

6. Estrategia de control de potencia MPC (Model Predictive Control)

6.1. Introducción

La segunda estrategia de control que se ha implementado en este proyecto es una estrategia de control predictivo MPC (Model Predictive Control). Ésta estrategia se originó a finales de los setenta y se ha desarrollado considerablemente desde entonces. Es una estrategia de control avanzada que se ha extendido ampliamente en la industria durante los últimos años, debido a su creciente popularidad [28].

Algunas de las ventajas que ofrece esta estrategia de control [28]:

- Es una estrategia particularmente atractiva para quienes tienen un limitado conocimiento en control, porque los conceptos que se usan son muy intuitivos, y al mismo tiempo la sintonía del controlador es relativamente sencilla.
- Puede usarse para controlar gran variedad de procesos, desde aquellos con dinámicas relativamente simples hasta los que tienen dinámicas complejas.
- Es fácilmente aplicable a sistemas multivariable.
- Introduce control feed-forward de forma natural para compensar perturbaciones medibles.
- La extensión de su tratamiento para sistemas con restricciones es relativamente simple.
- Es tremendamente útil cuando se conocen las referencias futuras.

Pero, lógicamente, también presenta inconvenientes:

- Alta carga computacional necesaria para la resolución de algunos algoritmos (quizás no muy grave debido a los grandes avances computacionales que tenemos hoy en día).
- El mayor inconveniente es la necesidad de disponer de un modelo apropiado del proceso. Las prestaciones obtenidas del algoritmo dependerán de las discrepancias existentes entre el proceso real y el modelo usado.

En resumidas palabras, la estrategia de control MPC consta de una función de coste que penaliza las desviaciones de las salidas en el instante actual y las salidas predichas (mediante un modelo interno del sistema) con respecto a las

referencias. La minimización de esta función de coste se hace contemplando unas restricciones, tanto para las salidas como para las señales de control. Lo que se hace es realizar una optimización on-line para determinar las señales de control actuales y futuras (durante un determinado horizonte de control) que minimicen la función de coste. Se utiliza lo que se conoce como principio de horizonte deslizante, ya que el horizonte de predicción, que no tiene por qué ser igual que el horizonte de control, se va desplazando en cada instante hacia el futuro.

Todos los conceptos que se resumían anteriormente serán desarrollados con mayor profundidad en el siguiente apartado 6.2.

6.2. Base teórica

Como se apuntaba en el apartado anterior, las ideas que aparecen en mayor o menor medida en la familia de controladores predictivos son las siguientes [28]:

- Uso de un modelo para predecir las salidas del proceso a controlar en futuros instantes de tiempo (horizonte).
- Cálculo de una secuencia de control minimizando una función objetivo.
- Estrategia de horizonte deslizante: en cada instante de tiempo el horizonte se desplaza hacia el futuro mientras que se aplica la primera señal de control de la secuencia calculada en cada paso (justamente la correspondiente al siguiente instante de tiempo).

En este apartado se pretenden introducir los conceptos básicos de una estrategia de control predictivo MPC. No se abordará explícitamente el caso que ocupa este proyecto (control MPC de un sistema multivariable con restricciones) debido a la gran complejidad que abarca su desarrollo y a que, como se verá en el apartado 6.4, la implementación se ha hecho gracias a la herramienta que ofrece el toolbox de Matlab de control predictivo.

La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia del MPC se caracteriza por la estrategia representada en la figura 6.1. En ella se representa el comportamiento de un sistema con una entrada y una salida.

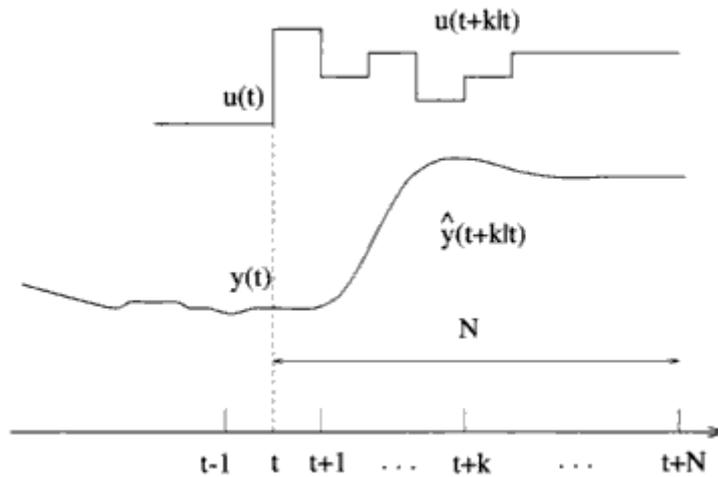


Figura 6.1: Estrategia de control predictivo

Los pasos que se siguen en una estrategia de control predictivo son los siguientes [28]:

1. En cada instante de tiempo t , y haciendo uso del modelo del proceso, se predicen las salidas futuras para un determinado horizonte N (llamado horizonte de predicción). Estas salidas predichas $\hat{y}(t+k|t)$ para $k=1\dots N$ dependen de los valores conocidos hasta el instante t (entradas y salidas pasadas) y de las señales de control futuras $u(t+k|t)$, $k=0\dots N-1$ que se pretenden mandar al sistema y que son las que se quieren calcular. (La notación $u(t+k|t)$ indica el valor de la variable en el instante $t+k$ calculado en el instante t)
2. El conjunto de señales futuras se calcula optimizando un determinado criterio en el que se pretende mantener el proceso lo más próximo posible a la trayectoria de referencia $w(t+k)$. Este criterio suele tomar la forma de una función cuadrática de los errores entre la salida predicha y la trayectoria de referencia también predicha, incluyendo en muchos casos el esfuerzo de control. Si el criterio es cuadrático, el modelo lineal y no existen restricciones se puede obtener una solución explícita, en otro caso se debe usar un método iterativo de optimización (el caso de este proyecto).
3. La señal de control $u(t|t)$ es enviada al proceso mientras que las siguientes señales de control calculadas son desechadas, puesto que en el siguiente instante de muestreo ya se conoce $y(t+1)$, y se repite entonces el paso 1 con este nuevo valor y todas las secuencias son actualizadas. Se calcula por tanto $u(t+1|t+1)$ (que en principio sería diferente a $u(t+1|t)$) al disponer de nueva información, haciendo uso del concepto de horizonte deslizante.

Para llevar a cabo esta estrategia, se usa una estructura como la mostrada en la figura 6.2. Así, se hace uso de un modelo para predecir las salidas futuras del proceso, basándose en las futuras señales de control propuestas. Estas señales son calculadas por el optimizador teniendo en cuenta la función de coste (donde aparece el futuro error de seguimiento) así como las restricciones. Como puede intuirse, el modelo juega un papel determinante en el controlador. Éste modelo debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para poder predecir las salidas futuras al mismo tiempo que debe ser sencillo de usar y comprender.

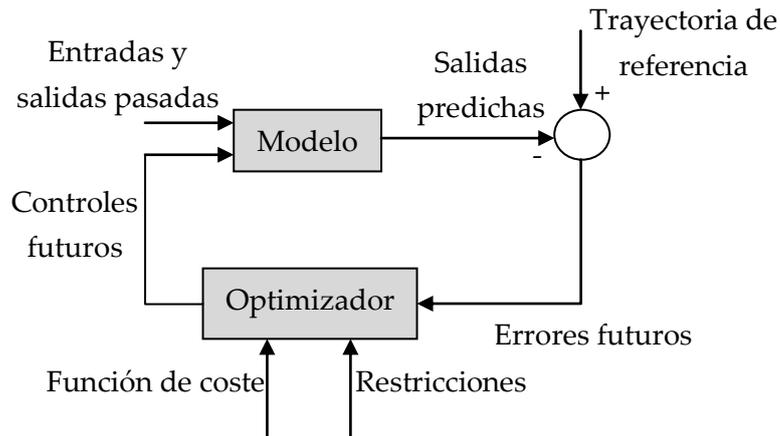


Figura 6.2: Estructura básica del MPC

El optimizador es otra parte fundamental de la estrategia, ya que proporciona las acciones de control. Si la función de coste es cuadrática, el mínimo se puede obtener como una función explícita de las entradas y salidas pasadas y de la trayectoria de referencia. Sin embargo, cuando existen restricciones de desigualdad, como ocurre en el caso que ocupa este proyecto, la solución debe ser calculada por métodos numéricos con más carga de cálculo.

6.2.1. El modelo de predicción

El elemento clave del MPC es el modelo. Un diseño completo debe incluir mecanismos necesarios para la obtención del mejor modelo posible, el cual debe ser lo suficientemente rico para capturar al máximo la dinámica del proceso y debe ser capaz de permitir el cálculo de las predicciones a la vez que sea intuitivo y permita un análisis teórico. El uso del modelo del proceso viene determinado por la necesidad del cálculo de las salidas predichas en los instantes futuros $\hat{y}(t + k|t)$.

Además se puede tener en cuenta un modelo de las perturbaciones, englobándose aquí el efecto de las entradas no medibles, el ruido y los errores de modelado.

Las formulaciones más usadas para modelar el proceso son:

- **Modelo de respuesta impulsional:** También conocida por secuencia de ponderación o modelo de convolución. La salida se relaciona con la entrada por la ecuación $y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} h_i \cdot u(t - i)$, donde h_i son los valores muestreados obtenidos al someter el proceso a un impulso unitario de amplitud igual al periodo de muestreo.
- **Modelo de respuesta ante escalón:** Similar al anterior solo que ahora la señal de entrada es un escalón.
- **Modelo en función de transferencia:** Se utiliza el concepto de función de transferencia $G = B/A$.
- **Modelo en espacio de estados:** Tiene la siguiente representación:

$$x(t) = A \cdot x(t - 1) + B \cdot u(t - 1) \quad (33)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) \quad (34)$$

Con lo que la predicción viene dada por:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t + k|t) &= C \cdot \hat{x}(t + k|t) = \\ &= C \cdot [A^k \cdot x(t) + \sum_{i=1}^k A^{i-1} \cdot B \cdot u(t + k - i|t)] \end{aligned} \quad (35)$$

La gran ventaja de esta formulación es que sirve para el caso multivariable, por lo que ésta será la formulación usada para el modelo interno del sistema en el control MPC.

6.2.2. Respuesta libre y respuesta forzada

Una característica típica de la mayoría de los controladores MPC es el empleo de los conceptos de respuesta libre y respuesta forzada. La idea es expresar la secuencia de acciones de control como la suma de dos señales:

$$u(t) = u_f(t) + u_c(t) \quad (36)$$

La señal $u_f(t)$ corresponde a las entradas pasadas (anteriores al instante t) y en el futuro se mantiene constante e igual al último valor de la variable manipulada. En cambio, la señal $u_c(t)$ toma el valor cero en el pasado y corresponde a las señales de control en los instantes futuros. De esta forma, se consigue separar la predicción de la secuencia de salida en dos partes, como puede verse en la figura 6.3. La señal

$y_f(t)$ es la respuesta libre, y corresponde a la predicción de la salida cuando la variable manipulada se hace igual a $u_f(t)$. La señal $y_c(t)$ es la respuesta forzada, y corresponde a la predicción de la salida cuando la señal de control es $u_c(t)$. La respuesta libre corresponde a la evolución del proceso debido a su estado actual (incluido por tanto el efecto de las acciones pasadas) mientras que la respuesta forzada es la debida a las acciones de control futuras.

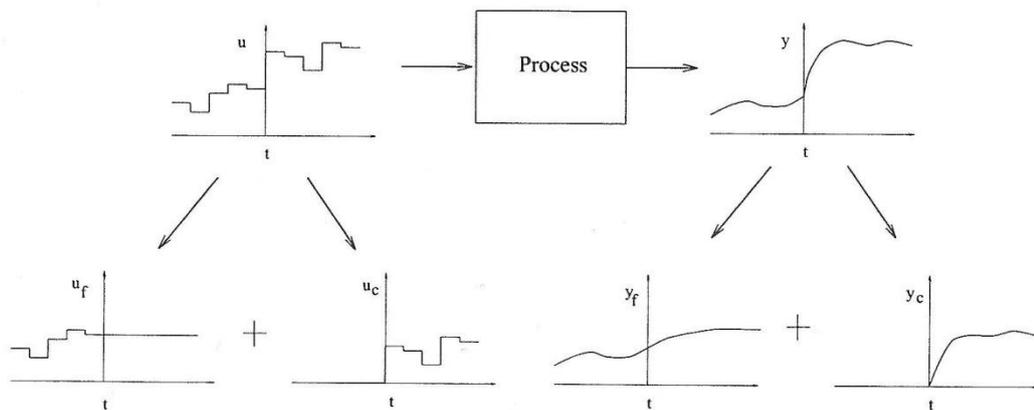


Figura 6.3: Respuesta libre y respuesta forzada

6.2.3. La función objetivo

Los diversos algoritmos de MPC proponen diferentes funciones de coste para la obtención de la ley de control. En general se persigue que la salida futura en el horizonte considerado siga a una determinada señal de referencia al mismo tiempo que se puede penalizar el esfuerzo de control requerido para hacerlo. La expresión general de tal función objetivo sería la que se presenta en la ecuación (37).

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) \cdot [\hat{y}(t+j|t) - \omega(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) \cdot [\Delta u(y+j-1)]^2 \quad (37)$$

En algunos métodos no se tiene en cuenta el segundo sumando (que considera el esfuerzo de control), mientras que en otros también aparecen directamente los valores de la señal de control (en lugar de los incrementos).

Los elementos principales de la función de coste son los siguientes:

- **Parámetros:** N_1 y N_2 son los horizontes mínimo y máximo de coste (o de predicción), y N_u es el horizonte de control, que no tiene por qué coincidir con el horizonte máximo de predicción. El significado de N_1 y N_2 es bastante intuitivo: marcan los límites de los instantes en que se desea que la salida siga a la referencia. Estos valores pueden usarse como parámetros de sintonización.

- **Trayectoria de referencia:** Una de las ventajas del control predictivo es que si se conoce a priori la evolución de la referencia (no es el caso de este proyecto), el sistema puede empezar a reaccionar antes de que el cambio se haya realizado, evitando los efectos del retardo en la respuesta del proceso.
- **Restricciones:** Razones constructivas, de seguridad o medioambientales pueden causar límites en las variables del proceso. Además, estas restricciones pueden venir motivadas por razones económicas. Normalmente se consideran límites en la amplitud y en el *slew rate* de la señal de control y límites en las salidas:

$$\begin{cases} u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}, \forall t \\ du_{\min} \leq u(t) - u(t-1) \leq du_{\max}, \forall t \\ y_{\min} \leq y(t) \leq y_{\max}, \forall t \end{cases} \quad (38)$$

6.2.4. Obtención de la ley de control

Para obtener los valores $u(t+k|t)$ será necesario minimizar la función de coste J de la ecuación 37. Para ello se calculan los valores de las salidas predichas $\hat{y}(t+j|t)$ en función de los valores pasados de las entradas, de las salidas y de las señales de control futuras, haciendo uso del modelo interno del sistema.

La obtención de la solución no resulta trivial ya que existirán $N_2 - N_1 + 1$ variables independientes, valor que puede ser bastante elevado (del orden de 10 a 30). Con la idea de reducir estos grados de libertad se puede proponer cierta estructura a la ley de control. Además esto puede suponer una mejora en la robustez y en el comportamiento general del sistema, debido fundamentalmente a que el hecho de permitir la libre evolución de las variables manipuladas (sin estructurar) puede conducir a señales de control de alta frecuencia no deseables y que en el peor de los casos podrían producir inestabilidad.

Esta estructura de la ley de control se plasma en el uso del concepto de horizonte de control (N_u), que consiste en considerar que tras un cierto intervalo $N_u < N_2$ no hay variación en las señales de control propuestas, es decir que $\Delta u(t+j-1) = 0$ si $j > N_u$.

6.3. Restricciones de control

Al igual que en la estrategia de control ECMS, se van a contemplar una serie de restricciones debidas a las características físicas de los elementos de potencia del vehículo: estos son la pila de combustible, las baterías y el sistema de disipación de potencia.

Nuevamente, las restricciones para la potencia de mandada a la pila de combustible es que ésta esté comprendida entre 0 kW y 56 kW, debido a las potencias mínima y máxima aceptables para la pila. Adicionalmente, se vuelve a contemplar un incremento máximo de la potencia que se le asigne 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, sigue siendo necesario restringir la intensidad que sale o entra de ellas, haciendo que no supere los límites establecidos de 30 A durante la carga (frenada regenerativa) y 200 A durante la descarga (baterías aportando potencia). Esta vez se ha hecho una simplificación para conseguir esto, debido a que el control MPC utiliza un modelo interno del sistema y éste debía de simplificarse un poco, y también debido a que, como se explica en la base teórica (sección 6.3), el controlador MPC lleva incorporado las restricciones de control, y sería muy complejo hacer que cambiasen en cada instante (en este caso me refiero a la restricción de potencia de las baterías en función de la tensión que toman en cada instante). La simplificación consiste en considerar que la tensión en las baterías se mantiene constante e igual al valor mínimo que toma. Dado que la tensión es menor cuanto más descargadas están las baterías, se ha tomado como tensión la que tienen cuando el estado de descarga es igual a 0.8 (valor máximo de descarga que permite el controlador). Esta tensión es de 17,38 V. Así, se calculan las potencias máxima y mínima admisibles para las baterías:

$$P_{\max})_{\text{batt}} = 8 \cdot 17,38 \cdot 200 = -4171 \text{ W} \quad (41)$$

$$P_{\min})_{\text{batt}} = -8 \cdot 17,38 \cdot 30 = 27808 \text{ W} \quad (42)$$

De esta forma, y como se podrá comprobar en los resultados de las simulaciones (en las que evidentemente se utilizan los modelos no simplificados del vehículo), se verá como la intensidad permanece entre los valores de seguridad.

En cuanto al sistema de disipación de energía, de nuevo la única restricción de control es que el control supervisor ha de asignarle una potencia siempre menor o igual a cero.

Como se decía en el apartado de introducción (sección 6.1), el controlador MPC puede contemplar restricciones también para las salidas del sistema controlado. Así, se define como restricción que el estado de carga de las baterías esté entre los valores 0,2 y 0,8.

Las restricciones anteriores que contempla el controlador se resumen en el siguiente cuadro 6.1:

Cuadro 6.1: Restricciones de control

Parámetro	Unidad	Pila de combustible	Baterías	Resistencias
Potencia	kW	$0 \leq P_{FC} \leq 56$	$4,171 \leq P_{batt} \leq 27,808$	$P_R \leq 0$
Corriente	A	---	---	---
Incremento máximo potencia	kW/s	$-7 \leq \Delta P_{FC} \leq 7$	---	---
Tiempo OFF→ON	min	10	---	---
SOC	---	---	$0,2 \leq SOC \leq 0,8$	---

6.4. Implementación y consideraciones prácticas

La implementación del controlador supervisor en el vehículo se muestra en el esquema que aparece en la figura 6.4.

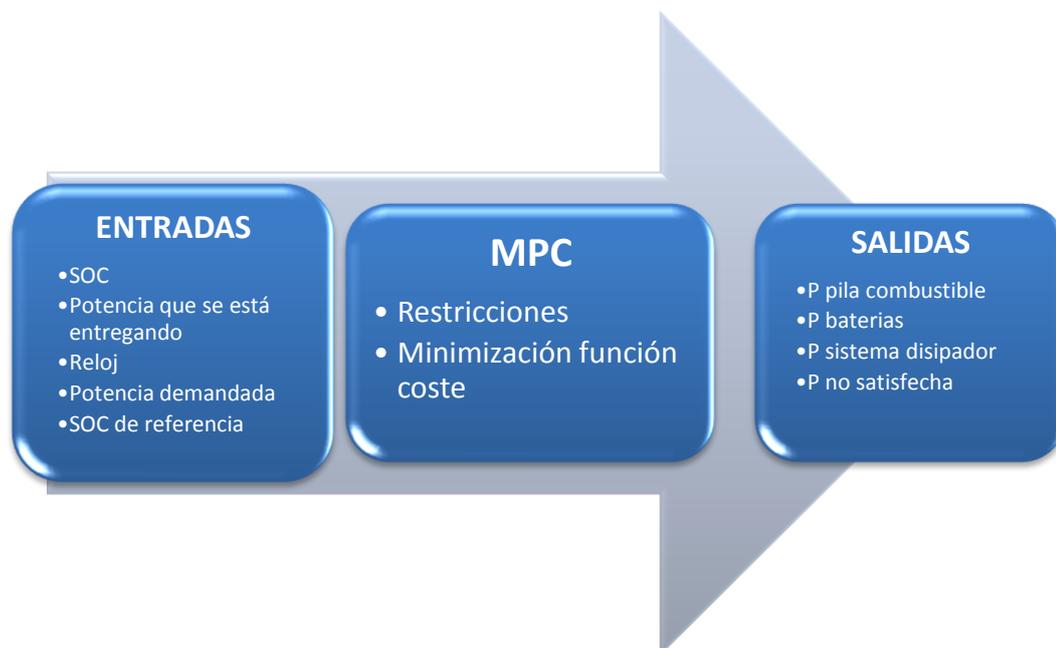


Figura 6.4: Esquema general del controlador

Las entradas del controlador supervisor son las siguientes:

- Estado de carga de las baterías (SOC)
- El reloj
- Potencia que el motor eléctrico está satisfaciendo
- Potencia demandada (referencia de potencia a satisfacer)
- Referencia para el estado de carga de las baterías $(SOC)_{ref} = 0,5$

Análogamente al anterior algoritmo de control, las salidas siguen siendo las potencias asignadas a los dispositivos de potencia del coche (pila de combustible, baterías y sistema de disipación de potencia) así como la potencia que no se ha podido satisfacer.

La simulación de este algoritmo se lleva a cabo tal y como se explica a continuación. Esto se resume en el esquema de la figura 6.5.

1. Se carga el ciclo de conducción que se va a simular (este paso es común en con el anterior algoritmo de control).
2. Se carga el estado de carga inicial de las baterías, para inicializar el controlador MPC.
3. Se configura el controlador MPC previamente a la simulación (este paso solo se realiza una vez).
 - a. Se carga el modelo interno del sistema y se linealiza.
 - b. Se establece el tiempo de muestreo:

$$T_s = 50 \text{ ms (veinte veces menos que el tiempo de reacción de una persona, que es de 1 s).}$$
 - c. Se definen las restricciones de las variables (entradas y salidas).

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

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

$$-4171 \leq P_{baterías}(t) \leq 27808$$

$$P_{disipada} \leq 0$$

$$0,2 \leq SOC \leq 0,8$$
 - d. Se asignan los pesos de la función de coste a minimizar.

$$J = 5 \cdot P_{pila} + 0,2 \cdot P_{baterías} + 70 \cdot P_{disipada} + 500 \cdot \Delta P_{pila} + 1 \cdot \Delta P_{baterías} + 1 \cdot \Delta P_{disipada} + 1000 \cdot (P_{DC-link} - P_{entregada}) + 40000000 \cdot (SOC - SOC)_{ref}$$
 - e. Se define el horizonte de predicción y el horizonte de control.

$$\text{Horizonte de predicción: } 10 \text{ s.}$$

$$\text{Horizonte de control: } 4 \text{ s.}$$
 - f. Se crea el “objeto MPC” con la función de Matlab ‘mpc.m’. Este “objeto MPC” se utilizará en el bloque de simulink de Matlab “MPC controller” para realizar el control.

- Se calcula la potencia que no se ha podido satisfacer:

$$P_{\text{no entregada}} = P_{\text{DC-link}} - P_{\text{entregada}}$$

- Se realiza la simulación.
- Se representan los resultados.

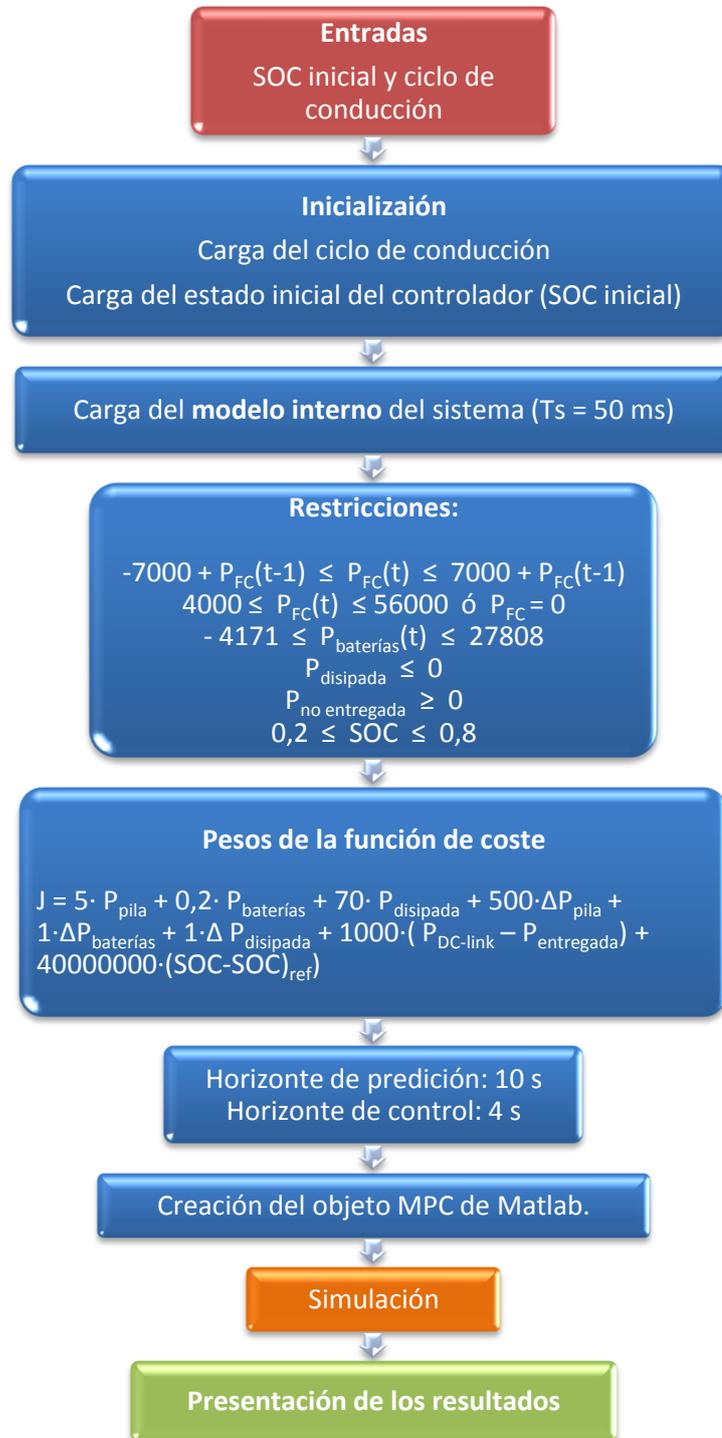


Figura 6.5: Diagrama de flujo de una simulación MPC

6.4.1. Establecimiento de las restricciones

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 MPC.

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

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.

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

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 6.4.3).

- $-4171 \leq P_{baterías}(t) \leq 27808$

Por las razones que se explicaban en la sección 6.3, se han escogido estos valores para la potencia mínima y máxima de las baterías.

- $P_{disipada} \leq 0$

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

- $0,2 \leq SOC \leq 0,8$

Como restricción para las salidas, se obliga a que el SOC permanezca siempre entre los valores 0,2 y 0,8.

6.4.2. Establecimiento de los pesos de la función de coste

El objetivo de este apartado es simplemente comentar la razón por la que se han escogido los pesos de la función de coste anteriormente presentados.

En cuanto a la penalización de las señales de control, se ha penalizado más la potencia asignada a la pila que la asignada a las baterías para hacer que el consumo sea el menor posible. Así mismo se penaliza más la asignada al sistema de

disipación de potencia, ya que en la frenada regenerativa se prefiere que se carguen las baterías lo máximo posible en lugar que se disipe más energía de la cuenta.

En cuanto a la penalización de los incrementos de las señales de control, la más fuertemente penalizada es la potencia de la pila, ya que se quiere que la evolución de la potencia que se le asigna a la pila de combustible sea lo más suave posible, para que sufra menos.

Finalmente, en cuanto a la penalización de las discrepancias de las salidas del sistema respecto a las referencias, se utiliza un valor alto para la potencia entregada para que quede la menor cantidad de potencia sin servir. El valor para el SOC es mucho mayor para compensar la diferencia en orden de magnitud entre ambas variables (SOC es del orden de 0,1, mientras que las potencias entregadas son del orden de 10^4). Así se consigue que el SOC tome valores entorno al óptimo (0,5).

6.4.3. Modelo interno del sistema

El modelo que se usa de forma interna para realizar las predicciones de las salidas a controlar es el que se muestra en la siguiente figura 6.6. Éste modelo ha de ser lo más simple posible para que la ejecución del algoritmo MPC no sea muy lenta, y a su vez debe modelar lo más fielmente posible la evolución de las salidas que se pretenden controlar del sistema en función de las señales de control aplicadas por el controlador.

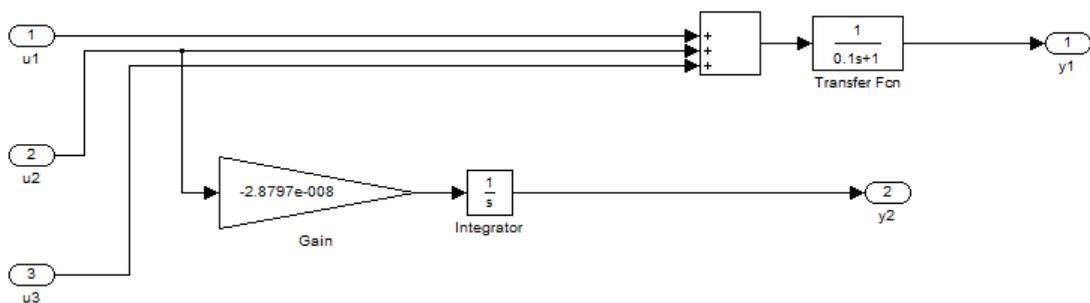


Figura 6.6: Modelo interno del sistema en simulink

Como puede verse en la figura, se ha modelado con un tiempo característico de 100 ms la dinámica del motor eléctrico, es decir, que éste es el tiempo que pasa desde que se asignan las potencias de referencia a los dispositivos de potencia, hasta que el sistema entrega esta potencia al vehículo.

Además, se ha modelado el comportamiento de las baterías [43] como se muestra en la ecuación 43:

$$\text{SOC}(t + 1) = \text{SOC}(t) - 2,8797 \cdot 10^{-8} \cdot P_{\text{baterías}}(t) \quad (43)$$

De esta forma el controlador MPC modela el comportamiento futuro de las salidas a controlar del sistema, y así elabora las secuencias de señales de control para que las salidas sigan a las referencias

6.4.4. Apagado / Encendido de la pila de combustible

Se nuevo, en la figura 6.7 se muestra la ventana que aparece al hacer doble-click sobre el bloque “selector pila on/off”. En esta ventana puede escogerse 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 primera variante del algoritmo en el que no se permite seleccionar el modo de conducción, 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 ($\text{SOC} > 0,7$), 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.

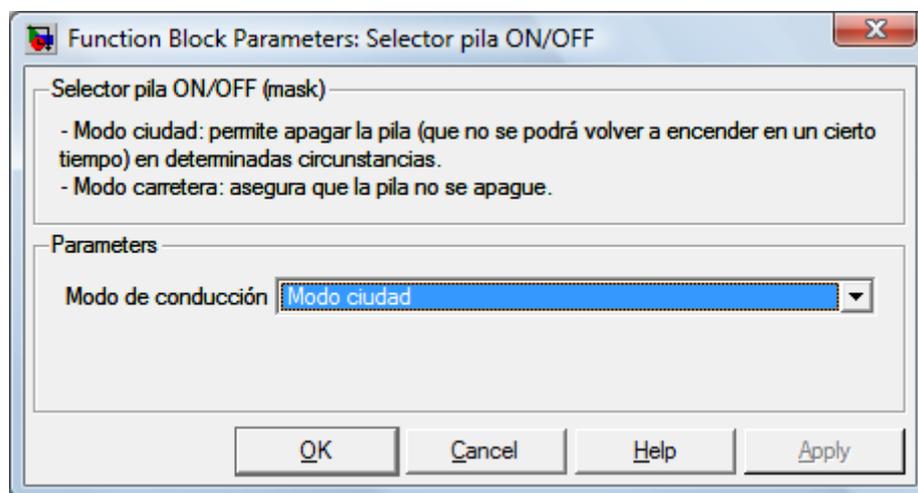


Figura 6.7: Máscara del bloque “selector pila on/off”

El selector de modo de conducción funciona con la misma filosofía que el usado en el algoritmo ECMS. Como recordatorio, en la figura 6.8 aparece el diagrama de flujo que sigue este selector de encendido o apagado de la pila de combustible.

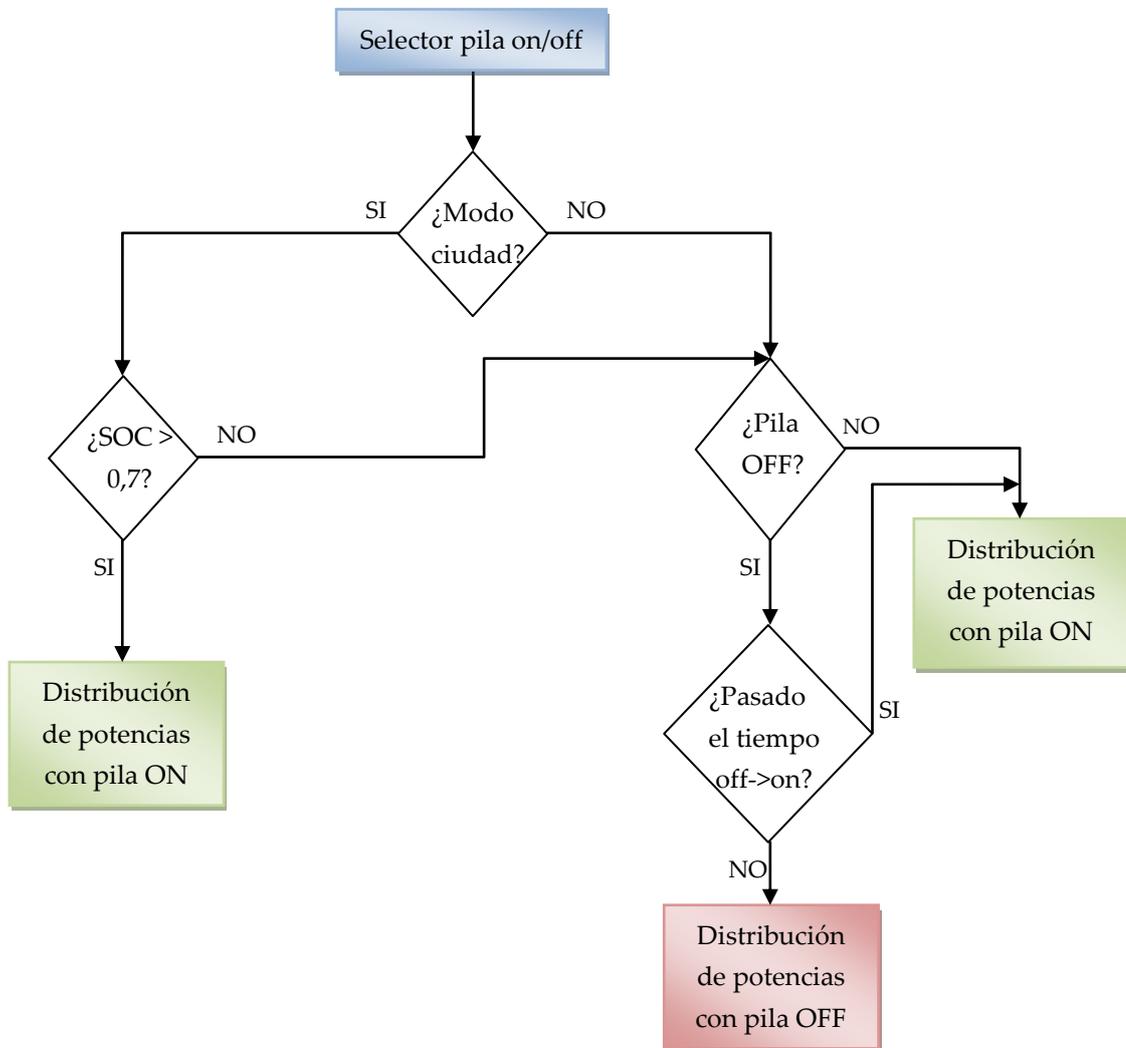


Figura 6.8: Diagrama de flujo del "selector pila on/off"

6.5. 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 utilizarán los archivos 'Hercules_MPC.mdl' y 'Hercules_MPC_selector_modulo.mdl'. Para las simulaciones, se utilizará el segundo de ellos, que se acaba de presentar en el

6.5.1. 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 6.10, 6.11 y 6.12 los resultados de la simulación.

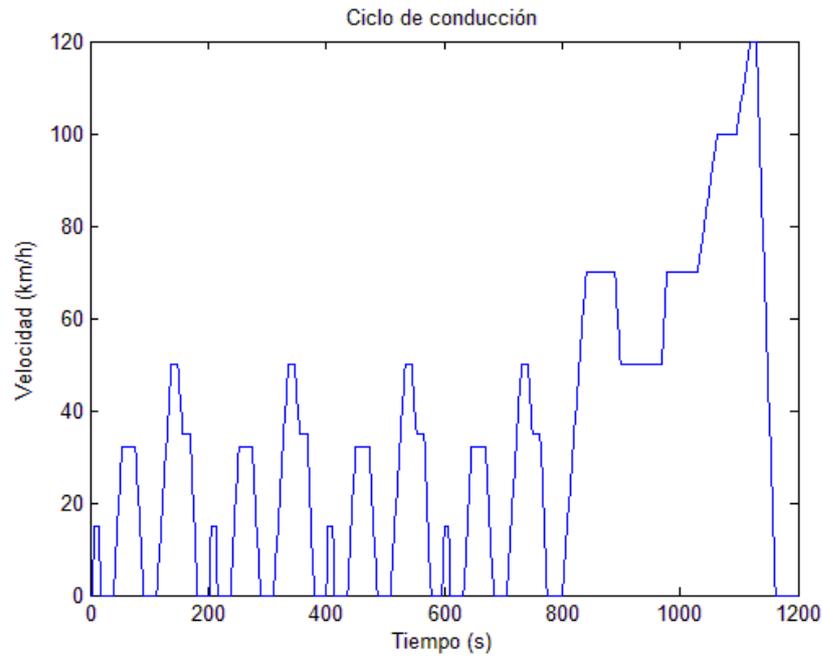


Figura 6.10: New European Driving Cycle

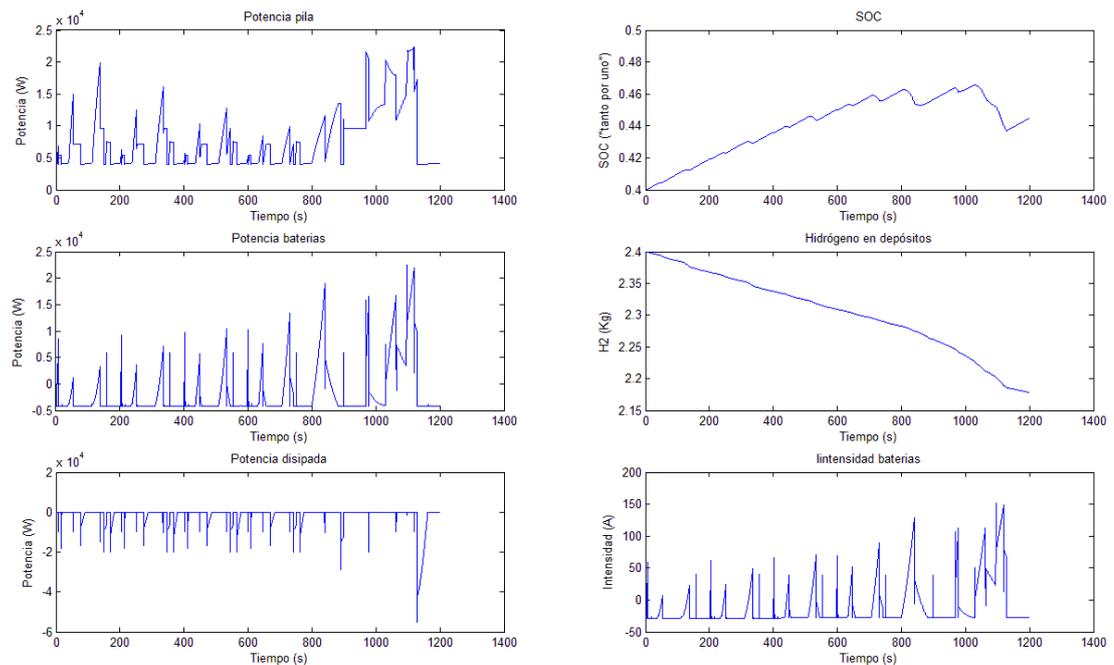


Figura 6.11: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

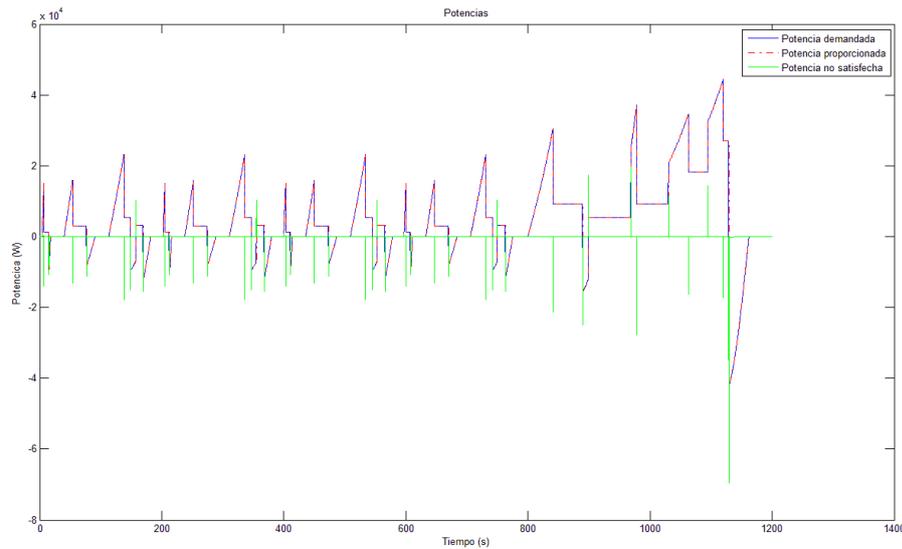


Figura 6.12: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

Recordando que el ciclo de conducción utilizado (NEDC), tal y como se ve en la figura 6.10, el primer tramo de simulación 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 el SOC a 0,5 (el considerado óptimo) mientras satisface la demanda del conductor.

Al igual que pasaba con el algoritmo EMCS, 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 disipador de potencia absorbe una gran cantidad de potencia, debido a la potente frenada que existe al final del ciclo de conducción.

Nuevamente, 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. Además, se comprueba que con el algoritmo MPC se ha podido penalizar las variaciones en la potencia asignada a la pila de combustible, consiguiéndose que ésta varíe de forma más suave, siendo las baterías las

encargadas de dar los picos de potencia, y sufriendo así menos la pila de combustible (compárese con los resultados obtenidos con el algoritmo ECMS en la figura 5.10).

La potencia demandada por el ciclo de conducción se satisface de forma prácticamente perfecta, excepto en los instantes en los que ocurren cambios bruscos en la evolución de ésta, debido a la dinámica del motor eléctrico que se ha introducido. Estos excesos o defectos de potencia ocurren en muy breves instantes de tiempo, tal y como se muestra a continuación en la figura 6.13.

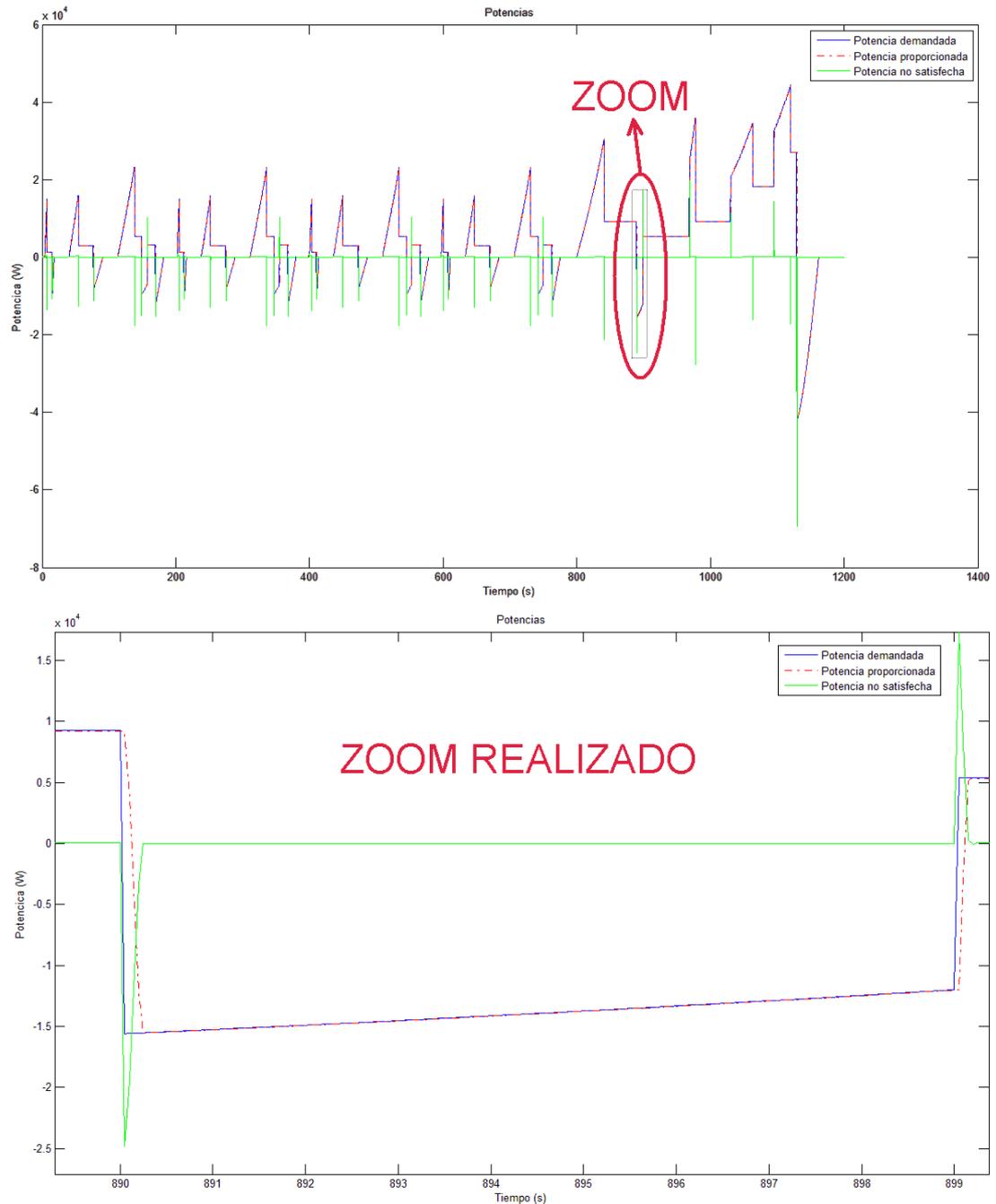


Figura 6.13: Zoom de una zona en la que hay exceso/defecto de potencia entregada

6.5.2. 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 6.14, 6.15 y 6.16 los resultados de la simulación.

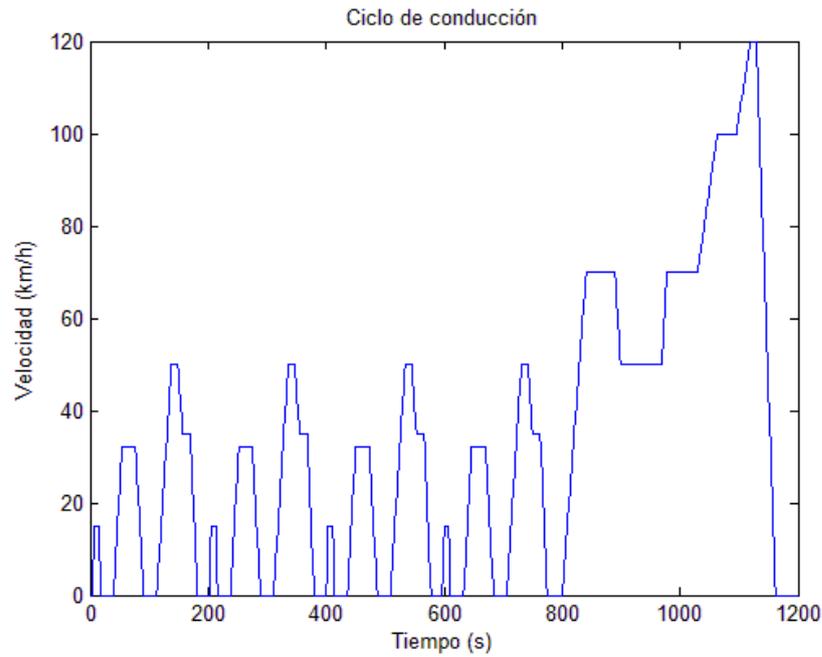


Figura 6.14: New European Driving Cycle

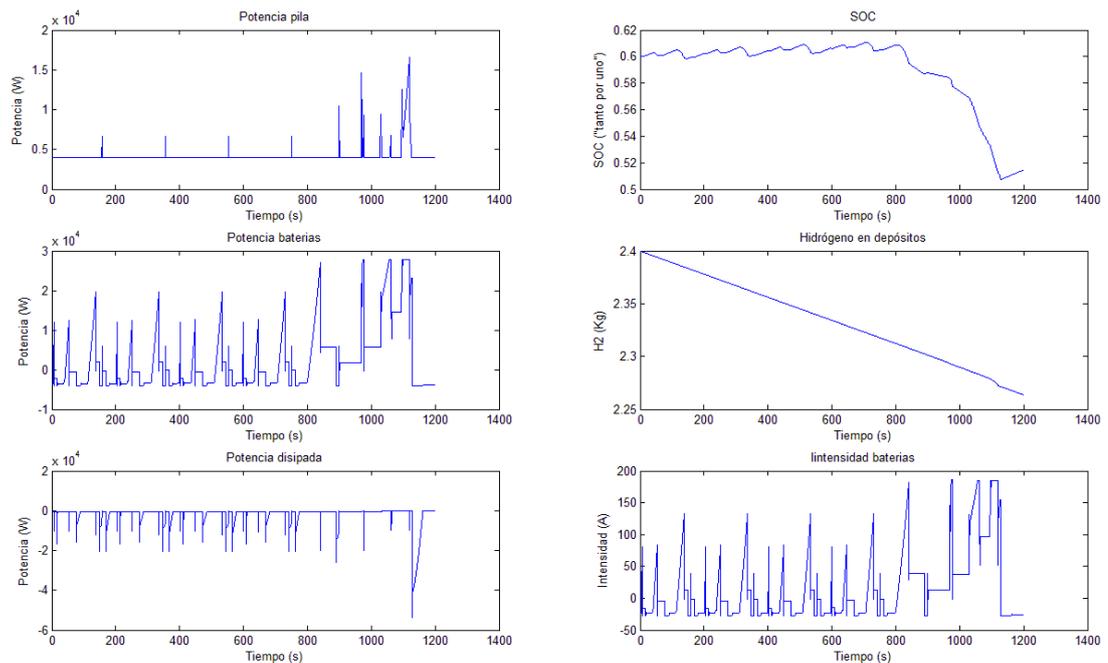


Figura 6.15: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

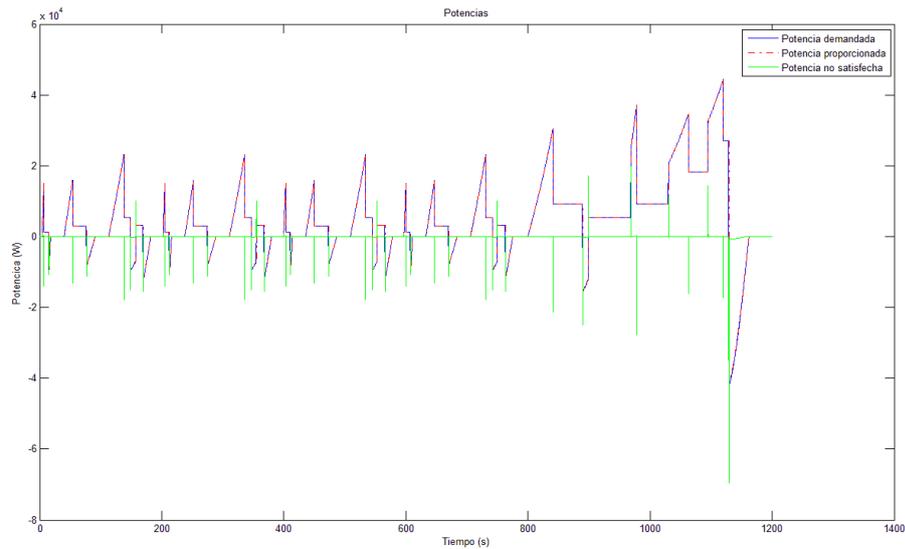


Figura 6.16: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

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 6.15.

Finalmente comentar que de nuevo se cumplen las restricciones de control y se satisface prácticamente toda la potencia demandada por el conductor (los únicos instantes en que hay exceso o defecto de potencia entregada son los mismos que antes por las mismas consideraciones hechas anteriormente). Así mismo el SOC permanece en el entorno de 0.5.

6.5.3. 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 6.17, 6.18 y 6.19 los resultados de la simulación.

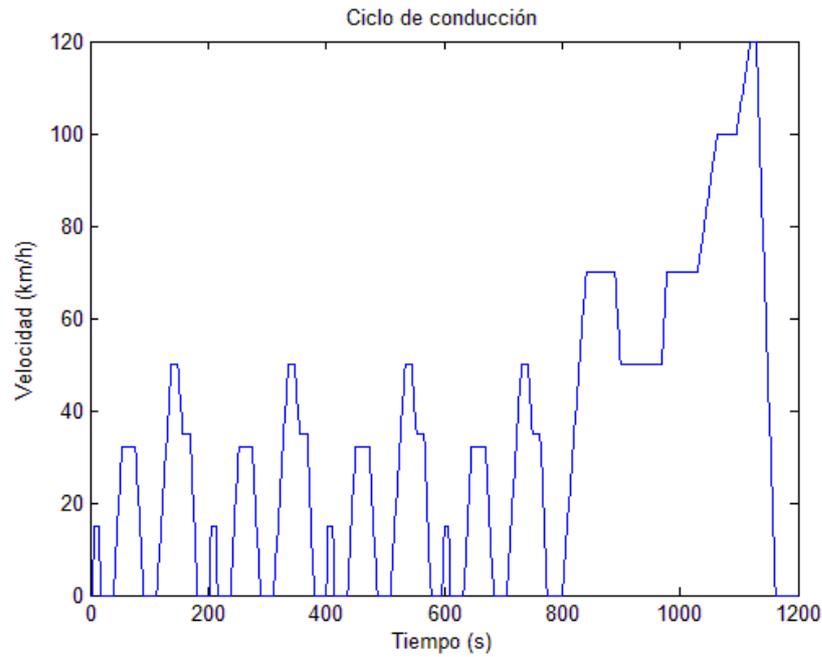


Figura 6.17: New European Driving Cycle

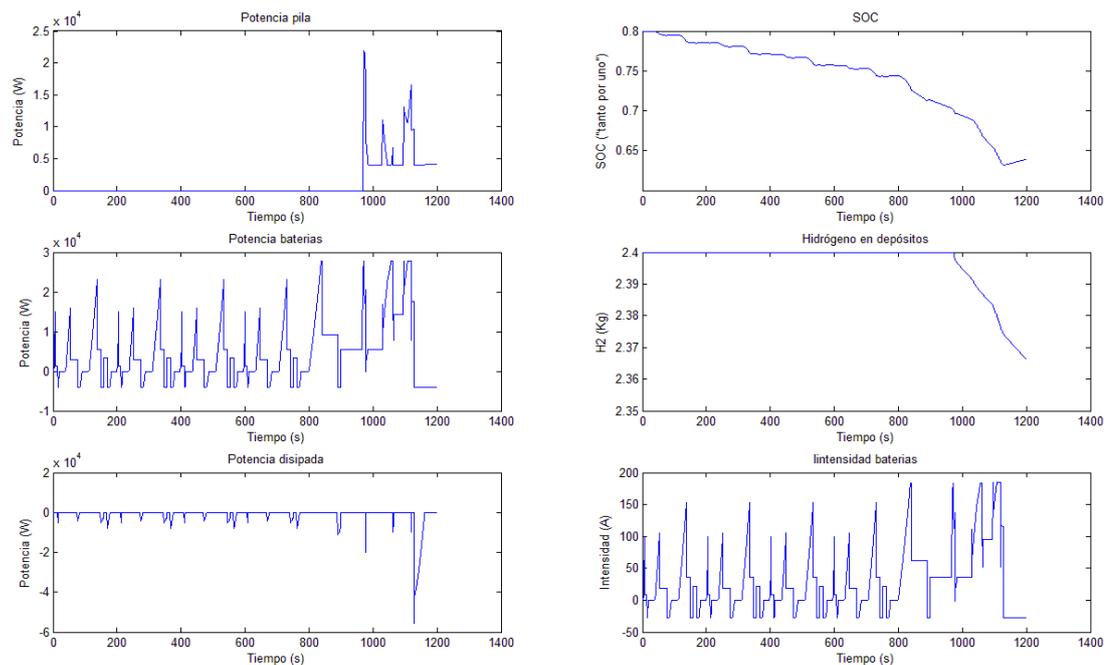


Figura 6.18: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

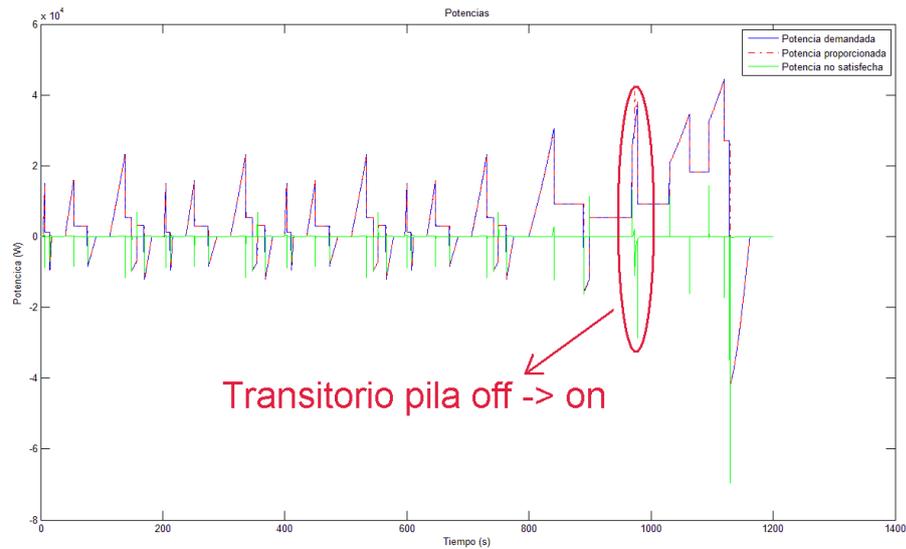


Figura 6.19: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

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 6.18).

La potencia demandada por el ciclo de conducción se satisface prácticamente por completo, excepto en el instante en el que se enciende la pila, produciéndose un breve transitorio hasta que de nuevo se sigue de forma prácticamente perfecta a la potencia demandada. Esto es así ya que el sistema tiene una cierta dinámica, y a que el MPC está proporcionando las potencias de referencia para los dispositivos de potencia, y hasta ese instante éstas eran ignoradas ya que la pila está apagada y lo que se hace es satisfacer la potencia demandada tan sólo con las baterías. Tras el encendido de la pila, las señales de control que dicta el MPC empiezan a ser aplicadas tal cual, ocurriendo éste transitorio (ver figura 6.19).

6.5.4. 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 6.20, 6.21 y 6.22 los resultados de la simulación.

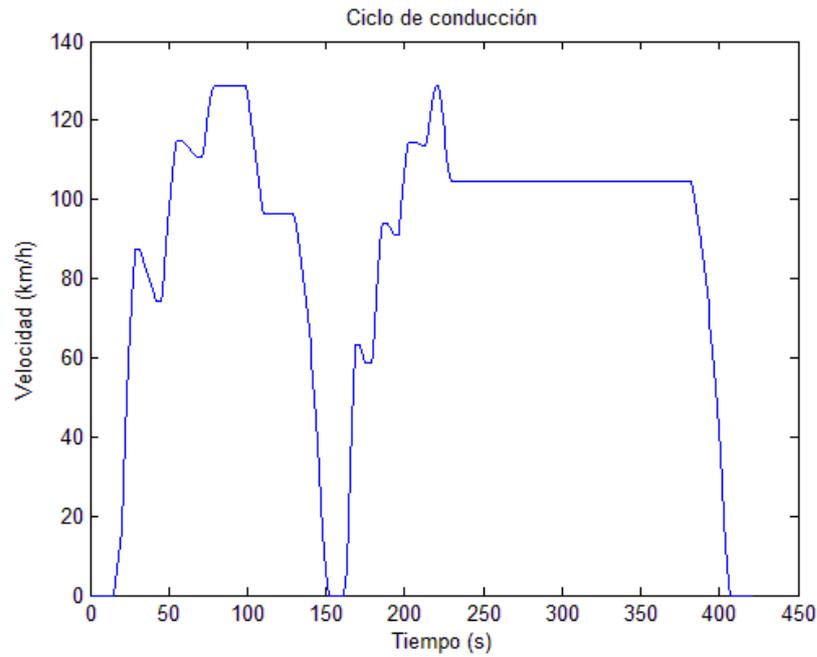


Figura 6.20: Ciclo de conducción en autopista

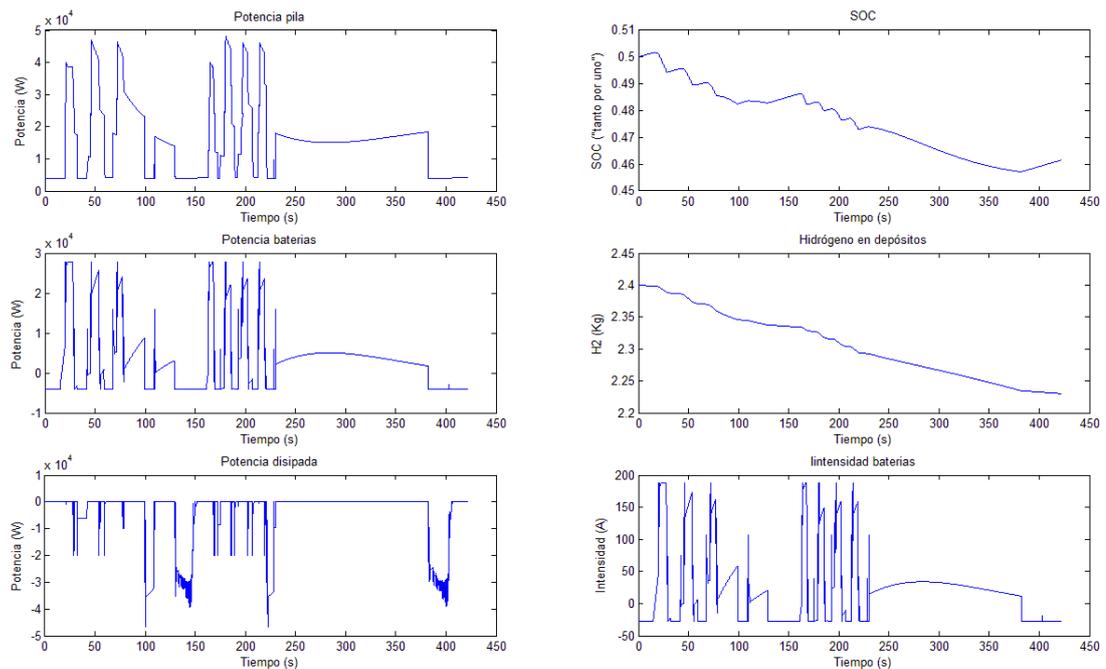


Figura 6.21: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

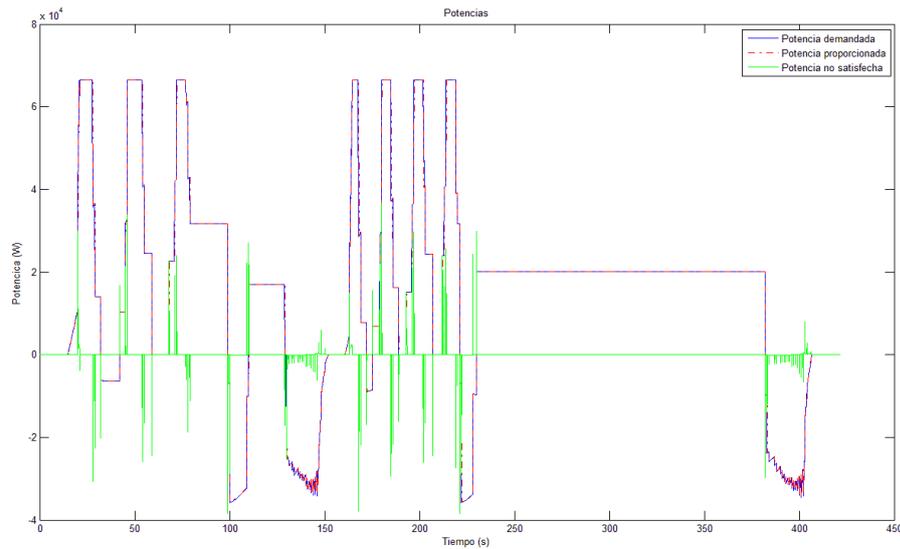


Figura 6.22: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

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 6.21 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 6.22), por una parte debido a éste efecto, y por otra parte debido a los efectos de la dinámica incluida en el sistema, como se comentaba en las simulaciones anteriores.

Como comentario adicional, decir que, como puede verse en la figura 6.22, hay dos frenadas en las que el cálculo de la potencia demandada a partir del ciclo de conducción da un resultado algo ruidoso, y como consecuencia las señales de potencia disipada y de potencia entregada son también algo ruidosas en ese espacio de tiempo. Simplemente comentar que éste efecto no aparecería en la implantación del controlador en un coche real ya que se tendría la verdadera potencia demandada por el conductor. De todas formas, no se viola ninguna restricción y el comportamiento del sistema es satisfactorio.

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.

6.5.5. 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 6.23, 6.24 y 6.25 los resultados de la simulación.

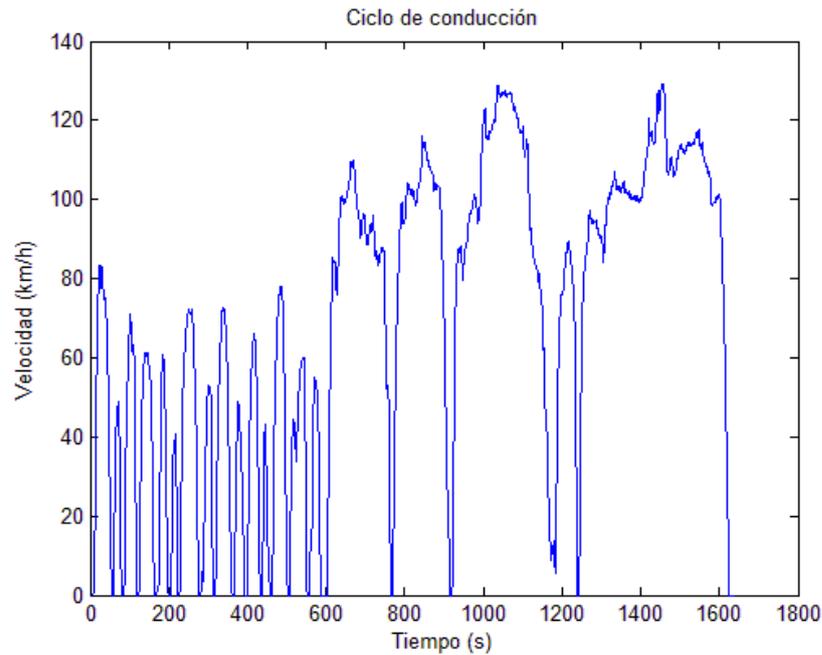


Figura 6.23: Ciclo de conducción severo

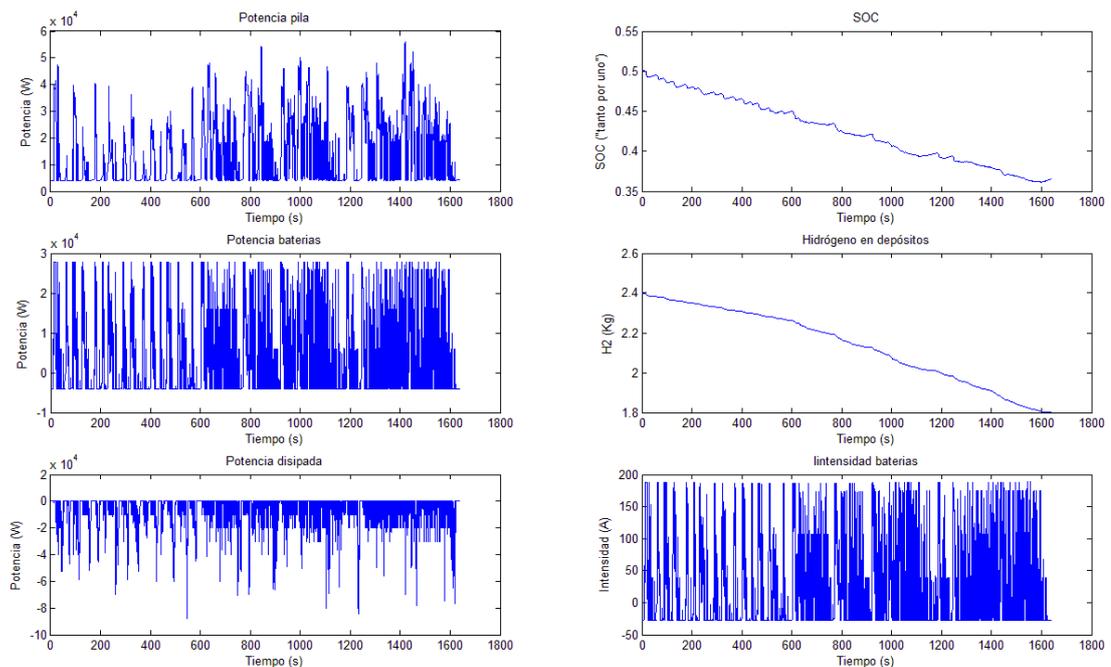


Figura 6.24: Potencias asignadas, SOC, depósito combustible e intensidad baterías

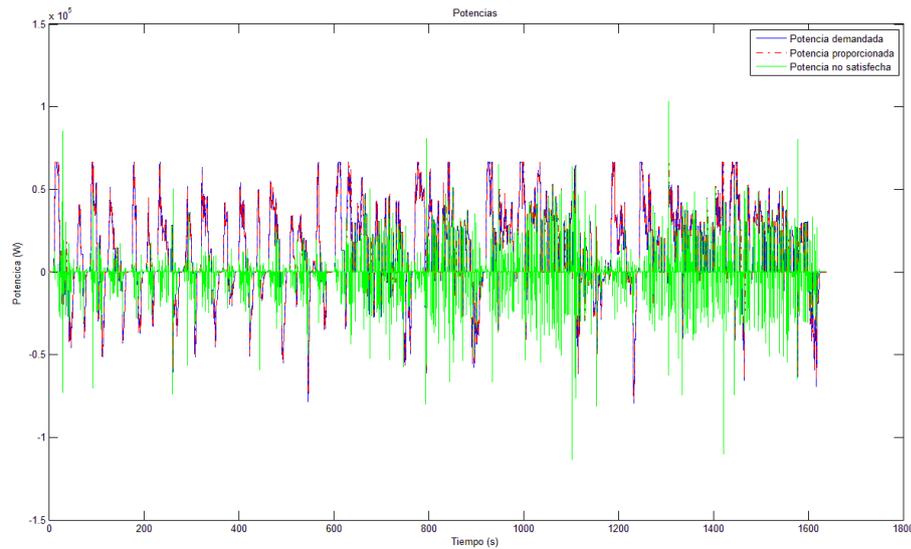


Figura 6.25: Potencia demandada, potencia entregada y potencia no satisfecha

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 6.24, 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 6.25 puede verse como además de los intervalos de tiempo en que el controlador no es capaz de satisfacer toda la potencia demandada debido a restricciones, tal y como ocurría con el algoritmo de control ECMS, ahora aparecen muchos picos de potencia no satisfecha. Estos últimos son debidos a la dinámica del sistema, y aunque en la anterior figura 6.25 parece mucha potencia no satisfecha, la realidad es que son tan sólo numerosos picos de potencia no satisfecha durante breves instantes, justamente cuando ocurre una fuerte aceleración o una fuerte deceleración. A continuación puede verse una imagen que ilustra esto (figura 6.26), viéndose como la potencia está satisfecha la mayor parte del tiempo excepto el comienzo de cada fuerte aceleración o frenada, debido a la dinámica del sistema, como se comentaba anteriormente.

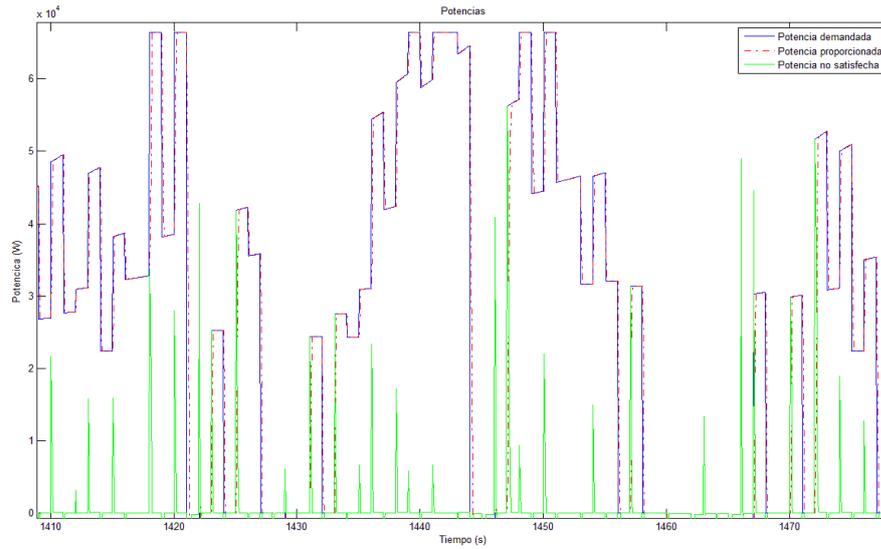


Figura 6.26: Zoom de la potencia demandada, satisfecha y no satisfecha

Como se decía, en la figura 6.26 se muestra un zoom de un trozo de la gráfica 6.25, donde se aprecia como la potencia demandada es satisfecha la mayor parte del tiempo, excepto ciertos picos en las aceleraciones o frenadas debido a la dinámica introducida en el modelo.

6.5.6. Tabla resumen de resultados

En el cuadro 6.2 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 6.2: Tabla resumen de resultados MPC

TABLA RESUMEN DE RESULTADOS - MPC					
Simulación	Ciclo	Modo conducción	SOC inicial	SOC final	H2 consumido
Simulación 1	NEDC	Modo carretera	0,4	0,4448	0,2218 kg
Simulación 2	NEDC	Modo carretera	0,6	0,5179	0,1388 kg
Simulación 3	NEDC	Modo ciudad	0,8	0,6391	0,0338 kg
Simulación 4	Ciclo autopista	Modo carretera	0,5	0,4615	0,1698 kg
Simulación 5	Ciclo severo	Modo carretera	0,5	0,3655	0,5993 kg