

Gestión de energía, mediante control predictivo, de un vehículo de pila de combustible

Ruiz Sicilia, Á.^{a,*}, Escachx Estévez, B.^a, Costa-Castelló, R.^b

^a*Institut de Robòtica i Informàtica Industrial, CSIC-UPC, Llorens i Artigues 4-6, 08028 Barcelona, Spain*

^b*Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).*

To cite this article: Ruiz Sicilia, A., Escachx Estévez, B., Costa-Castelló, R. 2023. Model Predictive Control for energy management in fuel cell vehicles.

XLIV Jornadas de Automática, 358-363. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498609.358>

Resumen

En este trabajo se propone el uso del Control Predictivo (MPC) para resolver el problema de la gestión de energía en un vehículo híbrido en un entorno industrial. En concreto, se propone un controlador para un sistema híbrido de tracción compuesto por una pila de combustible de hidrógeno y una batería. Los objetivos de control son, además de proporcionar la potencia demandada por el motor, mejorar la eficiencia energética del sistema y prolongar la vida útil de sus componentes. Por otro lado, se consideran las restricciones que suponen los límites físicos del sistema real. Finalmente, se presentan los resultados en simulación del controlador de un modelo del sistema real donde se pretende implementar el controlador.

Palabras clave: Vehículo híbrido, Pila de combustible para aplicaciones de automoción, Sistemas energéticos, Control predictivo y óptimo, Vehículos eléctricos y solares.

Model Predictive Control for energy management in fuel cell vehicles

Abstract

This paper proposes the use of Predictive Control (MPC) to solve the problem of energy management in a hybrid vehicle in an industrial environment. Specifically, a controller for a hybrid drive system consisting of a hydrogen fuel cell and a battery is proposed. The control objectives are, in addition to providing the power demanded by the motor, to improve the energy efficiency of the system and prolong the useful life of its components. On the other hand, the restrictions that suppose the physical limits of the real system are considered. Finally, the simulation results of the controller of a model of the real system where the controller is intended to be implemented are presented.

Keywords: Hybrid and alternative drive vehicles, Fuel cells for Automotive Applications, Energy systems, Model predictive and optimization-based control, Electric and solar vehicles.

1. Introducción

En los últimos años, los vehículos eléctricos han sido impulsados tanto por cuestiones medioambientales como por el desarrollo tecnológico. Uno de los principales problemas que encuentran estos vehículos es la limitación que supone el uso de una batería como fuente de energía. La restricción principal que impone una batería eléctrica es la limitada carga que puede transportar sin suponer un elemento cuya carga reduzca la eficiencia en el movimiento del vehículo así como el coste que

representan las baterías de alta capacidad. Por otro lado, la vida útil de las baterías eléctricas es un tema muy estudiado actualmente y sobre el que se espera una gran desarrollo en el futuro. El estado de carga de las baterías, *State of Charge* (SOC), influye en la vida útil de estos dispositivos, acortándola para estados de carga máxima y mínima, por tanto, es recomendable mantener el SOC entre el 20 % y el 80 % como indica Wikner and Thiringer (2018).

*Autor para correspondencia: alvaro.ruiz.sicilia@upc.edu
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

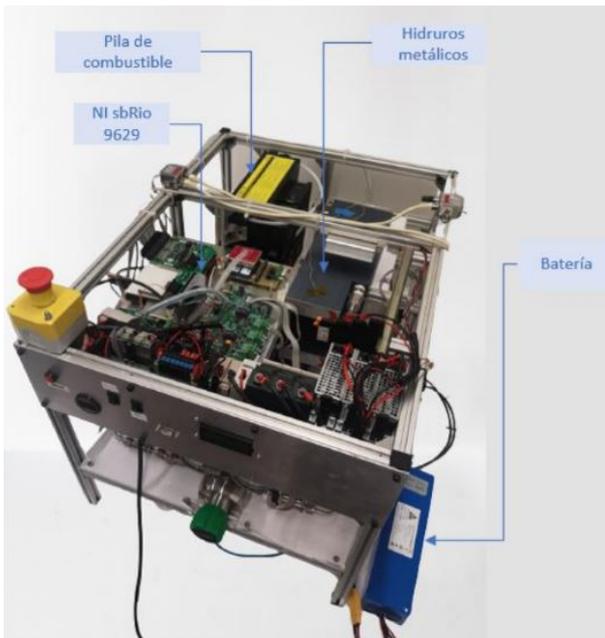


Figura 1: Dispositivo de experimentación Dovelar

En paralelo al desarrollo de las baterías, recientemente se han ido desarrollando, como fuente energía de cero emisiones, las pilas de combustible de hidrógeno. Mediante hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2), en el interior de la pila se lleva a cabo una reacción química que libera energía eléctrica y H_2O . Esta energía eléctrica puede utilizarse como fuente de energía para dispositivos electrónicos. En la actualidad, estos dispositivos son capaces de producir energía para alimentar grandes sistemas como vehículos, pero debe considerarse, como un elemento limitante, el consumo de combustible, en este caso el hidrógeno. Tanto la producción de H_2 , de gran pureza como requiere la pila de combustible, y su almacenamiento son cuestiones donde se esperan avances en los próximos años.

En el caso de los vehículos híbridos, la estrategia de gestión energética es un problema complejo a resolver. Para esta cuestión, la utilización de un controlador predictivo, *Model Predictive Control* (MPC), puede suponer una gran ventaja de cara a la eficiencia energética del vehículo con propuestas reales desarrolladas en los últimos años tanto para una formulación lineal Guzzella and Sciarretta (2007) como no lineal Borhan et al. (2012). En ambos casos se utiliza la plataforma de simulación PSAT Rousseau et al. (2001). Otro ejemplar de formulación no lineal y varinante con el tiempo es Carignano et al. (2016). En un sistema energético compuesto por una fuente de alimentación y un sistema de almacenamiento que debe proveer de energía para un determinado perfil de carga, el problema dispone de un único grado de libertad (Borhan et al., 2009), convirtiéndose en un control de una entrada y una salida. El trabajo está organizado de forma que en la segunda Sección se presenta el modelo energético del vehículo híbrido. En la Sección 3, se presenta el Controlador Predictivo propuesto y las distintas cuestiones que trata de resolver. En la Sección 4 se presentan los resultados obtenidos en simulaciones y, por último, en la Sección 5 se exponen conclusiones las obtenidas.

Tabla 1: Parámetros mecánicos del vehículo

Parámetro	Valor
Masa del vehículo (m)	80 kg
Coef. penetración de un cubo (C_x)	1,05
Densidad del aire (ρ)	1,225 kg/m ³
Superficie frontal (S)	0,75 m ²
Coef. fricción rodadura (u_k)	0,0055
Rendimiento mecánico (η_m)	0,9
Recudimiento motor eléctrico (η_e)	0,9
Gravedad (g)	9,81 m/s ²

2. Descripción del modelo

2.1. Dispositivo real de experimentación

Se dispone de un sistema híbrido de tracción de experimentación donde realizar las pruebas del control del sistema energético de un vehículo, este dispositivo es llamado Dovelar (Figura 1).

El Dovelar está planteado para realizar la gestión de energía de un vehículo industrial híbrido. Cuenta con una batería y una pila de combustible, las dos fuentes de energía del vehículo híbrido simulado, ambas conectadas a un bus común donde se ubica la carga. No se dispone de un motor eléctrico por lo que se genera la potencia necesaria que simula la carga que requiere un motor eléctrico para un determinado perfil de conducción. En lo referente a la pila de combustible de hidrógeno, el sistema cuenta con dos tanques de hidruros metálicos, elemento que permite almacenar H_2 a menor presión. Estos tanques proporcionan el combustible que requiere la pila en cada instante mediante un sistema de tuberías que conecta ambos dispositivos. El Dovelar cuenta con un controlador de National Instruments, NI sbRio 9629, dispositivo que gestiona todas las señales del sistema y permite comunicarse en tiempo real al Dovelar con sistemas externos. La NI sbRio 9629 indica al convertidor DC/DC de la pila de combustible que corriente debe proporcionar al bus común. La batería funciona como elemento pasivo proporcionando la corriente que resta hasta alcanzar la carga del motor simulado.

2.2. Modelo mecánico del vehículo

La gestión energética del vehículo industrial se realiza para proporcionar la energía que necesita para poder desplazarse siguiendo un determinado perfil de velocidad. A cada perfil le corresponde, en función de los parámetros mecánicos del vehículo, una potencia mecánica y eléctrica. El controlador desarrollado en el sistema de gestión energética debe responder a la potencia correspondiente que permite al vehículo realizar el desplazamiento deseado considerando los parámetros mecánicos del sistema (ver la Tabla 1).

En contra del desplazamiento del vehículo se oponen la fuerza de fricción con el suelo (1) y la fuerza resistiva aerodinámica (2), siendo k cada instante temporal de muestreo y v la velocidad del vehículo.

$$F_r = u_k \cdot m \cdot g \quad (1)$$

$$F_a(k) = \frac{1}{2} \rho S C_x v(k)^2 \quad (2)$$

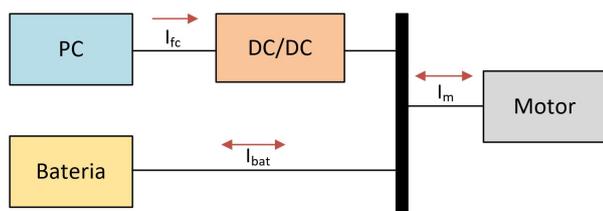


Figura 2: Arquitectura del modelo energético del vehículo

Con todas las fuerzas que actúan sobre el vehículo calculadas, es posible hallar la potencia mecánica (3) que se requiere para cumplir un determinado perfil de velocidad. T_s es el tiempo de muestreo del sistema.

$$P_m(k) = [(m \cdot a(k) \cdot v(k) + (F_r + F_a(k)) \cdot v(k)] \cdot \eta_m \cdot \eta_e \cdot T_s \quad (3)$$

2.3. Arquitectura energética

El modelo eléctrico (Figura 2) es el encargado de proporcionar la potencia que requiere el perfil de velocidad del vehículo. El Dovelar está compuesto por una batería y una pila de combustible de hidrógeno, ambas fuentes de energía que alimentan al motor eléctrico. A la salida de la pila está conectado un convertidor de corriente continua para proporcionar la corriente deseada proveniente de la pila de combustible. Por otro lado, la batería proporciona de forma pasiva la corriente restante para alcanzar la potencia demandada por el motor eléctrico, a la vez que fija la tensión de bus.

La corriente de la batería es bidireccional, pudiendo cargarse en caso de recibir una potencia negativa. Cuando la pila de combustible proporciona más potencia de la demandada por la carga del motor se produce un incremento de la carga almacenada en la batería. El segundo escenario donde se carga la batería ocurre en las etapas regenerativas del perfil de conducción, es decir, etapas de frenado. Durante este proceso se produce una energía mecánica que puede reutilizarse en aumentar la carga de la batería.

La ecuación fundamental para la gestión de energía es la que corresponde con la suma de corrientes de cada fuente de energía (4), siendo I_m corriente demanda por el motor, I_{bat} la corriente proporcionada por la batería y I_{fc} es la corriente proporcionada por la pila de combustible y η_{DC} es una constante de eficiencia vinculada al convertidor DC/DC a la salida de la pila de combustible. En el escenario de la gestión energética del vehículo, I_m está fijado por la demanda del motor y se desconoce su valor real para instantes de muestreo futuros, I_{fc} es seleccionado por el controlador diseñado y I_{bat} se fija de forma pasiva para cumplir con la igualdad.

$$I_m = I_{bat} + \eta_{DC} \cdot I_{fc} \quad (4)$$

Tanto I_{bat} como I_m pueden tomar valores positivos y negativos. Cuando I_m es negativo implica una etapa de frenado, donde la energía que se produce es reutilizada para cargar la batería. En el caso de que I_{bat} es negativa significa que la batería está recibiendo energía y, por tanto, aumentando su carga. Por último, I_{fc} solo puede ser positiva, la pila de combustible solo puede proporcionar corriente.

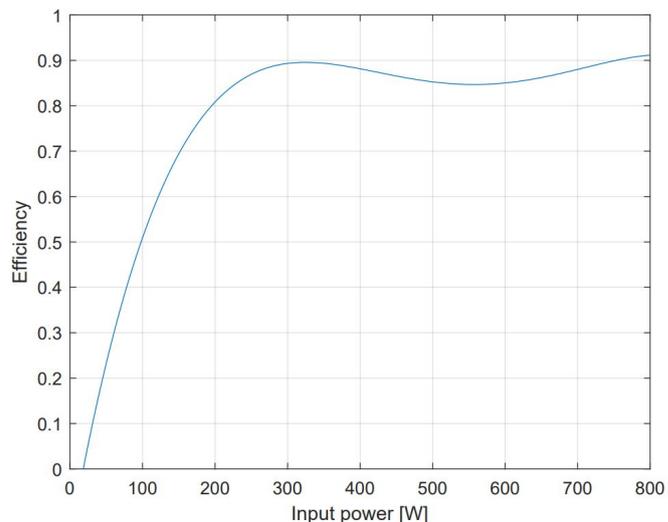


Figura 3: Curva de eficiencia del convertidor DC/DC

2.4. Batería

La batería es el elemento del sistema que permite almacenar energía y disponer de ella según el criterio del controlador. Por tanto, la batería se carga y descarga durante el recorrido del vehículo. Idealmente, los niveles de carga de la batería deben permanecer entorno al 20 % y 80 % de carga para reducir la degradación de la carga máxima del dispositivo.

La batería de ION-Litio modelada pertenece al fabricante Alterity y contiene 13 módulos en serie con una tensión nominal de 47V y una capacidad de 6,7 Ah.

$$SOC(k+1) = SOC(k) + \frac{T_s}{Q_{bat}} (I_{fc}(k) - I_m(k)) \quad (5)$$

El SOC de la batería está modelado según (5), siendo Q_{bat} la capacidad de la batería. La actualización del estado de carga de la batería depende de la corriente que es demandada por el motor y por la corriente proporcionada por la pila de combustible, permitiendo así que la batería se cargue o descargue.

2.5. Pila de combustible

La pila de combustible es el dispositivo que mediante el consumo de combustible, en este caso H_2 , produce energía eléctrica capaz de alimentar dispositivos electrónicos. Un elemento fundamental de la pila de combustible es la gestión del combustible, a menor consumo de H_2 por unidad de potencia eléctrica generada más eficiente es la pila.

La pila de combustible implementada corresponde con el modelo H1000 XP de tipo PEM con una potencia nominal de 1000W y 50 celdas.

A la salida de la pila de combustible se encuentra un convertidor DC/DC con una eficiencia media de 0,85, cuya eficiencia depende de la potencia de entrada (Figura 3). La corriente a la salida del convertidor se transmite al bus común compartido con la batería y el motor.

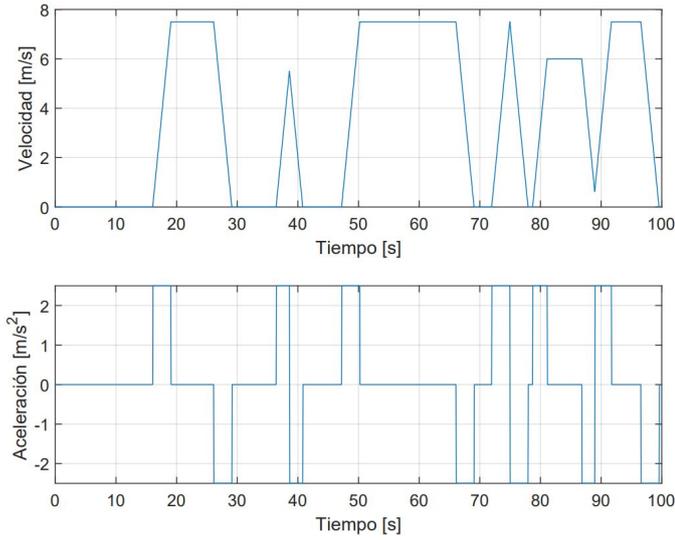


Figura 4: Perfil de conducción de simulación

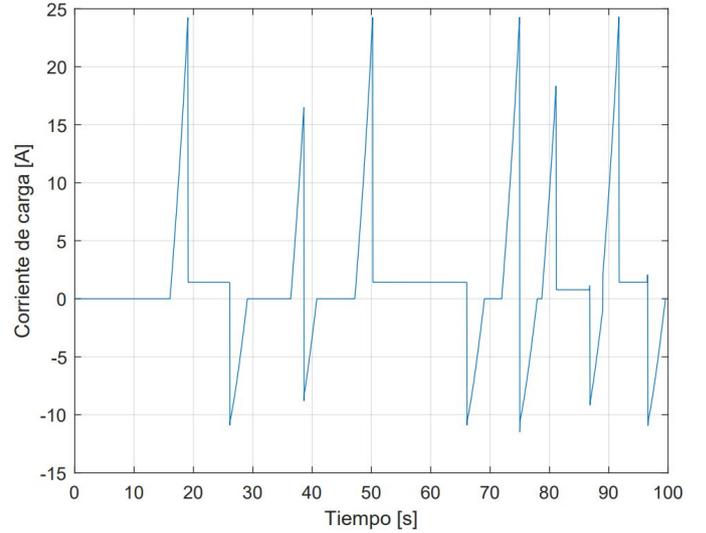


Figura 5: Perfil de conducción de simulación

3. Control predictivo

3.1. Problema de optimización

El control basado en MPC consiste en la resolución de un problema de optimización para todo el horizonte de predicción en cada instante de muestreo. Primero es necesario definir la variable de estado que corresponde al SOC de la batería y la acción de control que es la corriente proporcionada por el convertidor DC/DC de la pila de combustible. Para plantear un problema de optimización es necesario definir la función de coste y sus restricciones. En (6) se muestra la función de coste del MPC.

$$J = \lambda_1 \sum_{k=1}^{H_p} (0,5 - SOC(k))^2 + \lambda_2 \sum_{k=0}^{H_p-1} (I_{fc}(k))^2 \quad (6)$$

donde H_p es el horizonte de predicción y λ_i son los pesos asociados a cada elemento de la función a minimizar. Los dos objetivos establecidos por el controlador son mantener el estado de carga de la batería entorno al 50% para prolongar la vida útil de la batería. El segundo objetivo de la función de coste es minimizar la potencia entregada por la pila de combustible, lo que en un caso lineal simplificado, es equivalente a reducir el consumo de hidrógeno de la pila como se observa de la caracterización de Pielecha (2022), objetivo fundamental cuando se hace uso de pilas de combustible.

Es necesario también definir las restricciones del problema de optimización correspondientes a los límites físicos del sistema (7).

$$0 \leq I_{fc}(k) \leq I_{fcMAX} \quad (7a)$$

$$-\Delta I_{fcMAX} \leq \Delta I_{fc}(k) \leq \Delta I_{fcMAX} \quad (7b)$$

$$0 \leq SOC(k) \leq 1 \quad (7c)$$

Estableciendo (7a) se garantiza que la pila de combustible trabaja en su rango real de acción. Mediante (7b) se garantiza que la pila de combustible no es deteriorada por incrementos elevados de la corriente en la pila de combustible. Por último, (7c) establece los límites físicos de la carga almacenada en la batería.

3.2. Modelo de predicción

El vehículo donde se realiza la implementación del control está diseñado para entornos industriales. Por tanto, los perfiles de conducción del vehículo de pruebas están basados en tres posibles modos de funcionamiento: aceleración, conservación de velocidad y frenado. Es posible que ante un imprevisto en la ruta de funcionamiento del vehículo se requiera un parada de emergencia no prevista previamente. En la etapa de aceleración el robot aumenta su velocidad con una aceleración constante de $2,5 \text{ m/s}^2$ y en etapas de frenado es de $-2,5 \text{ m/s}^2$.

Conocidas las distintas fases de movimiento del Dovelar, es posible detectar si se encuentra en un etapa de aceleración, frenado o conservación a partir de las dos últimas potencia instantánea de carga registradas y predecir la corriente equivalente a la aceleración de la fase de conducción actual. Esta predicción se produce a lo largo de todo el horizonte de predicción, H_p .

La velocidad máxima del vehículo simulado es de $7,5 \text{ m/s}$, y el tiempo de muestreo del sistema es de 50 ms . Esto implica que en caso de velocidad máxima, el sistema actualiza su aceleración cada $0,375 \text{ m}$. Con un valor de horizonte de predicción, H_p , de 10 muestras se garantiza que el tiempo de computación del controlador es inferior al 10% del tiempo de muestreo en el régimen permanente del sistema, como se ha comprobado en las distintas simulaciones presentadas en este trabajo.

Debido a la simplificación en el movimiento del vehículo, aumentar H_p no supone un gran beneficio en la capacidad predictora del controlador mientras que si afecta directamente en su tiempo de computación. Además, cuando se realice la implementación del controlador en el Dovelar, al tiempo de computación se añade el tiempo de comunicación entre el Dovelar y el controlador, siendo la suma de ambos inferior siempre al tiempo de muestreo del sistema.

Tabla 2: Restricción del problema de optimización

Parámetro	Valor
Máx. corriente pila combustible (I_{fcMAX})	9 A
Máx inc. corriente pila combustible (ΔI_{fcMAX})	0,6 A/s

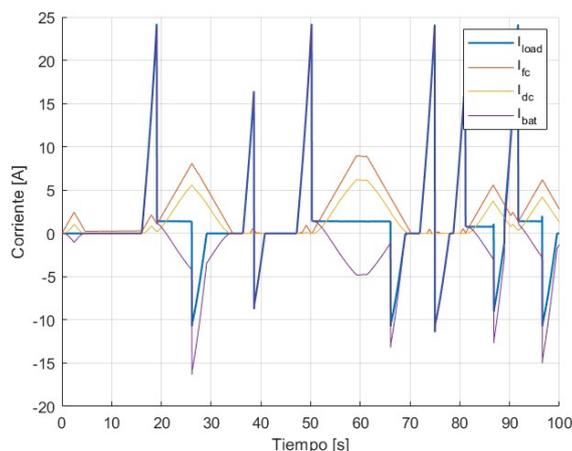


Figura 6: Evolución de las corrientes en el primer controlador

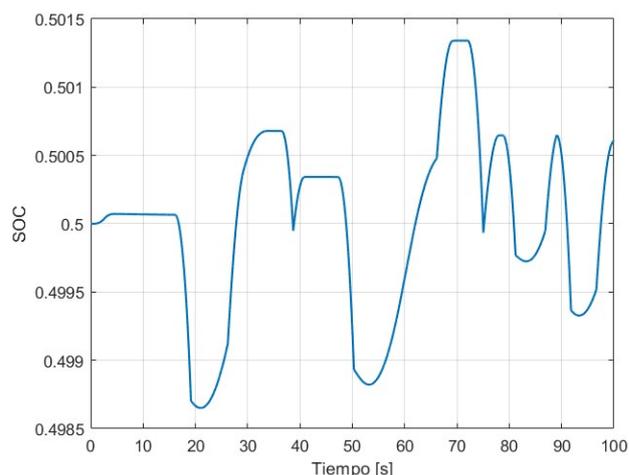


Figura 7: Evolución del SOC en el primer controlador

4. Resultados

4.1. Escenario de simulación

El modelo explicado en la Sección 2 ha sido integrado en Simulink y mediante el software YALMIP ha sido desarrollado el controlador predictivo del sistema. Para las simulaciones realizadas se ha considerado un perfil de carga con aceleraciones positivas y negativas (Figura 4). Este perfil corresponde a la conducción de un vehículo industrial que se mueve en un entorno controlado y con las tres etapas de conducción explicadas en la Sección 3.2.

Al perfil de conducción y en función de las características del vehículo, le corresponde un perfil de corriente determinado (Figura 5).

Las restricciones impuestas en el problema de optimización corresponden con los límites físicos de la pila de combustible. Estos límites están fijados por el fabricante y considerando un determinado coeficiente de seguridad (ver Tabla 2).

4.2. Control del SOC

En este primer control propuesto el único objetivo en la función de coste es mantener el SOC de la batería entorno al 50 % de su capacidad, por tanto, se espera obtener un seguimiento de este valor a lo largo de toda la simulación. Para este control se utiliza la función de coste (8). El horizonte de predicción utilizado es $H_p = 10$.

$$J = \sum_{k=1}^{H_p} (0,5 - SOC(k))^2 \quad (8)$$

La evolución de las corrientes durante el tiempo de simulación (Figura 6) es dependiente del objetivo de control. En las etapas de aceleración, el controlador hace uso fundamentalmente de la batería mientras que durante las etapas de conservación de velocidad y de frenado se activa la pila de combustible y proporciona energía para cargar la batería.

El SOC varía su estado a lo largo del tiempo de simulación (Figura 7). El SOC comienza con un valor de 50 % y oscila alrededor de este durante toda la simulación teniendo etapas de carga y descarga en función de la elección del controlador. Tanto la potencia entregada por la pila de combustible como las etapas regenerativas del perfil de conducción permiten a la pila cargarse durante la conducción del vehículo.

4.3. Controlador de SOC y consumo de hidrógeno

El controlador implementado en la segunda simulación cumple con los dos objetivos explicados en la Sección 3: mantener el SOC entorno al 50 % y reducir el consumo de hidrógeno. Al compartir dos objetivos en la función de coste, las prioridades del controlador se dividen en función de los pesos asociados a cada término.

La función de coste utilizada corresponde con (6). Se han seleccionado los pesos λ_1 y λ_2 como se indica en (9). En este caso se está dando un 95 % de prioridad al control del SOC y el 5 % restante a minimizar la potencia entregada por la pila de combustible. Se ha priorizado mantener el control sobre el SOC de la batería, la minimización del consumo de H_2 mediante la reducción de potencia entregada por la pila es un objetivo secundario. Al minimizar la potencia entregada por la pila, la carga de la batería se producirá fundamentalmente durante las etapas regenerativas del perfil de conducción. El horizonte de predicción utilizado es $H_p = 10$.

$$\lambda_1 = 0,95, \lambda_2 = \frac{0,05}{I_{fcMAX}} \quad (9)$$

La evolución de las corrientes con el segundo controlador propuesto (Figura 8) muestra un gran cambio respecto al controlador previo, la corriente entregada por la pila de combustible es casi nula durante todo el tiempo de simulación. Pese al 5 % que se le ha otorgado a la minimización de este término en la función de coste (6), el controlador utiliza principalmente la energía almacenada en la batería.

En este caso, la evolución del SOC (Figura 9) es siempre decreciente, la batería actúa como la fuente principal de energía durante todo el tiempo de simulación. La causa principal es que se parte del valor ideal del 50 % de SOC, en caso de alejarse mucho de este valor ideal, la prioridad en la función de coste de mantener el SOC cerca del 50 % activa la pila de combustible para cargar la batería con el excedente de energía otorgada. Se comprueba además, que las etapas regenerativas del perfil de conducción no bastan para cargar la batería a niveles óptimos y sigue siendo necesario una fuente de energía que garantice poder responder al perfil de conducción en todo momento, independientemente del estado de la batería.

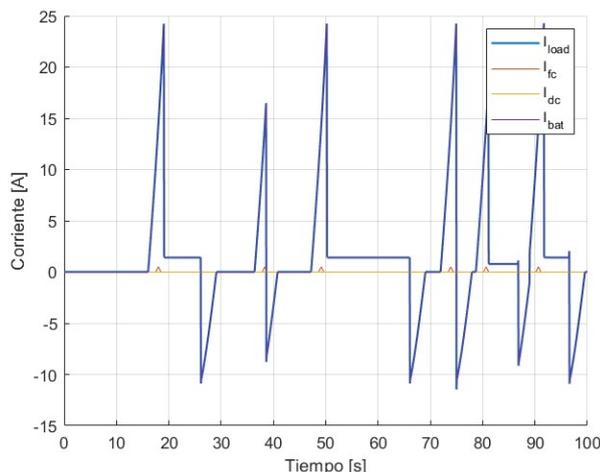


Figura 8: Evolución del SOC en el segundo controlador

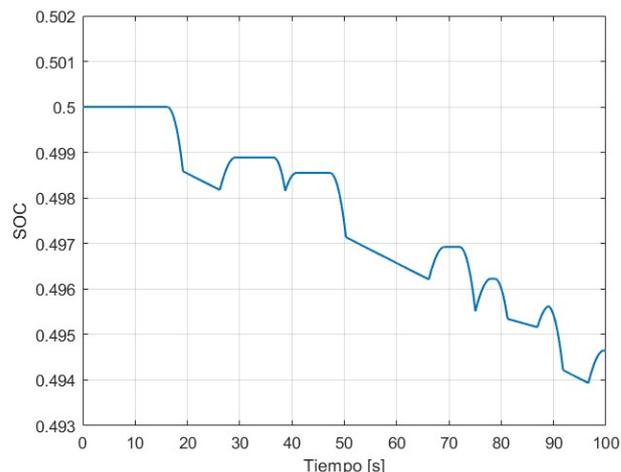


Figura 9: Evolución del SOC en el segundo controlador

Por tanto, con este segundo controlador propuesto se reduce considerablemente la potencia entregada por la pila de combustible y, en consecuencia, el consumo de hidrógeno es reducido.

5. Conclusiones

A partir de los resultados mostrados en la Sección 4, se puede concluir que el control predictivo es capaz de resolver de forma eficiente el problema de la gestión de energía en un vehículo híbrido. Ambos objetivos de control han sido cubiertos: se mantiene el SOC en valores que permiten alargar la vida útil de la batería y se minimiza el consumo de hidrógeno reduciendo la potencia entregada por la pila de combustible.

Se debe tener en cuenta que el escenario donde se pretende implementar el Dovelar es industrial y, por tanto, el perfil de conducción está simplificado en las tres fases de conducción explicadas. Esto ha facilitado el desarrollo de la predicción del perfil; sin embargo, en caso de implementar en MPC con un perfil de conducción urbano el problema de la predicción se complica. Sería necesario cambiar el método predictivo por alguno más complejo que se ajuste al problema en cuestión y tenga en cuenta la variabilidad del escenario de conducción urbano con aceleraciones y frenadas no constantes.

Como trabajo para futuro, se debe mejorar el modelado de algunos elementos del Dovelar. En este aspecto, el consumo de hidrógeno en la pila de combustible debería ser modelado mediante su curva potencia/consumo real como se caracteriza en Pielecha (2022) y no mediante la simplificación de la minimización de la corriente que la pila proporciona. Este cambio debería permitir al controlador trabajar con mayor libertad en el rango de valores óptimos de la pila de combustible y poder mantener durante un mayor periodo el SOC de la batería entorno a su valor del 50%. Por otro lado, la simplificación como constante de la eficiencia del convertidor DC/DC de la pila de combustible podría ser sustituida por la curva de eficiencia del dispositivo en función de la potencia de entrada.

Por último, el propósito fundamental de este trabajo es la implementación y experimentación del controlador desarrollado en el dispositivo Dovelar. Mediante un PC externo se pretende utilizar el MPC diseñado en YALMIP y comunicarse con el Dovelar mediante la NI sbRio 9629, recibiendo actualizaciones del estado del SOC y la corriente demandada por el motor, I_m , y enviando las referencias de corriente que la pila de combustible debe proporcionar, I_{fc} .

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Proyecto MAFALDA (PID2021-126001OB-C31) financiado por MCIN/ AEI /10.13039/501100011033 y por 'ERDF A way of make Europe'.

Este trabajo forma parte del proyecto MASHED (TED2021-129927B-I00), financiado por MCIN/ AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea Next GenerationEU/PRTR.

Referencias

- Borhan, H., Vahidi, A., Phillips, A. M., Kuang, M., Kolmanovsky, I. V., 2009. Predictive energy management of a power-split hybrid electric vehicle. 2009 American Control Conference, 3970–3976.
- Borhan, H., Vahidi, A., Phillips, A. M., Kuang, M., Kolmanovsky, I. V., Cairano, S. D., 2012. Mpc-based energy management of a power-split hybrid electric vehicle. IEEE Transactions on Control Systems Technology 20, 593–603.
- Carignano, M., Feroldi, D., Nigro, N., Costa-Castelló, R., 01 2016. Mpc como estrategia de gestión energética para un vehículo híbrido eléctrico. pp. 316–323.
DOI: 10.17979/spudc.9788497498081.0316
- Guzzella, L., Sciarretta, A., 01 2007. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization.
DOI: 10.1007/978-3-642-35913-2
- Pielecha, I., 2022. Modeling of fuel cells characteristics in relation to real driving conditions of fchev vehicles. Energies 15 (18).
DOI: 10.3390/en15186753
- Rousseau, A., Sharer, P., Pasquier, M., 03 2001. Validation process of a hev system analysis model: Psat.
DOI: 10.4271/2001-01-0953
- Wikner, E., Thiringer, T., 2018. Extending battery lifetime by avoiding high soc. Applied Sciences 8 (10).
DOI: 10.3390/app8101825