

## Gestión energética de vehículos híbridos mediante métodos de control robusto moderno

Energy management of hybrid vehicles using modern robust control methods

**Joseph Eli Izquierdo Obando**

joseph.izquierdo@pucese.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-5828-7767>

Ingeniero en sistemas informáticos, master en tecnologías de la información. Perito Informático de la Función Judicial.

**Aldo Patricio Mora Olivero**

aldo.mora.olivero@utelvt.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0002-4337-7452>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

**Cindy Johanna Choez Calderón**

cindy.choez.calderon@utelvt.edu.ec  
<https://orcid.org/0000-0003-3968-9397>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

**David Leonardo Rodríguez Portes**

david.pucese@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-1574-4382>

Doctorando en Proyectos UBJ México. Ingeniero de Sistemas PUCSE, Director de Proyectos Easytec

### RESUMEN

En este trabajo se propone el control predictivo económico como técnica para la gestión energética óptima de un vehículo híbrido. Se describe el modelo utilizado para el control y a partir del mismo se diseña un controlador predictivo económico. Finalmente, se estudia el mejor ajuste de los pesos del controlador que consiga la mayor reducción del consumo de la pila de combustible con la ayuda de baterías y supercondensadores. Para ello se determinan los puntos de consumo máximo y mínimo de la pila de combustible, y se caracteriza el problema de control multiobjetivo mediante la determinación de las curvas de Pareto. El artículo concluye con una discusión de los resultados y los trabajos futuros.

**Palabras claves:** Control predictivo económico, vehículos híbridos, pilas de combustible, baterías, supercondensadores.

### ABSTRACT

In this paper, economic predictive control is proposed as a technique for optimal energy management of a hybrid vehicle. The model used for the control is described and from it an economic predictive controller is designed. Finally, the best adjustment of the controller weights that achieves the greatest reduction in the consumption of the fuel cell with the help of batteries and supercapacitors is studied. To do this, the maximum and minimum consumption points of the fuel cell are determined, and the multi-objective control problem is characterized by determining the Pareto curves. The article concludes with a discussion of the results and future work.

**Keywords:** Economic predictive control, hybrid vehicles, fuel cells, batteries, supercapacitors.

### INTRODUCCIÓN

Según [5], los vehículos alimentados por una pila de combustible, en comparación con el motor de combustión interna (siglas en inglés ICE), tienen las ventajas de una alta eficiencia energética. Para este trabajo en particular, usaremos un vehículo cuya fuente principal de energía es una pila de combustible y tiene elementos que son capaces de almacenar energía. El objetivo será gestionar de manera óptima la energía del HEV considerando la energía que cada elemento es capaz de entregar o aportar al sistema. Se toma un perfil de velocidad, y lo convertiremos en un perfil de potencia, el que será la demanda del sistema, y las fuentes deben realizar un intercambio energético según sus capacidades, para cumplirlo. Se busca entonces que cada fuente entregue la cantidad óptima de energía (acotada) para permitir el desplazamiento, tomando en cuenta todas sus limitaciones físicas. La combinación de una fuente de almacenamiento de energía reversible (elementos de almacenamiento) con una pila de combustible permite reducir el consumo. También, se podrá recuperar o almacenar parte de la energía generada en el momento del frenado mediante un freno regenerativo, según las capacidades de almacenamiento de cada elemento. A partir del modelo obtenido se diseña un controlador MPC. Una alternativa propuesta es tomar el objetivo económico directamente como parte de la función del objetivo del controlador MPC. De esta forma el controlador optimiza directamente en tiempo real el desempeño económico del sistema, en lugar de forzar el seguimiento de un valor de consigna. Esta estrategia de control se conoce como MPC económico (EMPC, siglas en inglés).

Finalmente se determinan los puntos de consumo máximo y mínimo de la pila de combustible, para mostrar el máximo ahorro alcanzado en la misma. Se caracteriza el problema de control multiobjetivo mediante la determinación de las curvas de Pareto. El artículo concluye con una discusión de los resultados y los trabajos futuros. La estructura del artículo es la siguiente: En la Sección 2, se presenta el modelo del vehículo utilizado para la gestión de la energía. En la Sección 3, se introduce el control predictivo económico (EMPC) utilizado para la gestión óptima de la energía. En la Sección 4, se describen los resultados de aplicación del mismo en un caso de estudio. Finalmente, en la Sección 5 se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

#### 1. Modelo orientado a control

El modelo orientado a control se puede construir a partir de identificar los modelos de cada uno de los componentes del mismo: elementos de almacenamiento, bus de energía, fuentes y demandas. En este artículo, el vehículo considerado presenta los elementos que se muestran en la Figura 1. La fuente de energía principal en el HEV considerado es una pila de combustible, y los elementos de almacenamiento de energía son una batería y un supercondensador. Los supercondensadores y baterías, entregan energía en instantes de tiempo en los que la pila no puede cumplir con la demanda generada por el perfil, y son capaces de recuperar energía que no se disipa mediante el frenado regenerativo (en la desaceleración del perfil). Todos los elementos entregan la energía mediante un bus común, conectado a una maquina eléctrica que se conecta al sistema de tracción del vehículo.

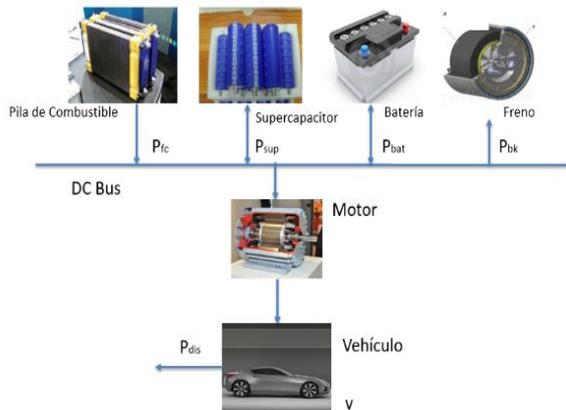


Figura 1. Componentes del vehículo considerado

A continuación, se describirá el modelo orientado a control de cada uno de dichos componentes.

## 1.1. Elementos de almacenamiento

### 1.1.1. Modelo del supercondensador

El modelo de control considerado para el supercondensador

$$E_{sup} = E_{sup,0} + \int_0^t P_{sup} dt \quad (1)$$

donde  $E_{sup}$  es la energía acumulada en el supercondensador,  $E_{sup,0}$  es el valor inicial de la misma y  $P_{sup}$  es la potencia neta proporcionada al supercondensador.

Los límites máximos de carga y descarga de potencia, para las señales de control en torno al parámetro de energía son  $P_{cs}$  y  $P_{ds}$ , teniendo en cuenta la capacidad nominal máxima de entrega de potencia  $P_{max}$ . Los parámetros usados para el supercondensador considerado se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros usados para el supercondensador

Nombre	Valor	Unidad
Voltaje Nominal	48.6	V
Potencia útil	60	kW
C	165	F

### 1.1.2. Modelo de la batería

En [4], se estudia las propiedades de las baterías, y su vida útil en función a los parámetros de carga y descarga de las mismas en aplicaciones de vehículos.

El modelo de control considerado para la batería es análogo al del supercondensador

$$E_{bat} = E_{bat,0} + \int_0^t P_{bat} dt \quad (2)$$

donde  $E_{bat}$  es la energía acumulada en la batería,  $E_{bat,0}$  es el valor inicial de la misma y  $P_{bat}$  es la potencia neta proporcionada por la batería. El estado de carga (SOC) relaciona la cantidad de carga de una batería en relación con su capacidad nominal. Los parámetros usados para el supercondensador considerado se muestran en la Tabla 2.

$$SOC = \frac{E_{bat}}{E_{bat}^{max}} \quad (3)$$

Tabla 2: Parámetros usados para las baterías.

Nombre	Valor	Unidad
Potencia útil	80	kW
Capacidad	2.5	Ah
Máximo carga continua	6.25	A
Máximo descarga continua	25	A

### 1.2. Pila de combustible

Las pilas de combustible presentan un comportamiento no lineal en su característica tensión-corriente, pero es posible utilizar un modelo linealizado capaz de predecir su comportamiento. En estado estacionario, el modelo eléctrico más simple que se puede construir consiste de una fuente de voltaje Thevenin ( $V_c$ ) en serie con una resistencia ( $R_c$ ) y se lo hace en función de variables como la presión de combustible, la humedad, y el estado de catalizador. En un sistema convencional todas las celdas de la pila están conectados en serie, la corriente de carga en cada célula tiene que limitarse a la corriente máxima que una celda del sistema puede suministrar. Teniendo en cuenta este hecho, la potencia de salida máxima de la pila se puede calcular, a efectos del control, la pila de combustible se modelará como una fuente de potencia limitada entre cero y el valor de potencia máxima que puede aportar

$$0 \leq P_{fc} \leq P_{max} \quad (4)$$

### 1.3. Demanda de potencia

Se trabajará con un perfil de velocidad conocido, mostrado en la Figura 2, el mismo que se le proporciona al controlador EMPC. Del perfil de velocidad, se obtiene la potencia necesaria que deben de aportar las fuentes para el movimiento del vehículo.

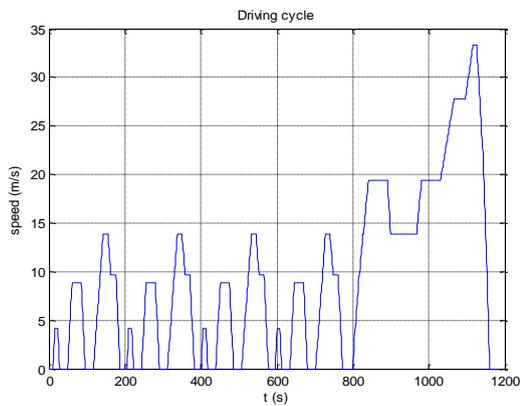


Figura 2: Perfil de velocidad del ciclo de conducción NEDC

La potencia necesaria para el movimiento del vehículo,  $P_{mov}$  se deduce derivando la energía cinética requerida para conseguir el perfil de velocidad deseado (Figura 2)

$$P_{mov} = mv \frac{dv(t)}{dt} \quad (5)$$

Además, deberán vencerse las fuerzas disipativas, que son la fuerza aerodinámica, y la fuerza de fricción con el suelo. La potencia de disipación  $P_{dis}$  que se puede estimar a partir:

$$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho v (SC_x) v^3 + C_{rr} (m) g v + g (m) \sin (\alpha) v \quad (6)$$

donde  $m$  es la masa del vehículo,  $g$  es la gravedad,  $C_{rr}$  es el coeficiente de resistencia a rodamiento,  $\alpha$  es la pendiente de la carretera,  $\rho$  es la densidad del aire,  $S$  es el área frontal del vehículo y  $C_x$  es el coeficiente de arrastre aerodinámico.

## 2.4 Modelo bus de potencia y freno regenerativo

Según se puede ver en la Figura 1, el bus de potencia interconecta todos los componentes del sistema de gestión de energía del vehículo, pudiéndose establecer el siguiente balance

$$P_v = P_{fc} + P_{bat} + P_{sup} + P_{freno} \quad (7)$$

donde  $P_{freno}$  es la potencia que se puede recuperar con el freno regenerativo y  $P_v$  es la potencia total requerida para producir el desplazamiento del vehículo, y su relación con las dos potencias mencionadas anteriormente es:

$$P_v = P_{mov} + P_{dis} \quad (8)$$

donde  $v$ , es la velocidad dada y sus valores futuros son desconocidos en principio. Del vector de potencia cinética, la parte positiva (valores sobre cero), representan la parte que se debe aportar para el movimiento del vehículo, mientras que la parte negativa (valores bajo cero), son las magnitudes que pueden retornar como potencia generada por la energía.

Como ya se había mencionado, para que el vehículo sea capaz de desplazarse, se debe al menos generar la energía necesaria para vencer las fuerzas disipativas, más la energía necesaria para generar en sí, el movimiento (parte positiva de la

energía cinética), a la que llamaremos energía aportada. La Figura 3, muestra el balance de potencias. En azul, se muestra la energía necesaria para el movimiento (aportada) y en verde, la energía que puede ser recuperada.

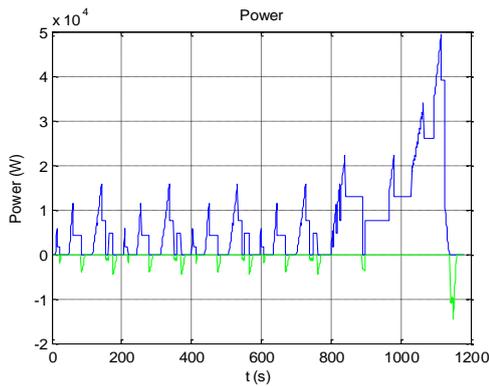


Figura 3: Potencia demandada para seguir el perfil NEDC

El porcentaje máximo de energía recuperable mediante el frenado regenerativo para un perfil de velocidad dado se puede estimar a partir de la evaluación de:

- la  $E_{rec}$  a partir de la energía cinética del vehículo menos las pérdidas por disipación

$$E_{rec} = \int_0^t (P_{mov} - P_{dis}) dt \quad (9)$$

- la energía  $E_{apo}$  que se necesita aportar para producir el desplazamiento para seguir el perfil de velocidad deseado (en el caso de este artículo el que se muestra en la Figura 1)

$$E_{rec} = \int_0^t (P_{mov} - P_{dis}) dt \quad (10)$$

como una relación entre las mismas, definida por:

$$\% rec = \frac{E_{rec}}{E_{apo}} \quad (11)$$

Para el vehículo considerado considerando los parámetros presentando en la Tabla 3 y el perfil de velocidad que se muestra en la Figura 2, dicho valor se acerca al 13%.

Tabla 3: Parámetros vehículo.

Nombre	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad del aire	$\rho$	1.2	kg/m <sup>3</sup>
Coficiente de resistencia al movimiento	$C_r$	0.02	s/u
Coficiente aerodinámico del vehículo	$C_x$	0.33	s/u
Área frontal del vehículo	$S$	3.8	m <sup>2</sup>
Masa del vehículo	$m$	1200	kg
Angulo de carretera	$\alpha$	0	rad

## 2. Control Predictivo Económico (EMPC)

A partir del modelo de los componentes del sistema de gestión de energía del HEV introducido en la sección anterior, se obtendrá primero el modelo de control en espacio de estados, incluyendo las limitaciones de control y se definirán los objetivos del EMPC.

### 2.1. Espacio de Estados

El modelo en espacio de estado para la gestión de energía en un vehículo híbrido se obtiene a partir las ecuaciones de los componentes elementales previa discretización en el tiempo

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_p d(k) \quad (12)$$

$$E_u(k) + E_d d(k) = 0 \quad (13)$$

donde:

$x(k) \in R^n$ , es el vector de estados, que para el caso en particular, representa la energía almacenada por la batería  $E_{bat}$ , supercondensador  $E_{sup}$ , pila de combustible  $E_{fc}$  y movimiento durante todo el ciclo de conducción  $E_{mov}$ .

$u(k) \in R^m$ , es el vector de variables de control, que está compuesto por la potencia neta de la batería  $P_{bat}$ , del supercondensador  $P_{sup}$ , de la pila de combustible  $P_{fc}$  y del freno regenerativo  $P_{freno}$

$d(k) \in R^p$ , es el vector que contiene las perturbaciones medidas en el sistema, que son las demandas de potencia  $P_v$  para seguir el perfil de velocidad. Las demandas se han dividido en dos partes, una primera demanda es la potencia necesaria para desplazar el vehículo  $d^+$ , y una segunda demanda es la energía que es capaz de recuperarse como parte del frenado regenerativo  $d^-$ .

$A$ ,  $B$  y  $B_p$  son las matrices de estado, mientras  $E$  y  $E_d$  son matrices que describen la relación de equilibrio entre los estados, y llevan los signos de aporte de potencia (+), o resta de potencia del sistema (-), entendiéndose que la pila de combustible, y las descargas de los elementos de almacenamiento, aportan al sistema, mientras las cargas de los mismos, piden energía (tomada del frenado).

### 2.2. Restricciones de Control.

Las restricciones operativas de las señales de control se establecen mediante cotas

$$u_{min}(k) \leq u(k) \leq u_{max}(k) \quad (14)$$

que se pueden incluir en el problema de optimización del control MPC como restricciones de desigualdad

$$u_{min}(k) - u(k) \leq 0, \quad (15)$$

$$u(k) - u_{max}(k) \leq 0 \quad (16)$$

### 2.3. Restricciones de Estado

Para el caso de las restricciones de estado, podemos limitarlas como se muestra en

$$x_{min}(k) \leq x(k) \leq x_{max}(k) \quad (17)$$

e incluirlas en el problema de optimización.

### 2.4. Función de Coste

El principal objetivo de un sistema híbrido de energía renovable es aprovechar al máximo la energía disponible y satisfacer la demanda solicitada por las cargas, optimizando al mismo tiempo el almacenamiento o provisión de energía en exceso o déficit que esté presente durante cada instante de tiempo. La función de coste es la traducción de los objetivos de control en una expresión matemática. En el control predictivo clásico se penalizan las desviaciones en las acciones de control futuras con respecto a la trayectoria de referencia definida convenientemente. En el control EMPC aplicado a sistemas de gestión de energía, la función de coste típicamente adopta la siguiente forma:

$$\min \sum_{k=0}^{H_p-1} f_1(k) + \sum_{k=0}^{H_p} f_2(k) + \sum_{k=0}^{H_p-1} f_3(k) \quad (18)$$

En la Sección 4, se introducirá un enfoque para resolver este problema de optimización multiobjetivo, en donde se variará este peso para lograr una compensación entre los objetivos de control que satisfaga lo que se desea del sistema. Las funciones objetivo individuales en (18), se definen mediante:

- el coste económico de operación:

$$f_1(k) = W_\alpha u(k) \Delta t \quad (19)$$

donde  $W_\alpha$ , es el peso que se le da a la función de coste al término económico.

- el mantenimiento de umbrales de seguridad en los dispositivos de almacenamiento de energía:

$$f_2(k) = \epsilon(k)^T W_x \epsilon(k) \quad (20)$$

donde  $\epsilon(k)$  que se define como el valor de penalización de las restricciones relacionadas con los valores de seguridad de los estados de carga de los elementos de almacenamiento de energía.  $W_x$  es una matriz de pesos asociada a dichas penalizaciones. En el caso en particular, se colocará un SOC de seguridad a los elementos de almacenamiento.

- la operación suave de las acciones de control:

$$f_3(k) = \Delta u(k)^T W_u \Delta u(k) \quad (21)$$

donde para obtener un control suave, definimos  $\Delta u(k)$  como el vector de variaciones en la señal de control y  $W_u$  la matriz de pesos asociada a las acciones de control. De igual manera que para (21), luego se variará el valor de este peso para lograr un control suave satisfaciendo a la vez los otros objetivos.

La formulación del problema de optimización y su resolución mediante programación cuadrática se realiza utilizando CPLEX/TOMLAB como se muestra en [12], en donde se explican los detalles. Se tratan entonces de tomar en cuenta la siguiente problemática, la misma que se representa en el modelo de control usado:

- las demandas del sistema, tanto para el aporte de energía, como la fracción de energía recuperable mediante el frenado regenerativo.
- la carga y descarga de los elementos de almacenamiento, sabiendo que del frenado regenerativo se puede aprovechar energía.
- finalmente, la energía aportada por la fuente principal (pila de combustible), para cumplir el perfil de velocidad dado.

## 4. Optimización multiobjetivo

### 4.1 Formulación

El método de la suma ponderada permite que el problema de optimización multiobjetivo

sea tratado como una sola función objetivo, compuesta por varias partes, como lo muestra (19). Entonces, se busca minimizar la función objetivo, construida como una suma de funciones objetivo individuales multiplicados por los coeficientes de ponderación. Estos coeficientes, son los que nos van a permitir definir la importancia que queremos que tomen cada una de las funciones como tales. Esta minimización debe estar sujeta a:

$$\min_{y \in \mathbb{R}^n} \{F_1(y), F_2(y), \dots, F_n(y)\} \quad (22)$$

$$g(y) \geq 0 \quad (23)$$

$$h(y) = 0 \quad (24)$$

en donde,  $y$  representa las variables de decisión, las mismas que son las secuencias de  $[x, u]$ . Entonces todas las  $F_i$  se agrupan en un vector de coste  $F(y) = [F_1(y), F_2(y) \dots \dots \dots F_n(y)]^T$ . El vector  $g$  y el vector  $h$ , representan las restricciones de igualdad y de desigualdad, denotadas por (14) y (17)

$$g = [g_1(y), g_2(y) \dots \dots \dots g_n(y)]^T \quad (25)$$

$$h = [h_1(y), h_2(y) \dots \dots \dots h_n(y)]^T \quad (26)$$

Este método se ha utilizado ampliamente para proporcionar un único punto de solución que refleje las preferencias incorporados en la selección de un conjunto de pesos. Como diferentes funciones objetivo pueden tener diferente magnitud, la normalización de los objetivos es requerida para obtener una solución consistente de Pareto.

### 4.2 Normalización

Para aplicar el método de la frontera de Pareto, debemos introducir algunos conceptos. Debemos buscar un minimizador  $y^{i*}$  para la función de coste  $F_i(y)$ . Entonces los *puntos de utopía*, definidos por  $F^* = [F^*_1, \dots \dots \dots F^*_{nf}]^T$

contienen los mínimos de las funciones objetivos individuales (19), (20) y (21),  $F_i(y^{i*})$ , además contienen también los mínimos individuales de los vectores de coste  $F(y^{i*})$ , el mismo que resulta el coste evaluado por el minimizador individual. Los puntos aproximados de Nadir  $F^N = [F^N_1, \dots, F^N_{n_f}]^T$  contiene el peor valor para cada objetivo, obtenido a partir de los vectores de costos mínimos individuales  $F_i^N = \max\{F_i(y_j^*)\}$  con  $j=1, \dots, n_f$ . Usando los minimizadores individuales,  $F_{a,i} = F(y^{i*})$  como los denominados puntos de anclaje, la matriz de resultante  $\vartheta$  contiene en ella la  $i$ -ésima columna del vector  $F_{a,i} - F^*$ . Alternativamente, al usar los pseudo puntos de anclaje,  $F_{pa,i} = [F^N_1, F^N_2, \dots, F(y^{i*}), \dots, F^N_{n_f}]^T$  la matriz de resultante  $\vartheta$  tiene la  $i$ -ésima columna del vector  $F_{pa,i} - F^*$ .

$$\min_{y \in S} F_{ws}(y) = \sum_{i=1}^{n_f} w_i F_i(y) \quad (27)$$

de donde  $w_i$  es el vector de parámetros escalables, o denominados pesos.  $F_i$  vendría a representar la ecuación (19). Para los pesos tenemos:

$$\sum_{i=1}^{n_f} w_i = 1, w_i \geq 0 \quad (28)$$

### 5. Resultados obtenidos

La Figura 4 muestra como se ha simulado el esquema de control del sistema de gestión de energía del vehículo propuesto en este artículo. El controlador EMPC recibe la potencia requerida para el movimiento tomando en cuenta el balance de potencias con las ecuaciones no lineales de la fuerza de resistencia al movimiento. De esta manera la parte no lineal del modelo del HEV considerado para la gestión de energía queda reducida a una demanda (ver Sección 2 para más detalles). Se muestra además, de que el controlador nos proporciona las estrategias de manejo óptimo de los flujos de potencia entre los diferentes elementos del sistema, teniendo en cuenta el estado de carga de los elementos de almacenamiento y la predicción de proporcionada por el modelo lineal utilizado por el EMPC.

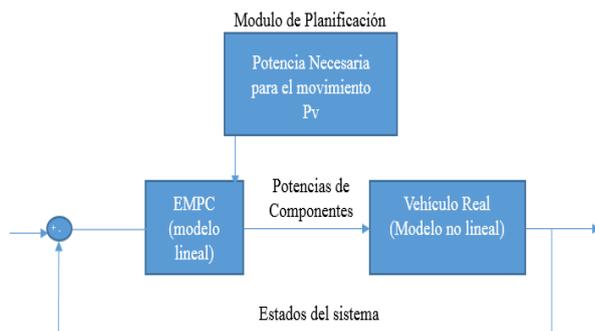


Figura 4: Principio de funcionamiento del esquema de control

En una primera parte, se trabajará con un objetivo de control puramente económico, manteniendo los pesos  $W_u$  y  $W_x$  en cero. Entonces, dentro de esta primera parte, para evaluar el controlador EMPC se han considerado inicialmente tres escenarios de simulación, con un horizonte de predicción de 10 muestras y un tiempo de muestreo de 1 segundo.

#### 5.1. Escenarios para verificación de función de peso económica

El primer escenario que se considera, asume que las fuentes de generación y almacenamiento que aportan al sistema presentan el mismo coste de generación. En el segundo escenario se considera que la pila de combustible sea una fuente con un coste de generación bajo, mientras que el aporte de las fuentes de almacenamiento al sistema, se las considera

con costes de generación más elevados. En el tercer escenario, se considera que la pila de combustible es una fuente con un coste alto de generación, mientras que las demás fuentes poseen un coste menor al de la pila. La Tabla 4, muestra la variación de la potencia entregada por la pila de combustible, dependiendo del escenario considerado. En dicha tabla, se comprueba que penalizando el coste de la pila de combustible (ver más detalles en Sección 3), se puede restringir el uso de la misma, o aumentar en caso de ser necesario.

Tabla 4: Aporte de la pila de combustible en cada escenario de simulación

1.1. Coste de Generación	1.2. Energía entregada por la Pila de Combustible [J]
1.3. <b>Primer Escenario</b>	1.4. 2.019.324,08
1.5. <b>Segundo Escenario</b>	1.6. 2.102.019,46
1.7. <b>Tercer Escenario</b>	1.8. 1.998.965,87

No obstante, existen límites de energía que la pila de combustible puede entregar. Un primer límite corresponde al caso en que la pila de combustible nos da la mayoría de energía del movimiento

$$d^+ \cong P_{FC} \quad (29)$$

En este punto, conociendo la energía total necesaria para el movimiento, la comparamos con la entregada por el MPC, y vemos que la pila genera la máxima energía para el movimiento del vehículo. Mientras, que en el otro límite (30), la pila de combustible nos entrega el valor mínimo que debe dar para permitir cumplir el perfil de velocidad dado, siendo el resto de aportes de las fuentes de almacenamiento, con la energía recuperada del frenado regenerativo. Entonces:

$$d^+ - d^- \cong P_{FC} \quad (30)$$

Las Tablas 5 y 6, resumen los puntos descritos por (29) y (30).

Tabla 5: Aporte máximo de la pila de combustible en la simulación

1.9. $E_{MOVIMIENTO}$ [J]	1.10. $E_{FC}$ [J]	1.11. % Pila
1.12. <b>2.177.473,40</b>	1.13. 2.176.934,71	1.14. 99,98

Tabla 5: Aporte mínimo de la pila de combustible en la simulación

1.15. $E_{MOVIMIENTO} - E_{REC}$ [J]	1.16. $E_f$ [J]	1.17. % PILA
1.18. <b>1.909.596,49</b>	1.19. 1.921.803,5	1.20. 8,25

En el valor (30) se corresponde con el caso donde se presenta el máximo uso del frenado de regenerativo. Si comparamos los valores de la energía aprovechada, con los resultados de (11) para el HEV considerado, podremos observar que los valores se acercan a un 13%, con los que se comprueba, que los límites estén correctos. La Figura 5 muestra el flujo de potencia para el mencionado punto. En donde, en la subgráfica 1, se puede observar la potencia entregada por la pila de combustible, mientras en las siguientes, se observa la potencia de la batería y del Supercapacitor respectivamente, en los instantes que el perfil lo exige.

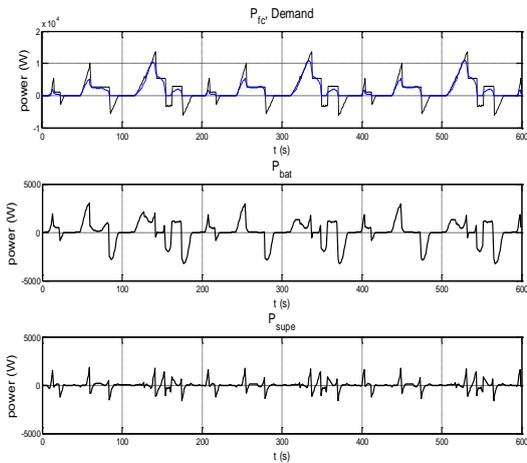


Figura 5: Flujo de potencia de elementos.

### 5.2. Ajuste de los pesajes

Como ya se mencionó, para modificar los pesos de las señales de potencia, en (19), hemos variado  $W_{\alpha}$ . Una matriz de cinco pesos, nos permiten modificar el coste de operación de los componentes. Mientras, que para el caso del control multiobjetivo, en (19), (20) y (21), se muestran los pesos  $W_{\alpha}$ ,  $W_x$  y  $W_u$ . Para variar la potencia entregada por los componentes, hemos trabajado con el  $W_{\alpha}$ , que es el peso que nos permite cambiar la energía aportada por los elementos en función del coste de generación, mientras mantenemos el resto de valores en cero. Finalmente, para lograr un control multiobjetivo de las tres funciones de control introducidas en (18), una vez normalizado el sistema con las condiciones estudiadas en la Sección 4, se variarán todos los pesos ( $W_{\alpha}$ ,  $W_x$  y  $W$ ) entre el 0% y el 100% (0 a 1). Las Figuras 6 y 7, muestra la compensación entre la función económica versus la de control, y la económico versus la de seguridad respectivamente con un SOC del 5%. Como podemos observar, mientras el uno aumenta, el otro va decreciendo, en función del punto óptimo al que deseemos llegar.

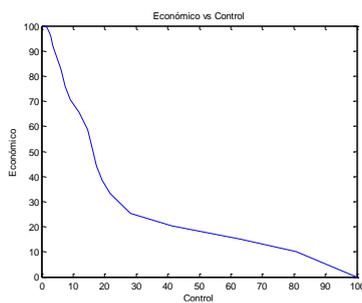


Figura 6: Variación de la función económica vs la de control

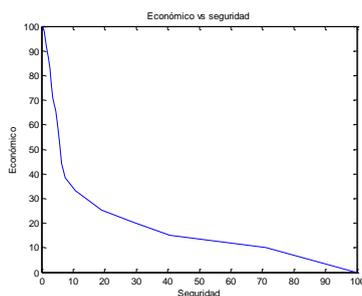


Figura 7: Variación de la función económica vs la de seguridad

La Figura 8 muestra en un gráfico tridimensional en el que se puede analizar la compensación entre las funciones económicas, de control y de seguridad del sistema propuesto, manteniendo el mismo comportamiento que las figuras anteriores.

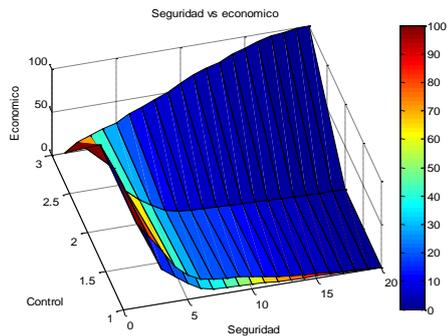


Figura 8: Variación de la función económica vs la de seguridad vs la de control

Al colocar un SOC de seguridad sobre los elementos de almacenamiento (10%), y subir el peso de la función individual de seguridad, veremos que el valor de energía de la batería no fluctúa hasta cero en caso de descarga de la misma. La Figura 9, muestra que al subir el valor  $W_x$  el valor de energía mínimo en la batería es distinto de cero.

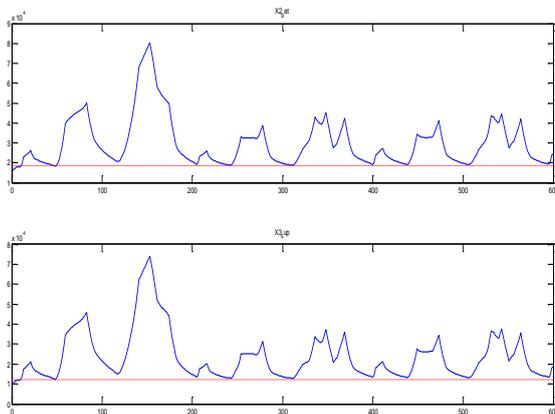


Figura 9: Flujo de energía de la batería y supercondensador cuando  $W_x$  es distinto de cero.

### 5.3. Discusión de los resultados.

En la simulación del segundo escenario, se observa que la casi totalidad de potencia requerida para el movimiento viene dada por la pila de combustible, mientras que la batería y el supercondensador, almacenan energía, pero no la entregan al sistema cuando este lo requiere, debido a que son fuentes con un coste más elevado. Para el tercer escenario, se observa que las fuentes de almacenamiento entregan la energía que almacenan.

Mientras se varía los pesos de la pila de combustible, manteniendo los demás pesos de los elementos de almacenamiento constantes, se puede llegar a obtener el valor mínimo que entrega la pila para el movimiento del vehículo, cuyo valor coincide con el límite o tasa máxima de recuperación de energía de acuerdo al perfil de velocidad dado.

Finalmente, para mejorar la vida útil de los elementos, las acciones de control, en torno a las derivadas de las potencias, deben ser más suaves, por lo que se busca aumentar el peso de la función de control  $W_u$ , logrando de esta manera cumplir este objetivo. Se ha considerado una banda de seguridad para el SOC del 5% para los elementos de almacenamiento.

## CONCLUSIONES

Este trabajo propone el uso del control EMPC como técnica de gestión óptima. Se ha presentado el modelo utilizado para el control del sistema y se ha formulado el problema de control EMPC. En la función de coste, además de los términos usados para los estados del sistema y las señales de control, el término económico puede ponderar el uso de las fuentes

mediante pesos, colocándolos con costes de generación altos y bajos. Finalmente se han obtenido simulaciones, en donde se estudia el efecto del ajuste de los pesos mencionados del controlador de forma que se consiga la reducción del consumo de la pila de combustible. También se presenta un enfoque inicial de control multiobjetivo, en donde se presentan las variaciones en las funciones de coste, según varía el pesaje sobre cada una de ellas. Como trabajo futuro, se analizará de forma más precisa el tuning de las funciones de control, para el enfoque multiobjetivo.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por la ayudas del Ministerio de Educación de España a través de los CICYT ECOCIS (ref. DPI2013-48243-C2-1-R) and CICYT HARCRCIS (ref. DPI2014-58104-R) y MICAPEM-IRI (DPI2015-69286-C3-2-R), [MINECO/FEDER].

### REFERENCIAS

- [1] Agarwal, V., Dev, M. (2013). Introduction to hybrid electric vehicles: State of art. In Engineering and Systems (SCES), 2013 Students Conference on (pp. 1-6). IEEE.
- [2] Agarwal, V., Saxena, R. (2014). An Introduction to Fuel Cell Electric Vehicles: State of Art. MIT International Journal of Electrical & Instrumentation Engineering, 4(1), 35-38.
- [3] Azib, T., Hemsas, K. E., & Larouci, C. (2014). Energy Management and Control Strategy of Hybrid Energy Storage System for Fuel Cell Power Sources. International Review on Modelling and Simulations (IREMOS), 7(6), 935-944.
- [4] Carter, R., Cruden, A., & Hall, P. J. (2012). Optimizing for efficiency or battery life in a battery/supercapacitor electric vehicle. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 61(4), 1526-1533.
- [5] Ehsani, M., Gao, Y., & Emadi, A. (2009). Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design. CRC press.
- [6] Feroldi, D., Serra, M., & Riera, J. (2009). Energy management strategies based on efficiency map for fuel cell hybrid vehicles. Journal of Power Sources, 190(2), 387-401.
- [7] Haitao, Y., Yulan, Z., Zunnian, L., & Kui, H. (2013). LQR-Based Power Train Control Method Design for Fuel Cell Hybrid Vehicle. Mathematical Problems in Engineering, 2013.
- [8] International energy Agency, "Key World Energy Statics" <http://www.iea.org> 2015.
- [9] Khurana, H., Hadley, M., Lu, N., & Frincke, D. A. (2010). Smart-grid security issues. IEEE Security & Privacy, (1), 81-85.
- [10] Sciarretta, A., De Nunzio, G., & Ojeda, L. L. (2015). Optimal Ecodriving Control: Energy-Efficient Driving of Road Vehicles as an Optimal Control Problem. Control Systems, IEEE, 35(5), 71-90.
- [11] Serrao, L., Sciarretta, A., Grondin, O., Chasse, A., Creff, Y., Di Domenico, D., & Thibault, L. (2013). Open issues in supervisory control of hybrid electric vehicles: A unified approach using optimal control methods. Oil & Gas Science and Technology–Revue d'IFP Energies nouvelles, 68(1), 23-33.
- [12] Toro, R. (2010). Smart tuning of predictive controllers for drinking water networked systems (Doctoral dissertation, Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- [13] Xu, N., Zhang, Y., Fu, Z., Zhao, D., Chu, L., & Zhou, F. (2015, April). Investigation of Topologies and Control Strategies of Fuel Cell Vehicles. In 2015 International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics. Atlantis Press