

5. Estrategia de control de potencia ECMS: minimización del consumo equivalente

5.1. Introducción

Los algoritmos de optimización global del sistema de gestión de potencia usan técnicas de programación dinámica o de control óptimo [1]. Todas estas técnicas están basadas en el conocimiento a priori de las condiciones de conducción futuras (de las potencias demandadas al vehículo), que en el caso de una simulación por ordenador se proporcionan con un ciclo de conducción. Aunque actualmente se están realizando estudios para llevar a cabo una estrategia de control óptimo mediante la utilización de sistemas GPS para la planificación de caminos, lo cual posibilitaría el empleo de una estrategia de control óptimo, esto no sería viable para una conducción normal no planificada. Evidentemente, por lo anteriormente comentado, hasta ahora las estrategias de control anteriores son inviables como implementación práctica, ya que en un vehículo real necesitamos una estrategia que funcione en tiempo real.

Para la realización de esta estrategia de control en tiempo real ha de considerarse que se desconocen las condiciones futuras de conducción. Para su realización a partir de la idea que se consideraría en una estrategia de control óptimo, la propuesta más consistente es la que se introduce en [1] y se desarrolla en [19], [20], [21], como sistema de control de gestión de potencia en un vehículo híbrido. Esta estrategia conocida como ECMS (“Equivalent Consumption Minimization Strategy”), es el paso de la estrategia de control óptimo al tiempo real (también conocido como control sub-óptimo), para que pueda implementarse como controlador supervisor en el vehículo real.

La idea principal del controlador ECMS es minimizar en cada instante una cierta función de coste, manteniendo las variables de control dentro de unas restricciones. Esta función de coste se evalúa como la suma de la energía utilizada a partir del combustible (el hidrógeno de la pila de combustible en el caso de este proyecto), y la energía utilizada a partir de las baterías. Como ambas no son directamente comparables, se utiliza un factor de equivalencia para comparar la energía del flujo de potencia “reversible” (este es el flujo de potencia que va desde

las baterías al motor eléctrico y viceversa), y la energía usada del combustible (obtenida a partir del hidrógeno, en la pila de combustible). Gracias a este factor de equivalencia, la función de coste se evaluará como la suma de la energía procedente del combustible y la energía de combustible equivalente a la usada a partir de las baterías. Éste es el concepto clave en esta estrategia de control.

Por otra parte, el problema del mantenimiento del estado de carga de las baterías se consigue de manera indirecta, mediante la manipulación del factor de equivalencia en función de las condiciones que se tengan en el sistema que se está controlando, influyendo así directamente en la función de coste y por tanto en la decisión que tomará el controlador supervisor.

Todos estos conceptos serán estudiados y desarrollados en mayor profundidad en los siguientes apartados.

5.2. Base teórica

En la figura 5.1 pueden verse esquemáticamente los componentes del tren de potencia que conforman el sistema de potencia del vehículo híbrido con pila de combustible, así como los flujos de potencia y sus posibles direcciones entre estos componentes. El flujo de potencia en lo que en la figura es llamado “DC-Link” viene dada por:

$$P_{DC}(t) = P_{FC}(t) + P_{batt}(t) \quad (28)$$

siendo P_{DC} la potencia con intensidad en continua que iría hacia (si P_{DC} es positiva) o desde (si P_{DC} es negativa) los convertidores de potencia que conectan con el motor eléctrico, y coincide con la suma de la potencia que viene de la pila (FC: Fuel Cell) y de la que viene (si P_{batt} es positiva) de las baterías (batt) o va hacia a ellas (si P_{batt} es negativa). Con las baterías tenemos por tanto un flujo reversible de energía, y se considerará como potencia positiva cuando se descargan, y como potencia negativa cuando se carguen. El flujo de potencia en la pila de combustible es unidireccional ya que ésta no puede cargarse (potencia siempre mayor o igual a cero).

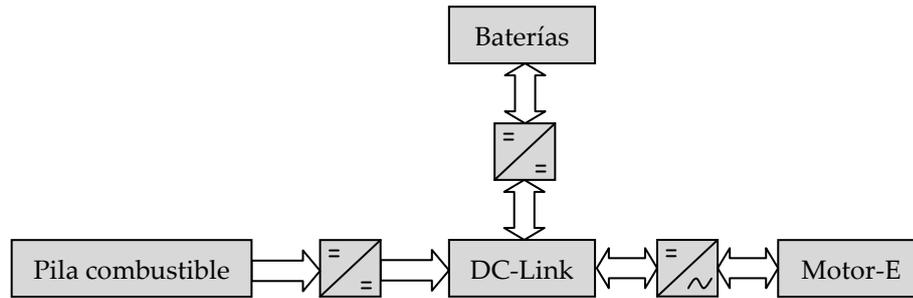


Figura 5.1: Componentes del tren de potencia y flujos de potencia

Idealmente, la distribución de potencia tiene que optimizarse para minimizar el consumo total de hidrógeno, tal y como indica la ecuación 29 que representaría ésta función de coste a minimizar:

$$J = \min \sum_0^{t_f} P_{H_2}(t_k) \cdot \Delta t_k \quad (29)$$

donde $P_{H_2}(t_k)$ es la potencia de hidrógeno necesaria para una potencia de salida de la pila $P_{FC}(t_k)$ en el Δt_k . Su valor sería igual al producto del ratio de flujo másico de hidrógeno $\dot{m}_{H_2}(t_k)$ y el poder calorífico inferior del hidrógeno LHV_{H_2} .

El principal problema de este criterio de minimización global es que el ciclo de conducción debe ser conocido a priori, tal y como se apuntaba anteriormente, así que el control en tiempo real, evidentemente necesario para el control de distribución de potencia en un vehículo, no puede implementarse de esta forma. Pero este inconveniente puede evitarse usando la estrategia de control de minimización del consumo equivalente "ECMS", que propone reemplazar el criterio de minimización global por uno local, el cual reduce el problema a minimizar un consumo de combustible equivalente. Así, para cada instante de tiempo t y con un tiempo de paso Δt se encuentra la variable de control $u(t)$, o directamente las potencias de referencia para la pila de combustible, las baterías y el sistema disipador de potencia (así se ha hecho en la práctica en este proyecto), minimizando una función de coste $J(t)$, definida como sigue:

$$J(t) = P_{H_2}(t) + s(t)P_e(t) \quad (30)$$

donde $J(t)$ es la función de coste a minimizar, la cantidad $P_{H_2}(t)$ es el flujo de potencia de H_2 hacia la pila de combustible, y la cantidad $P_e(t)$ es el flujo de potencia hacia ó desde la fuente de almacenamiento reversible (las baterías), en el intervalo Δt . El factor $s(t)$ convierte el flujo de potencia eléctrica en flujo de potencia química equivalente.

En principio, para este desarrollo teórico, podría considerarse como variable de control el índice de reparto de potencia u , que se define como el cociente entre la potencia de las baterías y la potencia en el DC-Link:

$$u = \frac{P_{\text{batt}}(t)}{P_{\text{DC}}(t)} \rightarrow \begin{cases} u(t) = 1 \rightarrow \text{Toda la potencia necesaria en las ruedas viene} \\ \text{dada por el flujo reversible (supercapacitores)} \\ u(t) = -1 \rightarrow \text{Frenada regenerativa (supercapacitores)} \\ u(t) = 0 \rightarrow \text{Toda la potencia viene de la pila de combustible} \end{cases}$$

La evaluación del factor de equivalencia $s(t)$ representa la base del funcionamiento de la estrategia "ECMS". Este parámetro influye en el comportamiento del sistema de la siguiente forma:

- Si $s(t)$ es demasiado grande, tiende a ser penalizado el uso de la energía de la fuente de almacenamiento reversible, y a incrementarse el consumo de combustible.
- Si $s(t)$ es demasiado pequeño, la fuente reversible de energía se agotará.

Una vez que se ha introducido el concepto de este factor de equivalente, se muestra como la derivación de $s(t)$ se subdivide en los siguientes dos pasos:

1. Se introducen dos factores de equivalencia constantes: s_{dis} y s_{chg} para evaluar el combustible equivalente al uso de energía reversible positiva (s_{dis} que viene de "discharge") y negativa (s_{chg} que viene de "charge") al final del ciclo de conducción.
2. Introduciendo un factor de ponderación $p(t)$, el factor de equivalencia variable $s(t)$ se evalúa como una función de s_{dis} y s_{chg} .

5.2.1. Concepto de consumo de combustible equivalente

Lo que se pretende es evaluar el combustible equivalente a la energía eléctrica usada por un vehículo eléctrico híbrido durante un determinado ciclo de conducción.

El procedimiento requiere simular el modelo del vehículo para varios valores constantes de la variable de control, es decir, para valores constantes en el reparto de potencia entre los dispositivos del coche. Al final de cada simulación, se almacenan los valores del uso de la energía de combustible $E_{\text{H}_2}^f$ y del uso de energía reversible (de las baterías) E_e^f , los cuales representan los valores finales de las cantidades acumulativas $E_{\text{H}_2}(t)$ y $E_e(t)$. Así, estos valores se representan esquemáticamente en la siguiente figura 5.2. La energía de combustible usada en el caso que se representa en la figura es la que tendría que usarse para conducir el ciclo si no hubiera flujo reversible $E_{\text{H}_2}^0$, o lo que es lo mismo, sin frenada regenerativa.

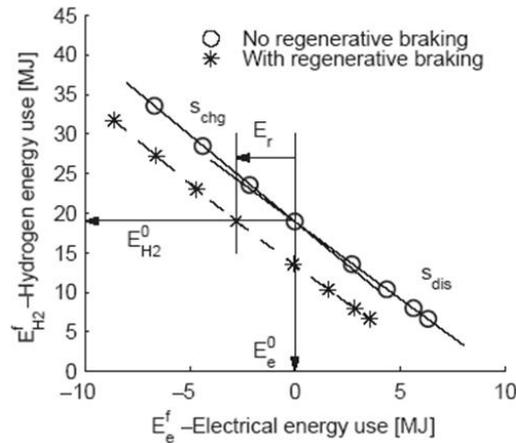


Figura 5.2: Uso de energía de combustible frente a uso de energía eléctrica de las baterías

Se observa que el caso puro de célula de combustible ($E_e^f = 0$) separa la curva $E_{H_2}^f = f(E_e^f)$ en dos segmentos, que son casi lineales en la zona de interés. Las pendientes de estos segmentos rectos son los llamados s_{dis} y s_{chg} . Esta linealidad se presenta incluso si las eficiencias en los flujos de potencia varían de forma no lineal dependiendo del punto de funcionamiento [1].

Por tanto los valores s_{chg} y s_{dis} se definen como sigue:

- El valor s_{chg} es igual a la cantidad de energía química (en J) que se emplea para almacenar 1 J de energía eléctrica en las baterías.
- El valor s_{dis} es igual a la cantidad de energía química (en J) que se ahorra cuando 1 J de energía eléctrica se gasta a partir de las baterías.

Por tanto, la diferencia entre los valores de s_{dis} y s_{chg} resultaría tan sólo de las pérdidas en el flujo reversible.

Como se decía anteriormente, en el planteamiento anterior no se tiene en cuenta ninguna energía recuperada E_r por la frenada regenerativa. Puesto que la cantidad de energía recuperable es constante para una conducción dada, la frenada regenerativa produce una simple translación de la curva considerada, ilustrado en la figura 5.2 por una línea discontinua. En cualquier caso, las pendientes s_{dis} y s_{chg} no se ven afectadas.

Éste procedimiento para obtener los valores de s_{dis} y s_{chg} tendría que realizarse con las pruebas pertinentes en el vehículo en cuestión previamente al funcionamiento normal con el controlador, ya que éste necesita conocer estos valores constantes para su correcto funcionamiento. Podría considerarse que éste procedimiento es una parte de la sintonía del controlador del coche.

5.2.2. Factor de equivalencia variable

Como decíamos, la energía reversible (de las baterías) usada al final del ciclo de conducción E_e^f puede convertirse en una energía de combustible equivalente con un factor de equivalencia s_{dis} (discharge), si es positiva, o s_{chg} (charge), si es negativa. Durante una operación en tiempo real, el algoritmo ECMS usa valores de s_{dis} y s_{chg} que son representativos de las condiciones de conducción en ese momento. Esto puede hacerse almacenando en el controlador ciertos valores que sean típicos de ciclos de conducción urbana, extra-urbana, etc, o bien considerándolos simplemente como valores constantes. Dependiendo del caso en estudio, en unos casos será ventajoso considerar varias combinaciones de s_{dis} y s_{chg} , y en otros será innecesario.

En el momento en que se asumen conocidas las cantidades s_{dis} y s_{chg} para cualquier instante de tiempo, deben usarse para calcular el factor de equivalencia $s(t)$ que convierte la cantidad $E_e(t)$ en una energía de combustible equivalente para poder computarse en la función de coste (ecuación 29). Pero el uso de s_{dis} y s_{chg} depende de si las baterías se están cargando o descargando, o lo que es lo mismo del signo de la energía de las baterías E_e^f , que no puede conocerse en tiempo real ya que no se conocen los valores futuros de $E_e(t)$. Por lo tanto, $s(t)$ no puede reemplazarse con certeza por s_{dis} o s_{chg} . Sin embargo, en lugar de eso podría evaluarse como se presenta en la ecuación 31, introduciendo el factor de ponderación previamente presentado:

$$s(t) = s_{dis} p(t) + s_{chg} [1 - p(t)] \quad (31)$$

De esta forma, el factor de ponderación $p(t)$ variará entre 0 y 1, siendo más cercano a 1 cuando sea más necesario o más probable que las baterías se descarguen, y más cercano a 0 en el caso opuesto.

Para la evaluación de este factor de ponderación se define un tiempo de horizonte t_h , durante el cual se computan los flujos energéticos en el DC-link midiendo la energía E_{DC}^h requerida en este punto del esquema de potencia del vehículo (véase figura 5.1) incluyendo ambas fases de tracción y regenerativa, y correspondiendo a una demanda energética media típica en el horizonte de tiempo t_h . Así mismo se computa la cantidad de energía máxima disponible en la célula de combustible E_{FC}^h (correspondiente a la energía eléctrica potencial disponible en la pila de combustible si fuera a funcionar a plena potencia durante el horizonte de tiempo).

Con todo esto, el factor de ponderación $p(t)$ puede calcularse como sigue (mas detalles en [34]):

$$p(t) = \frac{E_e(t) + E_{DC}^h}{E_{FC}^h} \quad (32)$$

donde $E_e(t)$ es la energía que va desde o hacia las baterías en el instante t , E_{DC}^h es la energía requerida en el DC-link, y E_{FC}^h es la energía máxima disponible en la célula de combustible.

Para un determinado sistema de potencia, la máxima potencia alcanzable a partir de la célula de combustible P_{FC}^{max} , es conocida. Además, puede asumirse una demanda de potencia media típica P_{DC}^{avg} durante el tiempo horizonte que se ha definido. Considerando la energía igual al tiempo horizonte por ésta potencia media, pueden derivarse las siguientes ecuaciones 33 y 34:

$$E_{DC}^h = t_h \cdot P_{DC}^{avg} \quad (33)$$

$$E_{FC}^h = t_h \cdot P_{FC}^{max} \quad (34)$$

de donde puede entonces reescribirse la ecuación 31 de la forma que aparece en la siguiente ecuación 35, donde el horizonte de tiempo t_h se convierte en el único parámetro de ajuste:

$$p(t) = \frac{E_e(t)}{t_h \cdot P_{FC}^{max}} + \frac{P_{DC}^{avg}}{P_{FC}^{max}} \quad (35)$$

La variable $E_e(t)$ de la ecuación 35 proporciona un feedback del estado de carga de las baterías, puesto que es el cómputo de la energía gastada u obtenida en las baterías y describe así la desviación del SOC de su valor inicial. Esto fuerza una operación natural de carga sostenible sin necesidad de ningún controlador adicional, puesto que el factor de ponderación $p(t)$ tomará un valor menor en caso de que las baterías se hayan descargado mucho ($E_e(t)$ será pequeño), haciendo que $s(t)$ se acerque al valor s_{chg} , que hará que la función de coste sea tal que la optimización resulte en una carga de las baterías. Y viceversa en caso de las baterías muy cargadas.

Como puede verse en la ecuación 35, el primer término para el cálculo de $p(t)$ tiene en cuenta la relación entre el cómputo de energía en las baterías y la potencia máxima de la pila durante el horizonte de tiempo, y el segundo término tiene en cuenta la probabilidad de necesitar que se descarguen o carguen las baterías, dependiendo de la potencia que se ha estado necesitando en el DC-link durante los t_h instantes anteriores.

La elección del horizonte de tiempo depende de la agresividad deseada para el control del estado de carga (SOC) de las baterías y de su capacidad. Cuanto más corto sea el horizonte de tiempo, más rápido será el control alcanzado del SOC, siendo a su vez una actuación más agresiva para las baterías. En cambio, cuanto mayor sea el horizonte de tiempo, mayores serán las desviaciones permitidas y más tiempo llevará corregirlas, pero más suave será el control para las baterías.

5.3. Restricciones de control

A partir de las características del vehículo donde se va a implementar el controlador, se ha estudiado el uso de una serie de restricciones.

En primer lugar, la pila de combustible puede dar como máximo 56 kW, y en ningún caso puede absorber potencia, con lo cual el límite inferior para ésta es 0 kW. Por otra parte, la pila de combustible no debe de variar bruscamente la potencia, con lo que se ha establecido un gradiente de potencia máximo de 7 kW/s. Así mismo, el tiempo que ha de transcurrir desde que se le demanda potencia cero a la pila (pila apagada) hasta que se le vuelve a demandar potencia (encendido de la pila) ha de ser superior a un cierto valor, en este caso de 10 minutos.

En cuanto a las baterías, la principal restricción está relacionada con la corriente máxima que son capaces de ceder o soportar. En la frenada regenerativa, las baterías pueden absorber potencia siempre que la corriente no supere los 30 A (en las restricciones se utiliza con un signo menos ya que se ha adoptado el criterio de utilizar potencias negativas cuando las baterías absorben potencia en la frenada regenerativa). Así mismo, cuando las baterías se descargan, es decir ceden potencia, la intensidad no debe superar los 200 A. Dependiendo de la tensión de las baterías en cada instante, y dado que hay 8 baterías, esto se traducirá en unas limitaciones de potencia de las baterías, de la siguiente manera:

$$P_{\max})_{\text{baterías}} = 8 \cdot v(t) \cdot 200 \text{ W} \quad (36)$$

$$P_{\min})_{\text{baterías}} = -8 \cdot v(t) \cdot 30 \text{ W} \quad (37)$$

En cuando al sistema de disipación de potencias, se quema la potencia que proporciona el motor/generador eléctrico en la frenada regenerativa y que no pueden absorber las baterías debido a las restricciones anteriores. La única restricción de control para el sistema de disipación es que el control supervisor ha de asignarle una potencia siempre menor o igual a cero.

Las restricciones anteriores se resumen en el siguiente cuadro:

Cuadro 5.1: Restricciones de control

Parámetro	Unidad	Pila de combustible	Baterías	Resistencias
Potencia	kW	$0 \leq P_{FC} \leq 56$	---	$P_R \leq 0$
Corriente	A	---	$-30 \leq I_{\text{batt}} \leq 200$	---
Incremento máximo potencia	kW/s	$-7 \leq \Delta P_{FC} \leq 7$	---	---
Tiempo OFF→ON	min	10	---	---

5.4. Experimento para la obtención de s_{dis} y s_{chg}

Lo que se ha hecho es seguir el procedimiento anteriormente descrito, cuando se hablaba del concepto del consumo de combustible equivalente. A continuación se muestran los valores de la señal de control utilizada, del uso de energía de combustible $E_{H_2}^f$ y del uso de energía reversible E_e^f .

Este experimento se ha hecho simulando el modelo en Matlab-Simulink, para el ciclo de conducción NEDC (New European Driving Cycle), de 1200 segundos de duración, sin tener en cuenta la frenada regenerativa, que al fin y al cabo, tal y como se explicó anteriormente, lo que hace es desplazar la curva que queremos obtener (línea discontinua de la figura 5.2), sin variar las pendientes de los dos tramos de curva, cuyos valores son el objeto de este experimento.

Se ha tomado como PCI del H₂: 120 MJ/Kg, y a partir de los Kg de H₂ consumidos se ha obtenido la $E_{H_2}^f$. La E_e^f se obtiene simplemente de las potencias demandadas a las baterías multiplicadas por el tiempo de simulación.

Para la realización de esto, se ha utilizado el siguiente que aparece en el archivo 'calculo_sdis_schg.m', utilizando diferentes valores de la variable de control y considerando las restricciones de control. Aparte de la variable de control, en el archivo también habría que poner sin comentar el trozo de código que hace que cuando $u < 0$ no actúe la restricción por corriente de las baterías que impediría que absorba toda la potencia que la pila le está proporcionando en exceso. De esta forma, para ser realistas, hacemos que el exceso de potencia de la pila de combustible sea como mucho lo que las baterías pueden absorber (véase el archivo para mayor claridad).

Tras las simulaciones en el archivo de Simulink 'Hercules_ECMS.mdl', utilizando como función de controlador el archivo anteriormente mencionado 'calculo_sdis_schg.m', los valores obtenidos fueron los siguientes:

Cuadro 5.2: Resultados para el cálculo de s_{dis} y s_{chg}

$u(t)$	$E_{H_2}^f$ (MJ)	E_e^f (MJ)
$-u_{min}$	30.962	-3.151
0	22.421	0
0.2	18.119	1.477
0.4	14.318	2.955
0.6	11.081	4.433
0.8	8.590	5.861
1	0	7.100

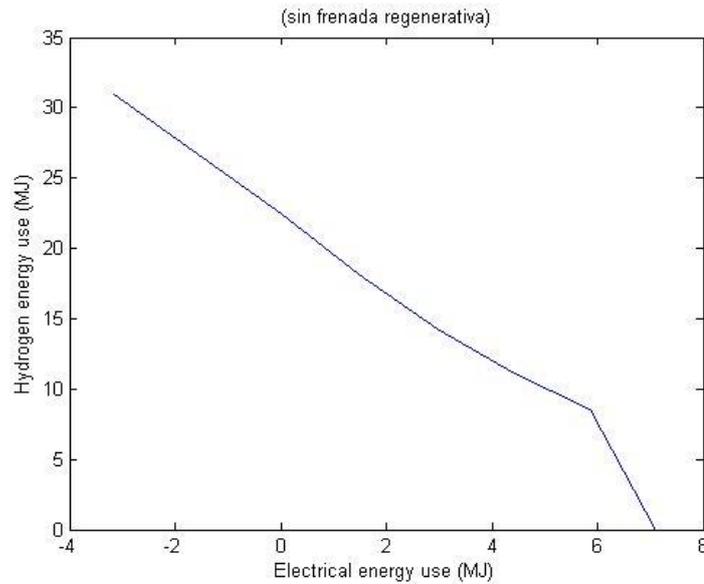


Figura 5.3: Uso de la energía de H₂ frente a uso de energía de las baterías

Como primer comentario de la anterior figura 5.3 es necesario apuntar a que el tramo final de la gráfica tiene una pendiente distinta debido a que la eficiencia de la pila de combustible no es lineal con la potencia, y la gráfica se ve afectado por esto, ya que precisamente este tramo se corresponde a un valor de la señal de control tal que se le demanda muy poca potencia a la pila, y a potencias demandadas a la pila muy bajas el rendimiento cae bruscamente. Por ello, y porque el control supervisor evitará que la pila funcione a muy baja potencia para evitar esta caída en la eficiencia, para el cálculo de s_{dis} y s_{chg} se tomará el tramo de la curva cuya pendiente se mantiene más o menos uniforme.

Según el desarrollo teórico, se supone que la gráfica se divide en dos ramas de pendiente aproximadamente constante, pero distintas una de la otra. A partir de estas pendientes se obtienen los valores de s_{chg} y de s_{dis} . En las simulaciones realizadas se comprueba que se obtienen los mismos valores ya que la diferencia entre ellos se debería exclusivamente a pérdidas del flujo de potencia que va de un dispositivo a otro. Estas pérdidas de flujo no están contempladas en el modelo del coche, de ahí que coincidan los valores.

s_{chg}	s_{dis}
2.02	-2.02

5.5. Implementación y consideraciones prácticas

La implementación del controlador supervisor en el vehículo se muestra en el esquema que aparece en la siguiente figura 5.4.

En la figura, puede verse que, de acuerdo con lo expuesto en la sección 4.5.6, las entradas del controlador supervisor por parte del resto del sistema son:

- Estado de carga de las baterías (SOC)
- El reloj
- La tensión de las baterías ($V_{\text{baterías}}(t)$)
- La potencia requerida en el DC-link (como entrada a los convertidores que conectan con el motor).
- La cantidad de combustible restante en el depósito.

Además, se tienen las entradas generadas por el propio controlador:

- Potencias requeridas en el DC-link en los t_n instantes anteriores.
- Potencia demandada a la pila en el instante anterior.
- Tiempo transcurrido desde que se apagó la pila de combustible (en caso de que se haya apagado).

Puede verse también, que tras el cálculo del factor $s(t)$ y la consiguiente aplicación del algoritmo ECMS minimizando la función de coste, se consiguen las salidas del controlador: potencias asignadas a la pila de combustible, a las baterías y al sistema disipador de potencia, así como la potencia que no se pudo satisfacer.

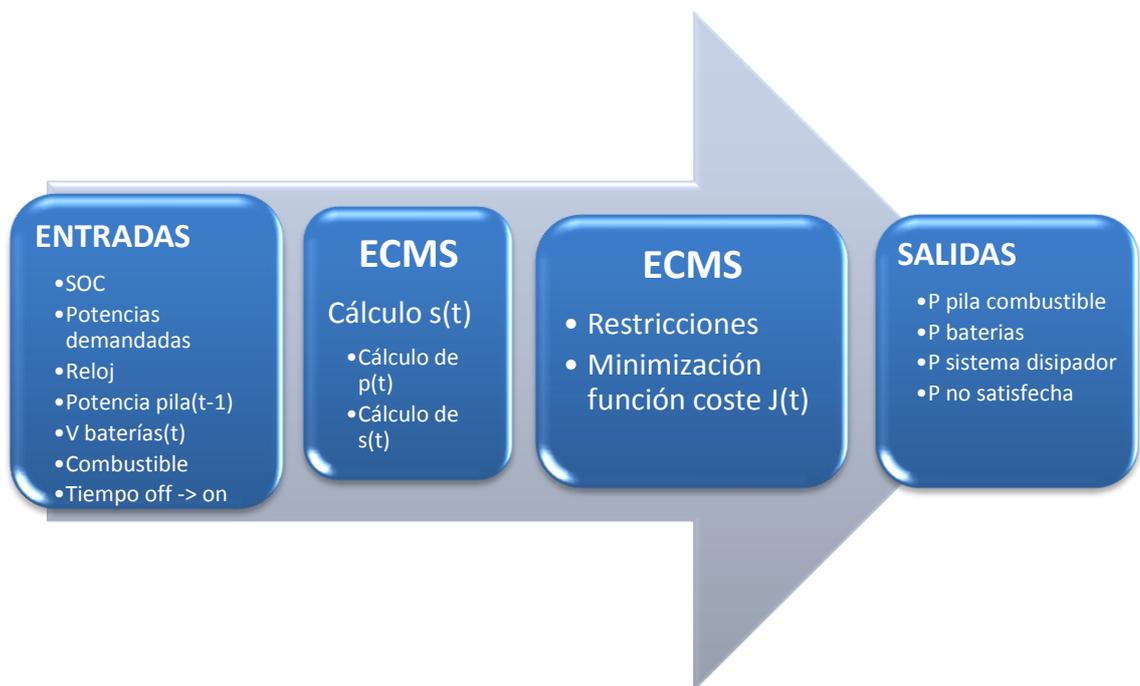


Figura 5.4: Esquema general del controlador

Así mismo, el esquema que, dentro del controlador supervisor, sigue el algoritmo de control ECMS se muestra en la figura 5.5.

En cada instante de tiempo, con un tiempo de paso $\Delta t = 1s$, se realizan los siguientes pasos en el algoritmo de control ECMS (para recordar el esquema de flujos de potencia en el vehículo, volver a ver la figura 5.1):

1. Se mide el flujo de potencia que se necesita en el DC link (viene dado por el modelo del vehículo-transmisión-motor-sistema de acondicionamiento de potencia, tal y como se indica en el apartado 4.4.1).
2. Con los valores almacenados de las potencias demandadas en el DC-link en los t_h instantes anteriores (tiempo horizonte), y con el valor del SOC actual, se calcula el valor de $p(t)$ utilizando la ecuación 35. Hecho esto, se obtiene el valor de $s(t)$ con la ecuación 31.

2.1. Cálculo de la potencia media en el DC-link:

$$P_{DC \text{ avg}} = \frac{\left(\sum_{t-t_h}^t P_{DC \text{ -link}}(t)\right)}{t_h} \quad (38)$$

donde $P_{DC \text{ avg}}$ es la potencia requerida en el DC-link teniendo en cuenta los t_h instantes anteriores.

2.2. Cálculo de la energía en las baterías: Se ha modificado el enfoque inicial que planteaba la introducción teórica (sección 5.2) para que se penalice la desviación de la energía en las baterías respecto a la que tienen éstas cuando están a media carga (SOC=0,5) en lugar de penalizar la desviación de la energía en las baterías con respecto a la que tenían inicialmente.

$$E_e(t) = (SOC - 0,5) \cdot 8 \cdot Q_r \quad (39)$$

donde $E_e(t)$ representa la desviación de energía de las baterías respecto a la que tienen a media carga (se considera éste el estado óptimo para las baterías), SOC es el estado de carga de las baterías, y Q_r es la carga de una batería (4475520 J).

2.3. Cálculo del factor de probabilidad $p(t)$:

$$p(t) = \frac{E_e(t)}{t_h \cdot P_{FC \text{ máx}}} \cdot f + \frac{P_{DC \text{ avg}}}{P_{FC \text{ máx}}} \quad (40)$$

donde $P_{FC \text{ máx}}$ es la máxima potencia que puede dar la pila (56 kW), y f es un factor de corrección que se ha decidido incluir en este proyecto, para no ser

demasiado estrictos en cuanto a la penalización de las desviaciones del SOC respecto a 0,5, permitiéndose mayores oscilaciones respecto a este valor y consiguiéndose así un mejor aprovechamiento de las ventajas que tiene utilizar las baterías (se ha sintonizado f como 0,1). Una explicación más detallada se ofrece en la sección 5.5.3.

Como puede observarse, tras la definición de una serie de parámetros constantes como Q_r , f , y t_n , al final el cálculo de $p(t)$ tan sólo depende en cada instante del estado de carga de las baterías (SOC) y de la potencia media requerida en el DC-link ($P_{DC\ avg}$).

2.4. Cálculo de $s(t)$ utilizando la ecuación 31:

$$s(t) = s_{dis} p(t) + s_{chg} [1 - p(t)] \quad (31)$$

3. Restricciones: se actualizan las restricciones en el instante de tiempo actual, las cuales dependen de la tensión en las baterías, el SOC, la potencia que se le demandó a la pila en el instante anterior y el tiempo que ha pasado desde que se apagó la pila (en su caso). Posteriormente se explica cómo se escogen estas restricciones.
4. Se aplica el algoritmo de minimización del combustible equivalente. Se calcula el uso de energía de combustible $P_{H_2}(t) \cdot \Delta t$ usando los datos derivados del modelo. Adicionalmente, usando el procedimiento descrito en la sección 5.2, se calcula el uso de energía reversible $P_e(t) \cdot \Delta t$. Así, se obtiene la función de coste a minimizar (ecuación 30).

$$\min J(t) = P_{pila} + s(t) \cdot P_{baterías} - 10^6 \cdot P_{disipada} + 10^7 \cdot P_{no\ entregada} \quad (32)$$

sa:

$$\begin{aligned} P_{pila} + P_{baterías} + P_{disipada} + P_{no\ entregada} &= P_{DC-link} \\ -7000 + P_{FC}(t-1) &\leq P_{FC}(t) \leq 7000 + P_{FC}(t-1) \\ 4000 &\leq P_{FC}(t) \leq 56000 \quad \text{ó} \quad P_{FC} = 0 \\ -8 \cdot v(t) \cdot 30 &\leq P_{baterías}(t) \leq 8 \cdot v(t) \cdot 200 \\ P_{disipada} &\leq 0 \\ P_{no\ entregada} &\geq 0 \end{aligned}$$

Se han escogido los pesos para la potencia disipada y la no entregada que en la función de coste aparecen porque, en el caso de la potencia disipada, se necesitaba una alta penalización con valor negativo (ya que esta potencia sólo toma valores negativos), y en el caso de la potencia no entregada un valor alto y positivo, mayor en módulo que el anterior, ya que

lo que se desea es que haya la menor cantidad de potencia que no satisfecha posible.

El problema de optimización en cada instante se resuelve una función de Matlab llamada "linprog", que resuelve este tipo de problemas de programación lineal con restricciones.

5. Finalmente se toma como valor de la variable de control $u(t)$ aquel que minimiza la función de coste $J(t)$. En este proyecto, en lugar de la señal de control $u(t)$, se calculan directamente las potencias asignadas a cada dispositivo de potencia.

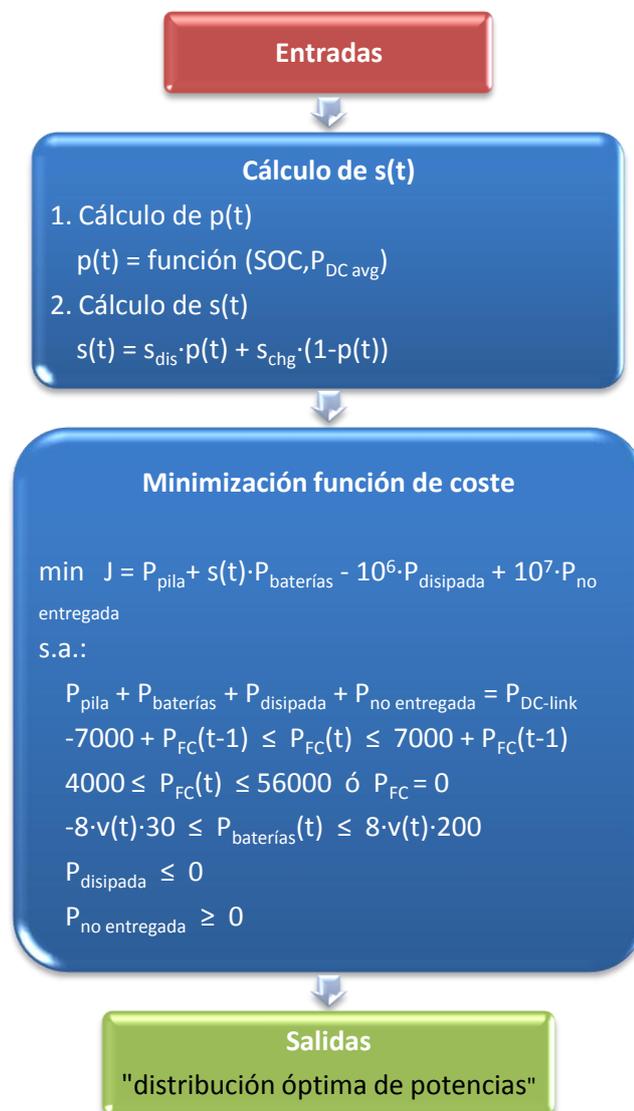


Figura 5.5: Diagrama de flujo: Algoritmo ECMS

5.5.1. Establecimiento de las restricciones para la minimización

Las restricciones tenidas en cuenta (descritas en el apartado “restricciones de control” mediante una tabla) se han materializado con las expresiones matemáticas que a continuación se exponen, y que se acaban de enumerar en el anterior desarrollo de los pasos que sigue el algoritmo ECMS.

- $P_{\text{pila}} + P_{\text{batt}} + P_{\text{disipada}} + P_{\text{no entregada}} = P_{\text{DC-link}}$

La potencia que en cada instante se requiere en el DC-link ha de ser distribuida entre los dispositivos de potencia del vehículo. Así, se intentará satisfacer entre la pila, las baterías y el sistema de disipación de potencia, según los resultados de la minimización de la función de coste lo indique. Con un coste mayor está penalizada la potencia no entregada, la cual es posible que exista debido al resto de restricciones.

- $-7000 + P_{\text{FC}}(t-1) \leq P_{\text{FC}}(t) \leq 7000 + P_{\text{FC}}(t-1)$

Con esta restricción se limita la derivada de la potencia en la pila de combustible (limitando el incremento de potencia en cada segundo). Así se previene la starvation de la pila.

- $4000 \leq P_{\text{FC}}(t) \leq 56000$ ó $P_{\text{FC}} = 0$

La potencia de la pila de combustible ha de ser siempre positiva y menor que 56 kW. Se escoge un límite inferior de potencia para evitar el rango de menor eficiencia de la pila (ver figura 4.13) en caso de que la pila esté encendida. En caso de que la pila esté apagada, se fuerza a que la potencia asignada a la pila de combustible sea nula (el apagado/encendido de la pila se desarrolla en 4.4.2).

- $-8 \cdot v(t) \cdot 30 \leq P_{\text{baterías}}(t) \leq 8 \cdot v(t) \cdot 200$

La potencia en las baterías se limita por la máxima intensidad de carga (30A) y la máxima intensidad de descarga (200A). Va multiplicado por 8 porque hay 8 baterías.

- $P_{\text{disipada}} \leq 0$

La potencia del sistema disipador se limita simplemente haciendo que sea negativa.

- $P_{\text{no entregada}} \geq 0$

La potencia no entregada ha de ser positiva o nula.

5.5.2. Apagado / Encendido de la pila de combustible

Como recordatorio, véase la figura 5.6, en la que se muestra la ventana que aparece al hacer doble-click sobre el bloque “controlador supervisor”. En esta ventana, existe la posibilidad de escoger como variante del algoritmo ECMS aquel que tiene un selector de modo de conducción. Al escoger ésta variante, podemos escoger entre el modo de conducción por ciudad y el modo de conducción por carretera:

- **Modo carretera:** El sistema de control funciona igual que en la segunda variante del algoritmo, manteniendo la pila de combustible siempre encendida con una potencia mínima asignada de 4 kW, y restringiendo además el incremento máximo de potencia que puede existir de un segundo a otro en la potencia asignada a la pila de combustible.
- **Modo ciudad:** El sistema de control funciona de la misma manera, con la excepción de que el usuario permite al controlador que, en caso de que se den determinadas condiciones, como que el estado de carga de las baterías superen un cierto valor ($SOC > 0,7$), el controlador supervisor pueda apagar la pila de combustible (potencia asignada nula). Se asume que, en caso de apagar la pila, es necesario esperar un tiempo (en el controlador se ha asignado 10 min), hasta que pueda volver a encenderse.

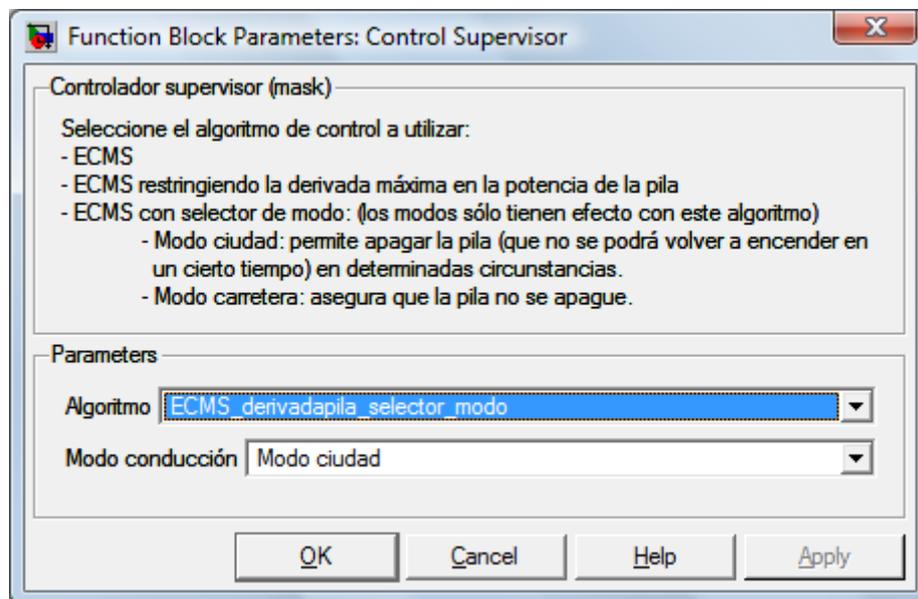


Figura 5.6: Máscara del bloque “controlador supervisor”

Tras el estudio de diversas posibilidades para el diseño del controlador supervisor, se ha llegado a que ésta era la posibilidad más factible y realista, por las razones que a continuación se indican.

Una de las primeras ideas que se plantearon fue la de evitar demandar potencia a la pila de combustible en el rango de menor eficiencia, estableciéndose una potencia mínima asignable a la pila de 4 kW (se corresponde con una eficiencia aproximadamente del 42%). Otra posibilidad que se planteó fue incluir en la función de coste una penalización respecto a la diferencia entre la potencia demandada a la pila y la correspondiente al rendimiento óptimo. Esto, además de ser dificultoso por la no linealidad de la curva de eficiencias, se descartó porque iría en contra del objetivo principal del controlador, que es satisfacer la potencia demandada por el conductor minimizando el hidrógeno consumido. Finalmente se escogió la primera opción ya que era más simple y la que mejores resultados ofrecía en las simulaciones.

Además, se pensó que en conducción urbana, muchas veces hay largos periodos en los que el vehículo se encuentra parado en atascos o circulando a muy baja velocidad, por lo que es probable que el estado de carga de las baterías suba mucho debido a que la pila tiene una potencia mínima asignada de 4 kW. Entonces se decidió que sería bueno posibilitar que la pila se apagase. Una opción era el apagado manual de la pila, lo cual se descartó porque se pensó que sería más beneficioso para el conductor un apagado automático, para que éste no tuviese que estar pendiente de este asunto. Otra posibilidad fue pensar en un predictor de las condiciones de conducción, lo cual acabó descartándose porque se pensó en la posibilidad, bastante frecuente, de salir con el coche de una ciudad con objeto a tomar una autopista, y que al principio el predictor podría ver que el estilo de conducción es urbano, y tomar la decisión de apagar la pila, lo cual sería grave porque no podría volverse a encender en 10 min, y si en ese momento entramos en la autopista contaríamos con 56 kW menos de potencia durante ese tiempo. Finalmente, de nuevo se escogió la opción más sencilla y a su vez realista. Se pensó que el conductor podría tomar la decisión de activar el “modo ciudad” cuando no pensase salir a la autopista, para que el controlador pueda decidir si apagar la pila, cuando el SOC haya subido mucho, por ejemplo por atascos. Así mismo, puede escoger el “modo carretera” para forzar a que no se apague la pila, previendo que va a conducir por una autopista en breve, por ejemplo.

A continuación puede verse un diagrama de flujo en el que se indica la manera en la que se toma la decisión de apagar la pila (figura 5.7). Es muy simple pero a su vez bastante realista a la hora de implantarse en el vehículo.

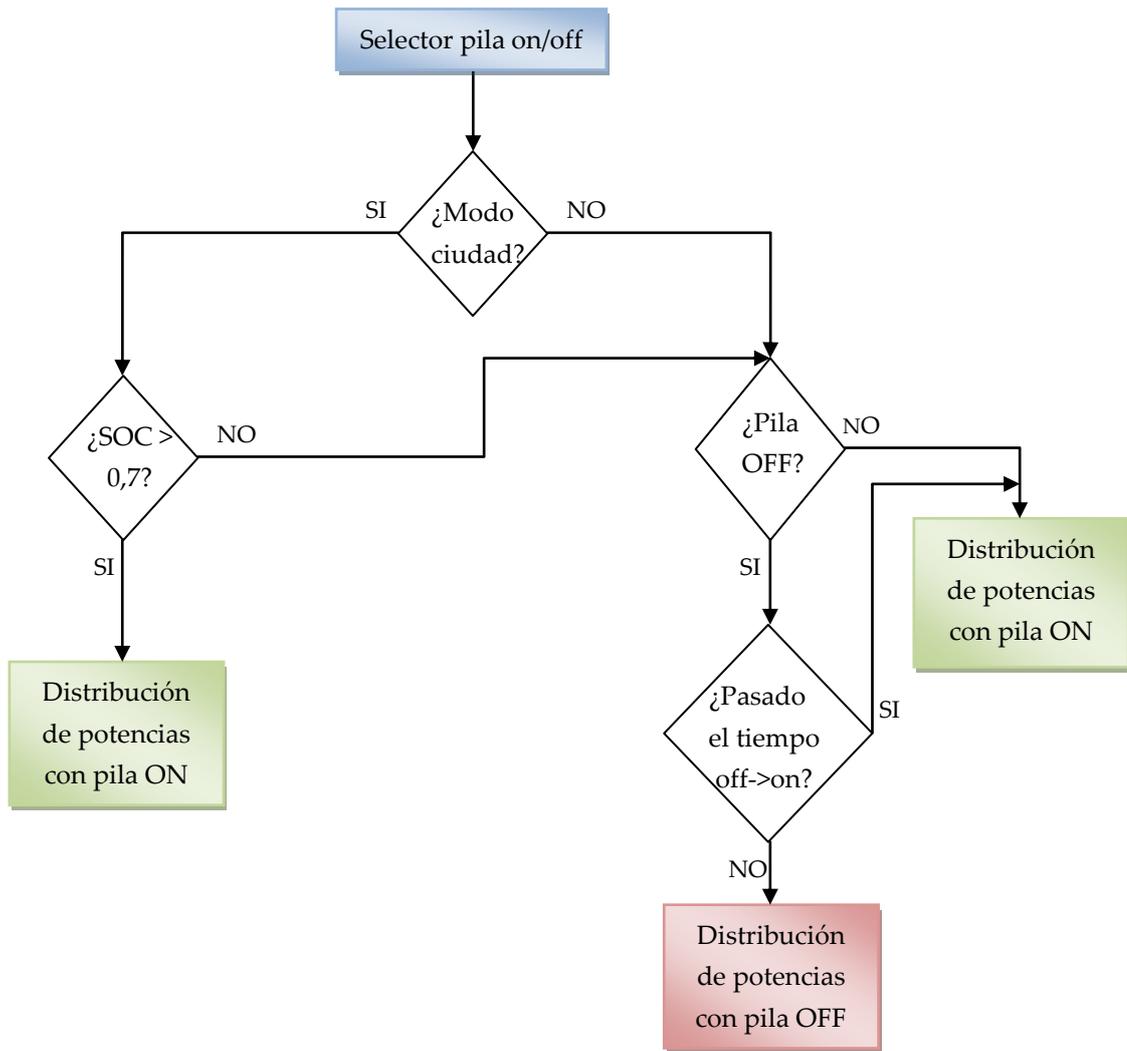


Figura 5.7: Diagrama de flujo del “selector pila on/off”

Como se verá en posteriores simulaciones, al seleccionar el modo ciudad el controlador asume que al principio de la simulación la pila se acaba de apagar. Entonces espera el tiempo de encendido (10 minutos) y comprueba si el estado de carga ya es menor que 0,7, con lo que espera a que se satisfagan ambas condiciones para encender la pila: que hayan pasado 10 min y que el SOC < 0,7. En caso de que durante la conducción el conductor cambie de idea y accione el modo carretera, si la pila ya se ha apagado, el controlador esperará a que se complete el tiempo de encendido y trascurrido éste encenderá la pila con independencia del SOC.

5.5.3. Modificación para adaptar el controlador al sistema físico real

En este apartado lo que se presenta es un ajuste del factor de ponderación $p(t)$, que como decíamos es el único parámetro de ajuste que, tras definir el modelo del vehículo, tiene en realidad el controlador.

Como se veían en los resultados gráficos para el controlador, el ajuste que este factor de ponderación hacía sobre el estado de descarga de las baterías era bueno, pero quizás lo era demasiado. Es decir, en realidad no existe la necesidad de que el estado de descarga se ajuste de forma muy exacta en torno al valor de 0.5 (valor óptimo). Quizás se aprovecharía más las ventajas de las baterías si el controlador, sin dejar de hacer que el SOC gire en torno al valor óptimo, dejase un poco de más holgura.

En las simulaciones se han medido los dos miembros que componen el factor de ponderación, para comprobar que efectivamente el primer miembro (el que penaliza la desviación energética de las baterías con la correspondiente a un SOD igual a 0.5) era dominante respecto al segundo miembro (el que utilizaba una predicción estadística de la potencia demandada). Así, se ha pensado multiplicar el primer miembro por un cierto factor menor que la unidad, de forma que se amplíe la permisibilidad de desviación con respecto a 0,5. Suponiendo un caso extremo en el que la potencia demandada fuera muy alta y la media fuese en torno al valor de 1.5 veces la potencia máxima en la pila, el segundo miembro tomaría un valor igual a 1,5. Si quiero asegurarme en este caso de que las baterías comiencen a recargarse en torno a SOD=0,65 por ejemplo, o sea que $p(t)=0$, resolviendo la ecuación obtenemos el valor de dicho factor:

$$p(t) = 0 = \frac{Ee}{th \cdot PFCmax} + \frac{Pavg}{PFCmax} = \frac{Ee}{th \cdot PFCmax} + 1,5$$

$$Ee = f \cdot ((0.5 - 0.65) \cdot 9 \cdot Qr) = -1.5 \cdot 336000 \rightarrow f = \mathbf{0.0939}$$

Así conseguimos nuestro propósito, que es ser un poco más permisivos con las desviaciones del SOD respecto del óptimo. En el código se ha puesto este factor de forma aproximada, como $f=0.1$.

5.6. Resultados de las simulaciones

En esta sección se presentan algunos resultados del control implementado sobre distintos ciclos de conducción, utilizando el vehículo híbrido con pila de combustible en estudio en este proyecto: coche HERCULES. Así, se utilizará el archivo 'Hercules_algoritmos_ECMS.mdl'. Para las simulaciones, se utilizará la tercera modalidad del algoritmo, que se acaba de presentar en el apartado anterior, y que permite el apagado de la pila. Se escoge ésta porque es la más completa y engloba todas las funcionalidades y restricciones de control (limitación del incremento en la potencia asignada a la pila en 7 kW/s).

En primer lugar, se muestra a título informativo la herramienta completa en Simulink en la siguiente figura 5.8 (para mejor observación ábrase el archivo 'Hercules_algoritmos_ECMS.mdl'). Su uso se explica en mayor detalle en el anexo "Manual de usuario".

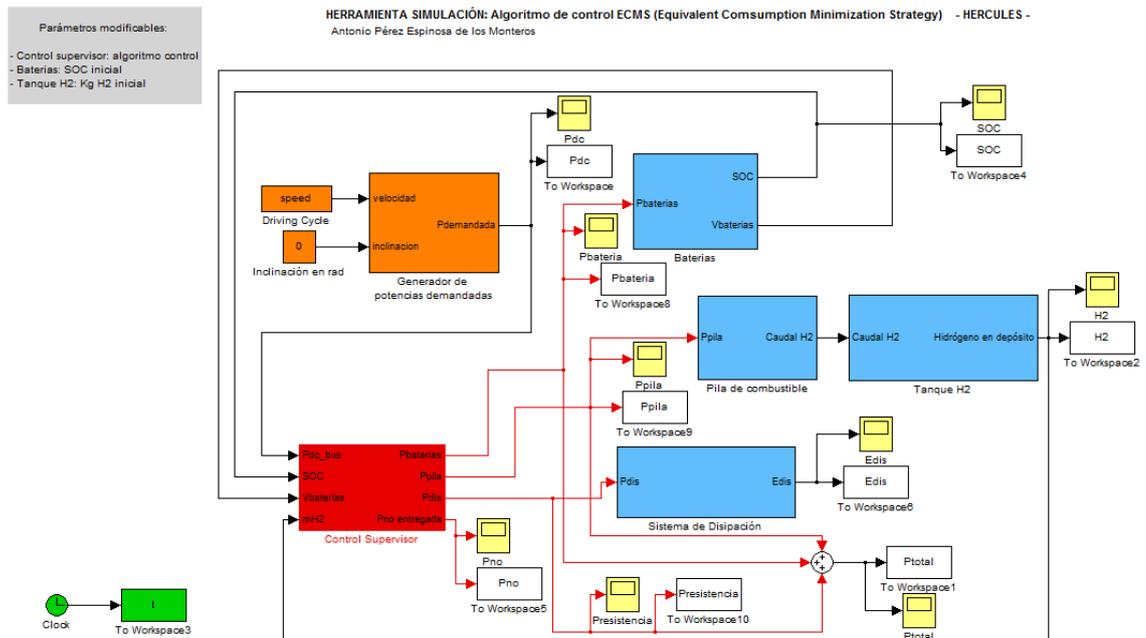


Figura 5.8: Herramienta en Matlab/Simulink para simular el algoritmo ECMS

A continuación se van a mostrar diferentes simulaciones con distintos parámetros de simulación, y se comentarán los resultados obtenidos para cada una.

El formato en el que se presentarán los resultados será siempre el mismo:

- Figura 1: Ciclo de conducción utilizado
- Figura 2: Potencias asignadas a los dispositivos de potencia, SOC, depósito de combustible e intensidad en las baterías.
- Figura 3: Potencia demandada, potencia satisfecha y potencia no entregada.

5.6.1. Simulación 1

A continuación se presentan los parámetros de simulación elegidos:

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN			
Ciclo de conducción	Modo conducción	SOC inicial	H ₂ inicial
NEDC	Modo carretera	0.4	2,4 Kg

Véase en las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 los resultados de la simulación.

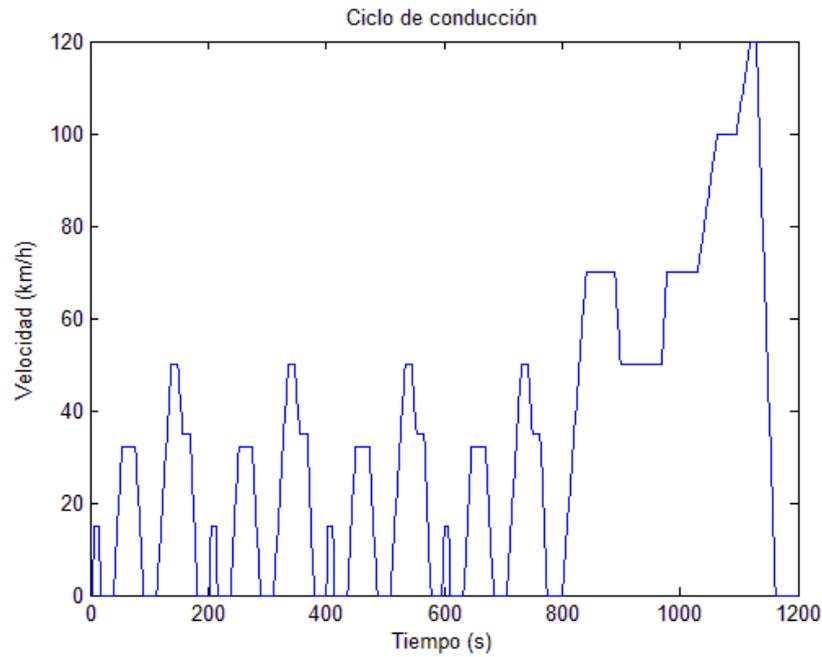


Figura 5.9: New European Driving Cycle

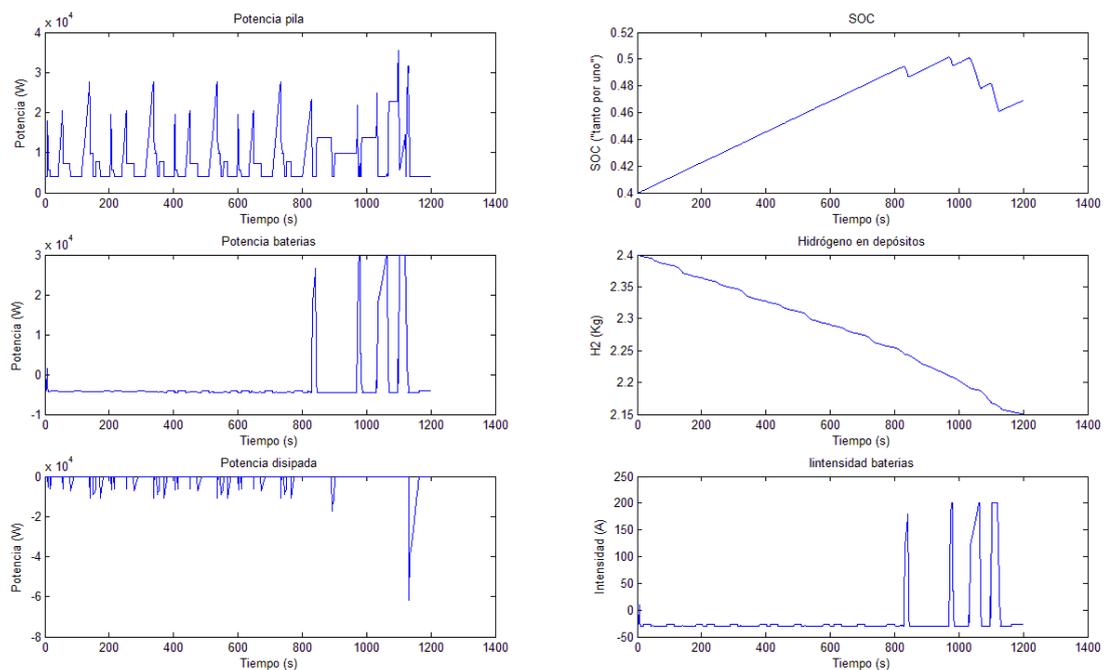


Figura 5.10: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

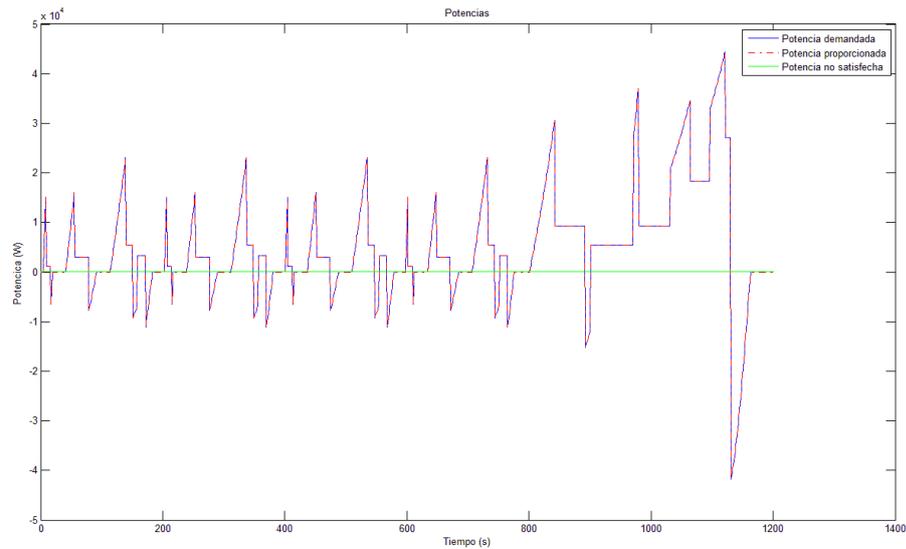


Figura 5.11: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

En esta simulación se observa que en el primer tramo de simulación, que tal y como se ve en la figura 5.9 corresponde a un tramo de conducción urbana, las baterías están cargándose gracias al exceso de potencia que la pila de combustible está dando para ello y gracias al aporte de las frenadas regenerativas. La pila se encarga de satisfacer la potencia demandada por el ciclo de conducción aportando además cierto exceso de potencia para cargar las baterías. Esto es así ya que se parte de un estado de carga de 0.4, y el controlador es capaz de acercarse más al SOC a 0,5 (el considerado óptimo) mientras satisface la demanda del conductor.

Un poco después de los 800 segundos de simulación, la batería empieza a aportar potencia para satisfacer la demanda del conductor, ya sea por la limitación en el incremento máximo de potencia en la pila (7 kW/s) o porque el SOC se encuentra cercano a 0,5 y el controlador decide repartir la potencia de esta forma para que no aumente mucho el hidrógeno consumido. Esto es porque ya está funcionando en torno a su punto óptimo de descarga (0.5) y colabora con la pila en la satisfacción de picos de potencia, y absorbe la frenada regenerativa. También se comprueba cómo cerca del final de la simulación el sistema dissipador de potencia absorbe una gran cantidad de potencia, debido a la potente frenada que existe al final del ciclo de conducción.

Puede comprobarse que las restricciones se cumplen, ya que la potencia asignada a la pila no varía más de 7 kW en cada segundo, la intensidad de las baterías se mantiene entre -30 y 200 A, etc. Así mismo se comprueba en la figura 5.11 que la potencia se satisface perfectamente en este ciclo de conducción.

5.6.2. Simulación 2

A continuación se presentan los parámetros de simulación elegidos:

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN			
Ciclo de conducción	Modo conducción	SOC inicial	H ₂ inicial
NEDC	Modo carretera	0.6	2,4 Kg

Véase en las figuras 5.12, 5.13 y 5.14 los resultados de la simulación.

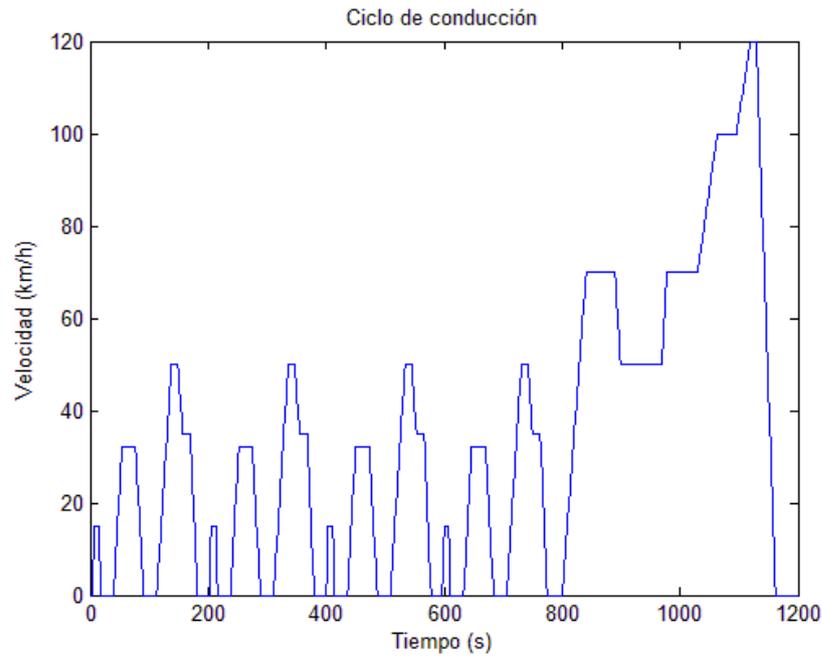


Figura 5.12: New European Driving Cycle

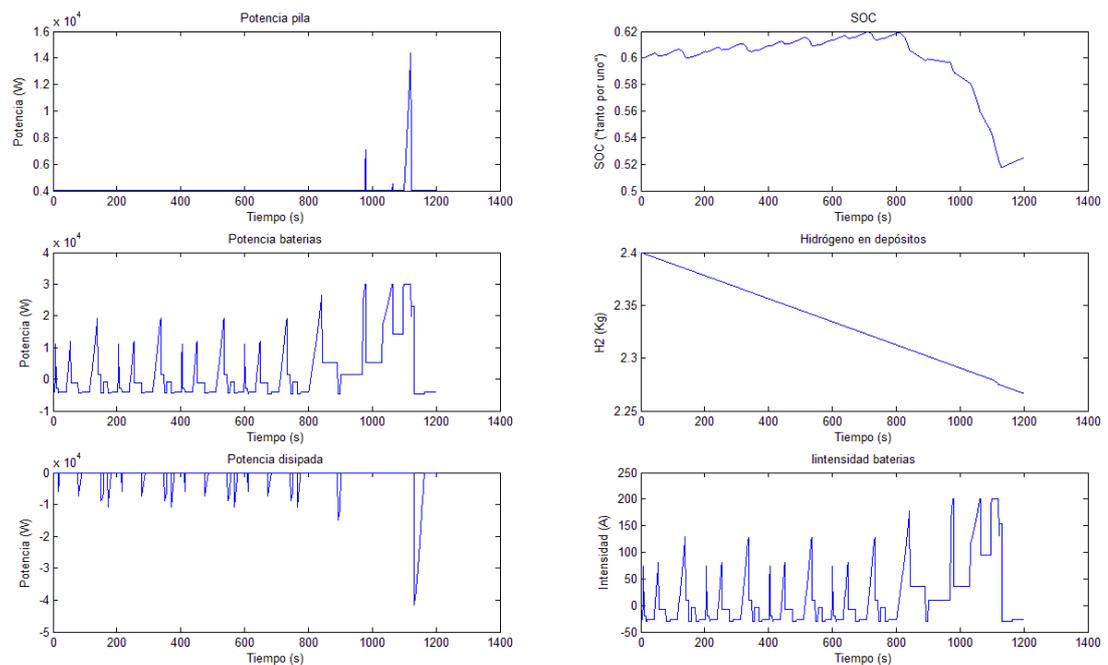


Figura 5.13: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

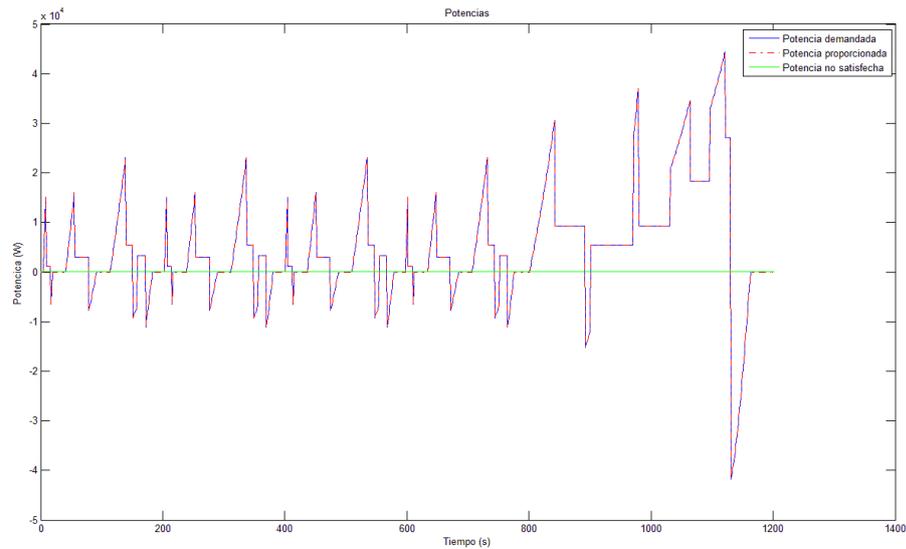


Figura 5.14: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

Esta simulación es totalmente análoga a la anterior, con la única diferencia de que se parte de un estado de carga inicial de las baterías de 0,6, más cargadas que en el caso anterior.

Además de las consideraciones hechas anteriormente, en esta simulación puede comprobarse que al estar las baterías cargadas por encima del valor óptimo (0,5), la pila de combustible da una base de potencia (4 kW, su potencia mínima asignable) durante el tramo de conducción urbana, mientras que las baterías se encargan de aportar y absorber los picos de potencia. En el segundo tramo, donde se alcanzan velocidades mayores, la pila contribuye aportando más potencia en algunos instantes en los que las baterías por sí solas no pueden por su limitación en la intensidad de descarga (200 A), como puede verse en la figura 5.13.

Finalmente comentar que de nuevo se cumplen las restricciones de control y se satisface completamente la potencia demandada por el conductor. Así mismo el SOC permanece en el entorno de 0.5.

5.6.3. Simulación 3

A continuación se presentan los parámetros de simulación elegidos:

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN			
Ciclo de conducción	Modo conducción	SOC inicial	H ₂ inicial
NEDC	Modo ciudad	0.8	2,4 Kg

Véase en las figuras 5.15, 5.16 y 5.17 los resultados de la simulación.

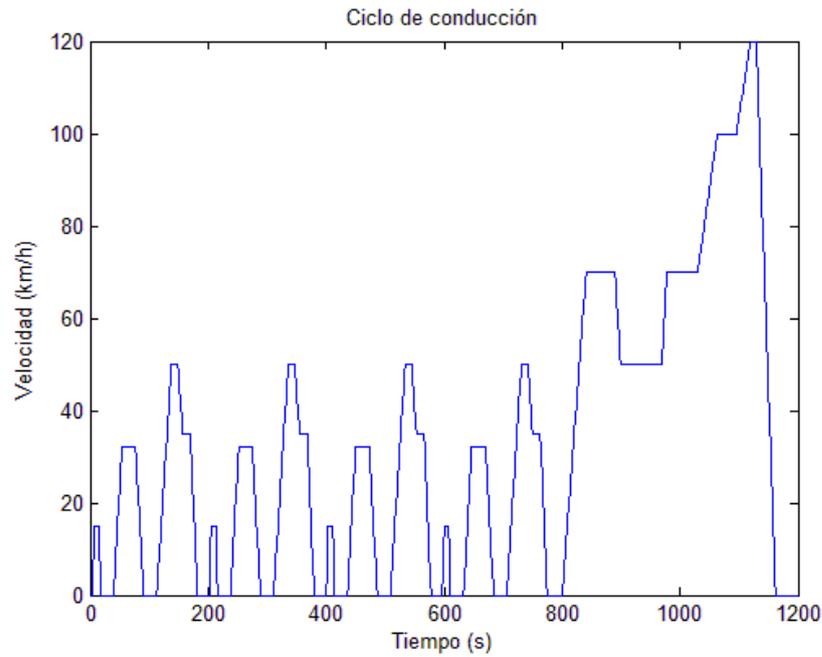


Figura 5.15: New European Driving Cycle

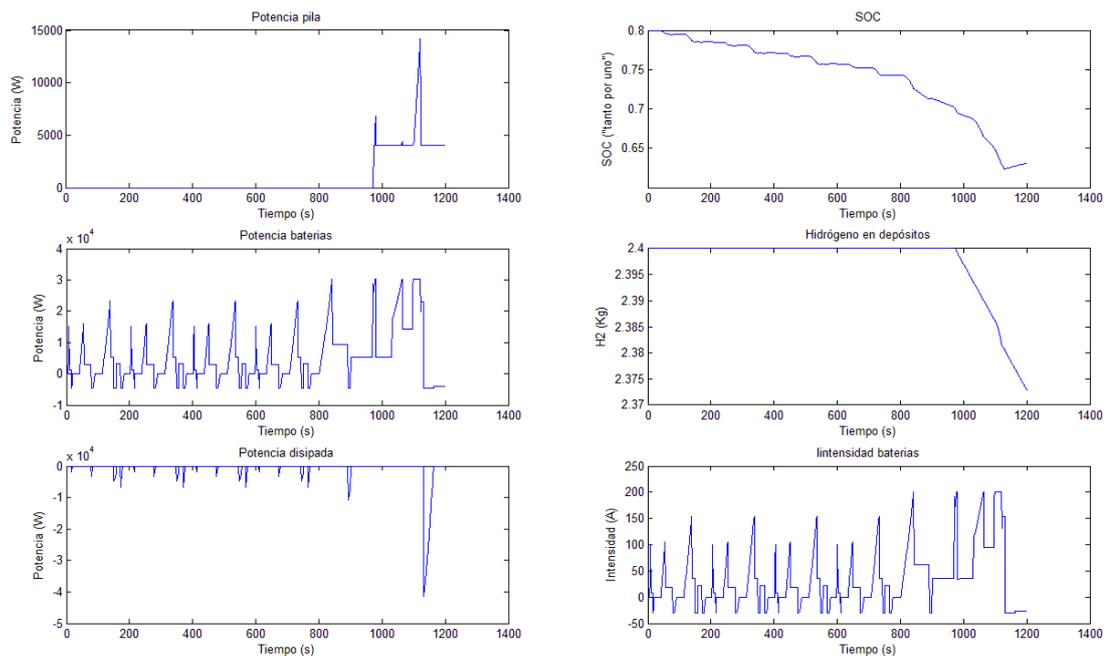


Figura 5.16: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

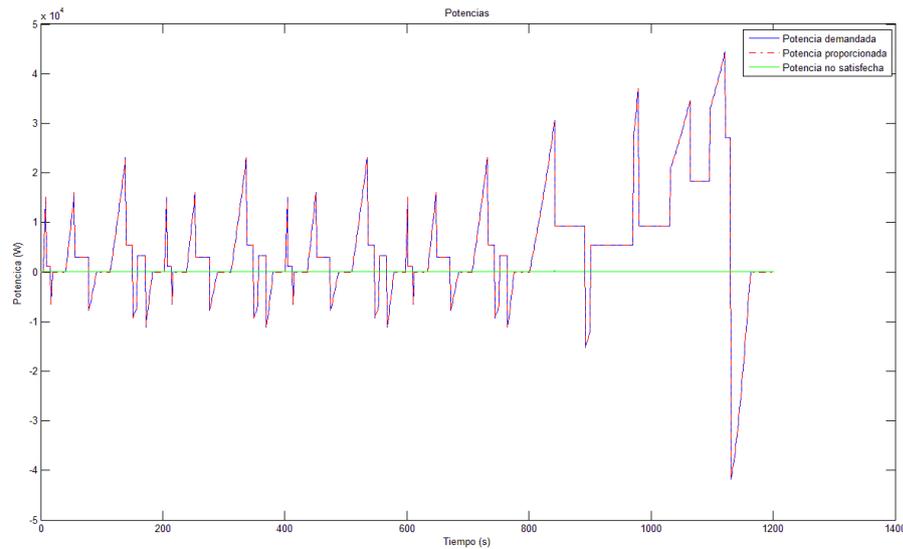


Figura 5.17: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

En esta simulación se ha escogido el modo de conducción por ciudad y un estado de carga inicial de las baterías muy alto (0,8), para ilustrar el funcionamiento de éste. Puede verse que en un primer momento se apaga la pila de combustible (potencia asignada nula), y toda la potencia demandada se satisface con las baterías. Cuando el tiempo para volver a encender la pila ha transcurrido (10 min, o lo que es lo mismo 600 s) no se enciende la pila porque el SOC es aún bastante alto. Sólo cuando el SOC baja de 0,7 se enciende la pila para aportar potencia (ver figura 5.13).

A pesar de que el ciclo de conducción NEDC tiene un tramo de conducción por autopista, y tener seleccionado el modo ciudad, la potencia demandada se satisface por completo debido a que da la casualidad de que cuando el SOC baja de 0,7 es cuando se está entrando en ese tramo de autopista.

Utilizando el mismo ciclo de conducción NEDC, si imaginamos que el conductor enciende el modo ciudad al principio de la simulación, con el SOC=0,8, y por tanto se apaga la pila de combustible, pero justo tras arrancar decide cambiar al modo carretera para tener la potencia de la pila disponible cuanto antes, la pila de combustible se encendería inmediatamente después de que transcurra el tiempo de encendido de la pila, sin esperar a que el SOC baje de 0,7. Esto puede simularse seleccionando el modo carretera en medio de la simulación. Puede verse el reparto de potencias que se obtendría en la siguiente figura 5.18, así como también puede verse como se satisface la potencia demandada en la figura 5.19.

A continuación se presentan los resultados para la variante de la simulación 3, en la que el modo ciudad está activo al principio de la simulación y una vez comenzada ésta se activa el modo carretera. Con ello queda ilustrado lo expuesto en el párrafo anterior.

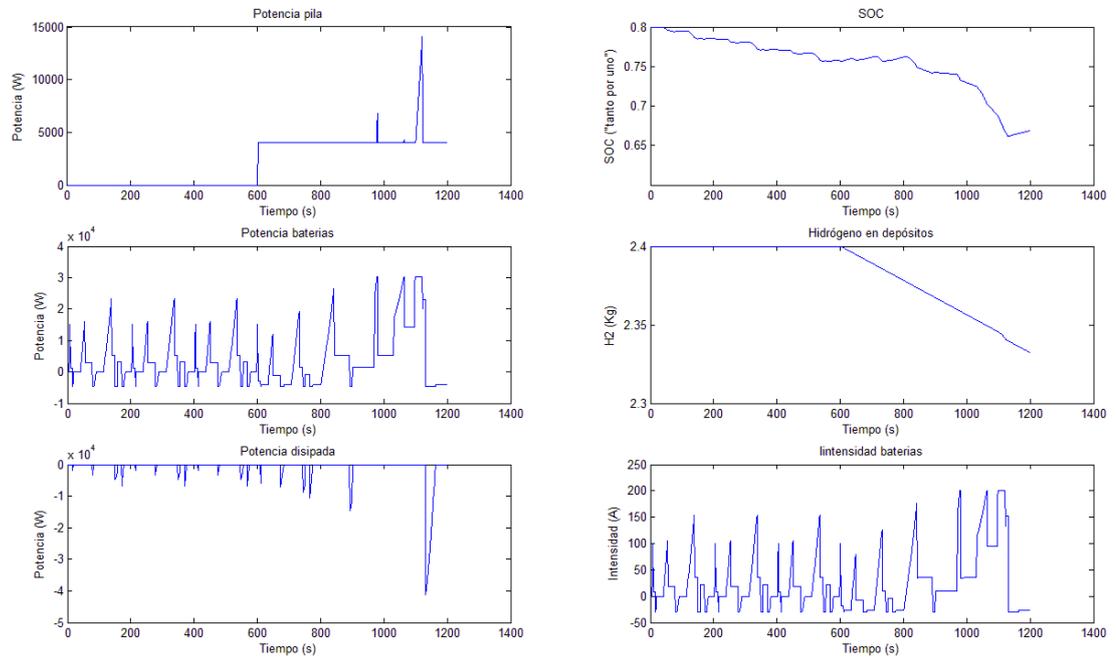


Figura 5.18: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

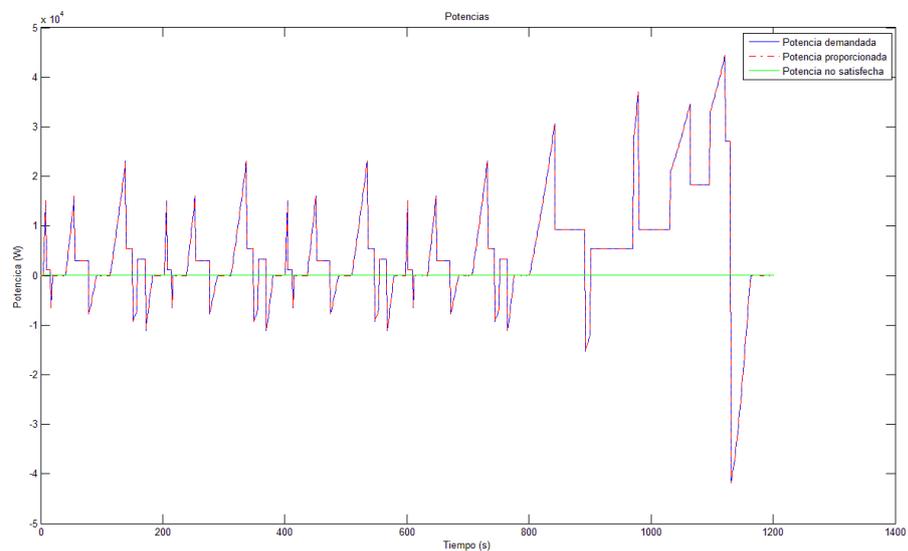


Figura 5.19: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

5.6.4. Simulación 4

A continuación se presentan los parámetros de simulación elegidos:

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN			
Ciclo de conducción	Modo conducción	SOC inicial	H ₂ inicial
Ciclo autopista	Modo carretera	0.5	2,4 Kg

Véase en las figuras 5.20, 5.21 y 5.22 los resultados de la simulación.

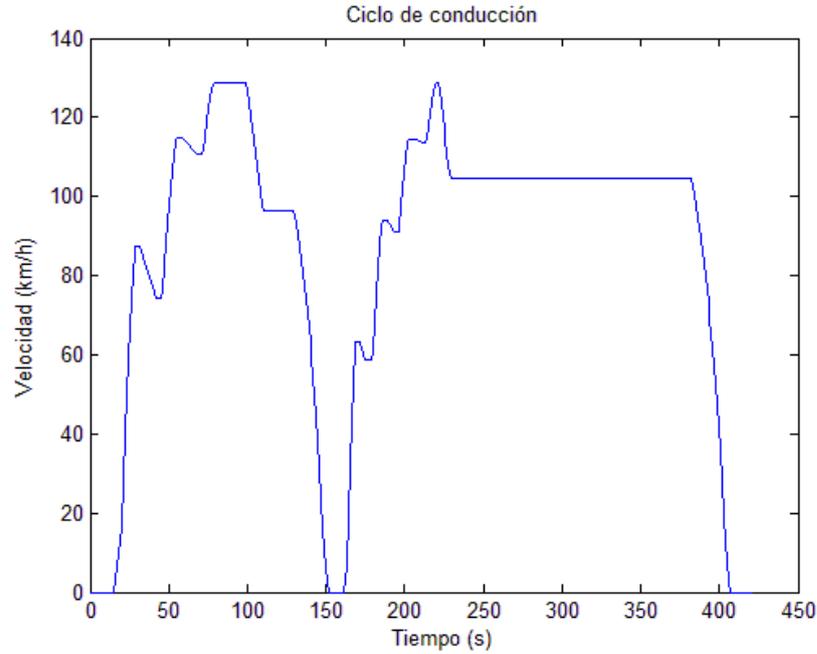


Figura 5.20: Ciclo de conducción en autopista

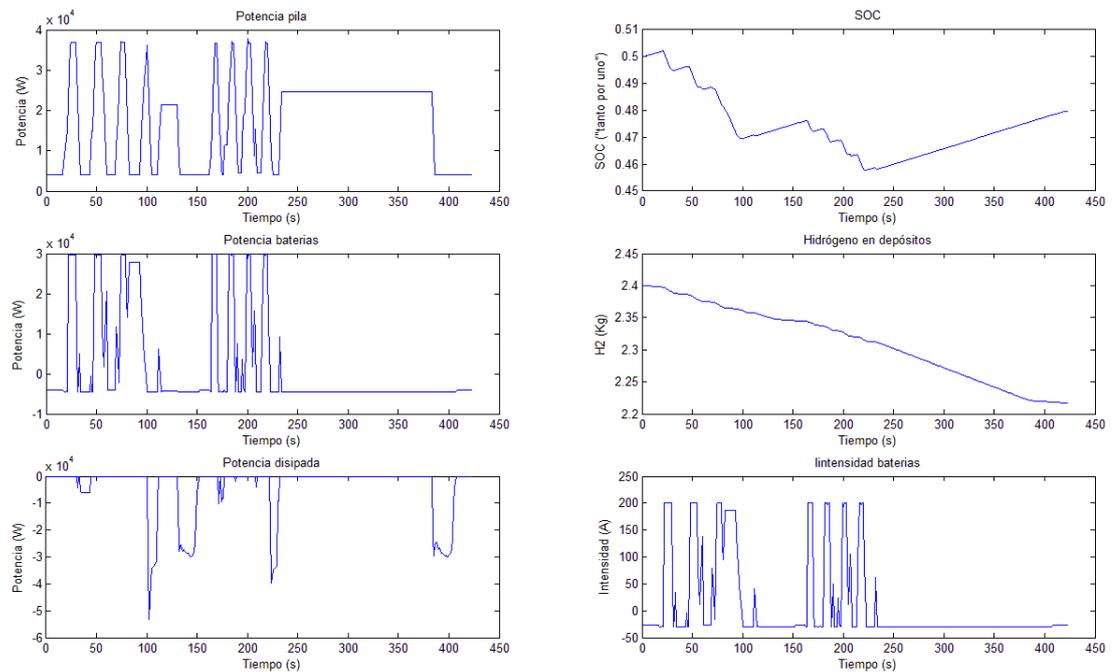


Figura 5.21: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

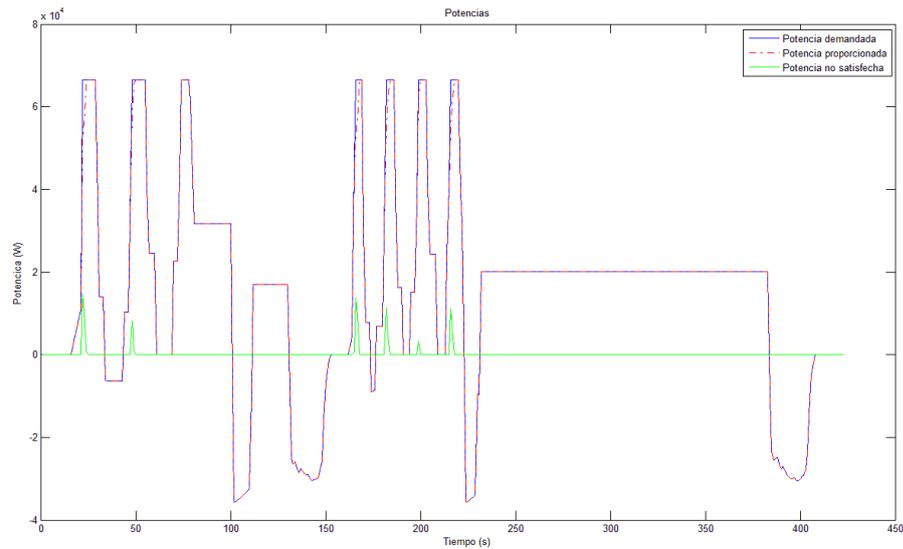


Figura 5.22: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

Esta simulación se ha incluido para ilustrar cómo actúa la restricción del incremento máximo en la derivada de la pila de combustible, de 7 kW/s. Este ciclo de conducción podría considerarse un ciclo de conducción en carretera, con algunas aceleraciones bastante fuertes. En ellas, la pila de combustible necesita un tiempo para proporcionar la potencia requerida, ya que sólo puede aumentar la potencia en 7 kW cada segundo. Para compensar este efecto, en la figura 5.21 puede verse como las baterías aportan potencia al límite de su capacidad (véase como la intensidad de descarga en esos momentos es de 200 A), pero se ve que aún queda algo de potencia sin satisfacer, aunque poca (véase la figura 5.22).

Aparte de los comentarios que se han hecho hasta ahora y de lo explicado en el párrafo anterior, no hay ningún otro aspecto novedoso en esta simulación.

5.6.5. Simulación 5

A continuación se presentan los parámetros de simulación elegidos:

PARÁMETROS DE SIMULACIÓN			
Ciclo de conducción	Modo conducción	SOC inicial	H ₂ inicial
Ciclo severo	Modo carretera	0.5	2,4 Kg

Véase en las figuras 5.23, 5.24 y 5.25 los resultados de la simulación.

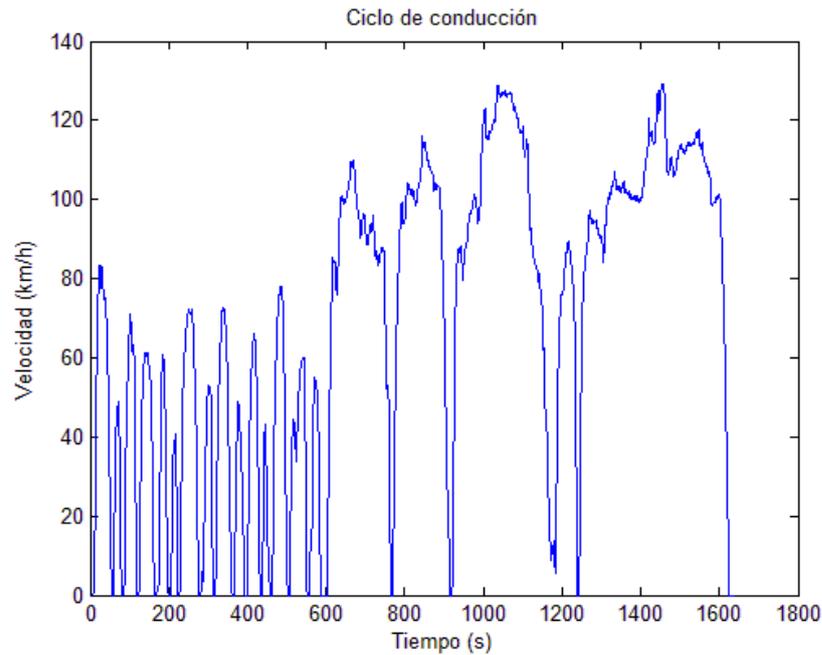


Figura 5.23: Ciclo de conducción severo

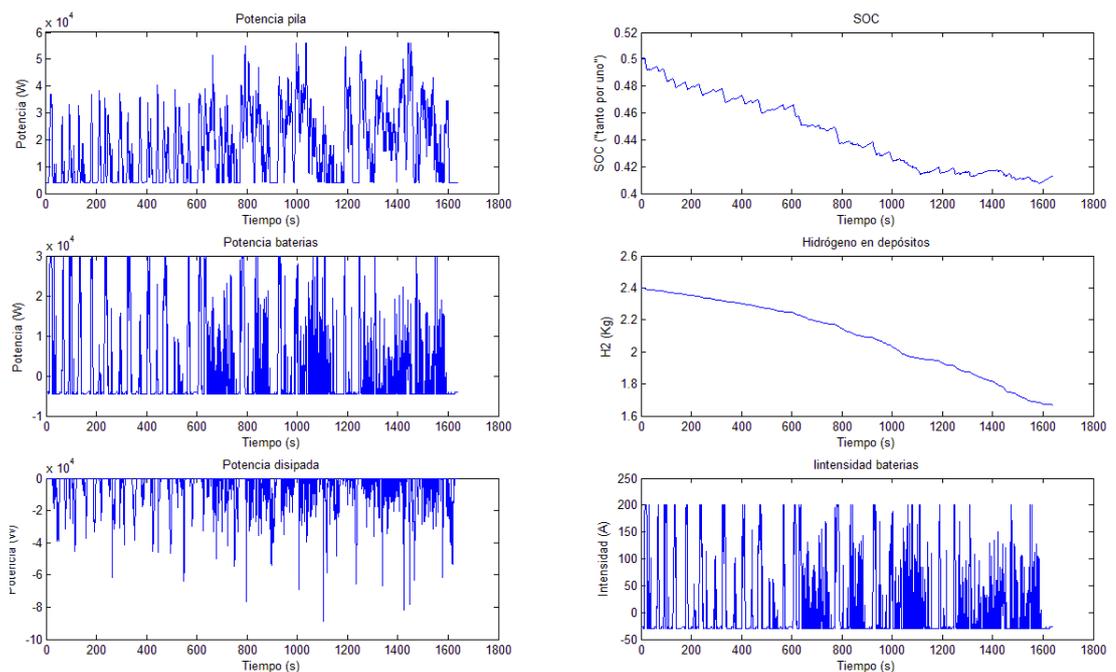


Figura 5.24: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

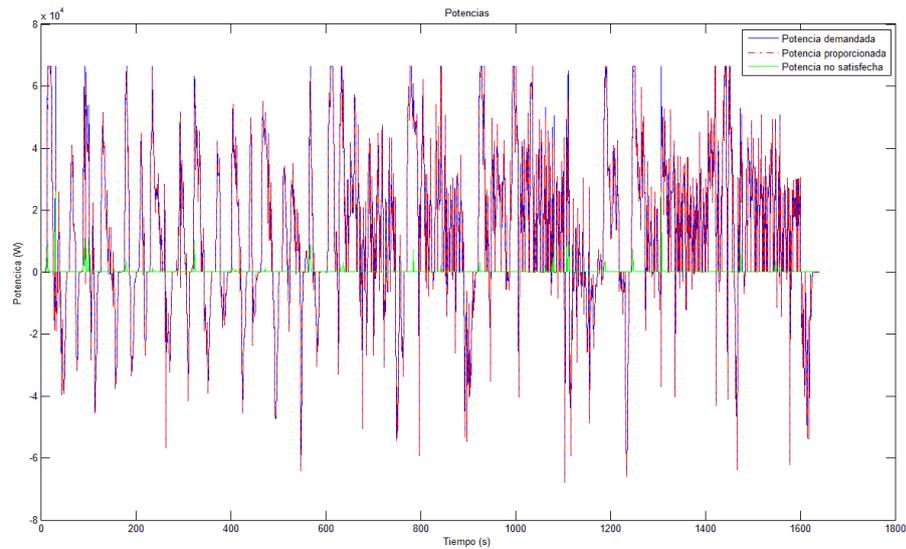


Figura 5.25: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

El ciclo de conducción que se ha simulado es un ciclo de conducción que combina un tramo por carretera convencional y un tramo por autopista. Es un ciclo de conducción muy severo, ya que combina altas velocidades con grandes aceleraciones y frenadas.

El objeto de ésta simulación es ilustrar el comportamiento del vehículo y del controlador ante una situación muy severa de conducción. Como puede verse en la figura 5.24, tanto la pila como las baterías, sin dejar de cumplir las restricciones de control, funcionan a pleno rendimiento para intentar satisfacer la potencia demandada. Como puede verse, el SOC decae inevitablemente, ya que la premisa más importante del controlador es satisfacer la demanda del conductor, y ésta es muy elevada. Así mismo, puede apreciarse un alto consumo de hidrógeno.

En la figura 5.25 puede verse cómo hay algunos intervalos de tiempo en que el controlador no es capaz de satisfacer toda la potencia demandada, aunque éstas cantidades tampoco son muy importantes.

5.6.6. Tabla resumen de resultados

En el cuadro 5.3 puede verse una tabla resumen con los resultados obtenidos en las anteriores simulaciones, en cuanto a estado de carga final de las baterías y cantidad de hidrógeno consumida durante las simulaciones.

Cuadro 5.3: Tabla resumen de resultados ECMS

TABLA RESUMEN DE RESULTADOS - ECMS					
Simulación	Ciclo	Modo conducción	SOC inicial	SOC final	H2 consumido
Simulación 1	NEDC	Modo carretera	0,4	0,4689	0,2499 kg
Simulación 2	NEDC	Modo carretera	0,6	0,5249	0,1336 kg
Simulación 3	NEDC	Modo ciudad	0,8	0,6312	0,0272 kg
Simulación 4	Ciclo autopista	Modo carretera	0,5	0,4798	0,1833 kg
Simulación 5	Ciclo severo	Modo carretera	0,5	0,4132	0,7305 kg