





# TABLA DE CONTENIDOS

---

1 OBJETIVO Y ALCANCE	5
2 INTRODUCCIÓN	7
2.1 Historia de la propulsión eléctrica en turismos	8
2.2 Situación actual	9
2.3 Justificación	...10
3 ARQUITECTURA HÍBRIDA	11
4 HERRAMIENTAS DE TRABAJO	13
5 MODOS DE FUNCIONAMIENTO	...15
6 DIAGRAMA DE BLOQUES	.0 5 .17
7 MODELO DE SIMULINK	..19
7.1 Parametrización	.20
7.2 Simulación	..22
7.3 Descripción operadores y bloques comunes	23
8 OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIONES	..27
9 CONCLUSIONES	..31
10 LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO	..33
11 DEFINICIONES	35
12 BIBLIOGRAFÍA	37
ANEXOS	
A Descripción modelo híbrido	...39
B Curva de par motor con máxima eficiencia	.81
C Obtención tablas de eficiencia	..83
D Descripción modelo térmico	..87
E Distribución fuerza de frenado	..91
F Tabla de características de baterías	95



# 1 OBJETIVO Y ALCANCE

---

En este trabajo se pretende analizar el control, gestión y funcionamiento del sistema de propulsión de un vehículo híbrido térmico-eléctrico, así como la optimización energética y económica del mismo. Para ello, se ha construido un modelo con el programa Simulink de Matlab que nos permite cumplir varios objetivos.

El principal objetivo es analizar qué opciones de funcionamiento están disponibles en cada momento y cuál es su efecto en el rendimiento energético del vehículo. También se pretende observar cuál es el efecto en dicho rendimiento de la variación de distintos parámetros de construcción del vehículo, algunos comunes a todos los vehículos (masa del vehículo, coeficiente aerodinámico, etc) y otros exclusivos de los HEVs (potencia del motor eléctrico, peso de baterías, etc). Además, el modelo incluye la capacidad de distinguir entre conducción urbana e interurbana y adaptarse a cada una. Por último, se incluye un análisis económico que incluye el gasto de combustible y el coste asociado a la reposición de baterías, pudiendo compararse el coste total para distintas configuraciones del sistema híbrido y éstas con un vehículo equivalente sin mecánica híbrida.

Dado que este modelo compara la eficiencia de la mecánica híbrida al cambiar sus características o frente a una mecánica convencional no se han incluido las pérdidas de rendimiento asociadas a elementos comunes (o muy similares) como caja de cambios, diferencial, resistencias internas del motor, etc.

Al ser éste un estudio enfocado a buscar la máxima eficiencia del vehículo se asume que el modelo será simulado bajo condiciones de conducción regular, alejada de conducciones muy deportivas o en asfalto deslizante. Por ello, se asume que los neumáticos estarán alejados del límite de adherencia, tanto en frenada como al traccionar, que no se requerirá demasiados cambios de marcha, etc.

Se ha definido el vehículo modelado en este estudio como híbrido térmico-eléctrico, y se hace referencia a lo largo del trabajo al motor térmico, denominándolo así para distinguirlo del eléctrico, pero conviene aclarar que este estudio se ha llevado a cabo considerando que el motor térmico es un motor alternativo de combustión interna (MACI), tanto de explosión provocada (motor de gasolina) como de explosión por combustión (motor Diesel).



## 2 INTRODUCCIÓN

---

Hoy en día, en una sociedad que cada día manifiesta una mayor conciencia ecológica, el problema del calentamiento global está más presente que nunca. Diversas previsiones advierten del peligro de desaparición de especies, de aumento del nivel del mar por deshielo de los casquetes polares, de radiaciones ultravioletas deficientemente bloqueadas por una capa de ozono cada vez más dañada, etc.

El transporte es la principal fuente de consumo energético en España con un 25%, del cual un 80% se debe al transporte por carretera, y hasta un 98% de todo el transporte es propulsado por derivados del petróleo. Similares cifras se pueden encontrar en el resto de países desarrollados.

Los derivados del petróleo son en buena parte responsables de la escalada en emisión de dióxido de carbono en las últimas décadas<sup>1</sup>, como puede verse en la figura 2.1. El dióxido de carbono es consecuencia de la vida y necesario para ella, pero el exceso de éste contribuye al temido efecto invernadero. Está claro que para evitar unos niveles insostenibles de gases contaminantes hay que sustituir paulatinamente los motores de propulsión de vehículos de combustibles fósiles por motores eléctricos. A ello hay que sumar que el petróleo es un bien no renovable y cuyas reservas disminuyen a un ritmo que se acelera cada año. Las dificultades para estimar el aumento en consumo de derivados del petróleo, así como la presencia de fuentes aún sin descubrir del mismo, propician que cada estudio llevado a cabo dé datos muy distintos sobre cuánto tiempo podremos seguir contando con este combustible fósil. Como orientación, la previsión British Petroleum 2001<sup>2</sup> estima esta cifra en 40 años.

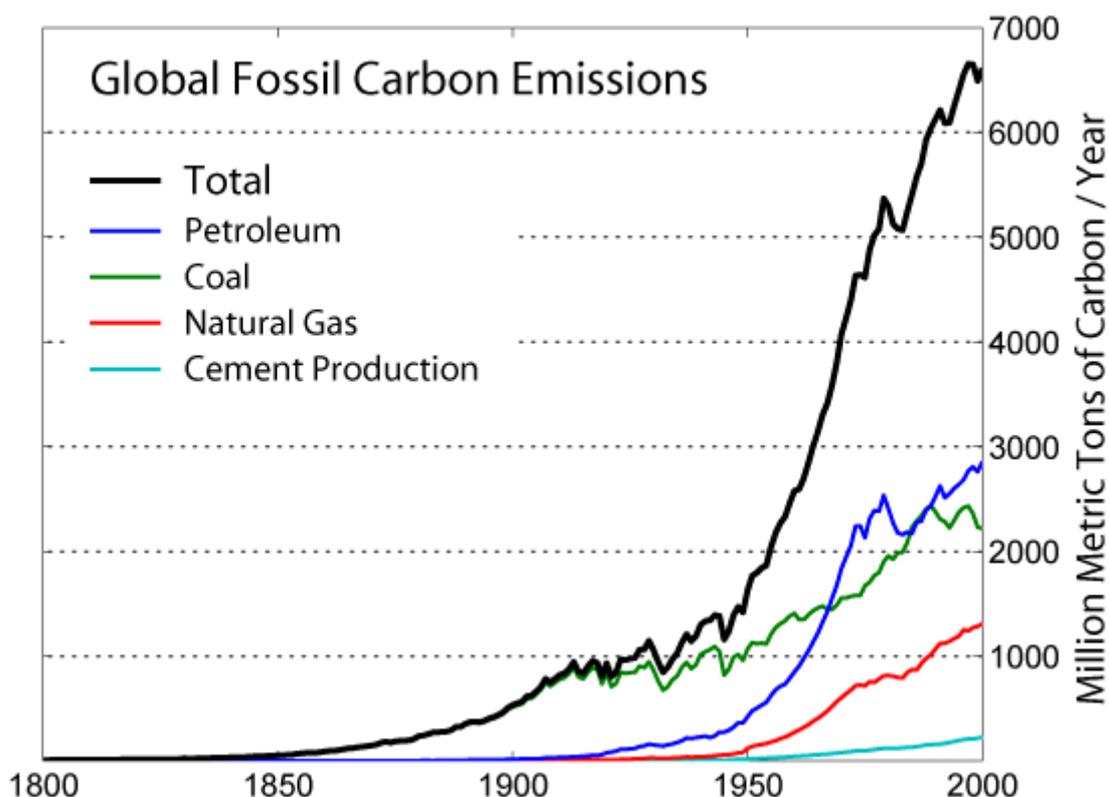


Figura 2.1 Evolución de las emisiones de carbono por combustibles fósiles en los últimos dos siglos.

## Historia de la propulsión eléctrica en turismos

El motor eléctrico se ha encontrado, a lo largo del pasado siglo, duras barreras que se han opuesto a su implementación, y la tecnológica no ha sido la que más dificultades le ha planteado. De hecho, el primer vehículo eléctrico fue construido por Gustave Trouvé en 1881 (7 años antes de que Kart Benz produjera el primer automóvil propulsado por gasolina), en 1899 aparecieron en Bélgica y Francia los primeros vehículos híbridos en paralelo y en 1901 Ferdinand Porsche diseñó el primer vehículo híbrido en serie.

El primer problema de los vehículos eléctricos e híbridos fue económico. Durante las primeras décadas del siglo XX se vivió en Estados Unidos una segunda fiebre del oro, y el llamado **oro negro** acabó con el desarrollo de los vehículos eléctricos gracias a su elevada densidad energética y su reducido precio. El segundo obstáculo fue político, y es que algunas de las entidades más influyentes del mundo se verían perjudicadas económicamente en caso de una reducción de la dependencia energética del petróleo.

Al final, la situación ecológica se volvió lo bastante insostenible para que en los años 90 se lanzara al mercado el primer coche híbrido moderno, el Toyota Prius. A lo largo de la siguiente década diversos fabricantes (principalmente en Japón) se sumaron a esta iniciativa, mientras otros (cabe destacar Renault) se decantaron por desarrollar vehículos puramente eléctricos.

En la gráfica de la figura 2.2 se pueden ver las previsiones de implantación de distintos tipos de vehículos ligeros (híbridos o no) encaminadas a cumplir con las expectativas de reducción de emisiones contaminantes del escenario Blue Map, planteado como objetivo por la IEA (internacional Energy Agency)<sup>3</sup>.

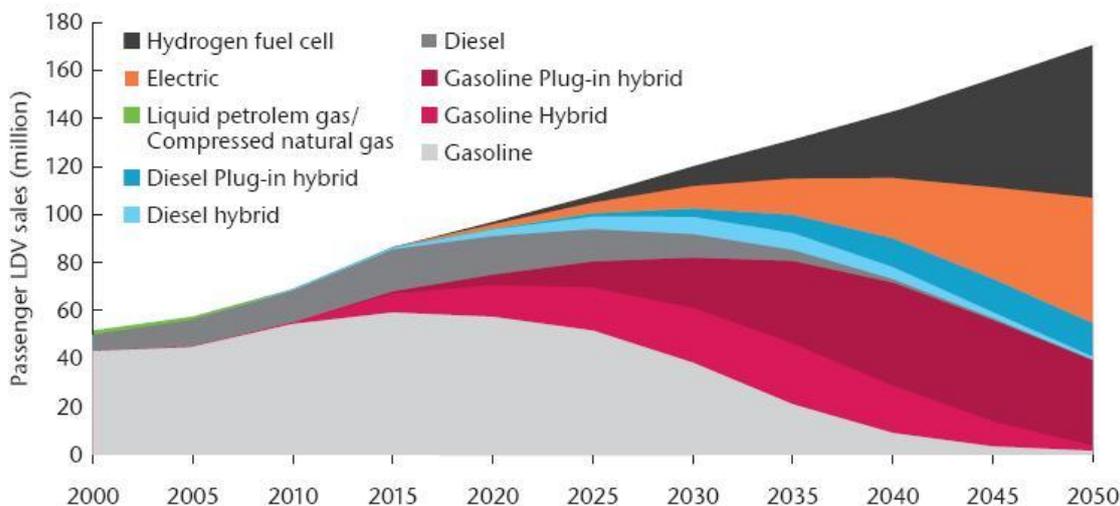


Figura 2.2 Previsión de ventas de vehículos ligeros para cumplir con las el escenario Blue Map.

## **Situación actual**

Actualmente, existen una gran cantidad de vehículos (en circulación o prototipos) que utilizan un motor eléctrico para impulsarse. Atendiendo a la fuente de energía del motor eléctrico podemos dividirlos en EV (Electric Vehicle - Vehículo Eléctrico), HEV (Hybrid Electric Vehicle - Vehículos Híbrido Eléctrico) y PHEV (Plug-In Hybrid Electric Vehicle - Vehículo Híbrido Eléctrico Conectable).

Los EVs constan únicamente de motor eléctrico (uno o varios) cuya única fuente de energía son sus baterías y la energía que pueda recuperar mediante un sistema de frenada regenerativa. Los HEVs utilizan tanto motor eléctrico como motor térmico, obtienen energía de éste último y de las frenadas. Los PHEVs constan de motor eléctrico y térmico, y reciben energía de las baterías, del motor térmico y de las frenadas.

Conviene aclarar que los HEVs también constan de baterías, pero éstas son recargadas por el motor térmico, mientras en los EVs y los PHEVs se deben conectar las baterías a la red eléctrica para ser recargadas.

El principal problema de los EVs es la energía que las baterías pueden almacenar, ya que con la tecnología de hoy en día un vehículo así propulsado no puede cubrir distancias medias-largas sin precisar de una recarga que puede durar horas. Otro problema lo comparten con los PHEVs, y es que la mayoría de redes eléctricas no tienen capacidad suficiente para suministrar suficiente energía de recarga en caso de una eventual masificación de estos vehículos.

A corto plazo, los HEVs se presentan como la mejor solución para reducir emisiones contaminantes (como puede comprobarse en la Figura 2.2) pues, a pesar de no ser tan limpios ni eficientes como los EVs o PHEVs, permiten una implantación sin apenas impacto en las infraestructuras energéticas ni en los hábitos de los conductores.

## Justificación

Resulta evidente que un vehículo con arquitectura PHEV o EV puede superar sensiblemente la eficiencia de un vehículo convencional, dado que éstos pueden ser recargados a través de la red eléctrica con energía eléctrica obtenida en centrales con mayor rendimiento que el motor térmico de un vehículo o, incluso, obtenida a partir de energías renovables. Sin embargo, un HEV obtiene la mayor parte de su energía del motor de combustión, así que en este punto se explicará cómo esta arquitectura puede mejorar significativamente el consumo de un vehículo.

Para ello, se muestra una gráfica de eficiencia de un MACI convencional en la figura 2.3. En ella se puede apreciar cómo el rendimiento del motor depende fuertemente del grado de carga. Además, el máximo rendimiento se obtiene en torno a la mitad de la potencia máxima. No obstante, en la conducción urbana, el motor térmico apenas se ve requerido a trabajar en condiciones de máxima eficiencia, como se puede ver en esta figura, donde se representan los puntos de trabajo del motor térmico al llevar a cabo el ciclo urbano FTP 75.

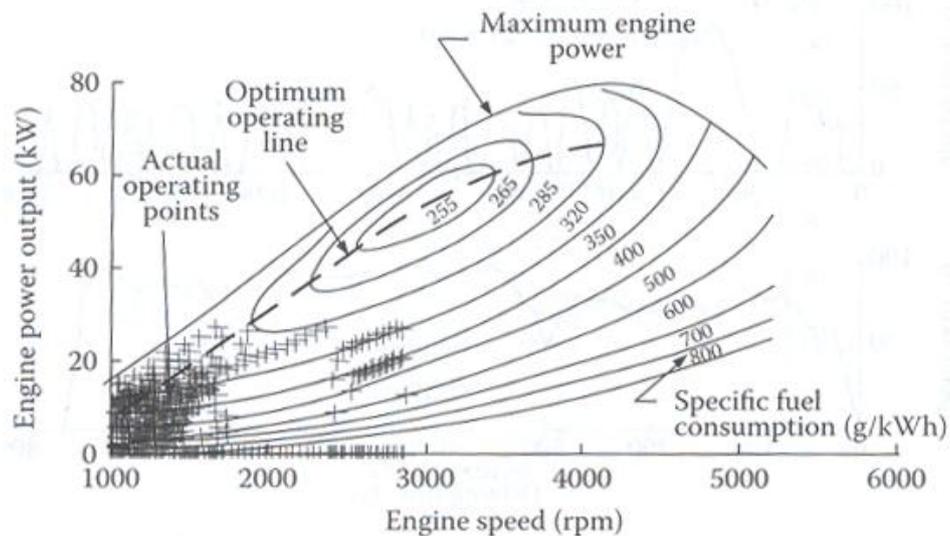


Figura 2.3. Puntos de trabajo del motor durante el ciclo urbano FTP 75<sup>4</sup>

En la figura se puede ver que el motor térmico opera durante la práctica totalidad del ciclo en una región de baja eficiencia, lo que se traduce en un consumo muy elevado de combustible. Esto es extensible al resto de vehículos con mecánica convencional, que reflejan un consumo mayor en conducción urbana que interurbana, a pesar de que la potencia media requerida es menor en la primera.

Como hemos visto el rendimiento de un motor térmico depende fuertemente de la potencia entregada, la cual está determinada unívocamente por la dinámica del vehículo. La adición de un motor eléctrico a la planta propulsora permite una mayor flexibilidad en la entrega de potencia del motor térmico. De esta forma, se puede hacer trabajar al motor en un punto de mayor potencia de la requerida para permitir un mayor rendimiento. Esta potencia sobrante se transforma en energía eléctrica para recargar las baterías, y a su vez en energía mecánica para impulsar el vehículo, con un rendimiento muy superior al del motor térmico. Además, existe la posibilidad de utilizar la energía en las frenadas (desechada en forma de calor en un vehículo convencional) para recargar las baterías, aumentando enormemente la eficiencia general.

### 3 ARQUITECTURA HÍBRIDA

---

Este vehículo dispone de un sistema híbrido en paralelo, con una configuración de dos ejes con acoplamiento de par que envía potencia a las ruedas delanteras. Además, el motor térmico envía potencia al acoplador a través de una caja de cambios que puede contar con 3, 4 o 5 marchas. En el acoplador de par, el índice de transmisión entre el eje de salida y el eje proveniente de la caja de cambios es 1, mientras entre el mismo eje de salida y el eje proveniente del motor eléctrico es, por defecto, 0.5 (el motor eléctrico gira a la mitad de velocidad que dicho eje de salida). En la figura 3.1 se muestra un esquema de la arquitectura híbrida del vehículo.

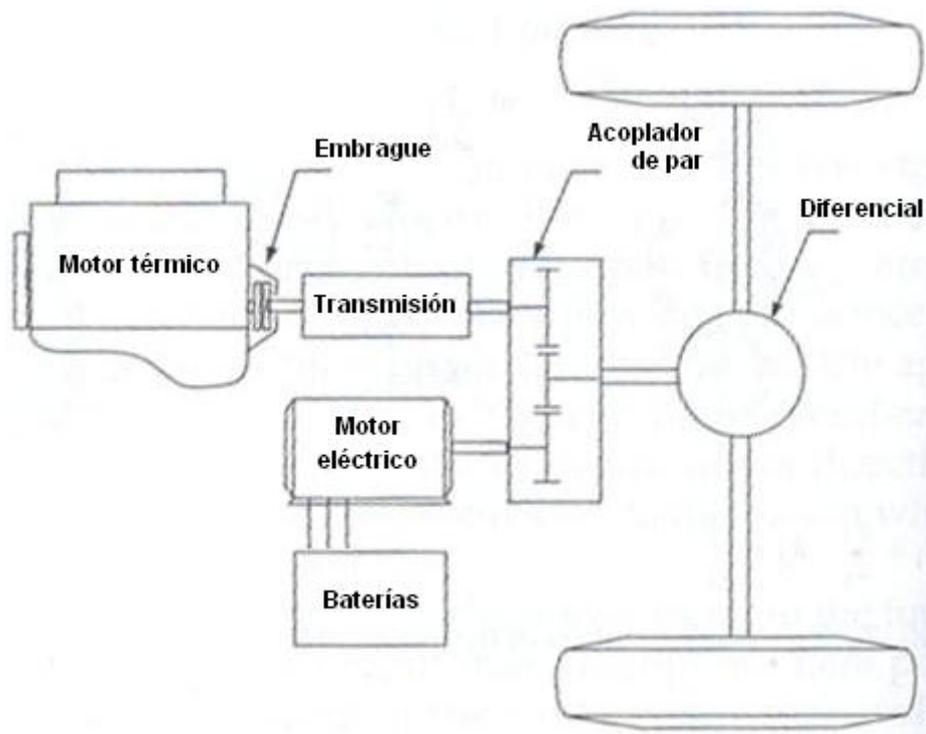


Figura 3.1. Esquema de la arquitectura de la planta de potencia híbrida.

Existen multitud de configuraciones posibles para una planta de potencia híbrida, pero todas ellas se pueden agrupar en tres tipos: serie, paralelo y serie-paralelo.

La configuración en serie debe su nombre a que toda la potencia entregada por el motor térmico pasa por el motor eléctrico. Para ello, el motor térmico está conectado a un generador eléctrico que transforma la energía mecánica de éste en energía eléctrica, que a su vez es utilizada para mover el motor eléctrico o para cargar las baterías. El motor eléctrico puede recibir energía tanto del generador como de las baterías, aunque también puede recargar éstas funcionando como generador en las frenadas.

En ocasiones a los vehículos de este tipo se les llama **híbridos eléctricos con autonomía extendida**, debido a que son propulsados únicamente por un motor eléctrico mientras que el motor térmico funciona como un depósito de energía.

La configuración en paralelo utiliza un motor térmico y uno eléctrico para propulsar el vehículo, así como para cargar las baterías (el térmico cuando la demanda de potencia es baja y el eléctrico en las frenadas). El acoplamiento entre ambos motores puede ser de par o de velocidad, mecánico o eléctrico.

Por último, la configuración serie-paralelo combina las dos anteriores mediante el uso de dos motores eléctricos. Uno de los motores transforma parte de la potencia del motor térmico en energía eléctrica, y el otro suma su potencia a la de éste para propulsar el vehículo y aprovecha las frenadas para recargar las baterías.

El sistema híbrido en serie tiene como ventajas su simplicidad y que, al estar el motor térmico desacoplado de la velocidad del vehículo, le permite operar en su punto óptimo de funcionamiento. No obstante, toda la potencia generada por el motor debe experimentar dos transformaciones energéticas (de mecánico a eléctrico en el generador y de eléctrico a mecánico a través del motor eléctrico), lo cual produce un descenso en el rendimiento. Además, requiere la presencia de un generador, con el aumento de peso y precio que conlleva. Por último, el motor eléctrico tiene que ser lo suficientemente potente para propulsar al vehículo por sí solo, lo que se traduce en otro incremento en peso y precio.

La configuración serie-paralelo permite también al motor térmico trabajar cerca de su punto óptimo de funcionamiento sin necesidad de que toda su energía tenga que ser transformada. Sin embargo, la presencia de dos motores eléctricos añade un elevado grado de complejidad. Además, diversas simulaciones no han mostrado un rendimiento superior al de una configuración paralela simple<sup>4</sup>.

Por todo ello, la configuración elegida ha sido la configuración en paralelo, que combina una elevada eficiencia con una relativa simplicidad de control y simulación. Además, dado que el motor térmico es muy sensible a los cambios de carga se ha utilizado un acoplamiento de par, que permite ajustar el par del motor para obtener la máxima eficiencia posible, y una caja de cambios entre el motor térmico y dicho acoplador, permitiendo ajustar el perfil de velocidad y par del motor a los requerimientos de la marcha.

## 4 HERRAMIENTAS DE TRABAJO

---

Para cumplir los objetivos anteriormente descritos se ha construido un modelo con el programa Simulink de Matlab. Este modelo simula el funcionamiento de la planta motriz de un vehículo híbrido paralelo, así como de los sistemas directamente relacionados con ella (caja de transmisión, consumo de combustible, etc). La disposición gráfica en forma de líneas de flujo de Simulink facilita establecer de forma intuitiva e inmediata relaciones aritméticas y lógicas entre parámetros, mientras que la posibilidad de utilizar bloques de subsistemas permite trabajar con cada uno de los sistemas del vehículo de forma separada y ordenada. Algunos bloques pueden ser utilizados repetidas veces en el modelo con mínimos cambios haciendo que el proceso de modelización sea mucho mas sencillo y rápido. Por último, se puede tener acceso detallado a cualquier parámetro del modelo gracias a los bloques %scope+ que monitorizan el valor de dicho parámetro en tiempo real.

En menor medida se han utilizado también los programas Autocad y Microsoft Excel, el primero para trazar el mallado con el que se han tabulado los mapas de eficiencia de los motores térmico y eléctrico, y el segundo para editar dichas tablas de eficiencia y crear las tablas %velocidad-tiempo+ y %aceleración-tiempo+ descriptivas del movimiento del vehículo.



## **5 MODOS DE FUNCIONAMIENTO**

---

La principal función de este modelo es controlar la distribución de potencia entre el motor térmico y el eléctrico, así como calcular el efecto que dicho control tiene en el punto de trabajo de ambos motores y en el nivel de carga de las baterías.

Dicho control se lleva a cabo a través de distintos modos de funcionamiento, dependientes de parámetros como la velocidad, aceleración o nivel de carga de las baterías. A continuación se describen los distintos modos en los que puede trabajar el sistema, además de aparecer indicado entre paréntesis el número que los identifica en las simulaciones.

### ***Eléctrico a baja velocidad (1)***

Este modo está activado cuando la velocidad del vehículo es inferior al mínimo que garantiza un rendimiento aceptable del motor térmico. En dichas condiciones, el motor térmico está apagado y sólo el motor eléctrico propulsa al vehículo. Dado que mientras este modo está activado la única fuente de energía son las baterías es necesaria una cierta carga inicial de ellas que puedan propulsar el vehículo hasta que el motor térmico entre en funcionamiento.

### ***Propulsión híbrida (2)***

Este modo entra en funcionamiento cuando el par motor requerido es superior al que puede entregar el motor térmico siguiendo la línea de máxima eficiencia. Para suplir esa falta de par el motor eléctrico suma su par al del motor térmico, utilizando la energía almacenada en las baterías.

### ***Recarga del PPS (3)***

Se activa cuando el par exigido al acoplador de par es inferior al que suministra el motor térmico siguiendo la curva de máxima eficiencia. En este modo, el par sobrante se envía al motor eléctrico, haciéndole trabajar como generador y recargando así las baterías. Cuando las baterías han llegado a la carga máxima, este modo se desactiva.

### ***Eléctrico puro (4)***

Entra en funcionamiento cuando las baterías se han cargado por completo, y se mantiene activo hasta que las baterías llegan a la carga mínima (salvo cuando el par exigido es superior al que puede dar el motor eléctrico y en caso de frenada regenerativa). Las baterías son la única fuente de energía y el motor eléctrico la única fuente de potencia en este modo, mientras que el motor térmico permanece apagado.

### ***Frenada regenerativa (5)***

Este modo está activo mientras el coche está frenando y la carga de las baterías es inferior a la máxima. Las ruedas delanteras hacen funcionar al motor eléctrico como generador, recargando las baterías y frenando al vehículo. En caso de que la potencia de frenada sea superior a la potencia que puede absorber el motor eléctrico como generador se aplica también un par de frenado mediante los discos de freno.

### ***Térmico puro (6)***

Existen situaciones en las que el vehículo requiere una potencia aproximadamente constante que, con una relación de transmisión adecuada, permitiría al motor térmico trabajar cerca de su punto óptimo en cuanto a eficiencia. Dichas situaciones podrían fácilmente encontrarse al circular a una velocidad media-alta en carretera.

En este caso, forzar al motor térmico a dar más potencia para transformar la parte sobrante en energía eléctrica (con las pérdidas en transmisión, conversión, almacenamiento y posterior uso que ello conlleva) supone una merma en la eficiencia, aparte de un desgaste innecesario de ciertos elementos de la planta propulsora.

Para ello se incluye este modo que evalúa si circulando con la marcha más alta el rendimiento del motor sería igual o superior al máximo que se podría obtener haciendo trabajar tanto al motor térmico como al eléctrico en su punto de máxima eficiencia, en cuyo caso el motor eléctrico se apaga y el vehículo se comporta como un vehículo convencional con motor térmico.

A efectos de cálculo se ha supuesto que en todas las situaciones en las que no se requiere potencia del motor térmico éste permanece apagado, lo cual es válido en la realidad para la mayoría de situaciones dados los modernos avances en materia de arranque rápido de MACIs (numerosos vehículos incorporan hoy en día tecnología start-stop para apagar el motor en detenciones de la marcha). El tiempo de duración del ciclo de carga-descarga de las baterías es mucho mayor que el tiempo que se invierte en apagar o encender el motor térmico, de ahí que mientras el vehículo avanza propulsado sólo por las baterías se pueda apagar por completo el motor térmico sin afectar a la marcha.

Sin embargo, en el modo de funcionamiento eléctrico a baja velocidad se puede dar el caso de que los ciclos de alternancia entre propulsión eléctrica pura e híbrida sean muy breves y no sea conveniente apagar el motor sino desacoplarlo del acoplador de par y mantenerlo al ralentí mientras no se requiera de su potencia.

No obstante, el consumo del motor en estas situaciones sería lo bastante bajo como para despreciarlo, de ahí que en las simulaciones se considere que el motor se apaga cada vez que no entrega par a la planta propulsora, sin que ello repercuta significativamente en los cálculos.

## 6 DIAGRAMA DE BLOQUES

---

El funcionamiento del modelo construido con el programa Simulink aparece descrito, en términos generales, mediante el diagrama de bloques mostrado en la figura 6.1.

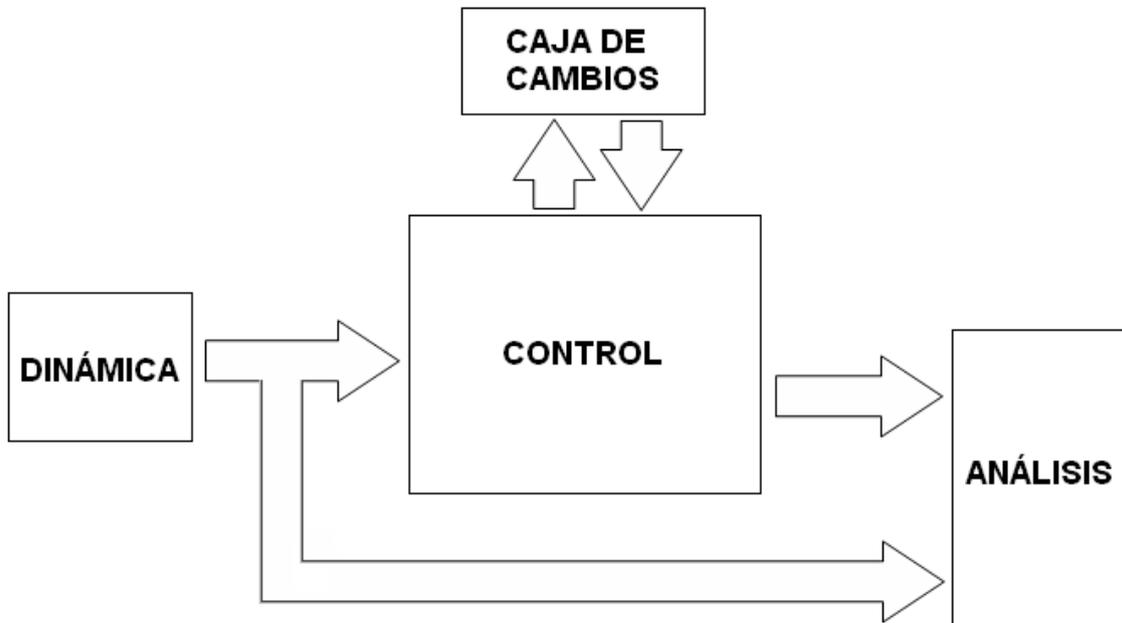


Figura 6.1. Diagrama de bloques del modelo de Simulink.

### Dinámica

Contiene la descripción, en términos de velocidad y aceleración, de la marcha del vehículo, y calcula la fuerza motriz y de frenado necesarias para satisfacerlos.

A partir de los datos de aceleración y velocidad del vehículo se calculan las resistencias aerodinámica y por rodadura que debe vencer el vehículo y la fuerza motriz necesaria para satisfacer las necesidades de marcha requeridas por el conductor.

Dado que el motor eléctrico se encuentra en el eje delantero éste sólo obtiene energía cinética de las frenadas de las ruedas delanteras. Para aprovechar al máximo esta energía y cumpliendo con la regulación ECE (ver Anexo E) se establece una ratio de frenado de las ruedas delanteras de 0.8 (lo que indica que el 80% de la fuerza de frenado es aplicado por las ruedas delanteras), que cumple con los requerimientos de frenado al circular por un firme con agarre favorable.

Otras funciones de los sistemas asociados a la dinámica son la distinción entre conducción en ciudad y en carretera y la capacidad de detectar cuándo el vehículo está manteniendo una velocidad aproximadamente constante.

## **Caja de cambios**

Controla el funcionamiento de la transmisión, evitando que el motor trabaje fuera de su rango de régimen de giro admitido y buscando la máxima eficiencia del mismo.

El sistema opera de forma que el régimen de giro del motor térmico no sea en ningún momento superior a 5000 rpm ni inferior a 1000 rpm. Además, calcula el rendimiento que se obtendría del motor térmico en una marcha inferior o superior y, si es posible, efectúa un cambio de marcha. Para evitar incomodidades en la conducción no se aplican cambios de marcha (salvo en caso de salirse de los límites de régimen de giro) si el vehículo está en plena aceleración, y después de cada cambio de marcha transcurren unos segundos hasta que se pueda volver a cambiar de marcha.

## **Control**

En este bloque se gestiona la selección de los modos de funcionamiento y simula la operación de los mismos. Para ello, controla, mediante los modos de funcionamiento, en qué punto de trabajo funcionan el motor térmico y eléctrico para cumplir con los requerimientos de potencia y para mantener el nivel de carga de las baterías dentro de los límites óptimos.

Estos límites se han tomado como el 50% y el 70% de la carga máxima de las baterías, pero para evitar que como consecuencia de una solicitud puntual elevada de potencia el nivel de carga caiga por debajo del 50% el sistema de control mantiene una cierta reserva de energía por encima de este nivel.

Este margen en el nivel mínimo de carga depende del escenario en el que se esté trabajando. Si el sistema detecta que se está circulando en ciudad reserva la energía necesaria para realizar una aceleración de 0 a 50 km/h. Si detecta que la conducción es propia de una vía interurbana, reserva la energía necesaria para afrontar una recuperación de 80 a 120 km/h.

## **Análisis**

Aporta información sobre el funcionamiento del sistema, dividido en tres aspectos: análisis de potencia, análisis de rendimiento y análisis económico.

Con el análisis de potencia se comprueba que no se le exija al motor eléctrico más potencia de la que puede suministrar ni que el nivel de carga de las baterías baje por debajo del mínimo. Además, se puede ver el margen de maniobra restante en caso de querer reducir la potencia máxima del motor eléctrico.

En el análisis de rendimiento se puede comprobar la eficiencia instantánea y acumulada de los motores térmico y eléctrico. Para cada uno de ellos se dan varios valores de rendimiento acumulado, correspondientes a cada modo de funcionamiento en el que pueden intervenir, lo que permite comprobar qué modos están funcionando de forma óptima y cuáles no.

El bloque análisis económico calcula el coste previsto del vehículo híbrido a los 200.000 kms derivado del consumo de combustible y reposición de baterías. Permite comparar la conveniencia de una configuración de parámetros del sistema híbrido frente a otra y también frente a un vehículo con mecánica convencional.

## 7 MODELO EN SIMULINK

Para simular el funcionamiento del sistema de propulsión híbrida de un vehículo se ha construido un modelo con el subprograma de MATLAB Simulink, mostrado en la figura 7.1. Dada la complejidad de este sistema, aparecen subsistemas incluidos en subsistemas superiores formando varios niveles de jerarquía. Por ejemplo, el subsistema que gestiona la caja de cambios contiene en su interior un subsistema que calcula la conveniencia de cambiar de marcha para aumentar la eficiencia del MACI y éste a su vez contiene un subsistema que calcula la eficiencia de éste.

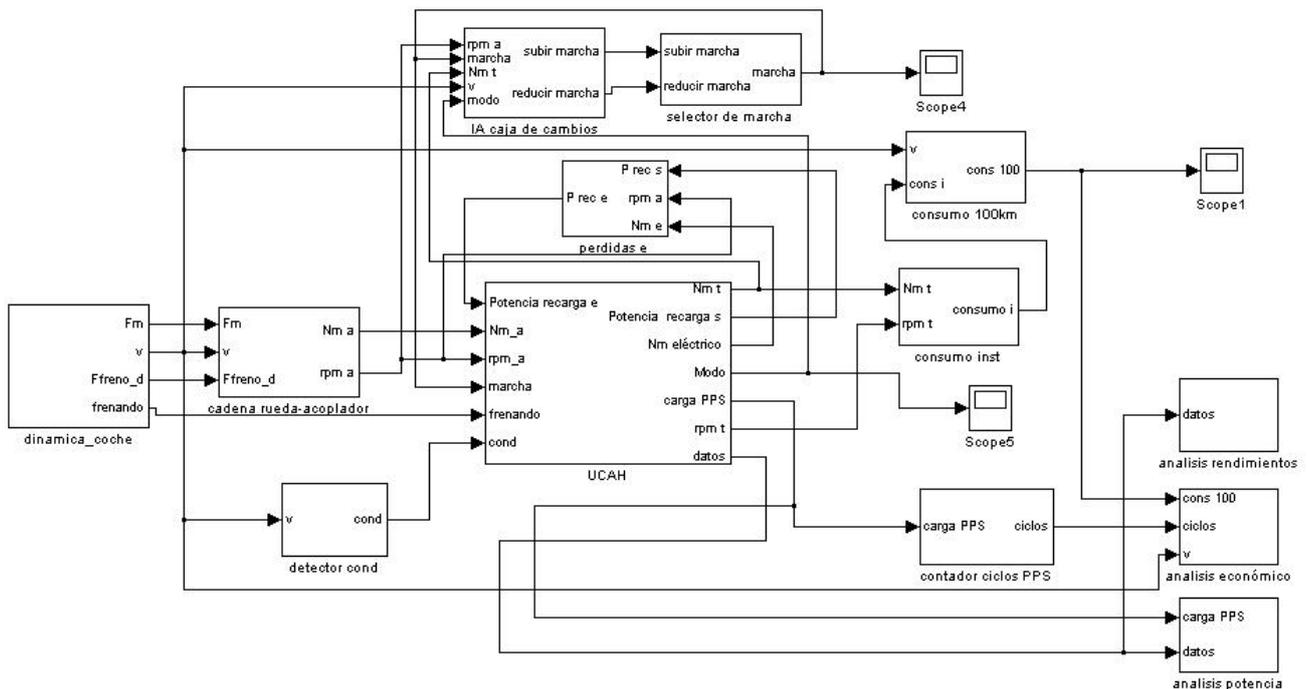


Figura 7.1. Modelo de vehículo híbrido de Simulink.

Este modelo está almacenado en el archivo de Simulink (extensión .mdl)  
 %modelo\_híbrido+

## Parametrización

Buena parte de los parámetros que describen el vehículo y su sistema de control han sido definidos como variables algebraicas que pueden ser introducidas en la ventana de comandos de MATLAB para ver el efecto que su valor tiene en el funcionamiento del sistema. De esta forma, el modelo funciona como un programa que permite simular diversas configuraciones de vehículo híbrido paralelo, variando parámetros constructivos (masa de baterías alojadas, coeficiente aerodinámico, etc), mecánicos (relaciones de la caja de cambios, índice de transmisión del acoplamiento del motor eléctrico, etc), operativos (eficiencia de las baterías, potencia de los motores) o de control (índice de carga máxima admitida para las baterías, tiempo de detección de velocidad constante, etc). En la tabla 7.1 aparece el conjunto de variables algebraicas configurables utilizadas en el modelo.

m	Masa del vehículo	m=1300	kg
coef_r	Coeficiente de rodadura	coef_r=0.015	-
cx	Coeficiente aerodinámico	cx=0.38	-
area	Área frontal del vehículo	area=1.67	m <sup>2</sup>
i1	Índice de transmisión en 1 <sup>a</sup>	i1=4	-
i2	Índice de transmisión en 2 <sup>a</sup>	i2=2	-
i3	Índice de transmisión en 3 <sup>a</sup>	i3=1	-
i4	Índice de transmisión en 4 <sup>a</sup>	i4=0.5	-
i5	Índice de transmisión en 5 <sup>a</sup>	i5=0.3	-
marchas	Número de marchas	marchas = 4	-
tvc	Tiempo de detección velocidad constante	tvc = 2	s
ivc	Intervalo de detección velocidad constante	ivc = 4	km/h
pmt	Potencia máxima del motor térmico	pmt = 124.5	CV
rend_b	Rendimiento de las baterías	rend_b = 0.85	-
rpm_mx	Régimen máximo antes de subir marcha	rpm_mx = 5000	rpm
rpm_mn	Régimen mínimo antes de reducir marcha	rpm_mn = 1000	rpm
cPPS	Carga máxima PPS	cPPS = 3.6e6	J
ie	Índice de transmisión del motor eléctrico	ie = 0.5	-
vmin	Velocidad mínima para el motor térmico	vmin = 20	km/h
pme	Potencia máxima del motor eléctrico	pme = 60.87	kW
rend_t_m	Máximo rendimiento del motor térmico	rend_t_m = 0.343	-
rend_e_m	Máximo rendimiento del motor eléctrico	rend_e_m = 0.90	-
en_esp	Energía específica de las baterías	en_esp = 40	Wh/kg
ciclos_v	Ciclos de vida de la batería	ciclos_v = 750	-
pr_b	Precio de baterías por unidad de energía	pr_b = 100	"/kWh
pr_c	Precio de combustible por litro	pr_c = 1.40	"

Tabla 7.1. Parámetros configurables del modelo híbrido.<sup>45</sup>

La primera columna hace referencia al nombre identificativo de la variable en el modelo. En la segunda se describe brevemente cada variable. La tercera columna contiene los valores numéricos de cada parámetro. Copiando esta columna en la ventana de comandos de MATLAB el sistema queda parametrizado. La última columna indica las unidades en que debe ser introducida cada variable.

Por defecto el sistema trabaja con una caja de cambios de 4 marchas, pero se puede simular el funcionamiento con 3 o 5 marchas. No obstante, se debe dar un valor a los

5 parámetros de índice de transmisión, aunque se utilicen menos de 5 marchas (las marchas no utilizadas pueden tener un índice cualquiera), ya que de otra forma el programa no hallará el valor de dichas variables en el modelo y dará un error al simular.

Respecto a la dimensionalización de los motores térmico y eléctrico, se considerará que todos ellos mantienen la misma proporción entre su curva de par y la potencia máxima introducida. Para reflejar mejor esta relación, la figura 7.2 muestra la curva de par motor de dos motores eléctricos, uno con una potencia máxima de 100 kW y el otro 50 kW.

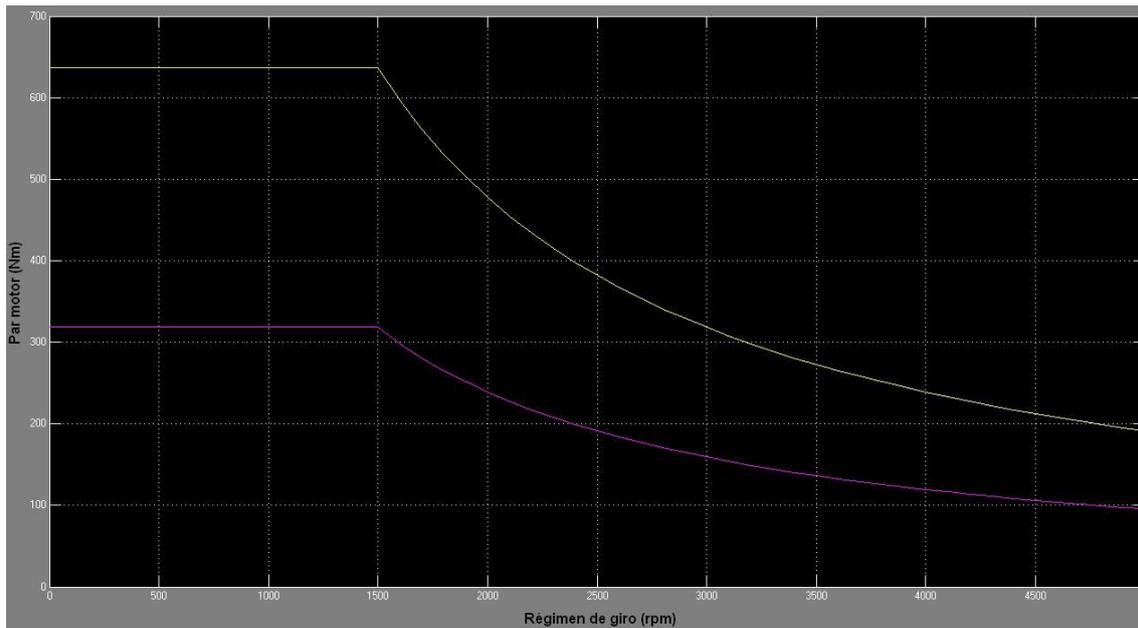


Figura 7.2. Curva de par de dos motores eléctricos de 100 kW y 50 kW

En algunos bloques (en general, relacionados con la potencia o eficiencia de los motores térmico y eléctrico) aparece como multiplicando el monomio  $\frac{P_{mt}}{124.5} + 0$  o  $\frac{P_{me}}{60.87} +$ . Esto es debido a que las funciones relativas al par motor o la potencia y las tablas de eficiencia han sido calculadas tomando como referencia los gráficos de par y eficiencia de sendos motores térmico y eléctrico de 124.5 CV y 60.87 kW, respectivamente. Con este término se ajusta el valor de los parámetros dependientes de la potencia del motor a la potencia del mismo en cada caso.

## **Simulación**

Una vez determinados los parámetros del vehículo se debe definir un ciclo de conducción, indicando en el bloque %Dinámica coche+ (ver Anexo A) la velocidad y aceleración del vehículo durante dicho ciclo. Para ciclos sencillos (aceleración o velocidad constante) se puede obtener la velocidad integrando el valor de aceleración, pero para ciclos complejos se recomienda calcular cada una por separado. Para la mayoría de simulaciones se ha utilizado una señal que simula el ciclo de conducción urbano FTP-75, cuyos valores de velocidad y aceleración (en km/h y km/hs) aparecen tabulados en la tabla Excel %ciclo ftp+, incluida en el CD adjunto al trabajo.

Con el fin de comprobar la mejora en el rendimiento de la mecánica híbrida frente a una convencional se incluye un modelo propulsado por esta última. Al compartir con el modelo híbrido la nomenclatura de las variables (obviamente aquellas presentes también en un vehículo con mecánica puramente térmica) se puede trabajar con ambos modelos al mismo tiempo.

Este modelo es reactivo respecto a los parámetros del ciclo de conducción introducidos en él. Esto quiere decir que el modelo puede simular ciclos que en la realidad no podría satisfacer. Para comprobar que el ciclo introducido en la simulación no rebasa las capacidades del vehículo parametrizado se incluye un subsistema de análisis de potencia (ver Anexo A, capítulo 14).

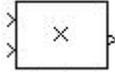
## Descripción de operadores y bloques básicos

### Suma



Da como resultado la suma (o resta) de sus entradas.

### Producto



Calcula el producto de dos entradas. Al no existir un bloque cociente las divisiones se calculan mediante el inverso de uno de los dos multiplicandos.

### Ganancia



Multiplica la entrada por un valor constante.

### Potencia



Eleva la entrada superior a la potencia de la entrada inferior. En este modelo se utiliza introduciendo en la entrada inferior una constante de -1 para hallar el inverso de una señal.

### Integrador



Calcula la integral de la señal de entrada.

### AND



Da un valor de 1 si todas sus entradas son distintas de 0.

### OR



Da un valor de 1 si al menos una de sus entradas es distinta de 0.

### NOT



Da un valor de 1 si la entrada es igual a 0 y un valor de 0 en caso contrario.

### Comparador



Establece una relación entre la entrada superior y la inferior (mayor, mayor o igual, igual, etc.), dando un 1 si ésta se cumple y un 0 en caso contrario.

### Saturación



Limita la salida de una señal dentro de un intervalo. Este bloque es utilizado a menudo en el modelo para evitar divisiones por 0.

### MinMax



Da el menor o el mayor de los las dos señales introducidas.

### Quantizer



Redondea la entrada al mayor número entero menor que ésta.

### Memoria



Da el último valor que ha tomado la entrada en el anterior paso de integración (0.2 s).

### Zero-hold



Cada periodo de tiempo ajustable toma el valor de la entrada y lo mantiene mientras dure este periodo.

### Transport Delay



Devuelve la señal introducida retrasada un tiempo configurable.

### Interruptor



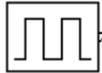
Conecta la entrada superior a la salida si la entrada intermedia es igual o superior a un valor prefijado (denominado `threshold`, y que por lo general en este modelo es igual a 1). En caso contrario, conecta la entrada inferior.

### Escalón



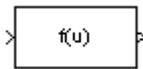
Da un valor constante inicial hasta que se alcanza el tiempo de inicio, momento en el cual da un valor constante final.

### Pulse Generator



Genera señales pulso de amplitud y frecuencia ajustables.

### Función



Aplica una función matemática descrita en la ventana de opciones del bloque a la señal de entrada.

### Tabla 2D



Da el elemento indicado tomando como índices las señales de entrada (la señal superior corresponde a la primera dimensión), siendo el valor 1 correspondiente al primer elemento (y así sucesivamente) e interpolando con índices no enteros.

### In



Recibe la señal conectada al puerto de entrada correspondiente del subsistema.

### Out



Envía la señal al puerto de salida correspondiente del subsistema.

### Goto



Envía una señal a un puerto `%From` con el mismo nombre.

### From



Recibe una señal de un puerto `%Goto` con el mismo nombre.

## Mux



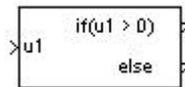
Une varias señales en un bus de datos.

## Demux



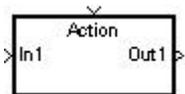
Divide un bus de datos en las señales que lo forman.

## If



Evalúa la condición (o condiciones) introducida en su ventana de comandos relativa a la señal (o señales) de entrada. En caso de cumplirse, activa un subsistema de acción.

## If Action Subsystem



Consiste en un subsistema que se activa cuando recibe la señal proveniente de su bloque **If** asociado. Cuando la señal se anula el subsistema mantiene la última salida calculada. Al volver a activarse puede mantener el valor anterior de sus estados o resetearlos (según se haya configurado el bloque).

## From workspace



Recibe datos introducidos en la ventana de comandos de MATLAB. En particular, en este trabajo se utiliza para representar en Simulink señales unidimensionales, introducidas en una tabla [tiempo valor] en la ventana de comandos de MATLAB.

## Scope



Monitoriza la señal conectada a él (o varias señales unidas en un bus de datos).

## 8 OPTIMIZACIÓN Y SIMULACIONES

Inicialmente, introducimos los valores numéricos expresados en la tabla 7.1 en la ventana de comandos de Matlab, quedando parametrizado el vehículo híbrido. A continuación, introducimos los valores de velocidad y aceleración del ciclo FTP 75 contenidos en la tabla Excel ftp 75 (cuyo perfil de velocidad aparece en la imagen 8.1) y establecemos como tiempo de simulación 1900 segundos. El vehículo almacena la energía en baterías de plomo/ácido (en el Anexo F se pueden ver las características de varios tipos de baterías).

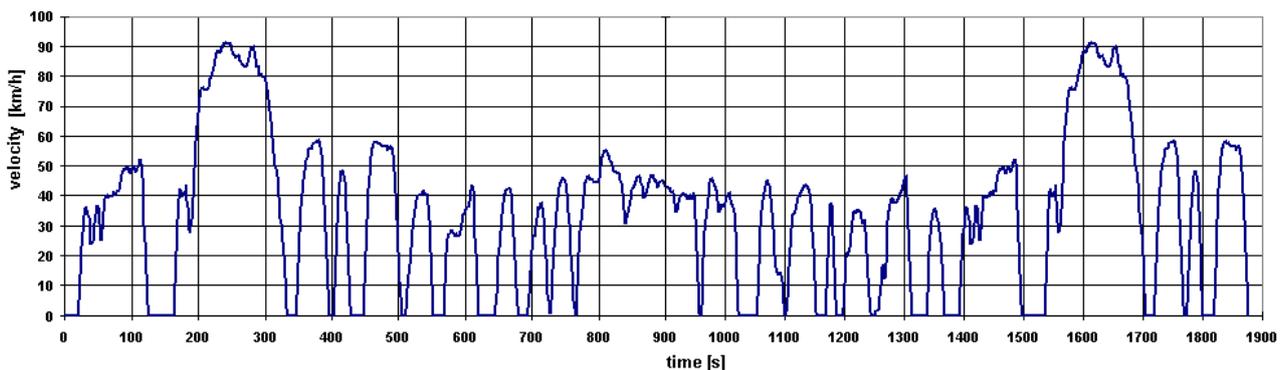


Figura 8.1. Perfil de velocidad del ciclo FTP 75.

La primera simulación da como resultado un consumo de 6.5 l/100 km. El rendimiento mecánico de la frenada nos da 0.86. Observamos que en ciertos momentos de la frenada las baterías se han llenado por completo antes de haber recibido toda la energía disponible en la frenada, así que aumentamos la carga de las baterías a 1.1 kWh (4e6 J).

Con este último valor de carga de las baterías el rendimiento de la mecánica aumenta hasta 0.88, pero es insuficiente para mejorar la eficiencia y el consumo se mantiene en 6.5 l/100 km, por lo que mantenemos el valor inicial de carga de las baterías (1 kWh). Analizamos los resultados del bloque `%Análisis de potencia+` para comprobar si se puede reducir la potencia de los motores y así obtener mejor rendimiento.

En los modos puramente eléctricos el motor térmico supera el 0.95 del índice de carga, así que no conviene reducir la potencia de éste. Sin embargo, el motor térmico no requiere en ningún momento de propulsión híbrida, por lo que se puede reducir su potencia. Establecemos el valor `pmt = 80 CV` y simulamos de nuevo.

El consumo se ha reducido a 5.66 l/100 km. Del bloque `%Análisis económico+` obtenemos un gasto total (por consumo de combustible y reposición de baterías), a los 200.000 km, de 24.300 €. El consumo de un vehículo con mecánica convencional equivalente (con una potencia de 100 CV para suplir la falta de motor eléctrico) es de 6.52 l/100 km y el gasto en combustible a los 200.000 km asciende a 18.250 €, es decir, 6050 € menos que el vehículo híbrido.

Por último, se comprueba el funcionamiento de un vehículo híbrido idéntico al de la última simulación pero equipado con baterías de Ión-Litio, de forma que volvemos a simular introduciendo los siguientes comandos en la tabla de MATLAB:

en\_esp = 110  
rend\_b = 0.97  
ciclos\_v = 1250  
pr\_b = 150

El resultado es un consumo a los 100 km de 4.97 l, con un gasto total a los 200.000 km de 22850 ", sensiblemente menor que en el caso de las baterías plomo/ácido pero aún superior al de un vehículo convencional. El peso de las baterías en este caso es de 9 kg.

A partir del bloque %Análisis de rendimientos+ comprobamos que el rendimiento mecánico de frenada es de 0.8, lo que unido a un rendimiento eléctrico durante la frenada inferior a 0.79 da un bajo valor de 0.63. El motor eléctrico muestra asimismo un rendimiento inferior a 0.79 en todos los modos en los que interviene. El motor térmico, por el contrario, se acerca más a su rendimiento máximo, alcanzando valores en torno a 0.32.

En la figura 8.2 se muestra la variación del índice de carga de las baterías, mientras en la figura 8.3 se puede observar el porcentaje de distribución temporal acumulada de cada modo de funcionamiento.

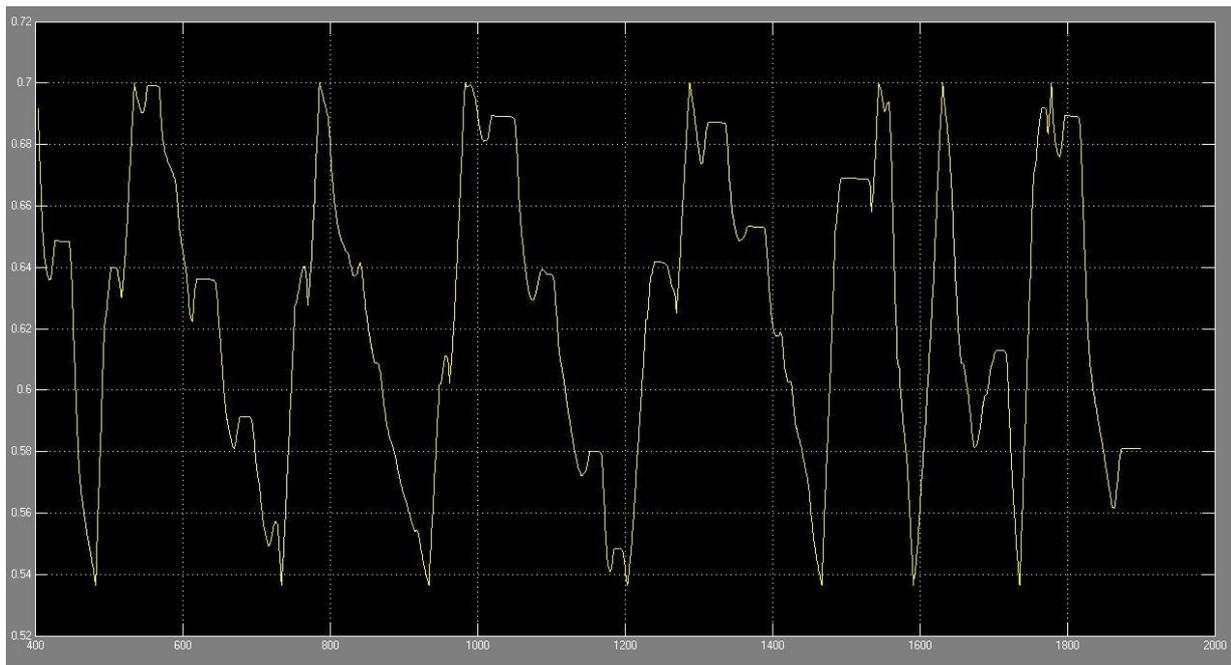


Figura 8.2. Índice de carga de las baterías respecto al tiempo.

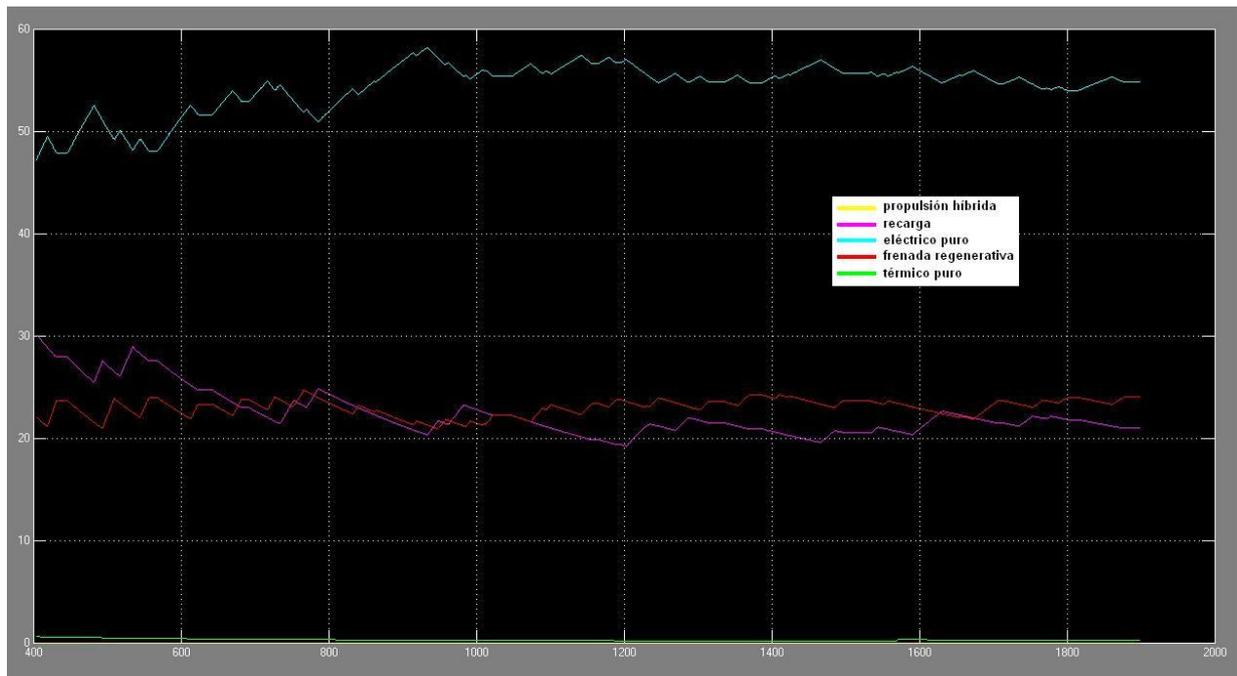


Figura 8.3 Porcentaje acumulado de la distribución temporal de los modos de funcionamiento.



## 9 CONCLUSIONES

---

De las simulaciones llevadas a cabo mediante el modelo de Simulink se desprenden varias conclusiones:

- Mediante unas estrategias de gestión de la potencia adecuadas, así como de una elección de parámetros de diseño del vehículo óptimos se ha conseguido construir un modelo de vehículo híbrido con una elevada eficiencia, que diferencia entre conducción urbana e interurbana, ajustándose a ambas, y que incluye numerosas variables de análisis permitiendo una eficaz localización de comportamientos inadecuados del vehículo.
- El uso de una mecánica híbrida permite reducir sensiblemente (más de un 25%) el consumo de combustible y las emisiones de dióxido de carbono. Además, se puede reducir la potencia del motor térmico sin que disminuyan las prestaciones del vehículo.
- El par añadido por el motor eléctrico elimina la necesidad de utilizar cajas de cambio con relaciones muy cortas, con la mejora de rendimiento que eso supone.
- A pesar del consumo reducido de combustible, el gasto por kilómetro recorrido es mayor en los vehículos híbridos debido al coste de instalación y reposición de baterías, a lo que hay que añadir el aumento de precio derivado de la adición del motor eléctrico. Por ello, son necesarias ayudas a la compra de este tipo de vehículos por parte de las administraciones para permitir un descenso en el precio de los mismos junto con una reducción en las emisiones contaminantes.
- A diferencia de los vehículos EV y PHEV, donde el factor crítico de funcionamiento es el peso de las baterías, en los HEVs toma vital importancia el precio, número de ciclos de vida y eficiencia de las mismas.
- El motor eléctrico, por sus características de entrega de potencia, no precisa en general de una transmisión de varias marchas en concepto de potencia máxima disponible. Sin embargo, el uso de una relación única de transmisión le obliga a trabajar en muchas situaciones fuera de su área de máximo rendimiento. Se debería valorar la utilización de una transmisión de dos marchas para la entrega de par del motor eléctrico.



## 10 LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO

---

El modelo utilizado de Simulink ofrece unas enormes posibilidades de ampliación y mejora. Una primera modificación sería incluir una transmisión de dos marchas acoplada al motor eléctrico, que le permitiera trabajar en un punto más cercano al de máximo rendimiento. En términos constructivos, se podría utilizar un único engranaje planetario para disponer de dos relaciones de transmisión, con un espacio requerido muy contenido.

La gestión de la recarga de energía de las baterías se basa en el máximo rendimiento obtenible en el motor térmico, pero esta condición implica en ocasiones que el motor, trabajando como generador, funcione en un punto de baja eficiencia. Se podría incluir una estrategia de control que buscara un punto óptimo de rendimiento de ambos motores.

Una línea de investigación podría valorar el uso de un motor Stirling (de mayor eficiencia que un MACI) como motor térmico . Las principales desventajas de este motor son la fuerte dependencia de su rendimiento respecto al régimen de giro y un largo tiempo de calentamiento hasta poder entrar en funcionamiento. El primer problema se puede resolver utilizando un acoplador de velocidad, que permitiría ajustar el régimen de giro del motor Stirling para una eficiencia óptima. La segunda desventaja se puede eliminar manteniendo una carga inicial en las baterías que permita al vehículo moverse en modo puramente eléctrico hasta que el motor térmico haya alcanzado su temperatura óptima de trabajo.



## 11 DEFINICIONES

---

MACI . correspondiente a las siglas Motor Alternativo de Combustión Interna, un tipo de motor térmico que engloba los dos tipos de motores comúnmente conocidos como motor de gasolina+y motor Diesel+

Motor térmico . máquina generadora de energía mecánica cuyo fluido de trabajo es compresible. A lo largo del trabajo se designa así al MACI empleado para distinguirlo del motor eléctrico.

PPS . acrónimo proveniente de la expresión inglesa *Peak Power Source* (Fuente de Potencia de Punta), designa varios tipos de fuentes de energía utilizadas por el motor eléctrico en vehículos híbridos para servir de apoyo al motor térmico, como pueden ser baterías, ultracapacitores, volantes de inercia, etc. En este estudio este término hace referencia a las baterías.

FTP 75 . proveniente del inglés *Federal Test Procedures 75*, consiste en una gráfica tiempo-velocidad que representa un ciclo de conducción que deben realizar los vehículos de carga ligeros en Estados Unidos desde el año 2000.

Acoplador de par . mecanismo que suma el par de 2 o más fuentes de potencia. El par entregado por cada fuente puede ser ajustado independientemente, pero el régimen de giro de los ejes de entrada, así como el del eje de salida, mantienen una relación fija.



## 12 BIBLIOGRAFÍA

---

- <sup>1</sup> "Marland, G., T.A. Boden, and R. J. Andres. 2007. Global, Regional, and National CO2 Emissions. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, United States Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A."
- <sup>2</sup> BP statistical review of world energy . oil+, 2001, disponible en [http://www.bp.com/downloads/837global\\_oil\\_section.pdf](http://www.bp.com/downloads/837global_oil_section.pdf).
- <sup>3</sup> Blue Map scenario, IEA (International Energy Agency).
- <sup>4</sup> Merhdad Ehsani, Yimin Gao and Ali Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles . Fundamentals, Theory and Design*, Segunda Edición, Taylor & Francis Group, Boca Ratón, 2010.
- <sup>5</sup> M. Maza Frechín, S. Baselga Ariño y J. Ortiz Sánchez-Lafuente, *Problemas de Diseño de Vehículos*, Kronos, Zaragoza, 2005.
- Arias-Paz, *Manual de Automóviles*, 56ª edición, CIE Inversiones Editoriales Dossat, Madrid, 2006.



## **A. DESCRIPCIÓN MODELO HÍBRIDO**

---

### **NOMENCLATURA DE SEÑALES**

Se incluye aquí una relación de las abreviaturas usadas para las señales más utilizadas en el modelo y las unidades en que están expresadas.

Nm t . par motor del motor térmico (Nm)  
rpm t . régimen de giro del motor térmico (rpm)  
Nm a . par motor del eje de salida del acoplador (Nm)  
rpm a . régimen de giro del eje de salida del acoplador (rpm)  
i . índice de transmisión de la marcha introducida  
ie . índice de transmisión del motor eléctrico en el acoplador de par  
v . velocidad lineal del vehículo (m/s)  
v cte . señal de detección de velocidad constante  
Fm . fuerza motriz aplicada sobre el vehículo (N)  
Ffreno\_d . fuerza aplicada por las ruedas delanteras para detener el vehículo (N)  
modo . modo de funcionamiento del sistema híbrido  
rend . rendimiento energético  
cons 100 . consumo promedio a los 100 km (l/100 km)

## **DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES**

En esta sección se hace una descripción de todos los bloques complejos (formados por varios bloques de la librería de Simulink) utilizados en el modelo híbrido, así como una figura mostrando su configuración interna. En el primer capítulo se describe una serie de bloques que son utilizados repetidas veces por distintos subsistemas, denominados «bloques comunes». Cada uno de los siguientes capítulos describe un bloque del nivel superior del modelo. Dentro de la mayoría de estos capítulos se incluyen subcapítulos describiendo los bloques incluidos en ellos y así sucesivamente, siguiendo la jerarquía de control de los bloques en el modelo.

# 1 BLOQUES COMUNES

## 1.1 Desmultiplicador

Funciona como un interruptor múltiple que, al introducir un número de marcha, devuelve su índice de transmisión (y el inverso de éste). Para evitar posibles problemas por división entre cero (si se introduce un número de marcha no entero el resultado del bloque suma es cero) el mínimo valor que entrega el bloque es igual al de la marcha más alta.

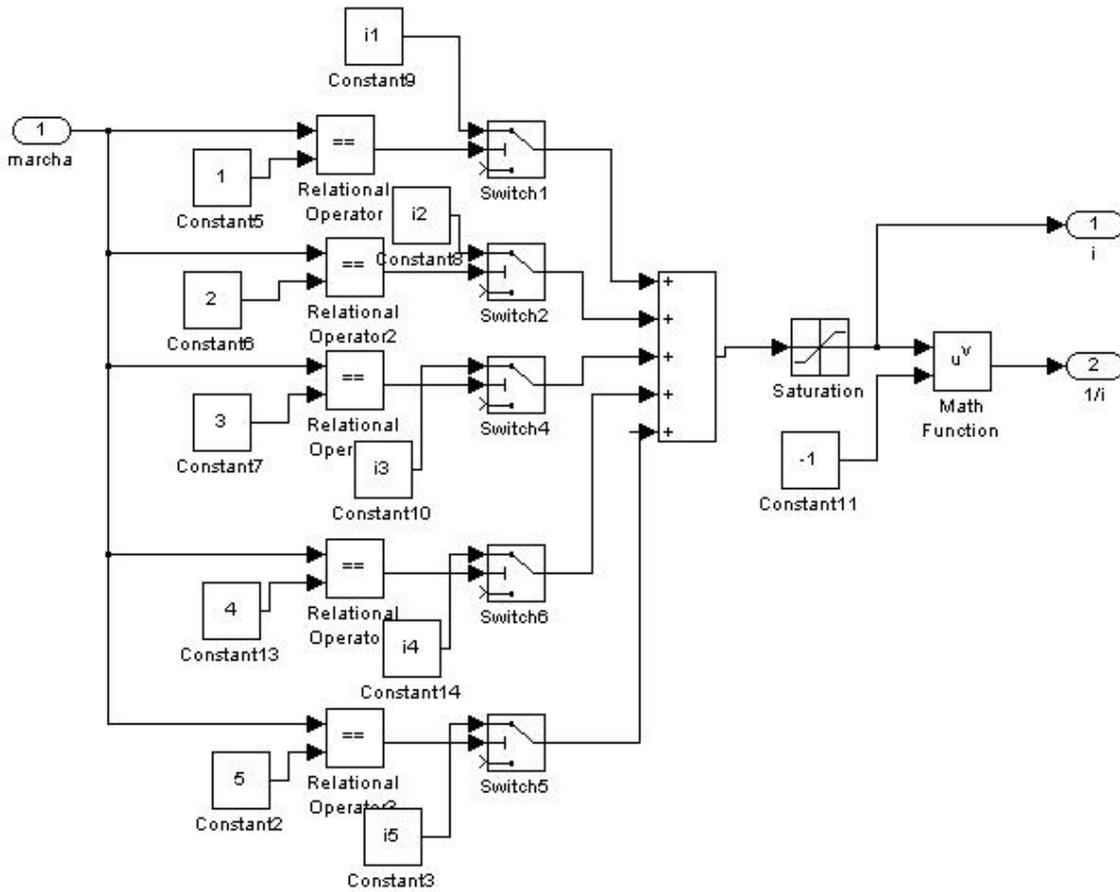


Figura A 1.1. Bloque Desmultiplicador

## 1.2 Motor eléctrico

Este bloque calcula el par máximo que el motor eléctrico puede entregar a un determinado régimen de giro. La curva de par máximo de un motor eléctrico tiene dos zonas, una de par constante y otra de potencia constante. En el caso del motor utilizado el punto de cambio entre estas dos regiones es el régimen de giro 1500 rpm. Mientras la señal  $\omega_{pm}$  es menor a 1500 rpm la señal  $\tau_{par}$  recibe un valor constante. Al superar la señal  $\omega_{pm}$  el citado valor la señal  $\tau_{par}$  se obtiene del cociente entre la potencia máxima y el régimen de giro (convertido a rad/s), siguiendo una hipérbola con potencia constante. Hay un segundo interruptor que evita una división por cero cuando el motor eléctrico está parado.

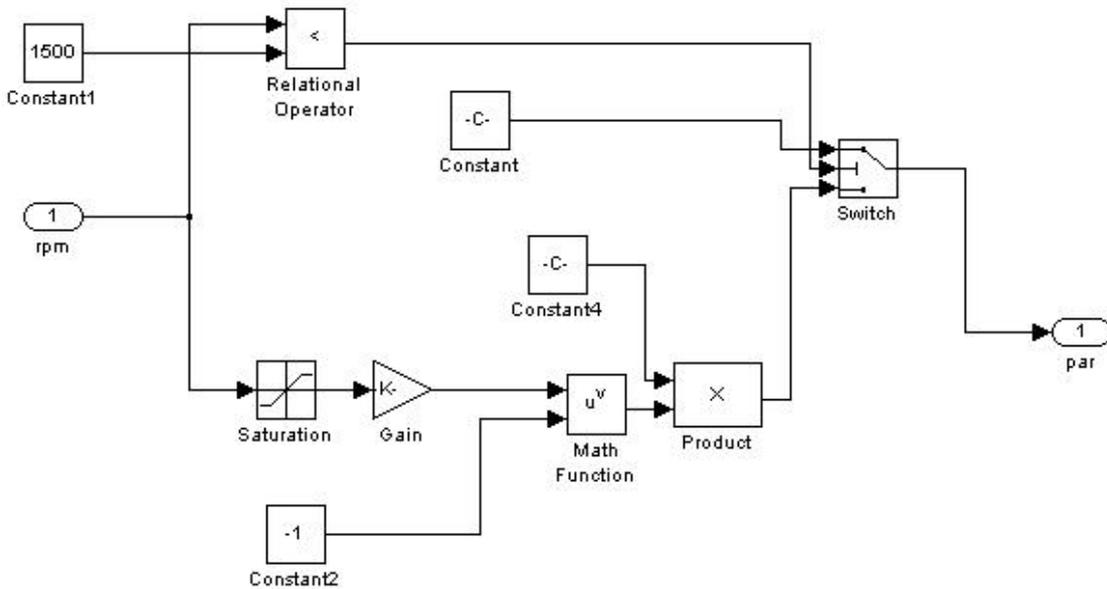


Figura A 1.2. Bloque  $\tau_{par}$  motor eléctrico

### 1.3 Rendimiento eléctrico

Este bloque recibe como entradas el par entregado y el régimen de giro del motor eléctrico y devuelve el rendimiento del mismo.

En el interior del bloque las dos entradas son introducidas en 6 bloques cuyas salidas son sumadas y entregadas como salida del bloque **%rendimiento eléctrico**. La explicación del cálculo del rendimiento aparece descrita en el anexo C.

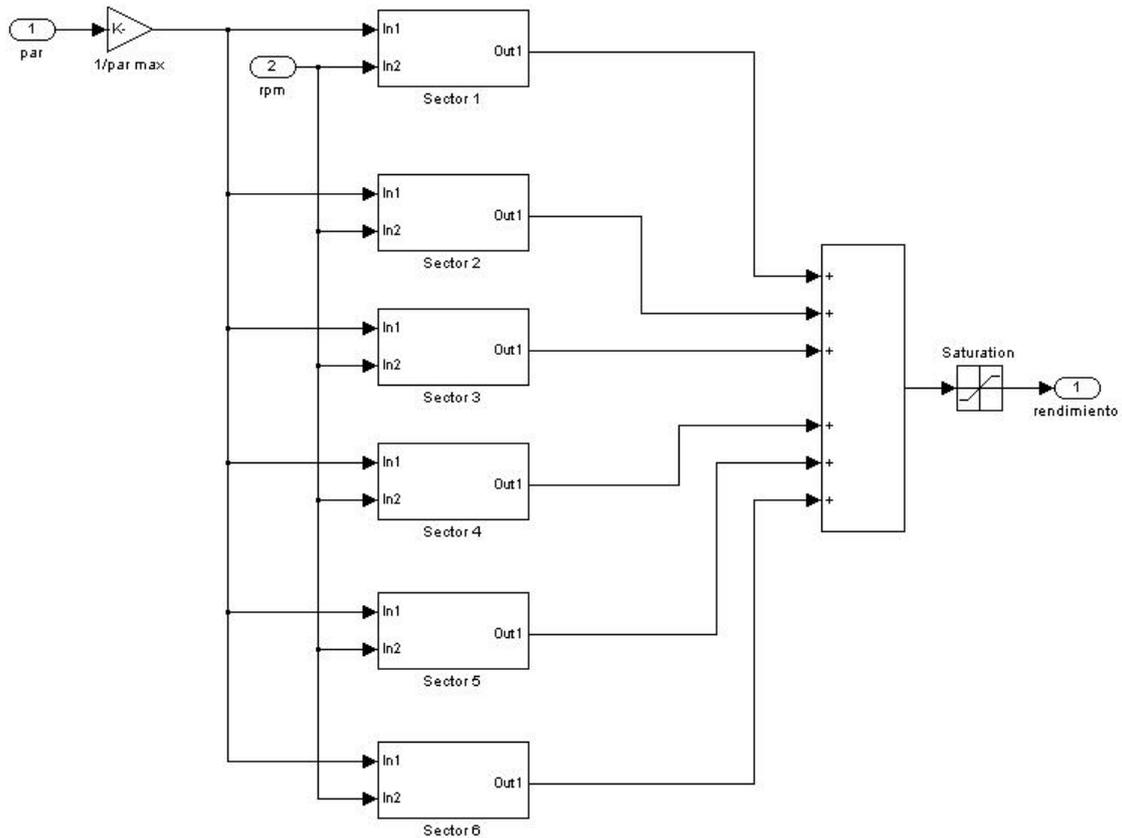


Figura A 1.3. Bloque **%rendimiento eléctrico**.

## 1.4 Rendimiento térmico

El funcionamiento de este bloque es esencialmente el mismo que el del bloque %rendimiento eléctrico+, y aparece descrito en asimismo en el Anexo C.

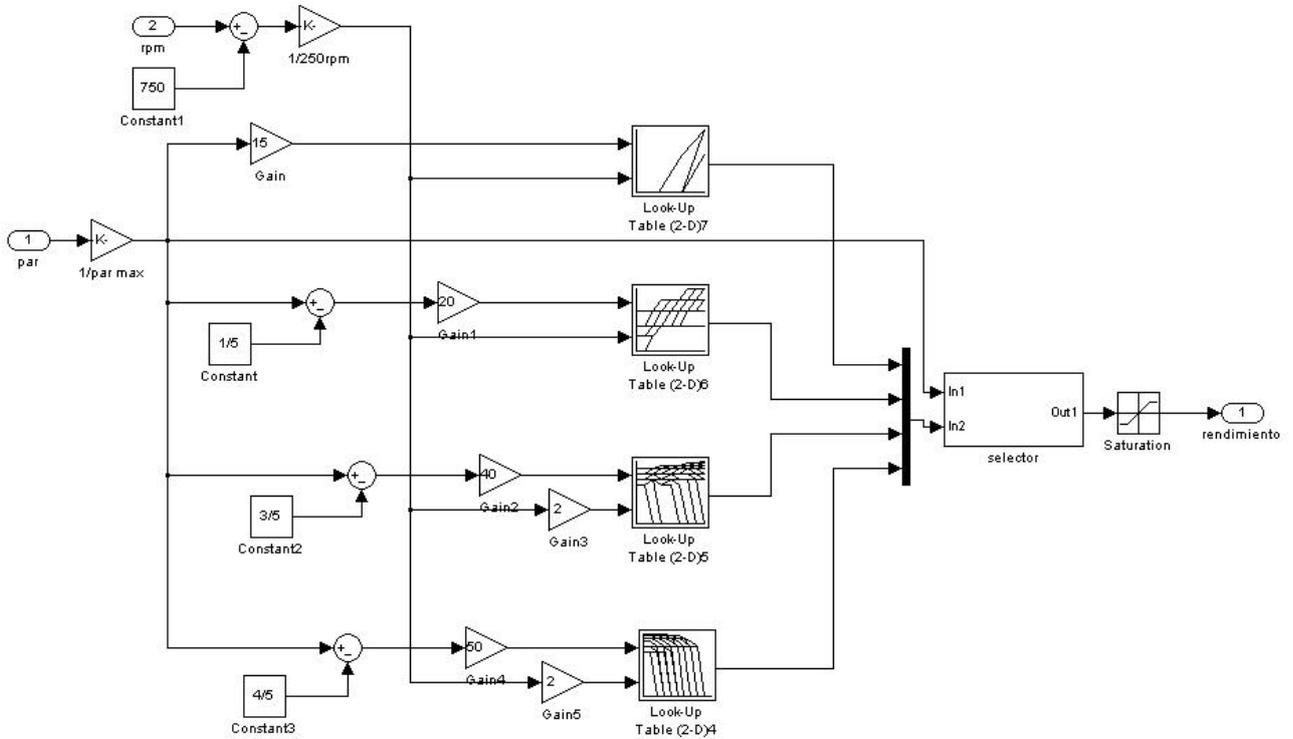


Figura A 1.4. Bloque %rendimiento térmico+

## 1.5 Velocidad constante

Este bloque detecta cuándo el vehículo ha mantenido una velocidad aproximadamente constante durante un determinado periodo de tiempo. Tiene como entrada la velocidad de éste y como salida la señal de detección de velocidad constante.

La señal de velocidad pasa por un bloque `%Zero-hold+` que mantiene su valor durante el tiempo indicado por la variable `%tvc+`. Este valor se divide en dos señales, a cada una de las cuales se le suma o resta, respectivamente, la mitad del parámetro `%tvc+`. Mientras la señal de velocidad se mantiene dentro de este intervalo se activa un bloque `%Action Subsystem+` que integra una constante de valor 1, actuando como contador. Si este contador llega al valor `%tvc+` se activa la señal `%vcte+`, y permanece activa mientras la señal de velocidad se halle dentro del intervalo indicado.

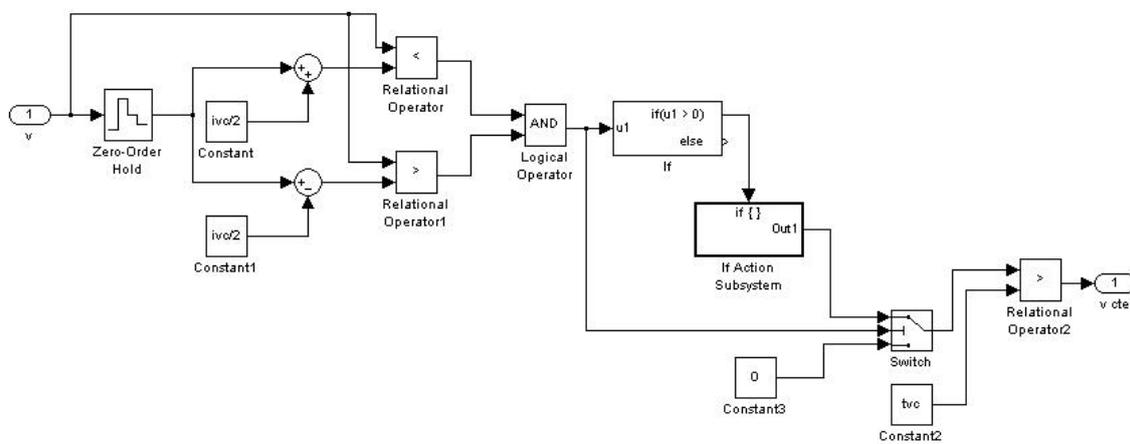


Figura A 1.5. Bloque `%velocidad constante+`.

## 2 DINÁMICA COCHE

Este bloque es el encargado de calcular la fuerza motriz necesaria para cumplir los requerimientos de la marcha del vehículo, así como de indicar cuándo se están utilizando los frenos del mismo.

En el interior del subsistema se localizan los bloques  $v_{urb}$  y  $a_{urb}$ , que proporcionan la velocidad y la aceleración, respectivamente, exigidos al vehículo al cumplir el ciclo de conducción FTP 75. Ambas señales han sido calculadas previamente y de forma externa al programa para reducir errores. Al estar calculadas en las unidades km/h y km/hs son multiplicadas por una ganancia de valor  $1/3.6$  para transformarlas en m/s y  $m/s^2$ .

La fuerza motriz se obtiene combinando la segunda ley de Newton con un equilibrio de fuerzas en la dirección de la marcha del vehículo (y transformando la aceleración en el sentido de la marcha en una fuerza virtual contraria a este sentido según el principio de D'Alembert). De esta forma, la fuerza motriz debe ser igual a la suma de la fuerza inercial del vehículo (obtenida multiplicando su masa por la aceleración que experimenta) y de las fuerzas por resistencia a la rodadura y aerodinámica.

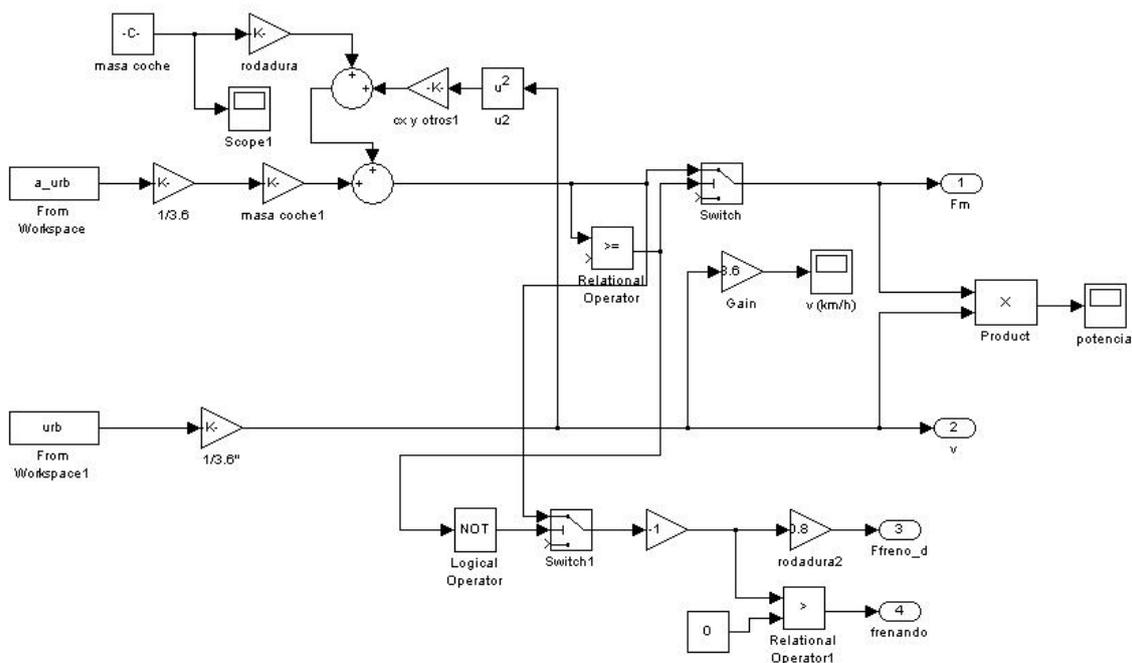


Figura A 2.1. Bloque Dinámica coche.

La masa del vehículo se obtiene como la suma de la masa del mismo en vacío y la masa de las baterías instaladas en el mismo. Esta última se calcula a partir del cociente entre la carga máxima de las baterías y la energía específica de las mismas (introducida en Wh/kg pero convertida por el bloque a J/kg).

Este bloque distingue entre fuerza motriz generada por el motor y fuerza motriz generada por los frenos. Si la deceleración que experimenta el coche es mayor que la que producen las fuerzas resistivas por rodadura y aerodinámica la fuerza motriz resultante se envía a la señal  $F_{freno\_d}$  (con valor positivo) mientras que señal  $F_m$  se

anula. Además, se activa una señal que indica que los frenos están actuando. Dado que el motor eléctrico se encuentra en el eje delantero sólo la fuerza de frenada delantera es utilizable para recuperar energía, de ahí que la señal  $F_{freno\_d}$  presente una ganancia de valor 0.8 antes de ella (para la explicación de obtención de este valor consultar Anexo E).

Al ser el objeto del estudio la eficiencia de la planta motriz híbrida del vehículo el análisis dinámico ha sido simplificado, no incluyéndose por ello la inercia provocada por los elementos internos del vehículo (peso de cilindros, momento de inercia de ruedas y caja de cambios, etc).

### 3 CADENA RUEDA-ACOPLADOR

Este bloque se encarga de transformar las variables lineales obtenidas en el bloque Dinamica\_coche en variables rotacionales. En particular, calcula el par motor (Nm a) y el régimen de giro (rpm a) de la salida del acoplador de par, donde el motor térmico y el motor eléctrico suman su par con una relación de transmisión fija. El engranaje de salida del acoplador de par va al diferencial y éste se encarga de enviar el par a las ruedas delanteras y éstas al suelo.

Este bloque no distingue entre fuerza motriz y fuerza de frenado. Conceptualmente la única diferencia es que en el caso del frenado el sentido de flujo de fuerza es el opuesto, es decir, son las ruedas las que envían potencia al motor eléctrico a través de diferencial y acoplador.

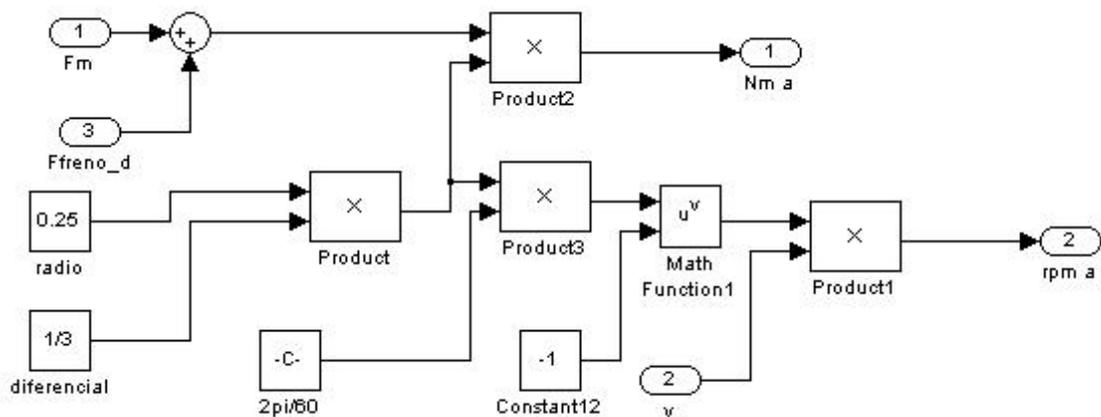


Figura A 3.1. Bloque "Cadena rueda-acoplador".

#### 4 SELECTOR DE MARCHA

Con este bloque se simula en qué marcha se está circulando. Tiene como entradas las señales booleanas %subir marcha+y %reducir marcha+y como salida la señal %marcha+, que indica qué marcha lleva engranada la caja de cambios.

Para subir o reducir marcha se utiliza un integrador que integra una constante de 10 o de -10 respectivamente. Mediante una función retraso de 2 segundos se compara el valor de la integral con el que tenía 2 segundos antes. Cuando esta señal es superior en 1 o inferior en 1 a la que tenía 2 segundos antes se anulan las señales de subir o reducir marcha mediante un bloque AND, con lo que el sistema deja de integrar durante, al menos, 2 segundos. Con ello se consigue que la salida aumente o disminuya con un valor entero. Un cuantizador a la salida del subsistema corrige alguna posible desviación del valor que pudiera haber y garantiza que la señal %marcha+sea siempre un número entero.

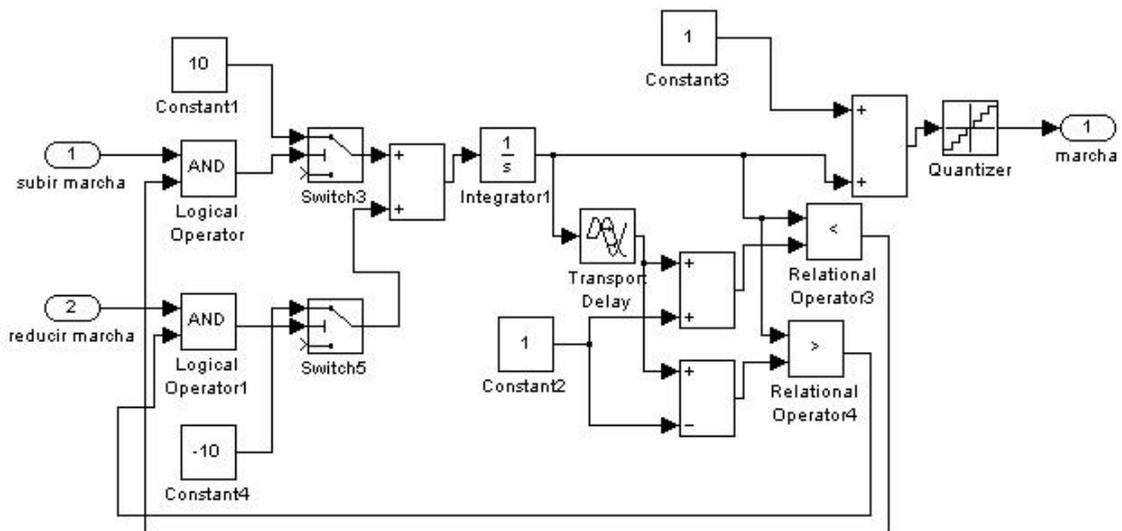


Figura A 4.1. Bloque %Selector de marcha+

## 5 IA CAJA DE CAMBIOS

Este bloque se encarga de gestionar el funcionamiento de la caja de cambios para que el motor no trabaje fuera de los regímenes de giro adecuados y con la máxima eficiencia posible. Tiene como entradas el régimen de giro del eje de salida del acoplador de par (que es igual al régimen de giro del eje de salida de la caja de cambios), la marcha engranada, el par motor exigido al motor térmico, la velocidad del vehículo y el modo de funcionamiento del sistema híbrido. Sus salidas son las señales que ordenan al bloque %selector de marcha+ subir o reducir de marcha.

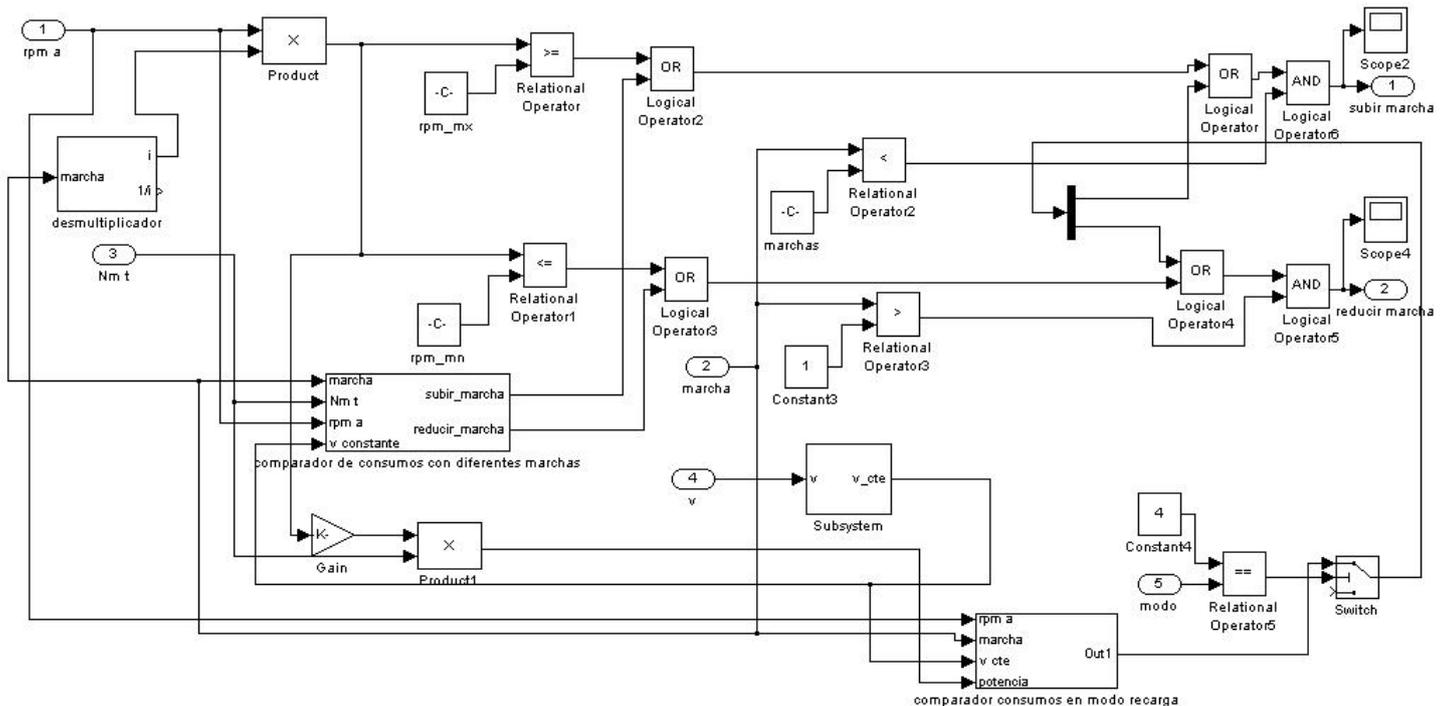


Figura A 5.1. Bloque %A caja de cambios+.

A las señales de salida llegan 3 pares de señales conectadas mediante bloques OR anidados, por lo que cualquiera de estos 3 pares puede activar las señales de subir o reducir marcha. Uno de los pares activa la señal de subir o reducir marcha si el régimen de giro del motor es mayor que el valor %rpm\_mx+ o menor que el valor %rpm\_mn+ respectivamente. El régimen de giro del motor térmico se obtiene multiplicando el régimen de giro a la salida del actuador (%rpm a+) por el valor obtenido del bloque %desmultiplicador+. Los otros dos pares de señales provienen de los bloques %comparador de consumos con diferentes marchas+ y %comparador de consumos en modo recarga+. La salida de los dos últimos bloques OR anidados está unida mediante un bloque AND a una señal que está activada si la marcha engranada es inferior al número de marchas (en el caso del bloque OR que activa la señal %subir marcha+) o si es superior a 1 (en el caso del bloque OR que activa la señal %reducir marcha+). De esta forma, el sistema no intenta subir marcha cuando se circula en la más alta ni reducir cuando se circula en la primera.

## 5.1 Comparador de consumos con diferentes marchas

La función de este bloque es comparar el rendimiento del motor térmico con la marcha actual y la que obtendría con una marcha inmediatamente superior e inmediatamente inferior entregando el mismo par al acoplador. En caso de que con una de las dos marchas más próximas pudiera obtener mejor rendimiento envía una señal para subir o reducir marcha, a condición de que otras 2 señales estén también activadas, gracias a dos bloques AND situados justo delante de las señales de salida del subsistema. Una de ellas es que el régimen de giro al subir de marcha o reducir marcha no sea inferior al mínimo ni superior al máximo permitido. La otra es la señal de entrada al subsistema  $\%v$  constante+, y se activa cuando el vehículo lleva un determinado tiempo circulando a una velocidad contenida en un determinado intervalo. El objetivo de esto es evitar que el sistema intente cambiar repetidas veces de marcha mientras se está acelerando o decelerando, lo que entorpecería la conducción.

El rendimiento del motor es función del par entregado y del régimen de giro, pero los valores de par y régimen de giro que aparecen como entradas al subsistema no se refieren al mismo punto en la cadena cinemática. La entrada  $\%rpm$  a+ se refiere al régimen de giro a la salida del acoplador, por lo que para obtener el régimen de giro a la salida del motor debemos multiplicar este valor por el índice de transmisión (para calcular el rendimiento en las marchas superior e inferior sumamos y restamos, respectivamente, una unidad a la marcha engranada antes de introducir su valor en el bloque  $\%desmultiplicador$ +).

La entrada  $\%Nm$  t+, por otro lado, se refiere al par motor entregado por el motor. Para transformar el par motor a la salida del acoplador de par en par motor a la salida del motor debemos multiplicarlo por la inversa del índice de transmisión. Recíprocamente, al multiplicar el valor de par entregado por el motor por el índice de transmisión obtenemos el par aplicado en el acoplador, y así obtenemos el valor  $\%Nm$  a+ que aparece indicado y que, multiplicado esta vez por la inversa del índice de transmisión de las marchas superior e inferior nos proporciona el par exigido al motor en una marcha superior e inferior.

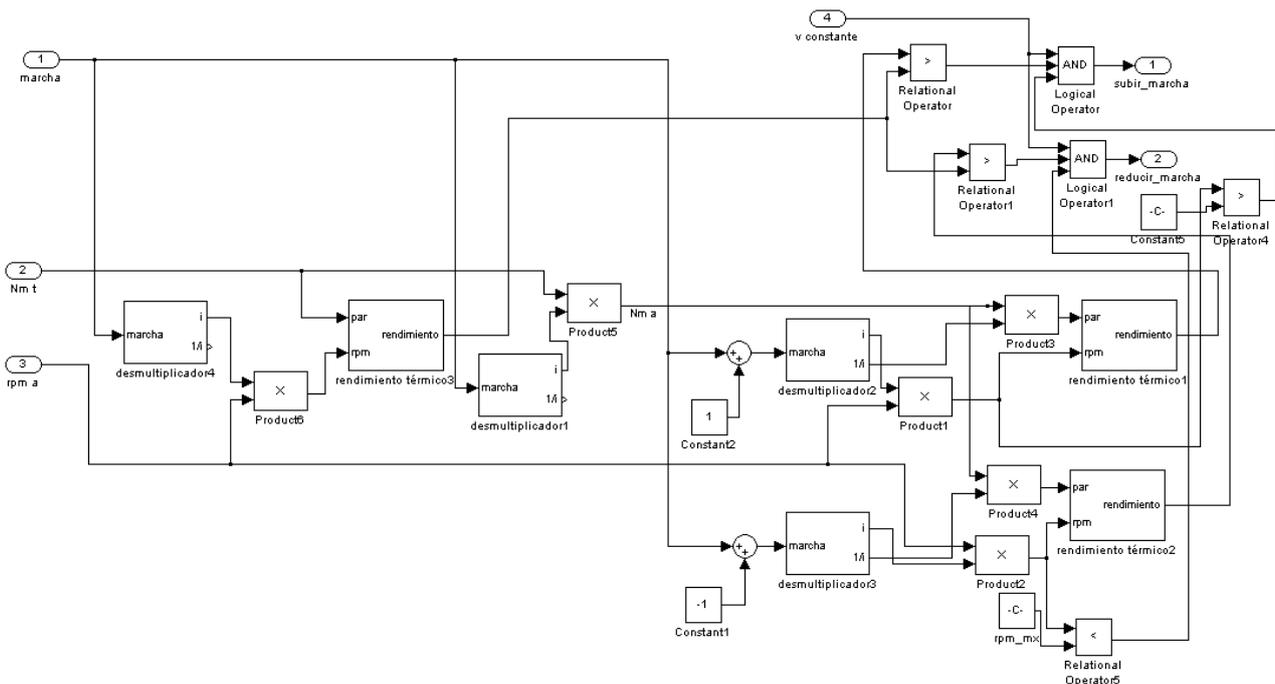


Figura A 5.2 Bloque  $\%Comparador$  de consumos con diferentes marchas+

## 5.2 Comparación de consumos en modo recarga

A diferencia de los otros modos de circulación, en el modo recarga el par motor entregado por el motor térmico no es un valor fijo externo al sistema híbrido dependiente de la aceleración, la velocidad o la marcha engranada, sino que puede ser ajustado independientemente (siempre y cuando la potencia entregada sea superior a la demandada por la dinámica del vehículo) para seguir la línea de máxima eficiencia del motor.

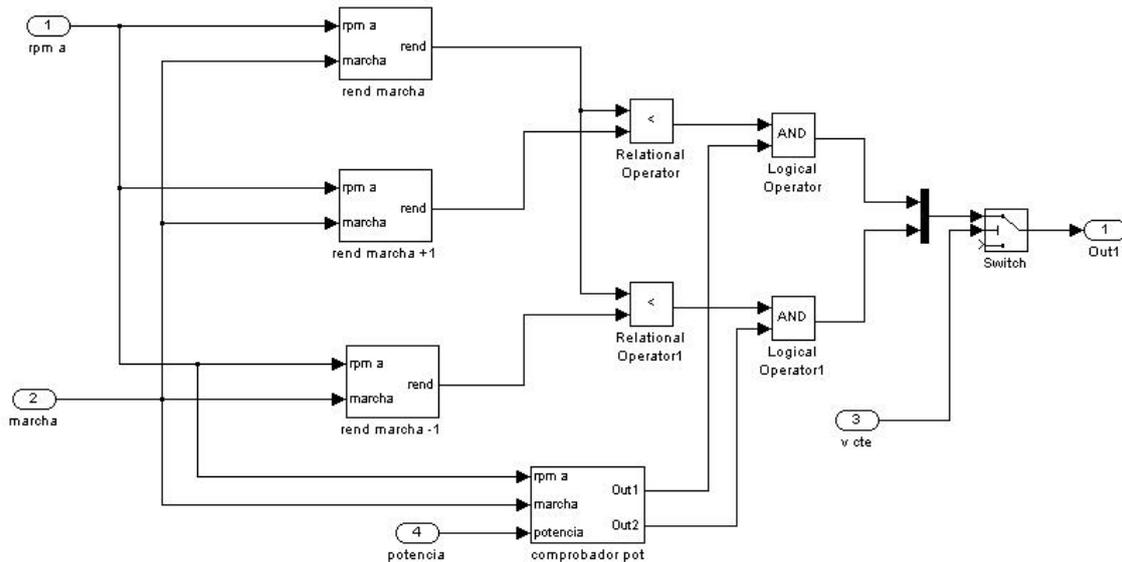


Figura A 5.3. Bloque %Comparador de consumos en modo recarga+.

Al igual que el bloque %comparador de consumos con diferentes marchas+este bloque tiene como entradas el régimen de giro en el acoplador, la marcha engranada y la señal de velocidad constante, pero en vez de la señal par motor del motor térmico tiene la señal %potencia+, que indica la potencia que se le está exigiendo a la planta de potencia híbrida. Las salidas son las mismas que en el bloque anterior, pero conectadas a un interruptor que garantiza que sólo puedan pasar si efectivamente el modo del sistema híbrido es el de recarga.

En el interior del subsistema aparecen 3 bloques (%rend marcha+, %rend marcha +1+, %rend marcha -1+) que calculan el rendimiento del motor en la marcha engranada, en una marcha superior y en una marcha inferior. En cada uno de estos bloques se calcula el par que entregaría el motor en las mencionadas marchas seleccionando el mínimo entre dos valores: el par que entrega a determinado régimen de giro siguiendo la línea de máxima eficiencia (mediante el bloque %par rend max+), y el máximo par que el motor eléctrico puede soportar (mediante el bloque %motor eléctrico+).

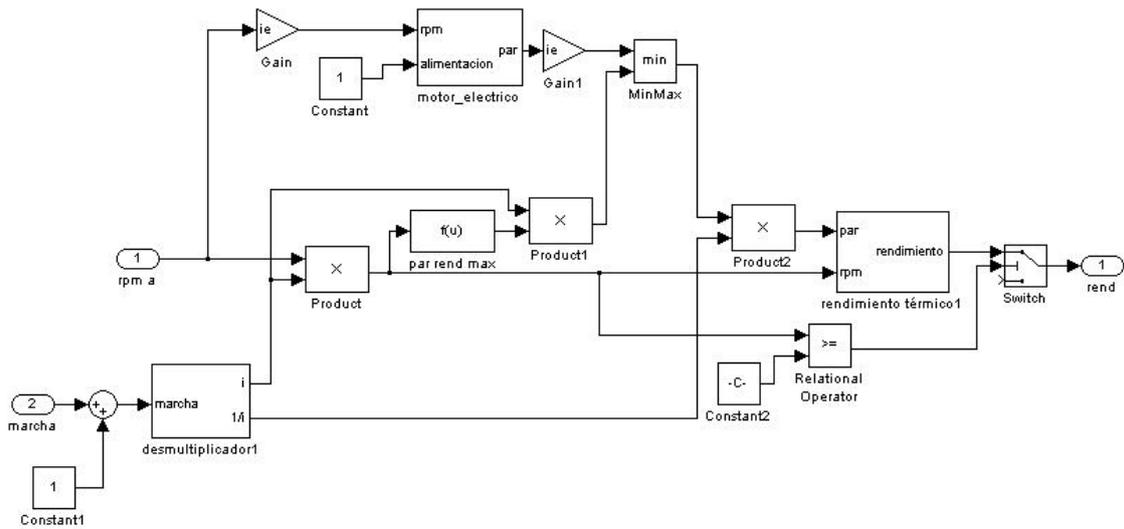


Figura A 5.4 Bloque %rend marcha + 1+

El cuarto bloque (%comprobador pot+) comprueba si tanto en una marcha superior como en una inferior el motor térmico podría seguir entregando la potencia demandada. Para ello, utiliza la función %pot rend max+, que es igual a la función %par rend max+ pero multiplicada por la velocidad angular para obtener el valor de la potencia.

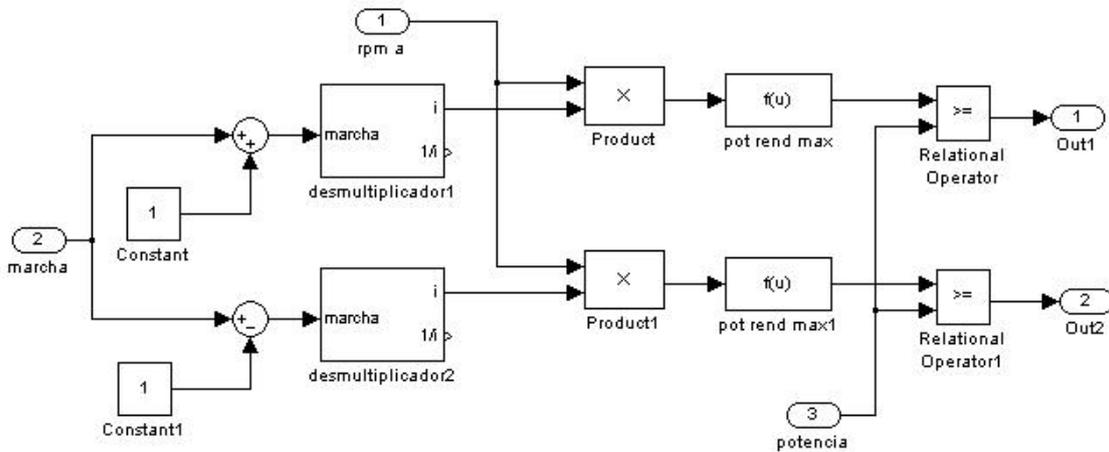


Figura A 5.5 Bloque %comprobador pot+

Si en una marcha superior o inferior el rendimiento es superior al de la marcha actual, la potencia que entrega el motor con dichas marchas engranadas es igual o mayor al demandado, y la señal de velocidad constante está activada, se envía la señal de subir o reducir marcha.



El funcionamiento del conjunto es, pues, el siguiente: el sistema comienza en modo urbano, y se mantiene así mientras no se superen los 70 km/h. En caso de superarlos, se pasa al modo interurbano, y permanece en dicho modo hasta que el vehículo circula durante 60 segundos a una velocidad inferior a 50 km/h, lo cual descarta posibles deceleraciones producidas en rotondas o travesías cortas por municipios.



carga de las baterías) y las envía a un subsistema de análisis de rendimientos y potencias.

En este nivel sólo se calcula el nivel de carga de las baterías, sumando a la carga inicial (establecida por defecto en un 60% de la carga total de las baterías) la integral de la potencia efectiva de recarga. El bloque `ang-lin` se encarga de transformar el valor de velocidad angular (expresado en revoluciones por minuto) del eje de salida del acoplador en velocidad lineal del coche. La constante `vmin` es un parámetro ajustable que da el valor de velocidad mínima (introducida en km/h y transformada a m/s) para que el motor térmico pueda entrar en funcionamiento.

El control de los modos de funcionamiento se lleva a cabo mediante los bloques `on-off`, `solo térmico` y `frenada regenerativa`.

El bloque `on-off` hace referencia a la estrategia de control denominada `engine on-off (thermostat)`. `motor encendido-apagado (termostato)`. que es la utilizada en este modelo<sup>4</sup>, y se llama así porque el motor térmico se enciende o apaga cuando se ha alcanzado el nivel mínimo o máximo, respectivamente, de carga de las baterías. Este bloque agrupa los modos `eléctrico a baja velocidad`, `propulsión híbrida`, `carga del PPS` y `eléctrico puro`.

Respecto a los otros dos bloques, como su propio nombre indica, controlan los modos `solo térmico` y `frenada regenerativa`. Además, la activación de cada uno de ellos conlleva la desactivación de los otros dos bloques, impidiendo que el sistema funcione en dos o más modos de funcionamiento a la vez. El bloque `frenada regenerativa` se diferencia de los otros dos en que el operador lógico e interruptor que lo activan o desactivan se encuentran fuera del mismo.

## 7.1 On-off

En este bloque se pueden ver dos bloques denominados **modo on** y **modo off**, que corresponden a los modos activados cuando se ha alcanzado el mínimo de carga de las baterías y el máximo, respectivamente. Es decir, el **modo on** agrupa los modos **eléctrico a baja velocidad**, **recarga del PPS** y **propulsión híbrida**, mientras el **modo off** se encarga de los modos **eléctrico a baja velocidad** (aparece duplicado por motivos de comodidad organizativa) y **eléctrico puro**. También nos encontramos el bloque **en\_ace**, encargado de calcular la energía de reserva necesaria para conducción urbana o interurbana (ver capítulo 7.1.3 de este Anexo).

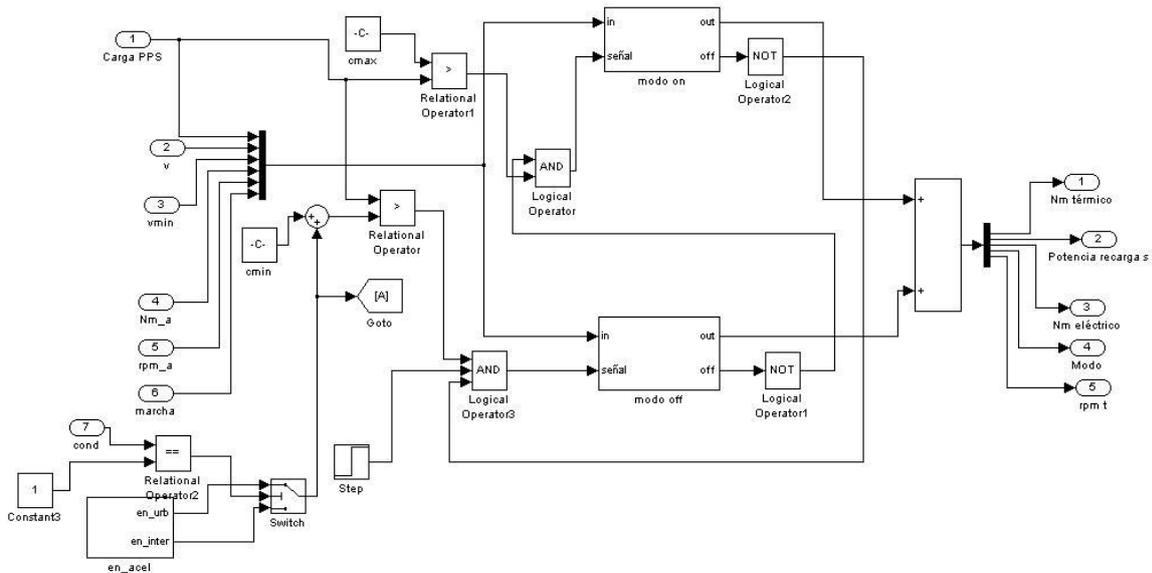


Figura A 7.2. Bloque **On-off**.

El bloque **modo on** se desactiva cuando la señal **carga PPS** llega al máximo valor de carga aceptado, mientras el **modo off** lo hace cuando ésta llega al valor mínimo. Cada uno de los bloques envía, mientras está activo, una señal **off** que impide que el otro bloque se active. Para evitar que los dos bloques intenten funcionar a la vez al iniciar la simulación se incluye una entrada escalón que durante un segundo entrega un valor 1, que a su vez da un 0 como salida del bloque AND conectado al subsistema **modo off**, impidiendo que éste entre en funcionamiento. Pasado un segundo el escalón pasa a valer 0, pero en ese momento el bloque **modo on** ya ha bloqueado con su señal **off** la activación del subsistema **modo off**.

### 7.1.1 On

En el interior del bloque **%modo on+** aparecen 3 bloques correspondientes a los 3 modos que puede simular dicho bloque. Cada uno de los bloques tiene un número distinto de señales de entrada, pero todos tienen las mismas 5 de salida: par motor del motor térmico, potencia de recarga de salida, par del motor eléctrico, modo de funcionamiento y régimen de giro del motor térmico. Todas estas salidas se suman y pasan por un interruptor que se activa sólo si la señal de entrada al bloque **%modo on+** está activa. Esta última señal también activa un interruptor que envía la señal **%off+**, impidiendo que el bloque **%modo off+** entre en funcionamiento mientras éste esté en funcionamiento.

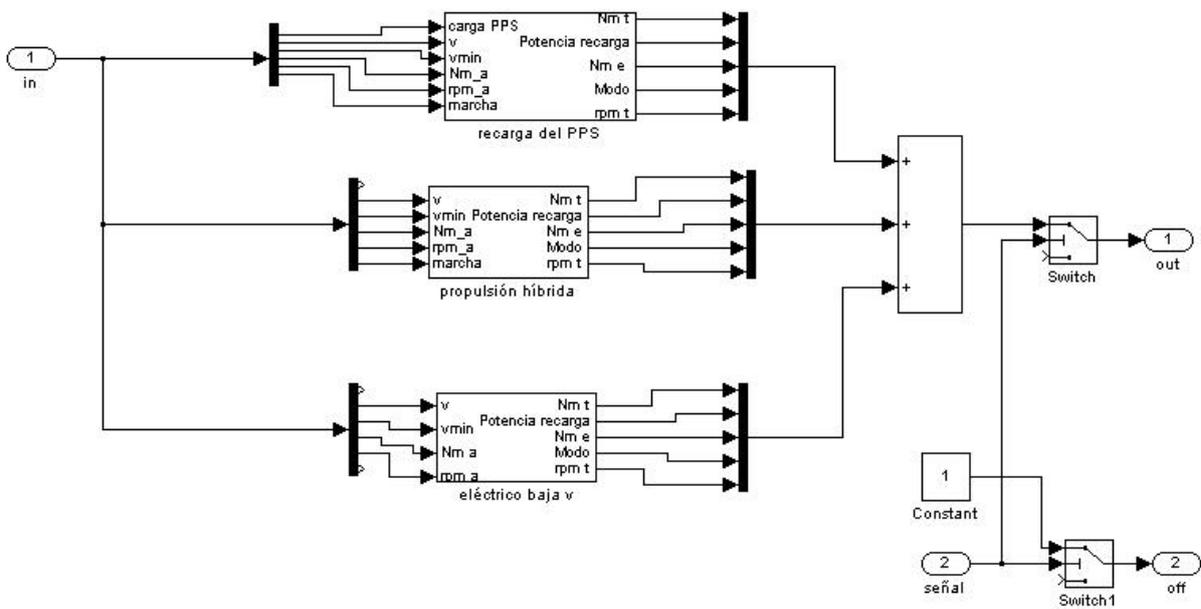


Figura A 7.3. Bloque **%on+**.

Dentro de cada bloque, además de los operadores matemáticos que calculan las condiciones de trabajo tanto del motor térmico como del eléctrico en el modo de funcionamiento seleccionado, se encuentran diversos operadores lógicos encargados de determinar si el modo de funcionamiento relativo a cada bloque es el indicado en cada situación o no, bloqueando o permitiendo el paso de las señales de salida de cada uno de los bloques. Una de estas señales es una constante distinta para cada bloque y que corresponde al número identificativo con el que han sido descritas en el capítulo **%Modos de funcionamiento+** de la Memoria. De esta forma, el operador suma que conecta los 3 bloques actúa como un interruptor que sólo da como salidas aquéllas recibidas del bloque asociado al modo efectivamente en funcionamiento.

### 7.1.1.1 Recarga del PPS

Este bloque evalúa si el sistema debe trabajar en el modo de recarga del PPS+ y calcula el funcionamiento de la planta híbrida en esas condiciones. Para ello, recibe como entradas el nivel de carga de las baterías, la velocidad del vehículo, la velocidad mínima para encendido del motor térmico ( $v_{min}$ ), el par motor requerido en el acoplador, el régimen de giro a la salida del acoplador y la marcha engranada.

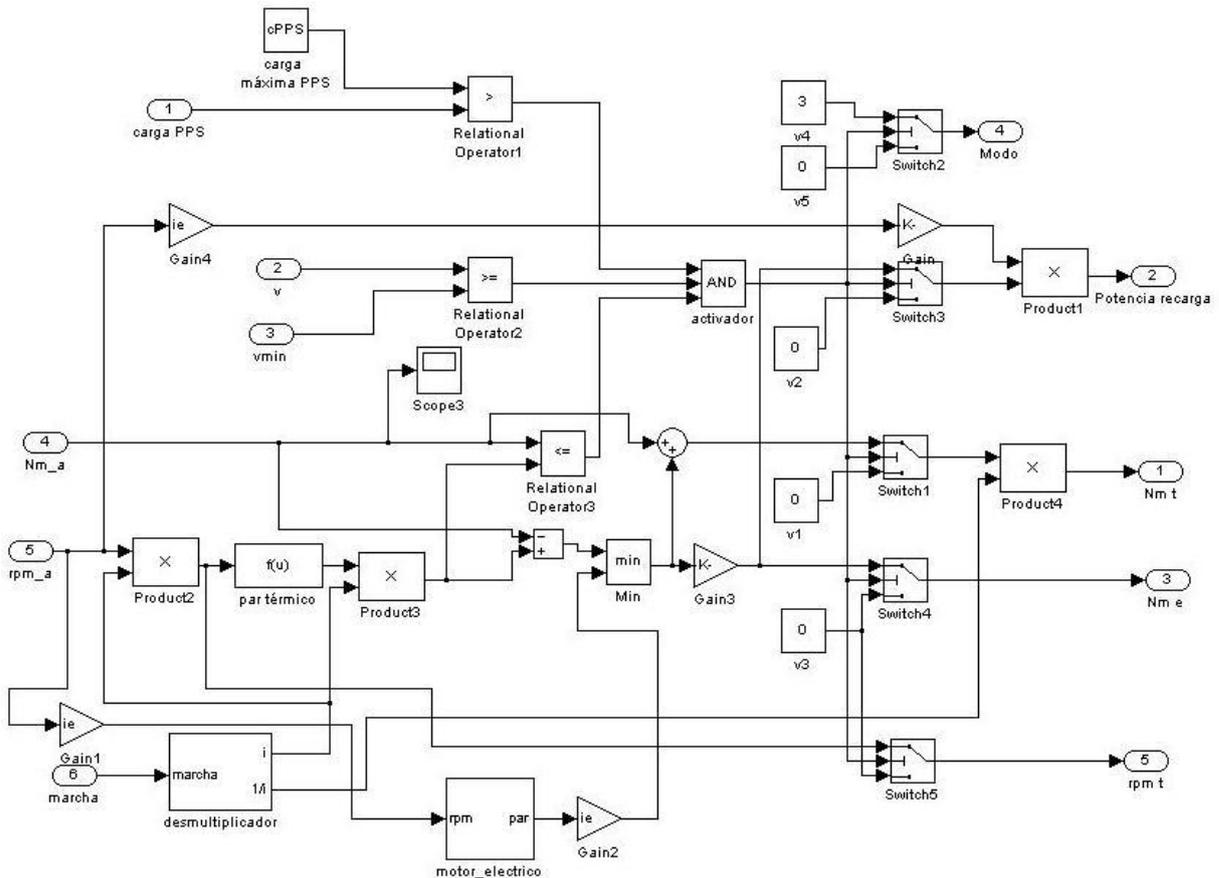


Figura A 7.4. Bloque %Recarga del PPS+

Las condiciones para el funcionamiento de este modo son tres: que el nivel de carga de las baterías sea menor al máximo admitido, que la velocidad del vehículo sea igual o mayor a  $v_{min}$  y que el par requerido en acoplador sea menor o igual que el que entrega el motor térmico a máxima eficiencia. En caso de que una de estas condiciones no se cumpla todas las señales de salida se anulan.

Las dos primeras condiciones no requieren de ningún tratamiento de las señales para ser evaluadas. Para la condición relativa al par hay que calcular, en primer lugar, el régimen de giro del motor térmico. Para ello multiplicamos el régimen de giro a la salida del acoplador por el índice de desmultiplicación obtenido del bloque %desmultiplicador+ a partir de la marcha engranada. Esta señal es enviada a la salida %rpm t+. Con el valor del régimen de giro del motor térmico hallamos el par entregado con la máxima eficiencia gracias a la función %par térmico+\*. Esta función contiene una función polinómica de segundo grado que aproxima la curva de trabajo que debe seguir el motor para que su rendimiento sea óptimo (ver Anexo B).

Este valor de par obtenido es el par entregado por el motor térmico a la entrada de la caja de cambios, por lo que lo multiplicamos por el índice de desmultiplicación para obtener su valor en el acoplador de par, con lo que se comprueba si la tercera condición de funcionamiento del bloque está satisfecha.

A este par obtenido se le resta el par requerido por la dinámica del vehículo, obteniéndose así el par motor sobrante que puede ser utilizado para recargar las baterías. Sin embargo, este par está limitado por la capacidad del motor térmico, de forma que hay que calcular el par máximo que puede soportar el motor eléctrico en cada situación. Para ello, multiplicamos el régimen de giro del acoplador por el índice de transmisión del motor eléctrico  $i_{te}$ , obteniendo el régimen de giro del mismo y, gracias al bloque `motor_eléctrico`, su par máximo. Al multiplicar nuevamente este valor por el índice de transmisión  $i_{te}$  obtenemos el par máximo que el motor eléctrico puede entregar al acoplador (o recibir de éste al trabajar como generador). El bloque `Min` garantiza que el par sobrante del motor térmico no sea en ningún caso superior al par que puede soportar el motor térmico.

Multiplicando la salida del bloque `Min` por el inverso del índice de transmisión del vehículo eléctrico obtenemos el par motor recibido por el motor eléctrico (generador en este caso) que es enviado a la señal de salida `Nme`. Además el producto de este par por la velocidad angular del eje del motor eléctrico (multiplicando la entrada `rpm_a` por el índice  $i_{te}$  y por la constante  $2\pi/60$  para convertirla en rad/s) nos da el valor de la señal `Potencia recarga`.

Respecto al motor térmico, al sumar el par cedido al motor eléctrico con el par requerido por el vehículo obtenemos el par efectivamente entregado al acoplador que, multiplicado por la inversa del índice de transmisión de la caja de cambios nos da el valor de la señal `Nm t`.

### 7.1.1.2 Propulsión híbrida

Este bloque es el encargado de la activación y control del modo de funcionamiento de igual nombre. Para ello, cuenta con las entradas velocidad, velocidad mínima, par motor y régimen de giro a la salida del acoplador y marcha engranada.

Dos condiciones activan el bloque AND que a su vez controla los interruptores que permiten el paso de las señales hasta los puertos de salida: el primero es que la velocidad del vehículo sea igual o superior a la  $v_{min}$ , el segundo es que el par requerido por el acoplador sea mayor del que puede proporcionar el motor térmico con máxima eficiencia.

Para hacer la comprobación relativa al par procedemos igual que en el bloque anterior, calculando el par aplicado por el motor térmico en el acoplador mediante la función  $\%par\ max\ rend+$  y el bloque desmultiplicador. La diferencia entre el par motor solicitado por la dinámica del sistema y el par motor entregado por el motor térmico siguiendo la curva de máxima eficiencia, multiplicada a su vez por el inverso del índice de transmisión del motor eléctrico nos proporciona el par suministrado por este último para satisfacer los requerimientos de potencia, correspondiente a la señal de salida  $\%Nm\ e+$ .

La señal  $\%Potencia\ recarga+$  se calcula como el opuesto (ya que es una descarga y no una recarga) del producto del par entregado por el motor eléctrico y el régimen de giro de éste (convertido mediante un bloque ganancia a rad/s). Las señales  $\%rpm\ t+$  y  $\%Nm\ t+$  se obtienen de los valores ya calculados de régimen de giro y par entregado del motor térmico.

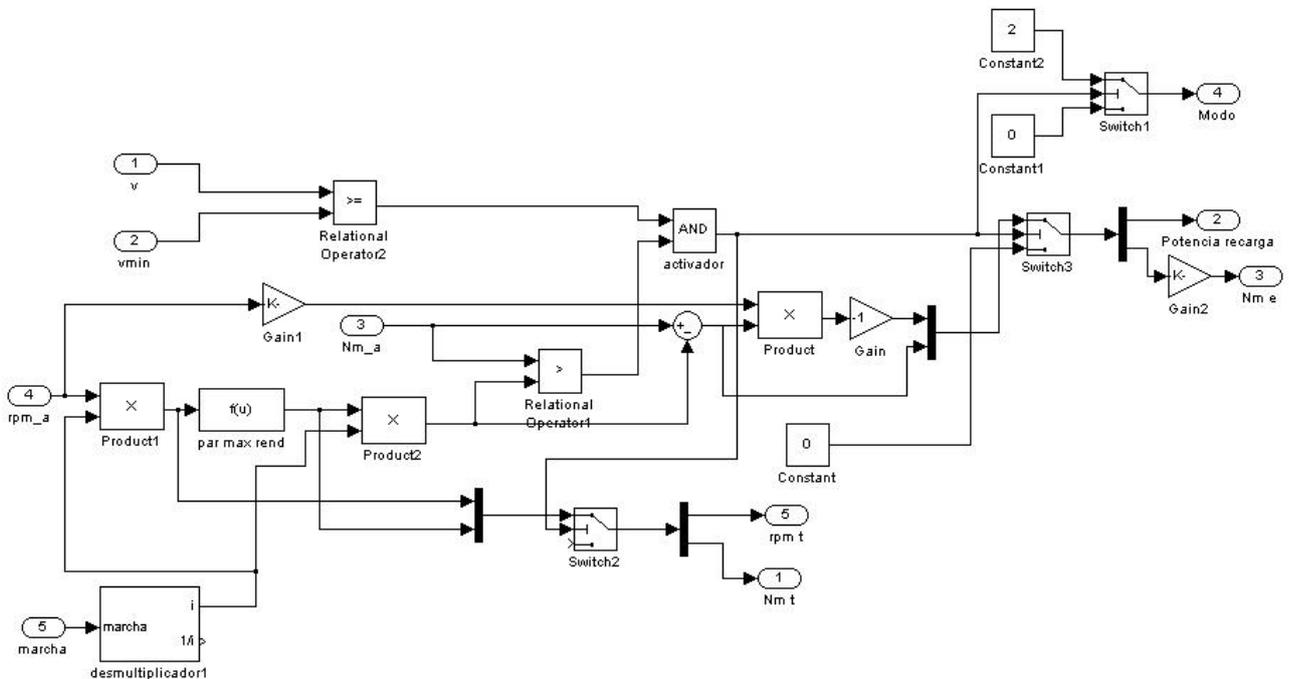


Figura A 7.5. Bloque  $\%Propulsión\ híbrida+$

### 7.1.1.3 Eléctrico baja v

Este bloque se activa cuando el vehículo se mueve en modo puramente eléctrico por no haber alcanzado la velocidad mínima necesaria para que entre en funcionamiento el motor térmico. Tiene como entradas la velocidad del vehículo, la velocidad mínima y el par motor y régimen de giro solicitados en el acoplador.

La única condición que permite el paso de las señales hasta los puertos de salida es que la velocidad del vehículo sea mayor a la señal  $v_{min}$ .

En este bloque las señales  $\omega_{pm\ t}$  y  $N_{m\ t}$  tienen valor nulo, ya que el motor está apagado en el modo eléctrico a baja velocidad. El par motor eléctrico se obtiene multiplicando el par de salida del acoplador por el inverso del índice de transmisión del motor eléctrico, mientras que la potencia de recarga se calcula como el opuesto del producto de dicho par multiplicado por el régimen de giro del motor eléctrico (convertido a rad/s).

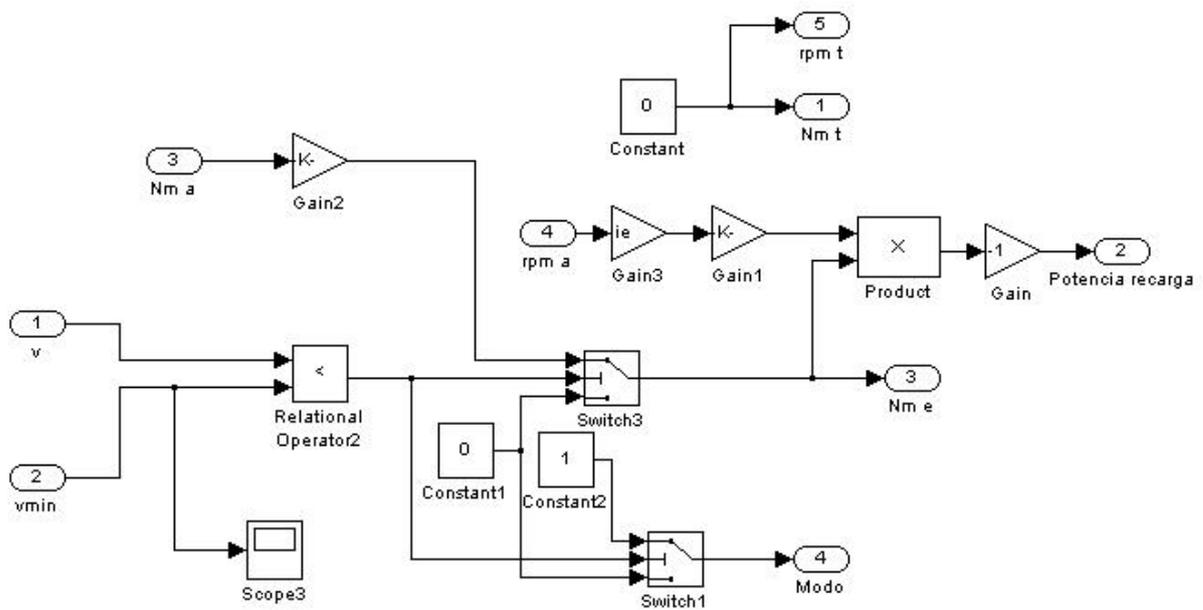


Figura A 7.6. Bloque Eléctrico baja v.

### 7.1.2 Off

Este bloque controla el funcionamiento del vehículo cuando las baterías se han cargado hasta el máximo admitido, momento en el cual el motor térmico se apaga y el vehículo se propulsa sólo mediante la potencia del motor eléctrico.

Las señales  $N_{m t}$  y  $r_{p m t}$  tienen valor nulo, mientras que la señal  $N_{m e}$  se obtiene multiplicando la señal  $N_{m a}$  por el inverso de la relación de transmisión  $\frac{1}{\omega}$ . El valor de potencia de recarga se calcula como el opuesto al producto del régimen de giro del motor eléctrico (obtenido a partir de la señal  $r_{p m a}$  y convertido a rad/s) y el par entregado por el mismo.

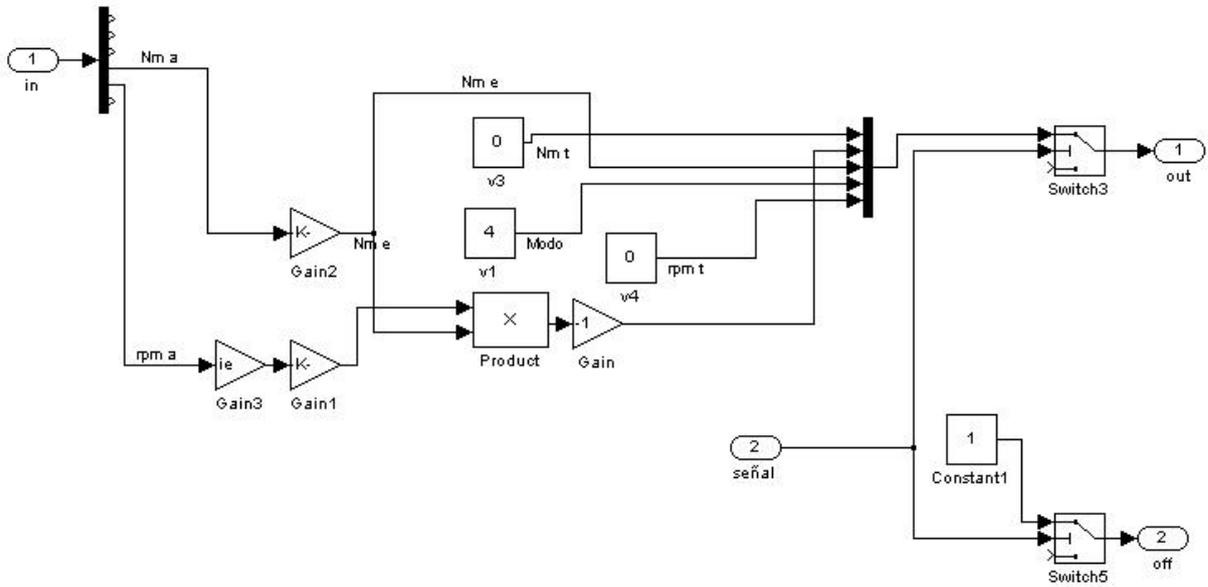


Figura A 7.7. Bloque Off.

### 7.1.3 En\_ace1

Este bloque no tiene entradas, ya que su funcionamiento no depende del resto de variables del sistema, sino de los parámetros de entrada introducidos en la ventana de Matlab. Sus salidas son las señales %en\_urb+ y %en\_inter+.

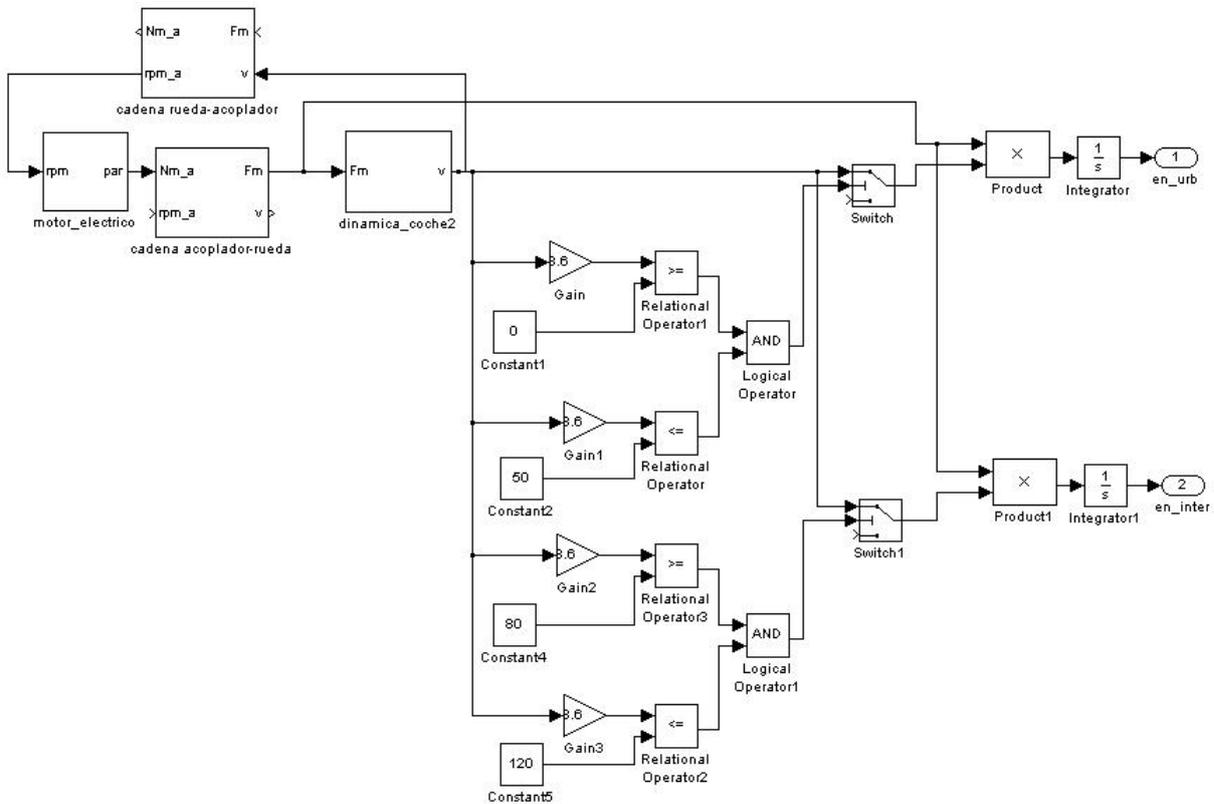


Figura A 7.8. Bloque %En\_ace1+

Las señales %en\_urb+ y %en\_inter+ dan el valor de la energía de reserva necesaria para una conducción urbana o interurbana. Un interruptor a la salida de este bloque conecta una u otra dependiendo de si la señal %cond+, relativa al tipo de circulación+, es igual a 1 o no.

En el interior encontramos algunos bloques ya utilizados en otros módulos aunque algunos de ellos ligeramente modificados. El bloque %motor eléctrico+ y %cadena rueda-acoplador+ no se han modificado, mientras que los otros dos se han invertido respecto a los anteriormente utilizados. De esta forma, el bloque %cadena acoplador-rueda+ es idéntico al bloque %cadena rueda-acoplador+ pero con el flujo de potencias inverso, es decir, transforma el par motor aplicado en el acoplador en fuerza motriz que impulsa al vehículo. Por su parte, el bloque %dinámica-coche2+ resulta de modificar ligeramente el bloque ya utilizado %dinámica-coche+: se han eliminado la parte relativa a la frenada y se han reorganizado las fuerzas aplicadas, con lo que calcula la aceleración (e, integrando, la velocidad) a partir de la fuerza motriz ejercida por el motor eléctrico.

Mediante los cuatro bloques se simula el arranque del vehículo únicamente propulsado por el motor eléctrico y su aceleración hasta la velocidad máxima que éste pueda proporcionar. La energía requerida para ello se calcula integrando el producto de la velocidad y la fuerza motriz. Dos grupos de bloques relacionales, lógicos e interruptores, que anulan la señal velocidad salvo cuando ésta se encuentra en los intervalos [0-50 km/h] o [80-120 km/h], permiten obtener la energía requerida en ciclo urbano y en ciclo interurbano.

Este bloque calcula la aceleración del vehículo en tiempo real, es decir, puede tardar en torno a un minuto (dependiendo de la potencia del motor eléctrico) en calcular los valores de las señales `%an_urb+` y `%an_inter+`. Sin embargo, las simulaciones han mostrado que ese tiempo es menor del que tarda el vehículo en requerir esos datos.

## 7.2 Térmico puro

Este subsistema controla el modo térmico puro, que se activa cuando el vehículo puede circular sólo con el motor térmico encendido con mejor eficiencia que utilizando el conjunto híbrido.

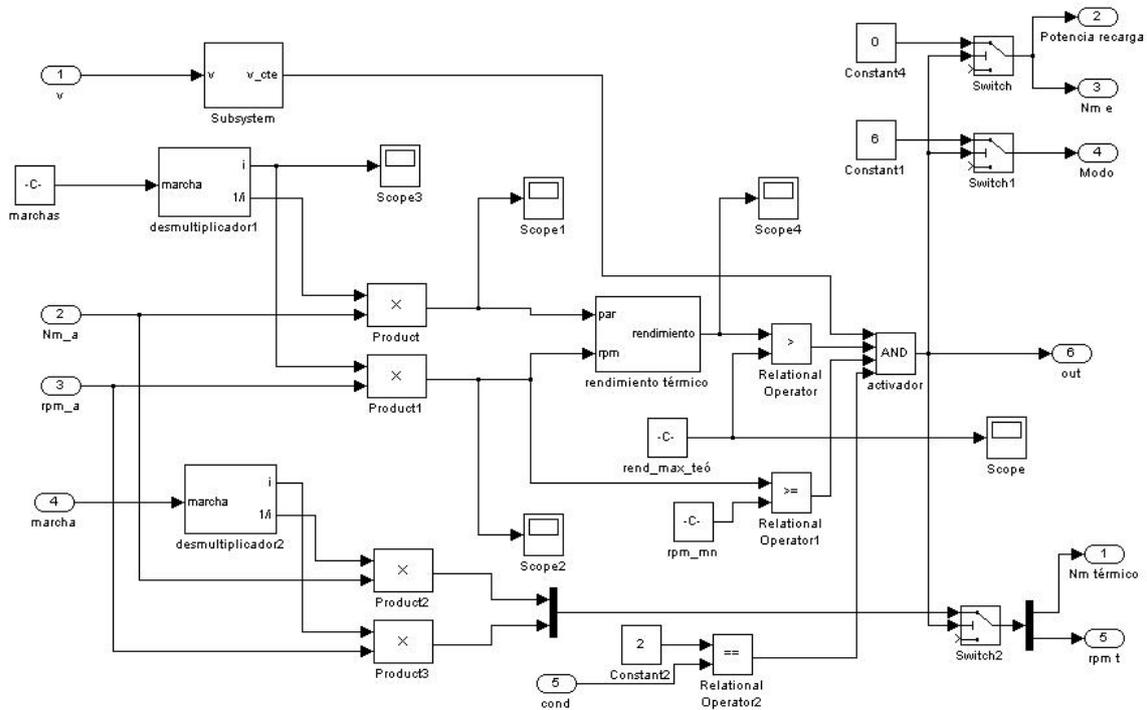


Figura A 7.9. Bloque térmico puro

El bloque activador que permite el envío de las señales por parte del bloque está sujeto a cuatro condiciones. La primera y más inmediata de calcular es que la señal de detección de velocidad constante  $v_{cte}$  esté activada.

La segunda es que el rendimiento del motor térmico circulando a la velocidad actual en la marcha más alta posible sea superior al rendimiento máximo teórico del sistema híbrido, obtenido como el producto del rendimiento de las baterías y los rendimientos máximos de motor térmico y eléctrico. Para ello, se introduce la señal  $marchas$  en el bloque desmultiplicador, dando el índice (y el inverso de éste) con la marcha superior engranada. Con estos dos valores y las señales  $Nm_a$  y  $rpm_a$  obtenemos el par motor y régimen de giro hipotéticos del motor térmico circulando en la marcha más alta. Con estos últimos valores hallamos el rendimiento y lo comparamos con una constante calculada como producto de los parámetros  $rend_b$ ,  $rend_{tm}$  y  $rend_{em}$ .

La tercera condición es que el valor de régimen de giro calculado para el motor térmico con la marcha superior introducida no sea inferior al régimen de giro mínimo admitido. Con estas tres condiciones satisfechas se permite el paso de las señales  $Nm_t$  y  $rpm_t$ , calculadas a partir de las señales  $Nm_a$  y  $rpm_a$  mediante los índices del bloque desmultiplicador con la marcha actual engranada, la constante de valor 6 identificativa del bloque y el valor nulo de las señales  $Potencia\ recarga$  y  $Nm_e$ .

La cuarta condición es que la señal  $\%cond$  sea igual a 2, es decir, que el vehículo esté realizando una conducción interurbana.

### 7.3 Frenada regenerativa

La condición para el funcionamiento de este bloque aparece fuera del mismo, por lo que dentro de éste no encontramos el bloque %activador+, y las señales %Modo+, %Nm t+ y %rpm t+ no están conectadas a ningún interruptor.

La señal %Nm\_a+ es multiplicada por el inverso del índice de transmisión %i+ para obtener el par aplicado al motor eléctrico (ya que trabaja como generador) por el acoplador. Para evitar superar el par máximo del motor eléctrico esta señal se compara, en el bloque %Min+, con la señal %par+ obtenida en el bloque %motor\_eléctrico+ a partir de la señal %rpm\_a+ multiplicada por el índice de transmisión del motor eléctrico.

La señal obtenida en el bloque %Min+ corresponde al par motor enviado al motor eléctrico, pero la emisión de esta señal está supeditada a dos condiciones, mediante el bloque %AND+ y el interruptor a continuación del bloque %Min+ que la carga de las baterías sea inferior al máximo admitido y que la velocidad del vehículo sea superior a 15 km/h (por debajo de esta velocidad el rendimiento de conversión de energía mecánica a eléctrica es muy limitado). En caso contrario, las señales %Nm e+ y %Potencia recarga s+ (obtenida como el producto de la anterior y el régimen de giro del motor eléctrico convertido a rad/s) se anulan.

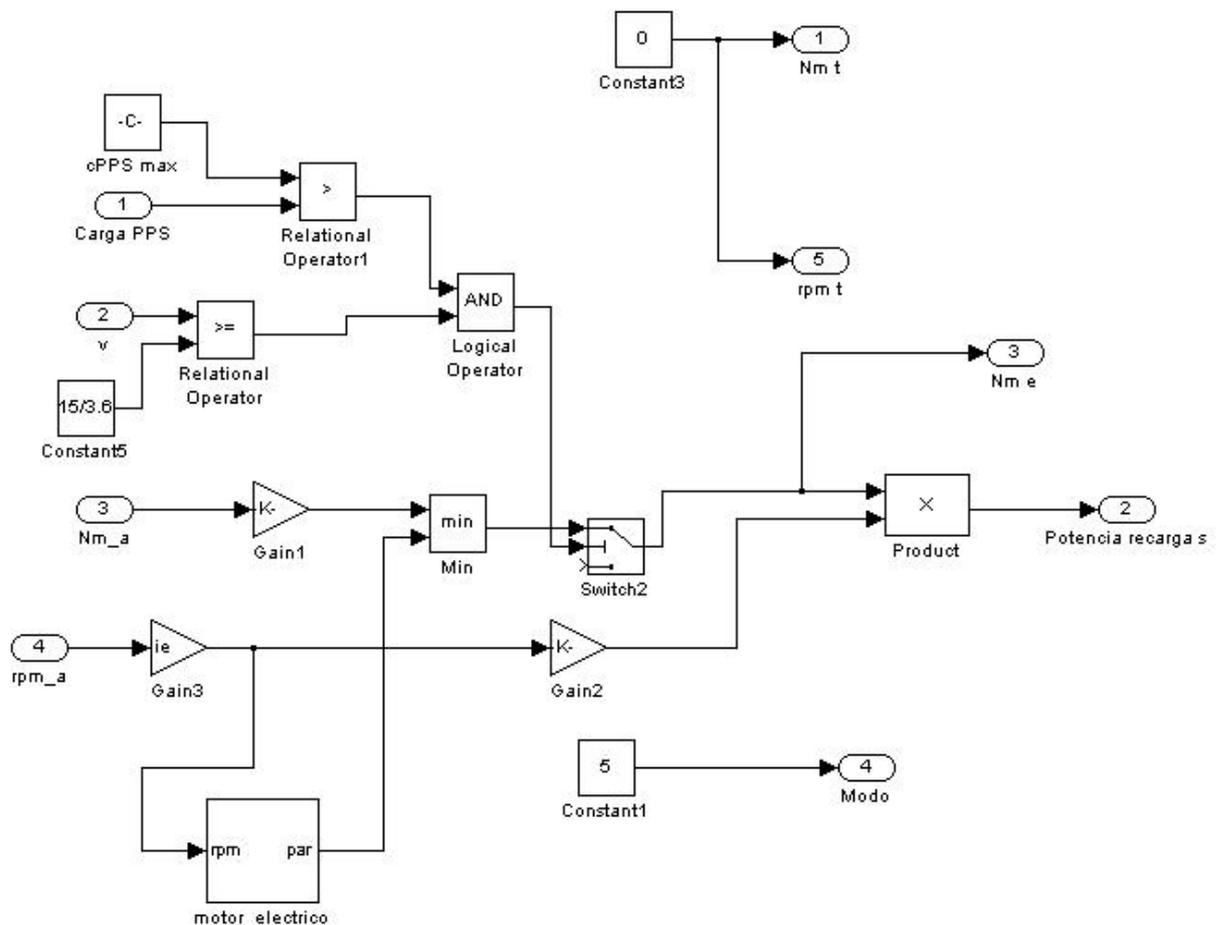


Figura A 7.10. Bloque %Frenada regenerativa+



## 9 CONSUMO INST

Este bloque calcula el consumo instantáneo de combustible por el motor térmico, expresado en litros por segundo. Tiene como señales de entrada  $N_{m\ t}$  y  $\eta_{p\ m\ t}$ , y da como salida la señal  $\%_{\text{consumo i}}$ .

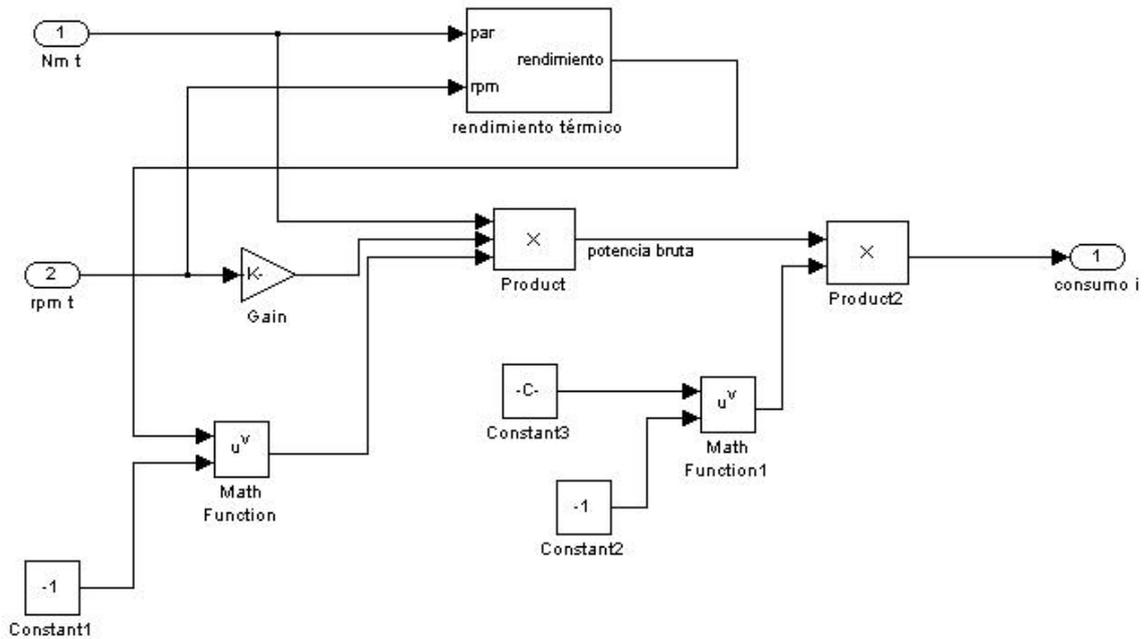


Figura A 9.1. Bloque  $\%_{\text{Consumo inst}}$ .

Las señales  $N_{m\ t}$  y  $\eta_{p\ m\ t}$  nos dan el rendimiento del motor térmico, cuyo inverso es multiplicado por el par y régimen de giro (convertido a rad/s) de dicho motor, obteniendo así la potencia bruta entregada por el MACI. Para calcular el consumo instantáneo de combustible multiplicamos la potencia bruta por el inverso de la energía específica del combustible (expresada en J/l).

## 10 CONSUMO 100 KM

Este bloque calcula el consumo teórico de combustible a los 100 km manteniendo el consumo promedio anterior. Tiene como entradas la velocidad del vehículo y el consumo instantáneo y como salida el consumo promedio a los 100 km recorridos.

La señal  $\%cons_i$  es integrada para hallar el consumo total acumulado por el vehículo. Al dividir este valor por el espacio recorrido en el mismo tiempo (obtenido integrando la señal  $\%v$ ) obtenemos el consumo promedio por metro recorrido. Multiplicando este último valor por una ganancia de 100.000 hallamos el consumo promedio por cada 100 km recorridos.

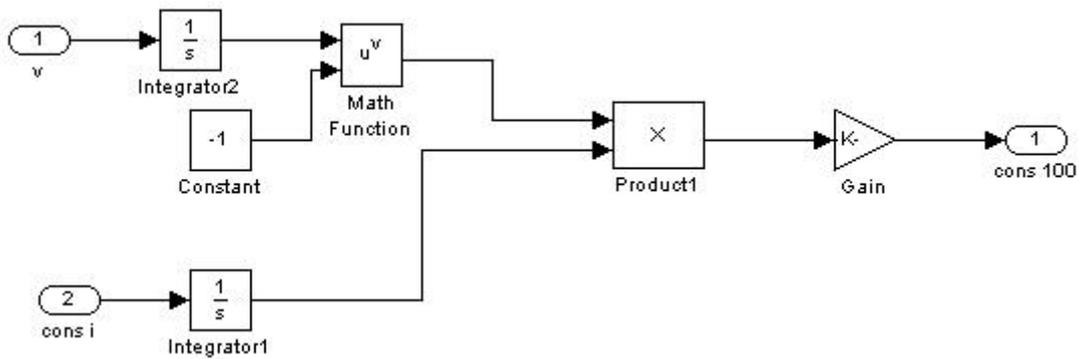


Figura A 10.1. Bloque %Consumo 100 km±

## 11 CONTADOR DE CICLOS PPS

Este bloque cuenta el número de ciclos de carga y descarga que han sufrido las baterías. Se considera que las baterías han completado un ciclo de descarga cuando, después de haber reducido su carga por debajo del 52% de la carga máxima (más el margen para energía de aceleración calculado en el bloque `%en_acel+`), aumentan su carga por encima del 68% de la carga máxima.

La señal `%carga PPS+` es comparada con el valor mínimo descrito antes. En el momento en que es menor que éste, el interruptor bloquea la señal y mantiene como entrada el valor mínimo de carga. El bloque comparador `%menor o igual+` está comparando dos señales iguales por lo que su señal de salida está activa. Mientras tanto, la señal `%carga PPS+` está siendo comparada con el valor máximo. Cuando supera este valor, la carga de las baterías ha completado un ciclo y se envía la señal de aumentar el número de ciclos al bloque `%contador ciclos+`, que actúa como el bloque `%selector de marcha+` (salvo que sólo puede aumentar su salida, nunca reducirla). Al aumentar en uno el número de ciclos la señal `%memory+` anula la señal del operador lógico `%igual a+`. El opuesto de esta señal activa, a través de un bloque OR, el interruptor más cercano a la señal `%carga PPS+`, y el sistema comienza de nuevo habiendo aumentado la señal `%ciclos+` en uno.

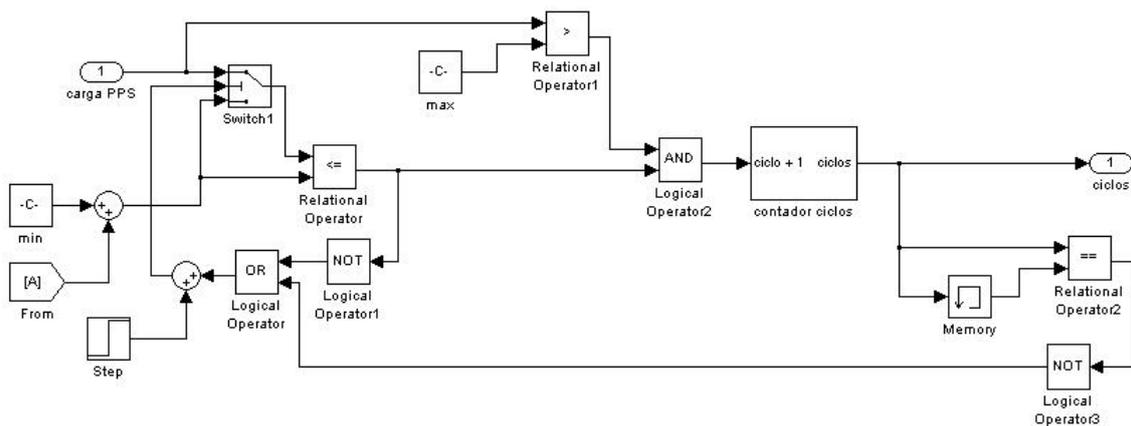


Figura A 11.1. Bloque `%Contador ciclos PPS+`

## 12 ANÁLISIS RENDIMIENTOS

Este bloque calcula distintos valores de rendimiento que permiten valorar el correcto funcionamiento del sistema, así como orientar sobre qué área puede ser mejorada. Tiene como entrada la señal múltiple `%datos+`, que contiene las señales `%Nm t+`, `%pm t+`, `%Nm e+`, `%Modo+`, `%pm a+` y `%Nm a+`. En el interior esta señal es enviada a 3 subsistemas que calculan distintos valores de rendimiento de frenada regenerativa, del motor térmico y del motor eléctrico.

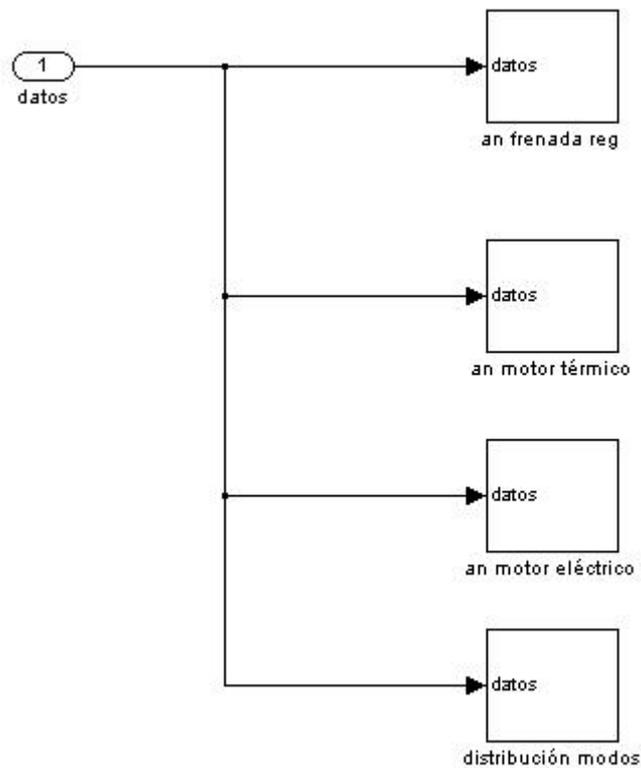


Figura A 12.1. Bloque `%Análisis rendimientos+`

## 12.1 An frenada reg

El subsistema `%An frenada reg+` calcula tres tipos de rendimiento promedio, denominados `%end e+`, `%end m+` y `%end comb+`. El primero corresponde al rendimiento eléctrico del motor eléctrico mientras convierte la energía mecánica recibida del acoplador en energía eléctrica. El segundo hace referencia a la cantidad de energía cinética que se aprovecha en energía mecánica a la entrada del motor (generador) eléctrico. Este rendimiento se ve disminuido por una mayor velocidad mínima de recarga por frenada, una potencia de frenada mayor de la que puede ser transformada en energía eléctrica o el hecho de que las baterías lleguen al nivel de carga máximo antes de haber frenado por completo. El último rendimiento es el resultado del producto de los otros dos, y refleja el rendimiento combinado al transformar la energía cinética en las frenadas en energía eléctrica.

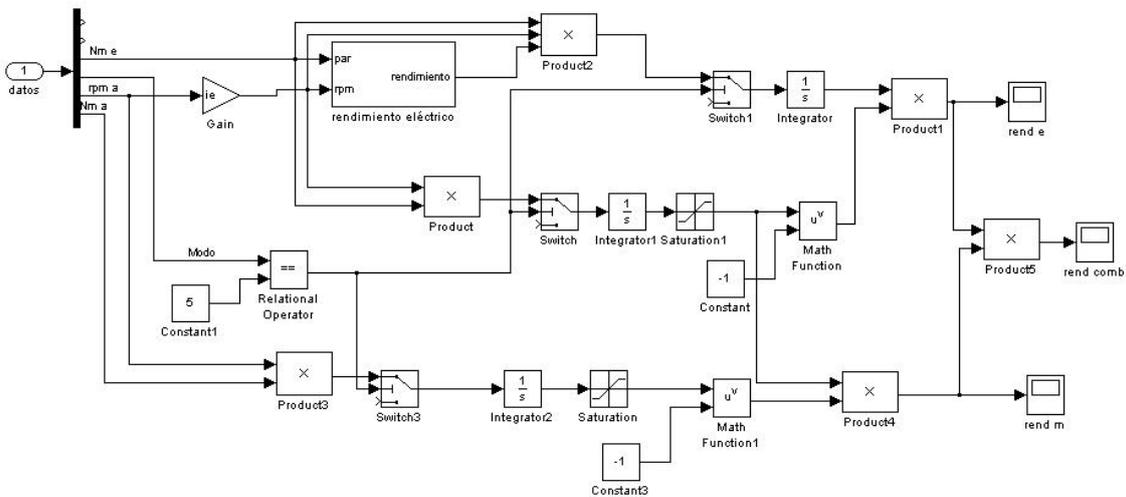


Figura A 12.2. Bloque `%An frenada reg+`

El rendimiento eléctrico se obtiene del cociente entre la integral del producto del par, régimen de giro y rendimiento del motor eléctrico y la integral del producto del par y régimen de giro del mismo. Un interruptor garantiza que dichos productos sólo se calculen cuando el valor de la señal `%Modo+` sea igual a 5, correspondiente al modo de funcionamiento `%frenada regenerativa+`.

El rendimiento mecánico se obtiene del cociente entre la integral de la potencia bruta mecánica que llega al motor eléctrico (obtenida como el producto del par y el régimen de giro del motor eléctrico) y la integral de la potencia de frenada en las ruedas delanteras (obtenida como el producto del par y régimen de giro a la salida del acoplador de par). Igual que en el caso anterior, un interruptor sólo envía señal a los bloques integradores si la señal `%Modo+` corresponde al modo `%frenada regenerativa+`. Por último, el rendimiento combinado se obtiene del producto de las señales `%end e+` y `%end m+`.

## 12.2 An motor térmico

Este bloque calcula el rendimiento acumulado e instantáneo del motor térmico en cada uno de los modos de funcionamiento en los que puede intervenir, que son los modos %propulsión híbrida+, %carga del PPS+y %térmico puro+.

En el interior del subsistema nos encontramos tres bloques %rendimiento térmico+, asociado cada uno a uno de los tres modos de funcionamiento. Cada uno de ellos recibe las señales %Nm t+y %rpm t+sólo cuando se cumple la condición de que el modo de funcionamiento coincide con aquél al que están asociados, dando el valor de rendimiento en ese momento (en caso de no estar activado da el valor 0.01) y siendo mostrado éste en las pantallas %end inst h+, %end inst r+y %end inst t. El cociente entre la integral del producto del par, régimen de giro y rendimiento del motor térmico y la integral del producto del par y régimen de giro del mismo da como resultado los rendimientos acumulados en cada modo, que son mostrados en las pantallas %end prop híb+, %end recarga PPS+y %end térmico puro+.

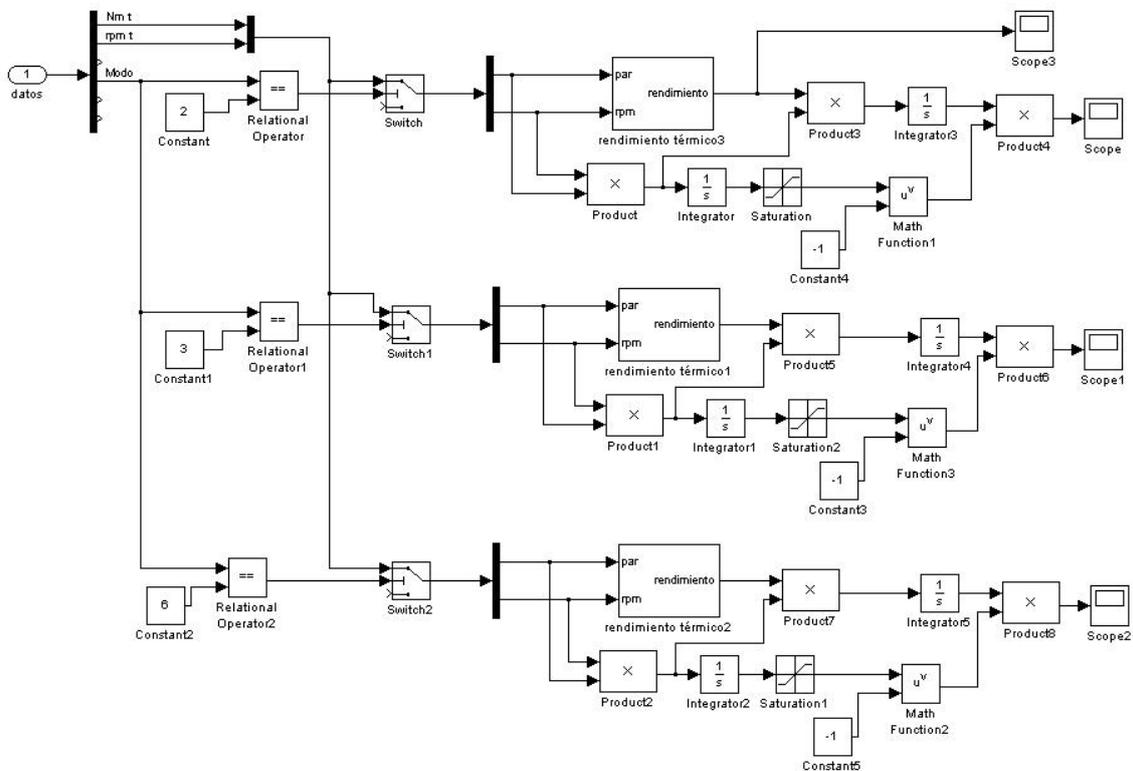


Figura A 12.3. Bloque %An motor térmico+.

### 12.3 An motor eléctrico

Este bloque es el equivalente al bloque `%an motor térmico` aplicado al motor eléctrico. Para calcular los rendimientos utiliza las señales `%Nm e` y `%rpm a` (multiplicada por el índice `%ie` para obtener el régimen de giro del motor eléctrico) y divide los rendimientos en los modos `%eléctrico puro` y `%eléctrico a baja velocidad` (al ser ambos modos iguales en funcionamiento no distingue entre los dos para calcular la eficiencia), `%propulsión híbrida` y `%carga del PPS`.

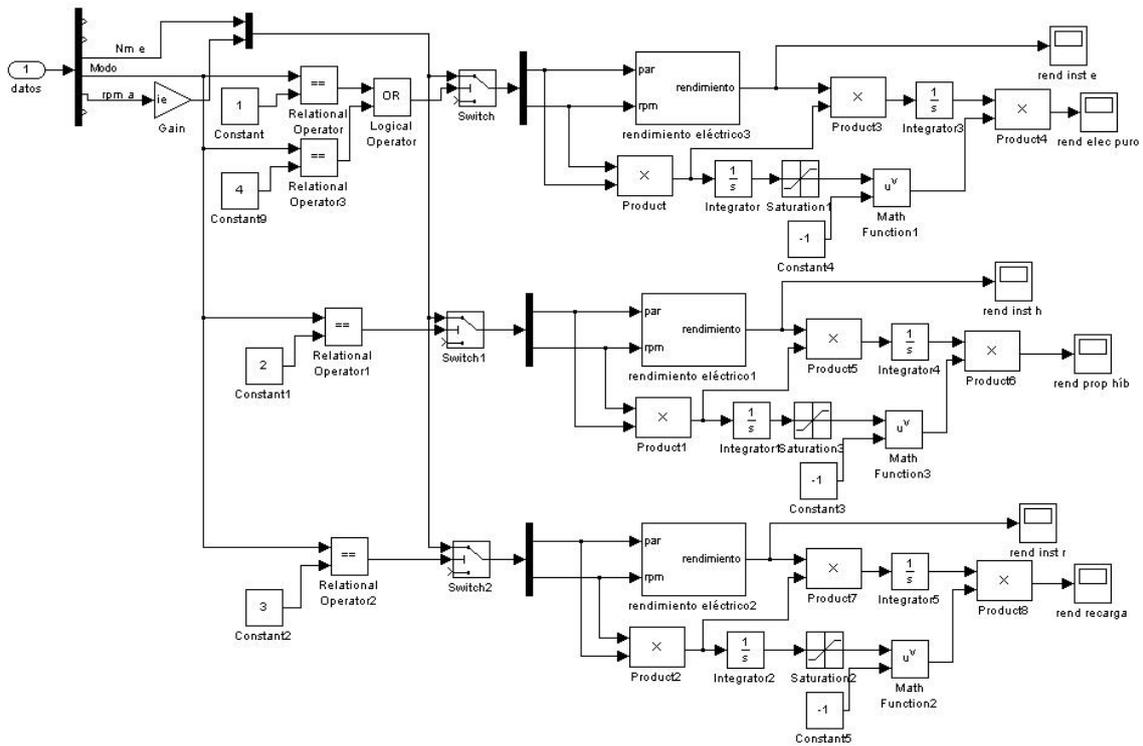


Figura A 12.4. Bloque `%an motor eléctrico`.

## 12.4 Distribución de modos

Este bloque calcula la distribución temporal de los modos de funcionamiento del vehículo durante su marcha.

Un integrador recibe una constante de valor unidad mientras la señal  $\%pm a+$  (proporcional a la velocidad del vehículo) es mayor que 0, actuando como un contador de tiempo de marcha. Mientras el vehículo está en marcha, se envía dicha constante de valor unidad a 6 interruptores que sólo la envían a sendos integradores si la señal  $\%modo+$  es la correspondiente. De esta forma, estos integradores actúan como contadores del tiempo de marcha en cada modo de funcionamiento. Multiplicando cada contador por el inverso del tiempo total de marcha y por una constante de valor 100 obtenemos el porcentaje de tiempo que cada modo de funcionamiento permanece activo. Estas señales son mostradas en un solo monitor mediante un bloque  $\%aux+$ .

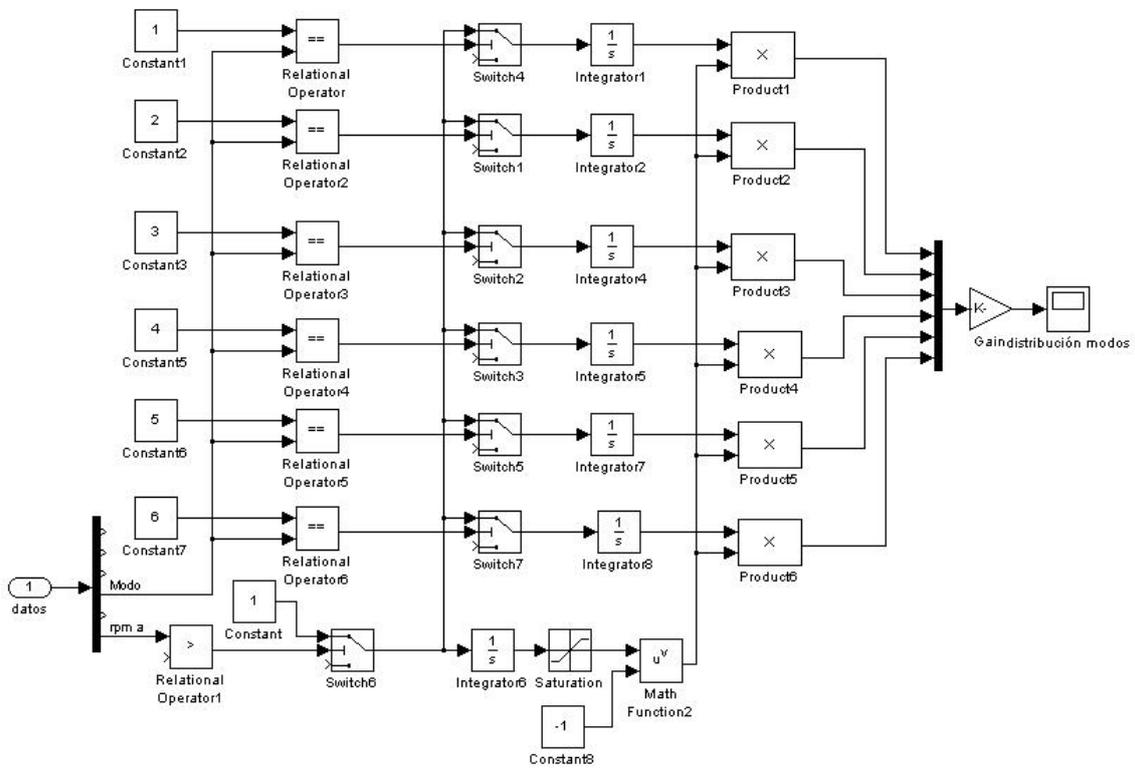


Figura A 12.5. Bloque  $\%Distribución modos+$



## 14 Análisis potencia

Este subsistema permite comprobar que las condiciones de marcha impuestas al modelo sean efectivamente asumibles por el mismo, en concepto de energía y potencia necesarias, así como aproximar el margen de potencia disponible por el sistema.

La señal `%carga PPS+` es dividida por el parámetro de carga máxima de las baterías, dando el índice unitario de carga de las mismas y pudiendo comprobarse si éstas han rebasado los límites de carga recomendados.

Con las señales `%rpm t+` y `%rpm a+` obtenemos el par máximo que el motor térmico y eléctrico, respectivamente, pueden entregar (en el caso del motor térmico, el par máximo con eficiencia óptima). Estos valores son comparados con las señales `%Nm t+` y `%Nm a+` dando como resultado el índice de carga de ambos motores. Para descartar los valores de carga triviales (en modo `%carga del PPS+` o `%propulsión híbrida+` el motor térmico siempre da como índice de carga 1, en modo `%térmico puro+` el eléctrico da 0, etc) se han incluido cuatro comparadores que reciben la señal `%modo+` y cuatro constantes identificativas de otros tantos modos. De esta forma, sólo se da el índice de carga del motor térmico en el modo `%térmico puro+`, mientras en el caso del motor eléctrico se da el índice de carga en los modos puramente eléctricos y en el modo `%carga del PPS+`.

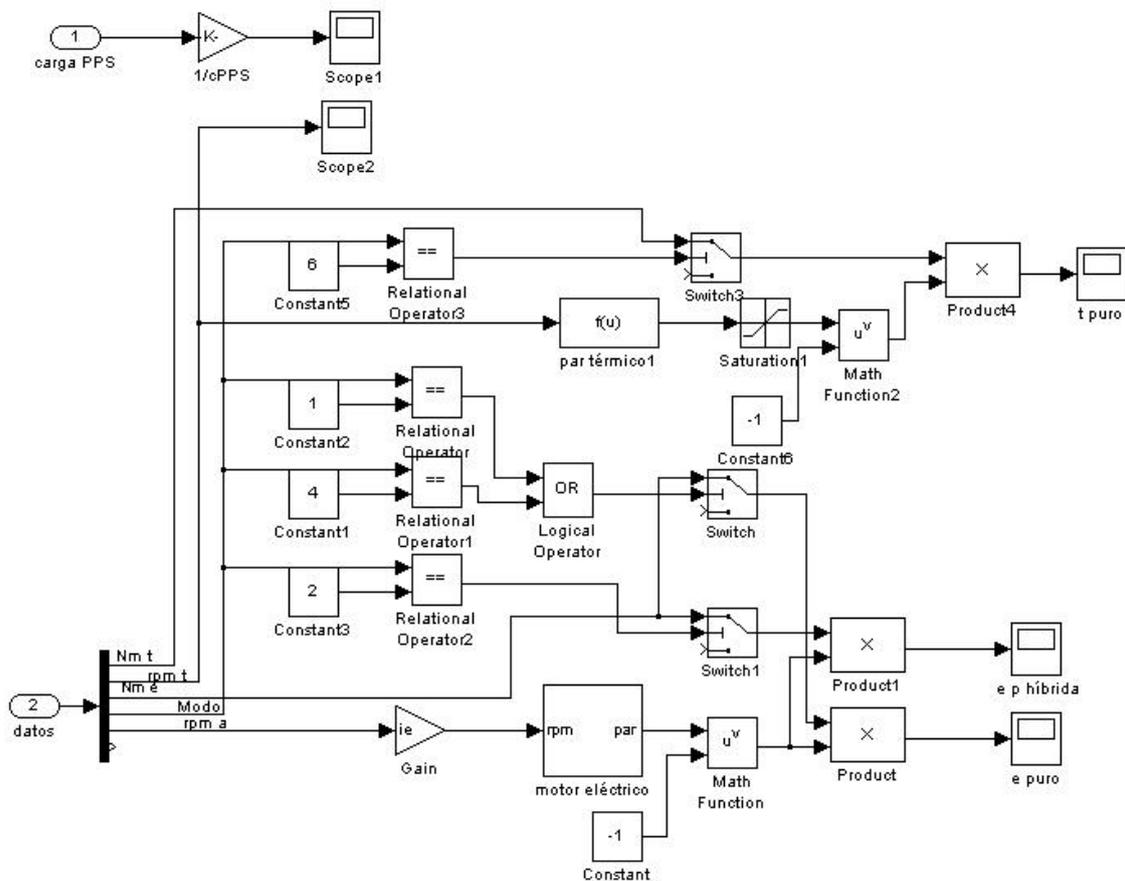


Figura A 14.1. Bloque %Análisis potencia+

## B. CURVA DE PAR MOTOR PARA MÁXIMA EFICIENCIA

La línea de par motor de máxima eficiencia ha sido aproximada por la siguiente función polinómica de segundo grado:

$$P(n) = -1.344e-5 \cdot n^2 + 0.06699 \cdot n + 127.32$$

Donde  $P$  es el par motor entregado y  $n$  el régimen de giro (en rpm) del eje de salida del motor. En la siguiente imagen se representa dicha función sobre el gráfico de rendimiento del motor térmico.

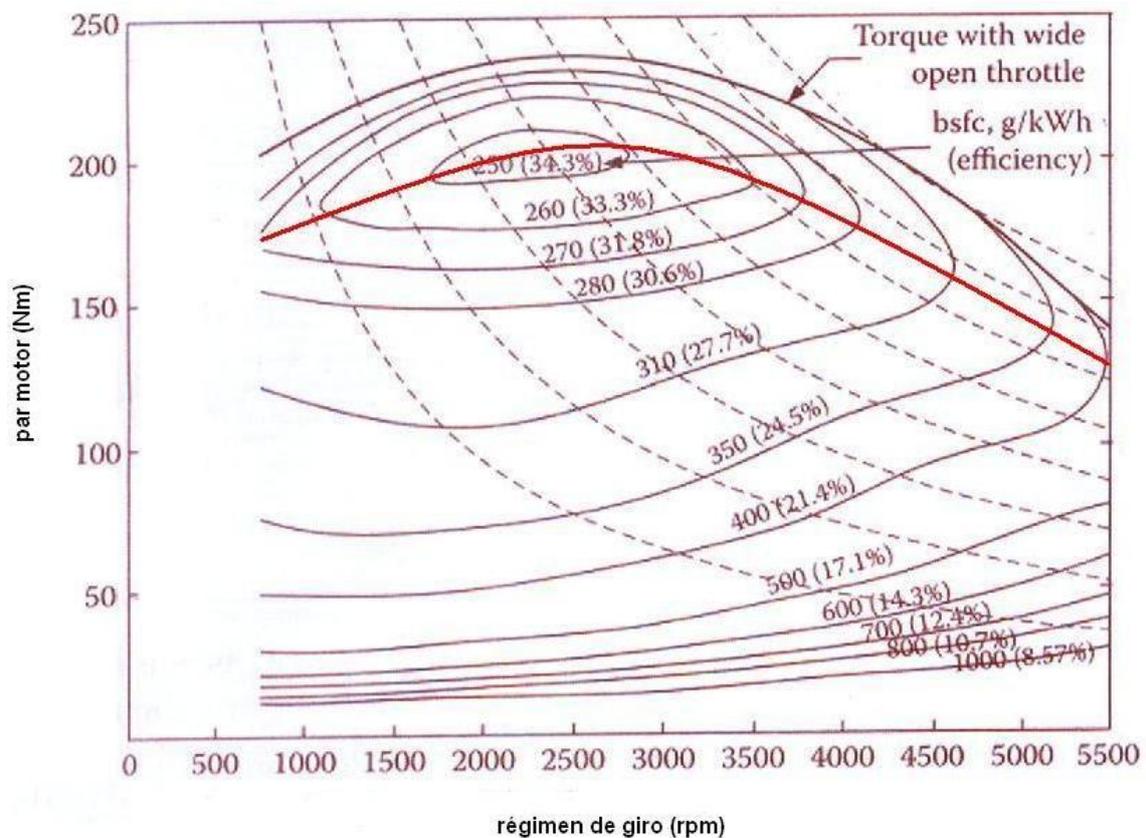


Figura B 1. Línea de par de máxima eficiencia del motor térmico.



## C. OBTENCIÓN DE TABLAS DE EFICIENCIA

### Motor eléctrico

La gráfica de eficiencia del motor eléctrico se divide en 6 sectores, cada uno con una tabla de eficiencia con un mallado distinto en función de cómo es la variación de la eficiencia respecto al régimen de giro y respecto al par entregado, como puede verse en la figura C 1.

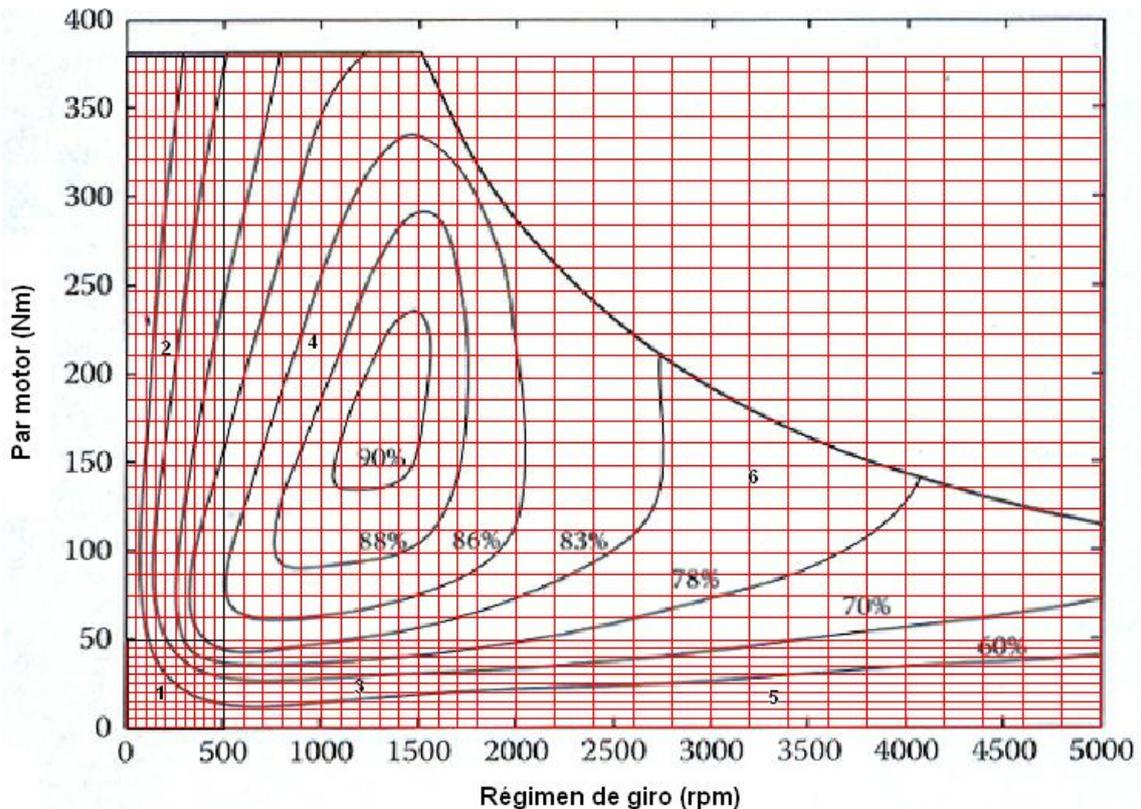


Figura C 1. Gráfica de eficiencia del motor eléctrico y mallado utilizado para su tabulación.

El par de entrada al bloque se divide por el par máximo del motor (expresado como  $387.5 \cdot p_{me} / 60.87$ ) de forma que las tablas dependen de un índice adimensional independiente de la potencia del motor eléctrico utilizado. El gráfico de rendimiento resultante (con la división en sectores y el mallado) se muestra en la figura C 2.

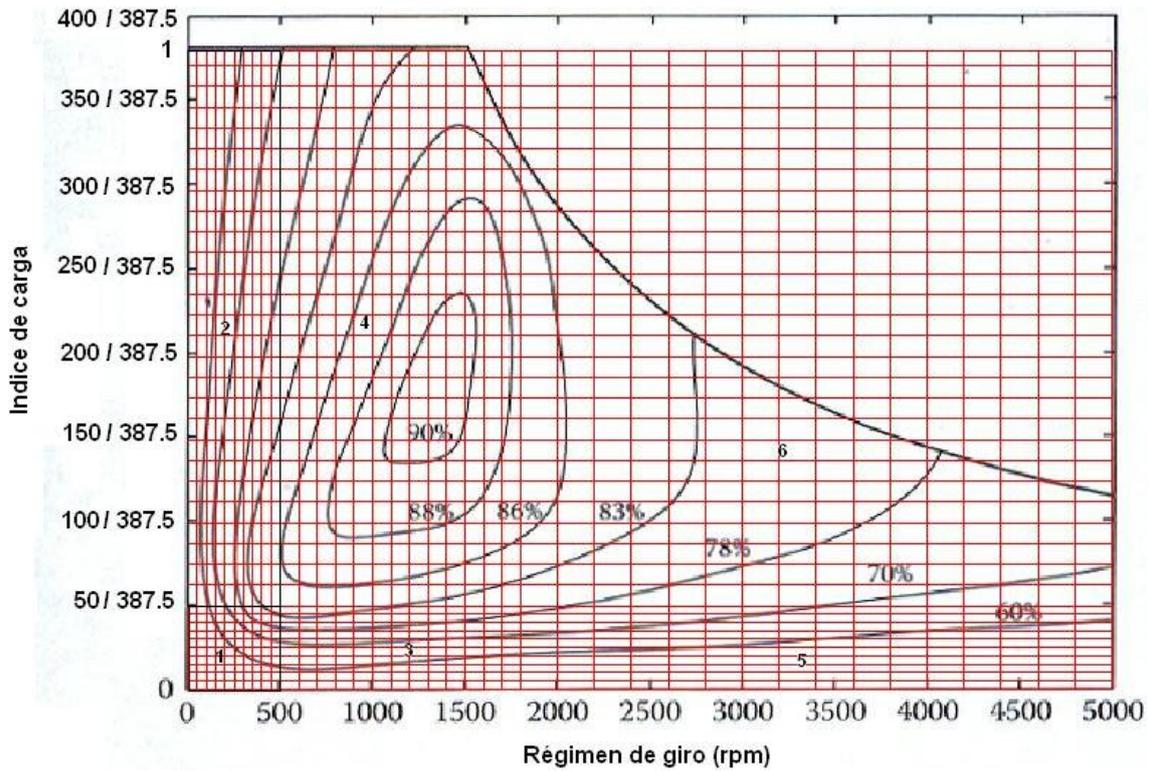


Figura C 2. Tabla de eficiencia normalizada del motor eléctrico

Para explicar cómo se calculan los parámetros utilizados en el interior de los 6 subsistemas asignados a las 6 áreas de muestreo explicaremos su obtención para la región 4.

La región 4 tiene como punto inicial (coordenadas [0,0] en su tabla) el correspondiente a un régimen de giro de 500 rpm y un par normalizado (par de entrada entre par máximo) de 50/387.5. Estos valores iniciales son restados de las señales de entrada de forma que los índices de la tabla empiecen en 0. Para calcular el índice correspondiente a un valor de entrada a la tabla se multiplica este valor por el índice máximo de dicha tabla y se divide por la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de entrada a la tabla. En el caso de la tabla del subsistema 4, esto implica multiplicar la señal de par por 27 (la tabla tiene 28 filas) y dividirlo por 337.5/387.5 (la diferencia entre el par normalizado para el índice de fila 27 y para el índice de fila 0), mientras que la señal de régimen de giro es multiplicada por 13 (la tabla tiene 14 columnas) y dividirla por 1300 (la diferencia entre el régimen de giro para el índice de columna 13 y 0).

Los bloques comparativos y AND sólo permiten que el valor de la tabla sea transmitido si el par normalizado y el régimen de giro se encuentran dentro de los límites de la región 4.

## Motor térmico

La gráfica de este motor se divide en 4 sectores, como puede verse en la figura C 3. Respecto al método anterior, la principal diferencia es que sólo se utiliza la señal de par normalizado para activar la tabla de un sector y desactivar las demás. Por lo demás, el método utilizado es el mismo que en el caso anterior, con la particularidad de que la eficiencia se ha calculado hasta un valor de par superior al par máximo del motor térmico. Lo único en lo que afecta este hecho es en que el par normalizado se obtiene a partir de este par %virtual+.

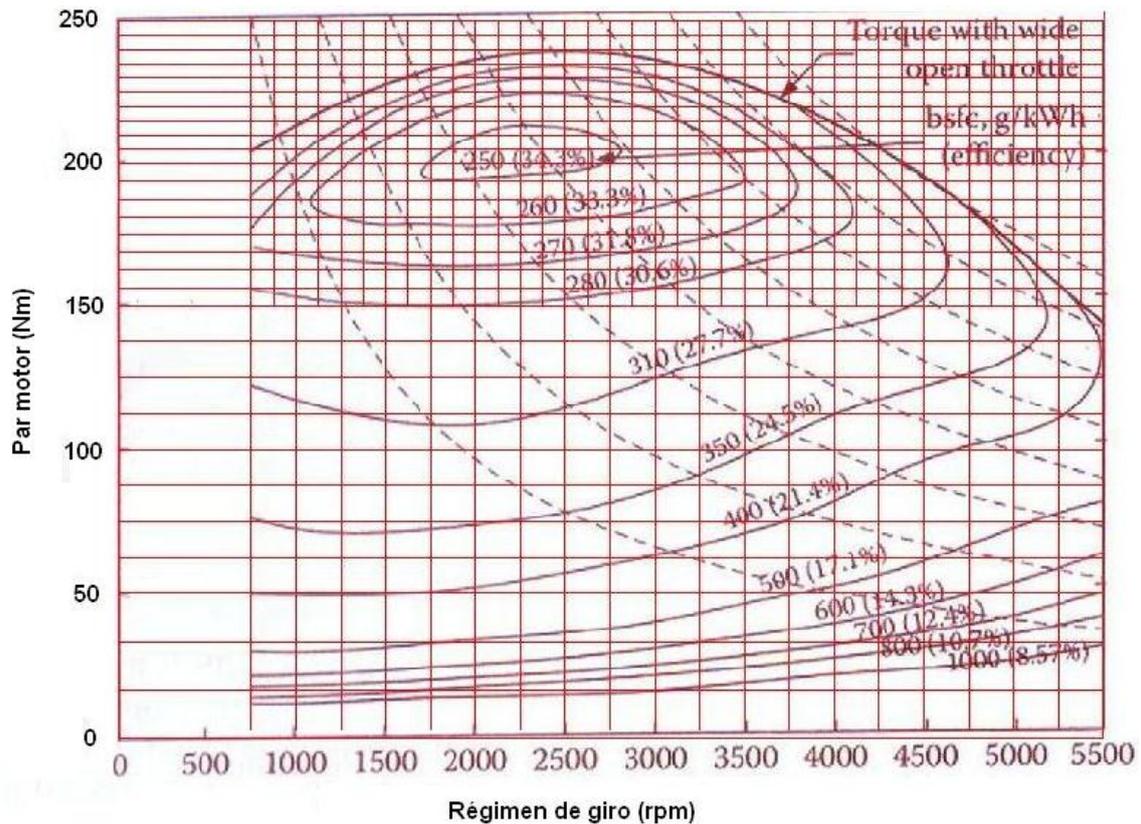


Figura C 3. Gráfica de eficiencia del motor térmico y mallado utilizado para su tabulación.

La gráfica normalizada, una vez dividido el par de entrada por el par máximo virtual+ (obtenido como  $250 \cdot p_{mt}/124.5$ ), aparece representada en la figura C 4.

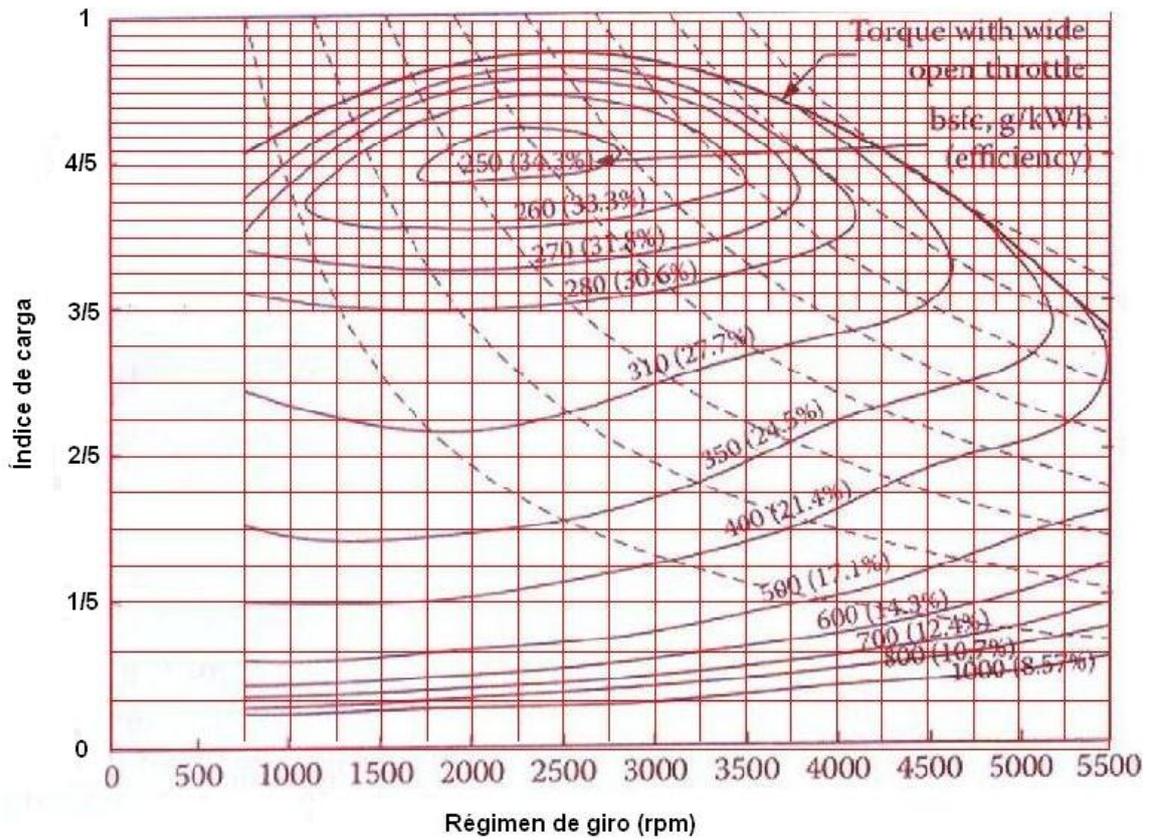


Figura C 4. Tabla de eficiencia normalizada del motor térmico.



En el bloque %cadena rueda-acoplador+se ha eliminado el puerto de entrada %renado\_d+

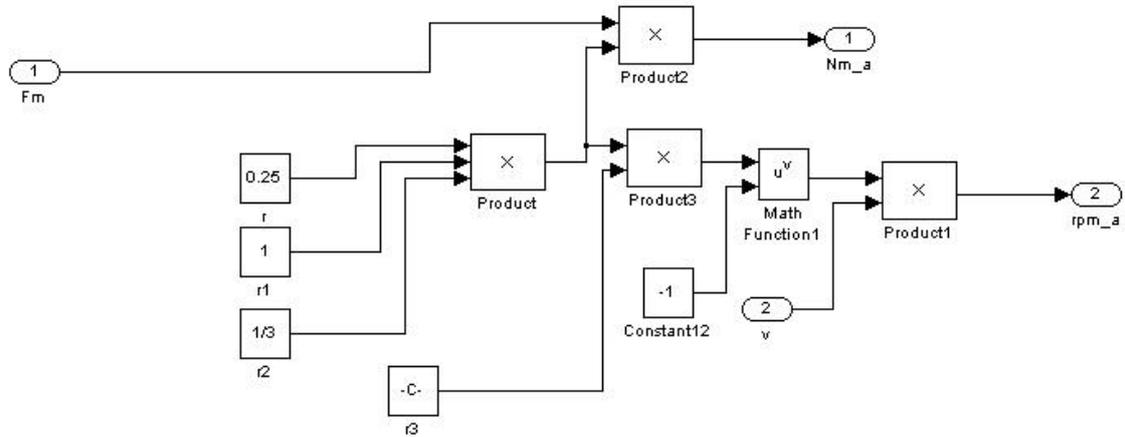


Figura D 3. Bloque %Dinámica cadena rueda-acoplador+

En el bloque %A caja de cambios+se ha eliminado el puerto %Modo+ y el subsistema que controlaba las señales de subir o reducir marcha en modo recarga.

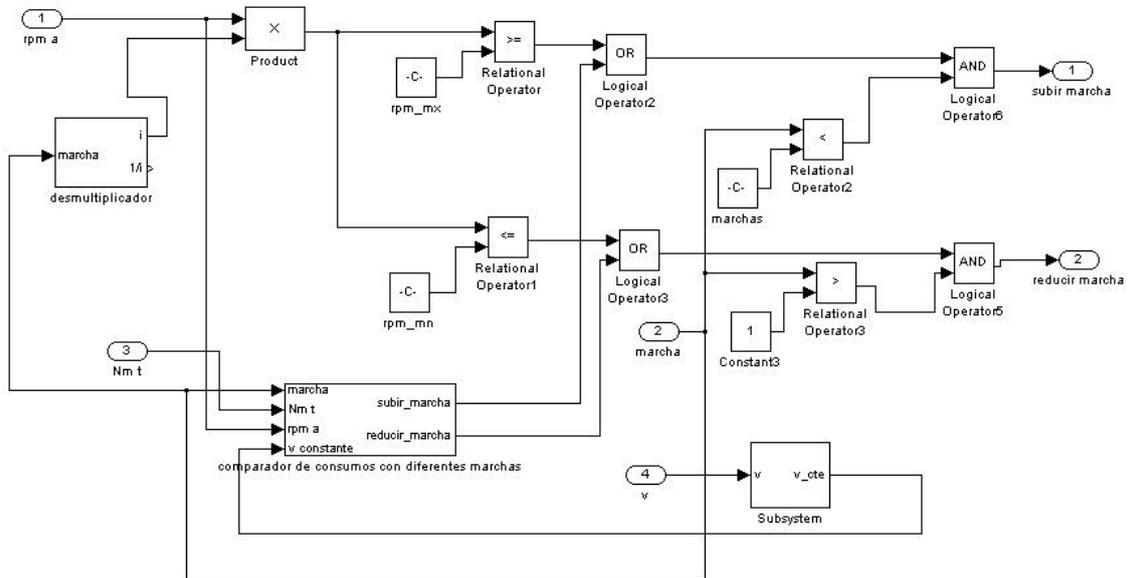


Figura D 4. Bloque %A caja de cambios+

El bloque `%CAH+` ha sido sustituido por el bloque `%Motor+` que, a partir de la señal `%Marcha+` y un bloque `%desmultiplicador+`, transforma el par motor y régimen de giro a la salida del acoplador en par motor y régimen de giro de salida del motor térmico.

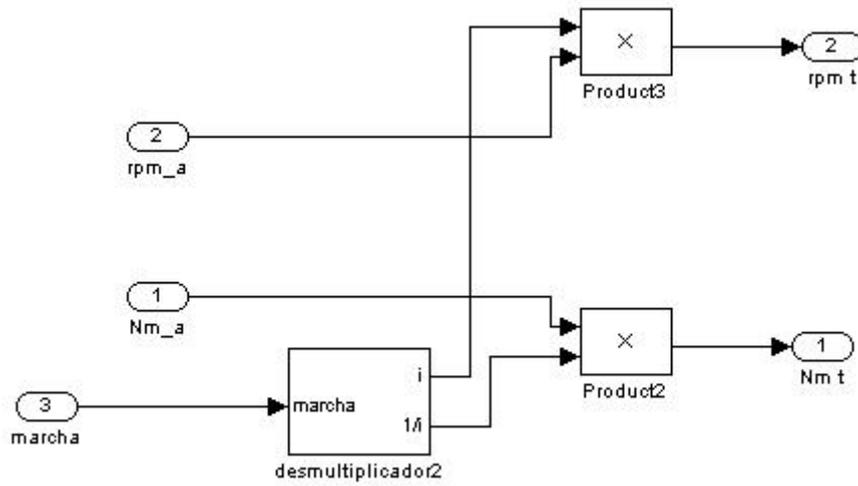


Figura D 5. Bloque `%Motor+`

En el bloque `%Análisis económico+` se ha eliminado la parte dedicada al gasto derivado de la reposición de baterías.



Figura D 6. Bloque `%Análisis económico+`

El bloque %Análisis potencia+ analiza ahora sólo el índice de carga del motor, para lo cual sólo necesita las señales %Nm t+y %rpm t+.

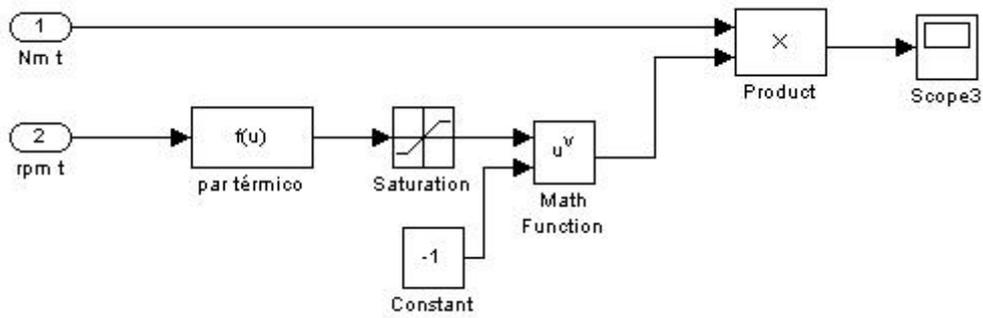


Figura D 7. Bloque %Análisis potencia+.

## E. DISTRIBUCIÓN FUERZA DE FRENADO<sup>4</sup>

En un vehículo la distribución de fuerza de frenado entre ejes no está repartida al 50%, sino que las ruedas delanteras aplican más fuerza de frenado que las traseras. Esto se debe a dos motivos. El primero es que al frenar la masa del vehículo se desplaza hacia el eje delantero, permitiendo a las ruedas delanteras disponer de más adherencia que las traseras. El segundo es que es preferible, por motivos de estabilidad, que sean las ruedas delanteras y no las traseras las que se bloqueen por exceso de fuerza de frenado. La relación entre la fuerza de frenado delantera y trasera aparece indicada mediante la línea  $\beta$ , como se muestra en la figura E 1

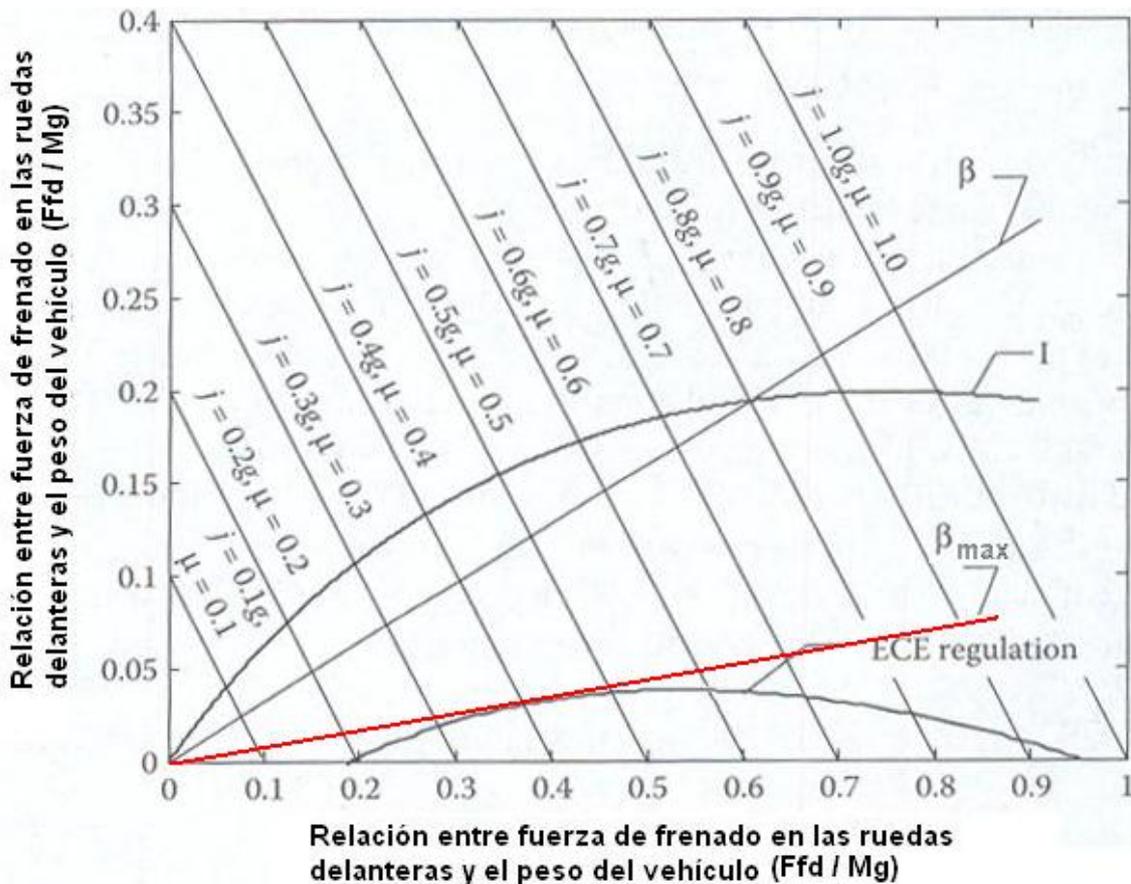


Figura E 1. Reparto de fuerza de frenado entre los ejes delantero y trasero.

Las líneas descendentes indican la máxima deceleración que se puede alcanzar dependiendo del coeficiente de adherencia entre neumático y asfalto. Dicha aceleración es igual (expresada respecto a la aceleración de la gravedad  $g$ ) al coeficiente de adherencia. La regulación ECE indica, mediante la curva parabólica de la parte inferior, la fuerza de frenado mínima que se debe enviar al eje trasero. Dado que con la arquitectura híbrida utilizada sólo la fuerza de frenado del eje delantero puede ser aprovechada para recuperar energía, se tratará de fijar una relación entre fuerzas de frenado que favorezca lo máximo posible la fuerza en el eje delantero, mediante la línea  $\beta_{max}$ .

La fuerza máxima de frenado en las ruedas delanteras está estipulada por la regulación ECE según la siguiente ecuación:

$$\frac{F_{fd}}{P_f} \leq \frac{q+0.07}{0.85} \quad (1)$$

Donde  $F_{fd}$  es la fuerza de frenado en las ruedas delanteras,  $P_f$  es la carga vertical sobre las ruedas delanteras y  $q$  es la relación entre la aceleración del vehículo y la aceleración de la gravedad,  $q = j/g$ . La fuerza de frenado en el eje delantero puede ser expresada como:

$$F_{fd} = \beta F_f \quad (2)$$

Donde  $F_f$  es la fuerza total de frenado, que está relacionada con  $q$  según la ecuación:

$$F_f = Mj = Mgq \quad (3)$$

El índice de aceleración  $q$  y la carga vertical sobre las ruedas delanteras cumplen la siguiente relación:

$$P_f = \frac{Mg}{L} (L_b + qh_g) \quad (4)$$

Donde  $M$  es la masa del vehículo,  $L$  es la longitud de batalla,  $L_b$  es la longitud, en el eje horizontal, desde el eje trasero hasta el centro de gravedad del vehículo, y  $h_g$  es la altura del centro de gravedad del vehículo. Combinando las ecuaciones 2 y 4 obtenemos:

$$\frac{F_{fd}}{P_f} = \frac{\beta qL}{L_b + qh_g} \quad (5)$$

De las ecuaciones 1 y 5 obtenemos:

$$\beta \leq \frac{(q + 0.07)(L_b + qh_g)}{0.85qL} \quad (6)$$

En esta ecuación se puede ver que el límite de  $\beta_{max}$  para cumplir con la regulación ECE es función del índice de aceleración  $q$ . El valor de este índice que permite el mayor valor de  $\beta_{max}$ , puede ser obtenido mediante la siguiente fórmula:

$$\left. \frac{d\beta}{dq} \right|_{q=q^0} = 0 \quad (7)$$

El valor de  $q$  para el cual se obtiene el mayor valor de  $\beta$  es, pues:

$$q^0 = \sqrt{0.07L_b/h_g} \quad (8)$$

Introduciendo este valor de  $q$  en la ecuación 6 hallamos  $\beta_{\max}$ :

$$\beta_{\max} = \frac{2\sqrt{0.07L_b/h_g} + L_b + 0.07h_g}{0.85L} \quad (9)$$

Tomando unos valores típicos para un turismo de  $L = 2.65$  m,  $L_b = 1.378$  m y  $h_g = 0.45$  m, el valor de  $\beta_{\max}$  es de 0.81, redondeado en el modelo de Simulink a 0.8 (da mayor margen de cumplimiento de la normativa ECE).



## F. TABLA DE CARACTERÍSTICAS DE BATERÍAS

En esta tabla se muestran las características de distintos tipos de baterías destinadas a su utilización en automóviles.

System	Specific Energy (Wh/kg)	Peak Power (V/kg)	Energy Efficiency (%)	Cycle Life	Self-Discharge (% per 48 h)	Cost (US\$/kWh)
<i>Acidic Aqueous Solution</i>						
Lead/acid	35-50	150-400	>80	500-1000	0.6	120-150
<i>Alkaline Aqueous Solution</i>						
Nickel/cadmium	50-60	80-150	75	800	1	250-350
Nickel/iron	50-60	80-150	75	1500-2000	3	200-400
Nickel/zinc	55-75	170-260	65	300	1.6	100-300
Ni-MH	70-95	200-300	70	750-1200+	6	200-350
Aluminum/air	200-300	160	<50	?	?	?
Iron/air	80-120	90	60	500+	?	50
Zinc/air	100-220	30-80	60	600+	?	90-120
<i>Flow</i>						
Zinc/bromine	70-85	90-110	65-70	500-2000	?	200-250
Vanadium redox	20-30	110	75-85	-	-	400-450
<i>Molten Salt</i>						
Sodium/sulfur	150-240	230	80	800+	0 <sup>a</sup>	250-450
Sodium/nickel chloride	90-120	130-160	80	1200+	0 <sup>a</sup>	230-345
Lithium/iron sulfide (FeS)	100-130	150-250	80	1000+	?	110
<i>Organic/Lithium</i>						
Li-I	80-130	200-300	>95	1000+	0.7	200

<sup>a</sup> No self-discharge, but some energy loss by cooling.





