

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Diseño de un controlador para la gestión de potencia en un vehículo híbrido alimentado por hidrógeno

Autor: Miguel del Castillo Álvarez

Tutor: Carlos Bordons Alba

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Diseño de un controlador para la gestión de potencia en un vehículo híbrido alimentado por hidrógeno

Autor:

Miguel del Castillo Álvarez

Tutor:

Carlos Bordons Alba

Catedrático

Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Grado: Diseño de un controlador para la gestión de potencia en un vehículo híbrido alimentado por hidrógeno

Autor: Miguel del Castillo Álvarez
Tutor: Carlos Bordons Alba

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia que me ha estado apoyando durante todo el transcurso de mi vida universitaria y que me ha dado la oportunidad de estar en la misma.

A la Universidad de Sevilla por proporcionarme una formación de gran calidad y una oportunidad de aprender una rama del conocimiento como es la ingeniería con especial mención a la robótica y electrónica, materias en las que he tenido grandes profesores.

Por último, dar las gracias a mi tutor, Carlos, por brindarme la oportunidad de colaborar con él en la elaboración de este trabajo, guiándome en lo necesario y proporcionándome toda la ayuda posible cuando la he necesitado.

*Miguel del Castillo Álvarez
Sevilla, 2024*

Índice

<i>Notación</i>	VII
1 Estado del Arte	3
1.1 Introducción	3
1.2 Baterías	3
1.2.1 Tipos de Baterías Utilizadas	3
1.2.2 Configuraciones de las Baterías	4
1.2.3 Tecnologías Relativas a las Baterías y Perspectivas Futuras	5
1.2.4 Conclusiones	5
1.3 Pila de hidrógeno	6
1.3.1 Introducción	6
1.3.2 Tipos de Pilas de Combustible	6
1.3.3 Configuración y Dinámica de las Pilas	6
1.3.4 Tecnologías Relativas y Perspectiva Futura	7
1.3.5 Ventajas y Desventajas de las PEMFC	7
1.3.6 Modelado y Simulación	7
1.3.7 Gestión Térmica	8
1.3.8 Producción de Hidrógeno	8
1.3.9 Almacenamiento de Hidrógeno	8
1.3.10 Estrategias de Gestión de Energía	8
1.3.11 Perspectivas Futuras	8
1.3.12 Conclusión	9
1.4 Técnicas de Control	9
1.4.1 Control basado en reglas	9
1.4.2 Control enfocado en la optimización	9
1.5 MPC basado en predicción	9
1.6 MPC basado en modelo	10
2 Descripción del Vehículo y su modelo	11
2.1 Vehículo FOX	11
2.1.1 Motores	11
2.1.2 Baterías	11
2.1.3 ECU	11
2.1.4 Sensor de giro del volante	11
2.1.5 Sensor de posición de los pedales	11
2.1.6 Sensores de suspensión	12
2.1.7 IMU	12
2.2 Modelo Inicial	13
2.3 Adaptación del modelo al vehículo	14
2.3.1 Modelo matemático simplificado	14

2.3.2	Modelo del coche	14
2.4	Comprobaciones del modelo	16
2.5	Calibración del modelo	16
2.6	Conclusión	17
3	MPC	19
3.1	Introducción	19
3.2	Planteamiento Modelo de Espacio de Estados	19
3.3	Función de Costes	19
3.3.1	Desarrollo primer término	20
3.3.2	Desarrollo segundo término	20
3.3.3	Desarrollo del tercer término	20
3.3.4	Desarrollo final de la función de costes	21
3.3.5	Método de resolución de la función de costes	22
3.4	Conclusión	22
4	Experimentos en simulación	23
4.1	Ciclo de Conducción	23
4.2	Elementos del sistema de producción y almacenamiento de la energía	24
4.3	Balance de Potencias	24
4.4	Modelo del vehículo	24
4.5	Controlador predictivo	24
4.6	Simulación con ciclo de conducción NEDC	25
4.6.1	Caso de estudio I	25
4.6.2	Caso de Estudio II	28
4.7	Simulación con WLTP	31
4.7.1	Simulación en terreno plano	31
4.7.2	Simulación con terreno elevado	34
4.7.3	Simulación con terreno descendente	34
4.7.4	Simulación de larga duración en terreno plano	36
4.8	Conclusiones	39
5	Instalación Embarcada	41
5.1	Hilo principal	41
5.2	Hilo comunicaciones	42
5.3	Hilo de control	42
5.4	Propuesta de funcionamiento	42
6	Conclusiones	43
6.1	Adaptación del Modelo	43
6.2	Diseño del Controlador	43
6.3	Modelo del Vehículo	43
6.4	Simulación con Componentes Reales	43
6.5	Instalación embarcada	44
6.6	Conclusión Final	44
	Apéndice A Códigos	45
	<i>Índice de Figuras</i>	55
	<i>Índice de Códigos</i>	57
	<i>Bibliografía</i>	59
	<i>Glosario</i>	61

Introducción y objetivos

En esta sección se describe la motivación e introducción de este trabajo de fin de grado.

Introducción

Este trabajo consiste en el diseño de un controlador predictivo para un sistema de potencia basado en una fuente de hidrógeno y una batería, simulando así, el sistema real del coche FOX de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería.

Para realizar el trabajo se han empleado distintas herramientas de diseño y simulación, con un punto de inicio ideal y aproximándolo cada vez más al sistema real. Finalmente, debido a la imposibilidad de probar el resultado en el vehículo real, se ha llevado a cabo una propuesta de instalación embarcada para el vehículo. .

Objetivo

El objetivo del trabajo es la realización de un controlador predictivo que esté listo para su implementación a bordo del vehículo FOX, para ello se han ido consiguiendo una serie de objetivos menores que se describen a continuación:

- Adaptación del modelo. Como punto de partida se empleará el modelo de una microrred, que será modificado con el objetivo de representar de la forma más fiel posible al vehículo FOX.
- Diseño del controlador. Realización de un controlador predictivo capaz de gestionar la entrega de potencia al vehículo, cumpliendo las restricciones impuestas por los componentes usados en el sistema real.
- Obtener un modelo del vehículo, realización de un modelo del vehículo para que en base a un ciclo de conducción, este pudiese dar los valores necesarios para mover el vehículo.
- Simulación con componentes reales. Llevar a cabo distintas simulaciones usando modelos de los componentes reales del sistema de potencia.
- Diseño del controlador en un sistema operativo de tiempo real, en base al trabajo previamente descrito se realizará un diseño software del controlador para permitir su implementación dentro del ordenador del vehículo con su sistema operativo de tiempo real.

Notación

Ni	níquel
MH	metal-hidruro
BMS	Battery Management System
PEMFC	Proton-exchange membrane fuel cell
RB	Rule Based
RTO	Real Time Optimization
MPC	Model Predictive Control
HEV	Hibryd Electric Vehicle
$x(t)$	vector de variables de estados
SOC	State of Charge
LOH	Level of Hydrogen
η_{bat}	Rendimiento de la Batería
η_{elz}	Rendimiento del Electrolizador
η_{fc}	Rendimiento de la Fuel Cell
T_s	Tiempo de muestreo
C_{max}	Capacidad Máxima de la Batería
V_{max}	Volumen Máximo del Tanque de Hidrógeno
P_{fc}	Potencia de la Fuel Cell
P_{grid}	Potencia Grid
P_{elz}	Potencia Electrolizador
P_{bat}	Potencia Batería
P_{load}	Potencia demandada por la Carga
P_{gen}	Potencia Generada
m	Masa
D_a	Drag
W	Peso
F	Fuerza
R	Resistencia a la Rodadura
θ	Ángulo
a_x	Aceleración en el eje x
g	Aceleración de la gravedad
ρ	Densidad
D	Coefficiente de Resistencia Aerodinámica
A	Sección transversal
U_w	Velocidad del Viento
$y(t)$	Salidas del modelo
$u(t)$	Variable Manipulable
$d(t)$	Perturbación Medible
k_{bat}	Parámetro Batería
k_{fc}	Parámetro de la Pila de Hidrógeno
α, β, λ	Pesos de la Función de costes

J	Función de Costes
$\Delta_{tri-inf}$	Matriz Triangular Inferior
\mathbf{u}	Vector de Variables Manipulables
\mathbf{C}	Vector de Términos Constantes
N_c	Horizonte de Control
N_p	Horizonte de Predicción
\mathbf{x}	Vector de Variables de Estado
$\mathbf{x}_{inicial}$	Vector de Valor Inicial de los Estados
\mathbf{d}	Vector de Perturbaciones Medibles

Resumen

El trabajo aborda el problema de control relativo al sistema de potencia del vehículo FOX, el cual es de tipo híbrido, ya que emplea tanto una fuente de potencia a partir de una batería, como una fuente de potencia a partir de una pila de hidrógeno.

Se abordará el problema desarrollando un controlador predictivo basado en modelo, para ello se partirá de un modelo de una microrred que será adaptado a las características del vehículo. Una vez obtenido dicho modelo se desarrollarán las ecuaciones necesarias para plantear la función de costes del controlador predictivo.

Con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento de este controlador se realizarán una serie de simulaciones bajo distintas condiciones, empleando como datos de test los ciclos de conducción estándar con más reconocimiento mundial, estos son el NEDC y el WLTP.

Por último, se hará una propuesta de instalación embarcada, ya que no ha sido posible la prueba de esta en el vehículo real. Esta propuesta consistirá en una arquitectura de los distintos hilos que sería necesarios para abordar el funcionamiento en tiempo real del control.

1 Estado del Arte

1.1 Introducción

Una de las principales fuentes de consumo de energía y de emisión de gases de efecto invernadero es el transporte. Debido a este problema se presenta la necesidad de reducir la dependencia con los combustibles fósiles con el fin de mitigar los gases de efecto invernadero, es por esto, que los vehículos híbridos se postulan como una de las posibles soluciones. Dentro de estos vehículos destacan los que combinan baterías y pilas de hidrógeno por su potencial para ofrecer una alta eficiencia energética y reducir las emisiones.

Estos vehículos que usan baterías y pilas de hidrógeno son capaces de utilizar dos fuentes de energía, por un lado, las baterías almacenan y suministran energía de forma rápida y eficiente, por otro lado, las pilas de hidrógeno proporcionan electricidad mediante un proceso electroquímico. La combinación de ambas permite un aprovechamiento de las ventajas de ambos sistemas: la respuesta rápida y capacidad de almacenamiento de las baterías, y la alta densidad energética y autonomía de las pilas.

Sin embargo, la integración de ambos sistemas supone un reto en términos de gestión y control de la potencia, la coordinación de ambos es un punto crítico en la optimización del rendimiento del vehículo. Para abordar este desafío existen técnicas de control de potencia que abarcan desde enfoques basados en reglas simples hasta métodos complejos mediante inteligencia artificial.

A continuación, revisaremos el estado del arte de los distintos sistemas de energía que se emplean en este tipo de vehículos híbridos. Se tratarán las distintas técnicas empleadas. También se discutirá el estado del arte de los componentes de los sistemas de energía, tanto baterías como pilas de hidrógeno.

1.2 Baterías

1.2.1 Tipos de Baterías Utilizadas

En los vehículos híbridos que combinan baterías y pilas de hidrógeno, se utilizan principalmente baterías de iones de litio (Li-ion). Estas baterías son populares debido a su alta densidad energética, eficiencia y durabilidad. La tecnología Li-ion ha dominado el mercado de los vehículos eléctricos e híbridos porque permite almacenar grandes cantidades de energía en un espacio relativamente pequeño y proporciona un ciclo de vida prolongado [14].

Las baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) también se utilizan en menor medida. Aunque estas baterías tienen una menor densidad energética y son más pesadas que las de Li-ion, ofrecen ciertas ventajas como una mayor estabilidad térmica y una vida útil más larga en condiciones de carga y descarga cíclicas [1]. Estas fueron el tipo de batería predominante durante los primeros modelos de vehículos híbridos, como el Toyota Prius de primera generación, con el paso del tiempo han sido reemplazadas por las batería de Li-ion. Otro tipo de batería que ha ganado interés es la batería de estado sólido. Estas baterías utilizan un electrolito sólido en lugar de uno líquido, lo que mejora significativamente la seguridad al eliminar el riesgo de fugas y explosiones. Además, las baterías de estado sólido tienen el potencial de ofrecer una mayor densidad energética y una vida útil más larga, aunque todavía están en fase de desarrollo y no se han comercializado ampliamente [9].



Figura 1.1 Batería de iones de litio. Fuente: www.renaultgroup.



Figura 1.2 Batería de Níquel-metal hidruro. Fuente: www.electriccarsguide.com.au.

1.2.2 Configuraciones de las Baterías

La configuración de las baterías en vehículos híbridos es crucial para optimizar su rendimiento y eficiencia. Estas se organizan en módulos y paquetes lo que permite gestionar altas demandas de energía, así como, las fluctuaciones de carga y descarga rápidas de estos vehículos, [13].

Una configuración común en vehículos híbridos es el uso de un sistema de batería-hibridación, donde la batería de iones de litio se combina con ultracapacitores. Los ultracapacitores, también conocidos como supercapacitores, ofrecen una alta densidad de potencia y pueden cargar y descargar rápidamente, lo que los hace ideales para complementar a las baterías de iones de litio en situaciones donde se requiere una respuesta rápida de energía [4]. Esta combinación permite aprovechar la alta densidad energética de las baterías de Li-ion y la alta potencia de los ultracapacitores, mejorando así la eficiencia energética y la capacidad de

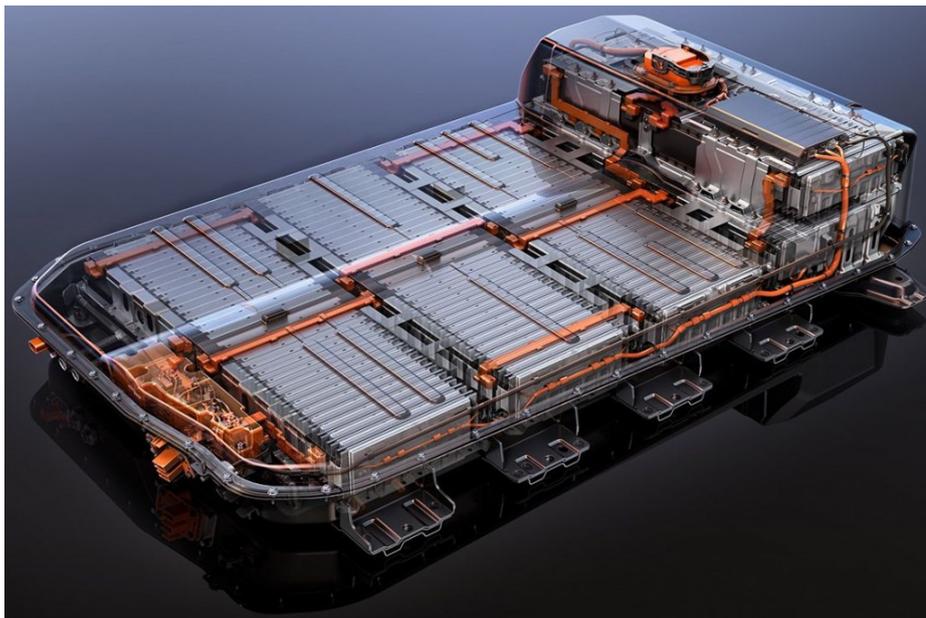


Figura 1.3 Batería de Estado Sólido. Fuente: www.arenaev.com.

respuesta del vehículo.

Otra posible configuración es la integración de sistemas de gestión de baterías (BMS). Esto es crucial para optimizar el rendimiento y la duración de las baterías. El sistema de gestión es el encargado de hacer un seguimiento del estado de la batería, incluyendo parámetros como el voltaje, la corriente y la temperatura, y ajusta el flujo de energía para mantener las celdas balanceadas y evitar condiciones que puedan dañar la batería [12]. La implementación de un sistema de gestión que sea eficaz mejora la seguridad, la eficiencia y la duración de las baterías.

1.2.3 Tecnologías Relativas a las Baterías y Perspectivas Futuras

Las tecnologías de baterías para vehículos híbridos están en constante evolución. Las últimas líneas de desarrollo están centradas en mejorar la densidad energética, la seguridad y la duración de las baterías de iones de litio. Una de las innovaciones más prometedoras es el uso de electrolitos sólidos en lugar de líquidos. Los electrolitos sólidos pueden aumentar la seguridad de las baterías al eliminar el riesgo de fugas y explosiones y mejorar la eficiencia energética [9].

Otro avance significativo es la investigación en materiales más desarrollados para los electrodos. Los ánodos de silicio, por ejemplo, son capaces de proporcionar capacidades mucho mayores que los ánodos tradicionales de grafito. No obstante, el principal desafío con los ánodos de silicio es su tendencia a expandirse y contraerse durante los ciclos de carga y descarga, lo que puede causar problemas de estabilidad y reducir la duración de la batería. Los investigadores están explorando diversas estrategias para mitigar estos problemas, como el desarrollo de nanocompuestos y estructuras de silicio avanzadas [9].

En cuanto a las perspectivas futuras, se espera que las baterías de estado sólido y las baterías de litio-azufre desplacen a un lado a las baterías de iones de litio actuales. Las baterías de litio-azufre, concretamente, tienen la posibilidad de ofrecer densidades energéticas más altas y costos más bajos. No obstante, también enfrentan desafíos técnicos, como la baja conductividad eléctrica del azufre y la formación de polisulfuros solubles, que pueden reducir la eficiencia y la duración de la batería [8]. Además, la integración de sistemas de gestión de baterías avanzados es crucial para optimizar el rendimiento y la longevidad de las baterías. Un sistema de gestión de batería avanzado puede incluir algoritmos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para predecir y gestionar de manera más eficaz el comportamiento de la batería bajo diversas condiciones operativas. Esto no solo mejora la seguridad y la eficiencia, sino que también puede extender significativamente la vida útil de la batería [12].

1.2.4 Conclusiones

En resumen, las baterías de iones de litio son la opción preferida para vehículos híbridos con pilas de hidrógeno debido a su alta densidad energética y eficiencia. Las configuraciones híbridas que combinan

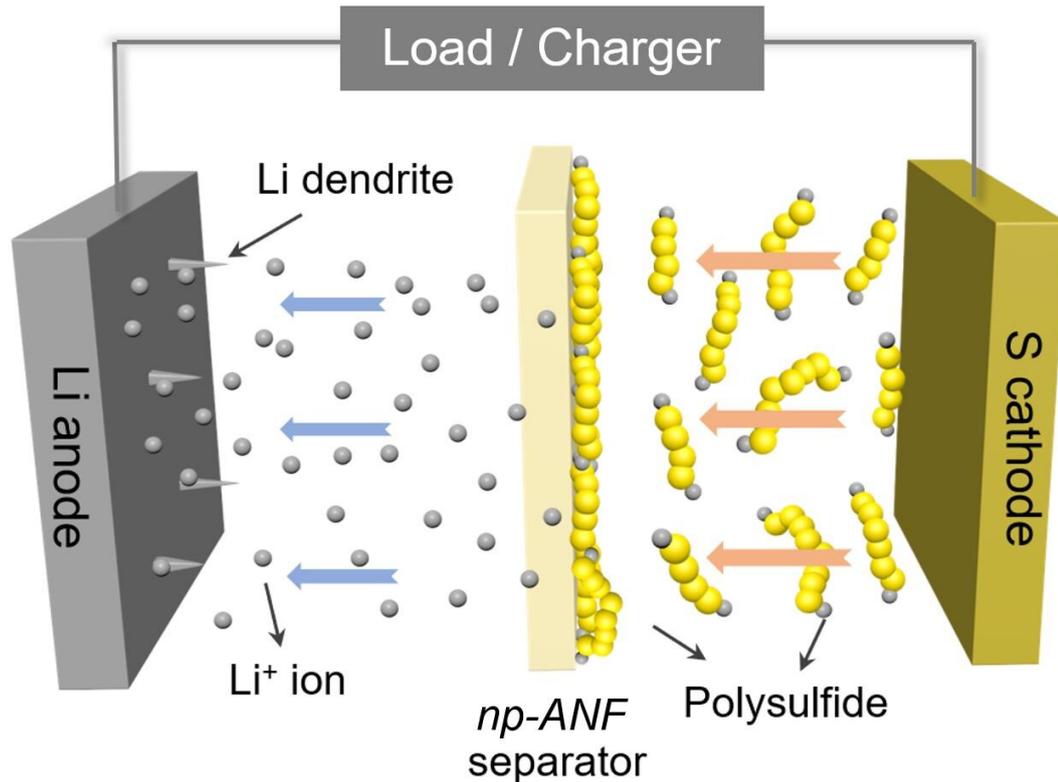


Figura 1.4 Batería de Litio-Azufre. Fuente: techxplore.com.

baterías con ultracapacitores están demostrando ser efectivas para mejorar el rendimiento del vehículo. Las innovaciones tecnológicas, como los electrolitos sólidos y los nuevos materiales de electrodos, junto con los sistemas avanzados de gestión de baterías, están proporcionando un desarrollo hacia una nueva generación de baterías más seguras y eficientes.

1.3 Pila de hidrógeno

1.3.1 Introducción

Las pilas de combustible de hidrógeno representan una tecnología clave en el avance hacia la movilidad sostenible y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. A continuación, se presenta un análisis del estado del arte de estas tecnologías basado en diversas investigaciones recientes.

1.3.2 Tipos de Pilas de Combustible

Las pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) son actualmente las más utilizadas en aplicaciones automotrices por su eficiencia y densidad de potencia. Destaca que las PEMFC proporcionan ventajas significativas en cuanto a rendimiento y compatibilidad con el uso de hidrógeno renovable [16].

1.3.3 Configuración y Dinámica de las Pilas

El modelo dinámico y la configuración de las pilas son cruciales para su aplicación efectiva en vehículos. Se desarrolló y validó un modelo dinámico de una PEMFC, esto es esencial para poder optimizar el rendimiento del vehículo bajo diversas condiciones de operación [11]. Este modelo permite simular y ajustar parámetros críticos, mejorando la eficiencia y la durabilidad de las pilas.

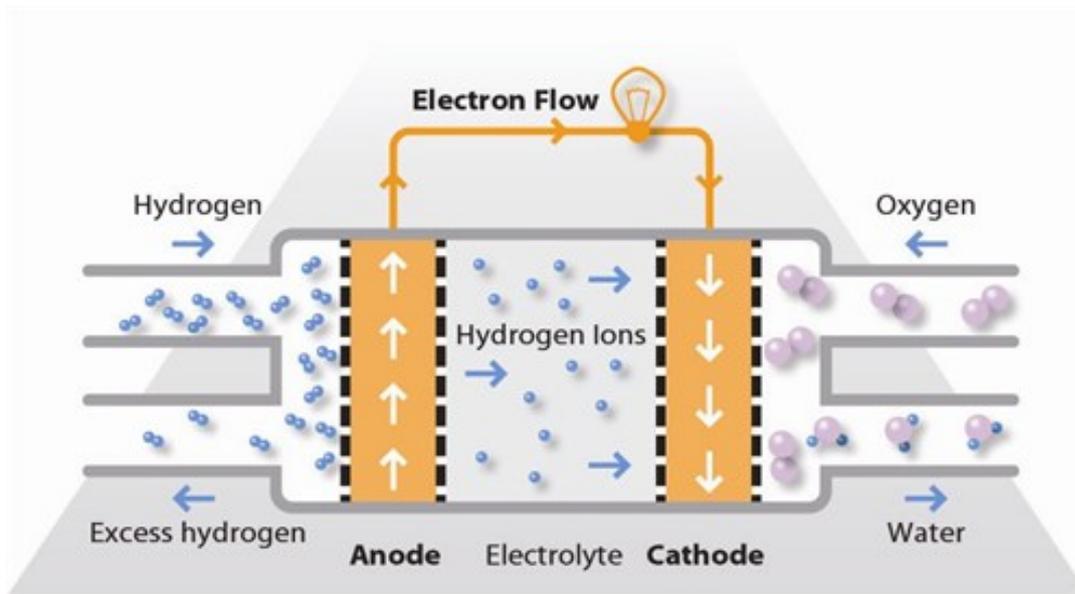


Figura 1.5 PEMFC. Fuente: fuelcellsworks.com.

1.3.4 Tecnologías Relativas y Perspectiva Futura

Las tecnologías de producción de hidrógeno y almacenamiento también juegan un papel fundamental en el desarrollo de vehículos eléctricos de pila de combustible. Se analizan diversas tecnologías de producción de hidrógeno, subrayando la importancia del hidrógeno renovable para minimizar el impacto ambiental [17]. Se hace una revisión en los avances en materiales de almacenamiento de hidrógeno y tecnologías de pilas de combustible, destacando los progresos hacia soluciones más seguras y eficientes [10].

En cuanto a la gestión térmica y las estrategias de conducción, presentan modelos y simulaciones que ayudan a gestionar la temperatura de las pilas de combustible, esto es crucial para mantener un rendimiento óptimo [2]. La literatura revisa las estrategias de conducción enfocadas en la optimización del consumo de hidrógeno y la gestión de energía, aspectos esenciales para mejorar la autonomía y la eficiencia de los vehículos [5].

1.3.5 Ventajas y Desventajas de las PEMFC

Las principales ventajas de las PEMFC incluyen:

- Alta eficiencia de conversión energética.
- Operación silenciosa y sin emisiones contaminantes.
- Alta densidad de potencia, lo que permite diseños compactos.

Sin embargo, también presentan ciertas desventajas:

- Sensibilidad a las impurezas del hidrógeno.
- Necesidad de materiales costosos como el platino para los electrodos.
- Durabilidad y vida útil limitada bajo ciertas condiciones operativas.

1.3.6 Modelado y Simulación

El modelado dinámico de las pilas de combustible consiste en la representación matemática de los procesos electroquímicos y de transferencia de masa y calor que ocurren en la pila. Este modelado es fundamental para poder predecir el comportamiento de la pila bajo diferentes condiciones de operación y para diseñar estrategias de control efectivas.

Presentan un modelo detallado que considera los fenómenos de transporte de protones, electrones y calor, también las reacciones electroquímicas en los electrodos [11]. Los experimentos de validación con el modelo demuestran su precisión y utilidad para el diseño de sistemas de control que optimizan el rendimiento de las pilas de combustible en aplicaciones automotrices.

1.3.7 Gestión Térmica

La gestión térmica es otro punto crítico en la configuración de las pilas de combustible. Se presentan un estudio detallado sobre la gestión térmica de vehículos con pilas de combustible, incluyendo modelos y simulaciones que ayudan a mantener la temperatura óptima de operación [2]. El control térmico efectivo es esencial para garantizar la eficiencia y la durabilidad de las pilas, si se evitan sobrecalentamientos y distribuyendo uniformemente el calor generado.

1.3.8 Producción de Hidrógeno

El hidrógeno puede producirse a partir de diversas fuentes:

- Reformado de gas natural.
- Electrólisis del agua utilizando energía renovable.
- Gasificación de biomasa.

El reformado de gas natural es actualmente el método más usado debido a su bajo coste. Sin embargo, la electrólisis del agua, especialmente cuando se utiliza electricidad de fuentes renovables, es la opción más sostenible a largo plazo. Destaca la necesidad de invertir en tecnologías de producción de hidrógeno renovable para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas [17].

1.3.9 Almacenamiento de Hidrógeno

El almacenamiento de hidrógeno es otro punto crítico. En la literatura se revisan los desarrollos en materiales de almacenamiento de hidrógeno y tecnologías de pilas de combustible, destacando los progresos hacia soluciones más seguras y eficientes [10]. Los métodos de almacenamiento incluyen:

- Almacenamiento en tanques de alta presión.
- Almacenamiento en forma de hidruros metálicos.
- Almacenamiento criogénico.

Cada método tiene sus propias ventajas y limitaciones. El almacenamiento a alta presión es común pero plantea problemas en cuanto a seguridad y coste. Los hidruros metálicos ofrecen una alta densidad de almacenamiento, pero el coste y complejidad son mayores. El almacenamiento criogénico permite almacenar hidrógeno en estado líquido, pero requiere temperaturas extremadamente bajas.

1.3.10 Estrategias de Gestión de Energía

Las estrategias de gestión de energía también son críticas para la optimización del rendimiento de los vehículos con pilas de combustible. Se revisan diversas estrategias de gestión de energía usadas en la optimización del consumo de hidrógeno. [5]. Estas incluyen:

- Optimización del uso del motor eléctrico y la pila de combustible para minimizar el consumo de hidrógeno.
- Recuperación de energía durante el frenado.
- Gestión de la carga de la batería auxiliar para maximizar la eficiencia del sistema.

La implementación de estas estrategias permite mejorar la autonomía y la eficiencia de los vehículos, reduciendo el consumo de hidrógeno y las emisiones asociadas.

1.3.11 Perspectivas Futuras

El desarrollo de las pilas de combustible de hidrógeno para vehículos eléctricos ha avanzado en los últimos años. Las líneas de desarrollo actuales se centran en mejorar la eficiencia y la durabilidad de las PEMFC, optimizar su configuración y modelo dinámico, y desarrollar tecnologías de producción y almacenamiento de hidrógeno más sostenibles.

Confome se solucionen los problemas técnicos y se reduzcan los costes, podemos esperar que los vehículos eléctricos de pila de combustible tengan un papel cada vez más relevante en el sector del transporte. Tanto la producción del hidrógeno como su almacenamiento serán importantes de cara a obtener un transporte sostenible.

1.3.12 Conclusión

Las pilas de combustible de hidrógeno representan una tecnología prometedora para el futuro del transporte sostenible. Las PEMFC, en particular, ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia y compatibilidad con el uso de hidrógeno renovable. No obstante, aún existen problemas en términos de costes, durabilidad y gestión térmica que deben ser solucionados.

Las investigaciones recientes han demostrado avances importantes en el modelado dinámico, la producción y el almacenamiento de hidrógeno, así como en las estrategias de conducción y gestión de energía. Con estos avances, las perspectivas para los vehículos eléctricos de pila de combustible son importantes, ofreciendo una alternativa viable y ecológica para el futuro del transporte.

1.4 Técnicas de Control

El control de supervisión de alto nivel tiene en cuenta datos y previsiones futuras. Mejora el rendimiento global del vehículo porque la eficiencia del combustible depende de los datos actuales y de los datos futuros. En otras palabras, este controlador de alto nivel suele incluir condiciones basadas en eventos o en el tiempo que coordinan el funcionamiento de los componentes, [15].

Según la literatura podemos encontrar dos grandes tipos de estrategias de control: basadas en reglas o enfocadas en la optimización.

1.4.1 Control basado en reglas

El control basado en reglas (RB) como un sistema que se apoya en la experiencia humana, heurísticas e incluso modelos matemáticos, predefiniendo estrategias de conducción y de nivelación de carga. El RB se divide en métodos deterministas y difusos. Los métodos deterministas utilizan tablas de búsqueda para diseñar reglas, mientras que los difusos usan parámetros en tiempo real y conocimiento lingüístico. Se detallan diferentes estrategias de RB, como control de termostato, seguidor de potencia y estrategias basadas en máquinas de estados. Además, se mencionan variantes difusas, como estrategias convencionales, adaptables y predictivas. Cada enfoque tiene sus ventajas y desventajas en términos de robustez, complejidad y adaptabilidad a condiciones de conducción variables.[15]

1.4.2 Control enfocado en la optimización

En el control basado en enfoques de optimización en sistemas de vehículos híbridos, destacan dos categorías principales: la optimización global y la optimización en tiempo real (RTO). La optimización global utiliza información pasada y futura de la demanda de potencia para minimizar la función de costo sobre un ciclo de conducción fijo, mientras que la RTO se basa en datos instantáneos para minimizar el consumo de combustible equivalente. Se distinguen diversas estrategias de optimización, como la programación lineal, la teoría de control, la programación dinámica, el algoritmo genético y el control predictivo óptimo. Cada enfoque tiene sus ventajas y desventajas en términos de precisión, complejidad computacional y aplicabilidad en tiempo real. Además, se describen estrategias específicas, como ECMS y el control de desacoplamiento, que se centran en la minimización del consumo de combustible y la garantía de la maniobrabilidad del vehículo. La discusión sobre las diferentes estrategias proporciona una visión general de las opciones disponibles y sus aplicaciones potenciales en sistemas de vehículos híbridos. [15]

Podemos ver otra clasificación de las estrategias de control: estrategias heurísticas y basadas en la optimización.[7]

Enfocado en el MPC, podemos encontrar que en el artículo se describen los dos tipos principales de este controlador.

1.5 MPC basado en predicción

En el artículo se explica que la información relativa a la conducción futura es indispensable para la formulación del MPC. Podemos destacar dos tipos de predicciones: basada en GPS e ITS y basadas en estadísticas.[7]. En función de como sean la predicción del ciclo de conducción se definen una serie de tipos de MPC.

- MPC en Tiempo Congelado adopta la misma cantidad de potencia demandada durante todo el horizonte de predicción, tiene un rendimiento bajo, es por esto que suele usarse como comparación con los

demás controladores para saber su eficacia. Este tipo de control funciona bien si el ciclo de conducción no cambia bruscamente, es por eso que en autovía funciona mejor que en condiciones urbanas.

- MPC Previsor al igual que el de tiempo congelado, este según la literatura actúa como buena base con la que se pueden comparar otras técnicas para analizar sus respectivos rendimientos. Se asume que conoce toda la información futura con exactitud, es decir, todos los controladores debería de tener un rendimiento similar al de este tipo.
- MPC de Variación Exponencial el MPC basado en la variación exponencial utiliza una expresión simple de variación exponencial para representar la información futura en el horizonte de predicción. En el proceso de desarrollo de este MPC, se supone que el par desconocido de la demanda del conductor disminuye exponencialmente a lo largo del horizonte de predicción, [7]. Sin embargo, este método de predicción se basa en la suposición de variación exponencial de la información de conducción futura, lo que impide su aplicación extensiva si se viola esta suposición.
- MPC estocástico es utilizada principalmente para modelar y resolver problemas dinámicos de tomas de decisiones. Como es un método prometedor se ha invertido mucho esfuerzo en el desarrollo de controlers del sistema de potencia basadas en la optimización con este método. [7]
- MPC Inteligencia Artificial debido a su capacidad para modelar, predecir y aprender, se ha puesto mucho esfuerzo en la previsión de los ciclos usando inteligencia artificial, por ejemplo con redes neuronales, algoritmos bayesianos y máquinas de vectores de apoyo, [7].

1.6 MPC basado en modelo

Este tipo de MPC se emplea conociendo el modelo de predicción, existen cuatro grandes familias: No lineales y Lineales, Híbridos, Jerárquicos y el resto, [7].

- MPC no lineal y lineal debido a la no linealidad de los sistemas de tren motriz y a algunas restricciones de desigualdad e igualdad en las entradas, estados y salidas, el problema de gestión de potencia MPC se convierte en un problema de optimización no lineal y restringido. Estos problemas suelen plantear problemas de aplicación en tiempo real. [7]
- MPC Híbrido los HEV suelen funcionar en varios modos lo que hace que el MPC se convierta en un MPC híbrido. Para afrontar esta situación se han propuesto distintos enfoques de modelado de sistemas híbridos, como son un sistema dinámico lógico mixto (MLD), un lenguaje de descripción de sistemas híbridos (HYSDEL) y un modelo afín a trozos (PWA). [7]
- MPC Jerárquico los controladores de gestión de potencia como el MPC suelen actuar como controladores de nivel superior, es decir, determinan referencias para los distintos controladores de nivel inferior del sistema, a esto le denominamos estructura jerárquica. Los propios MPC pueden hacerse de forma jerárquica de manera que un MPC de nivel superior coordine las acciones de otros MPC de nivel inferior. [7]

2 Descripción del Vehículo y su modelo

2.1 Vehículo FOX

El vehículo FOX es un prototipo de coche eléctrico que consta de un motor por rueda. Posee dos fuentes de energía, por un lado la pila de hidrógeno, y por otro lado la batería con su respectivo banco de supercondensadores. Emplea un chasis de competición S2 fabricado por SilverCars que ha sido modificado para poder albergar los motores, las fuentes de alimentación, así como pantallas para modificar los algoritmos a probar y algunas modificaciones secundarias. Para comunicarse entre ellos los distintos modelos emplean la comunicación basada en CAN.

2.1.1 Motores

Consta de cuatro motores sin escobillas que otorgan 7 kW de potencia y 78 nM de par máximo. Las pérdidas de energía son menores, ya que los motores ofrecen menos rozamiento al no tener escobillas. Los motores están directamente introducidos en cada rueda sin ningún tipo de elemento mecánico para su conexión, lo que mejora la transferencia de energía del motor a la rueda. Estos motores están alimentados por corriente continua que proviene de un convertidor, encargado de transformar la corriente alterna de las baterías.

2.1.2 Baterías

Consta de seis paquetes de baterías, cada una de cuatro celdas. Estas baterías contaminan menos que la mayoría existentes lo cual es crucial para el vehículo cuyo objetivo es la reducción de emisiones. También tienen un peso menor que las baterías existentes para la capacidad que pueden ofrecer, esto conlleva un menor peso sobre el vehículo lo cual ayuda a aumentar su gran autonomía.

Es por todo esto que las baterías son un factor clave que potencia las características del vehículo FOX, porque es un vehículo que contamina poco y del cual podemos obtener la máxima eficiencia, aspecto del cual pecan este tipo de vehículos.

Las baterías se encuentran en la parte trasera del vehículo lo que hace que la distribución de peso en el eje trasero sea mayor que en el delantero.

2.1.3 ECU

Es uno de los componentes clave del vehículo, ya que permite controlar su funcionamiento. Conjuntamente con el hardware de supervisión son los que permiten el correcto funcionamiento del vehículo, ya que son el centro de comunicación de todos los demás componentes. Aquí es donde irá cargado el controlador que se desarrollará durante este trabajo.

2.1.4 Sensor de giro del volante

Mediante un potenciómetro que permite detectar giros de hasta una vuelta completa se puede monitorizar el giro del volante, este sensor va alimentado a 5 V.

2.1.5 Sensor de posición de los pedales

Potenciómetros lineales alimentados a 5 V con una salida de 0 - 5 V, de unos 12.5 mm.



Figura 2.1 Vehículo FOX.

2.1.6 Sensores de suspensión

Son potenciómetros lineales que permiten conocer el estado de la suspensión del vehículo. Con esto se puede inferir en la distribución de pesos a través de la ECU.

2.1.7 IMU

Consta de acelerómetros en los tres ejes. El nombre de IMU, Inertial Measurement Unit, permite obtener medidas inerciales, como la aceleración de cada eje. También contiene un GPS lo que ofrece la posibilidad de estudiar el recorrido del vehículo.

2.2 Modelo Inicial

Como modelo inicial se ha empleado el correspondiente al capítulo 4 del libro [3].

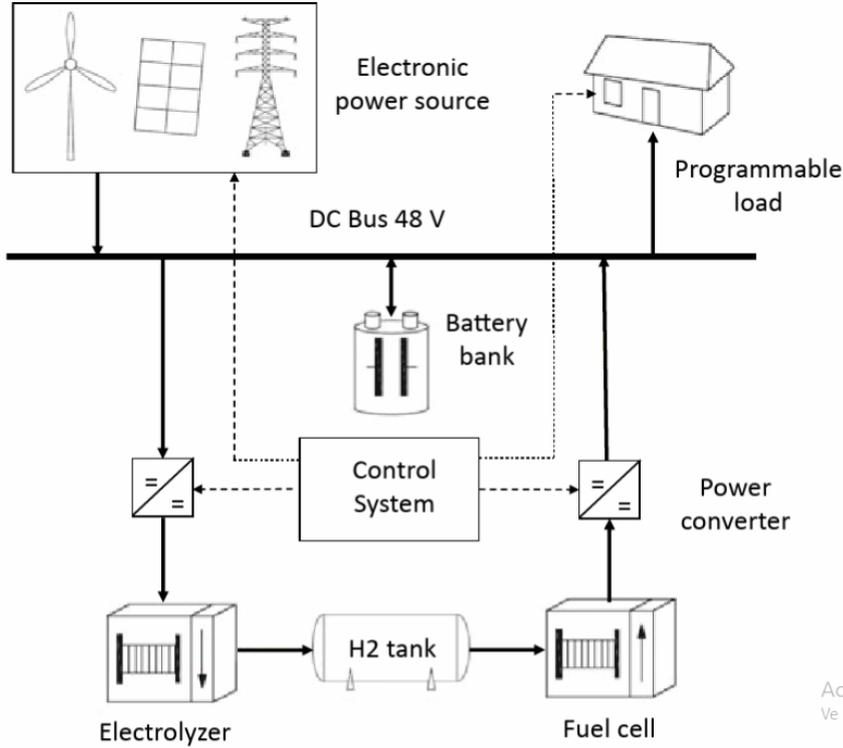


Figura 2.2 Esquema del sistema.

$$x(t) = [\text{SOC}(t) \quad \text{LOH}(t)]^T \quad (2.1)$$

El sistema representado en el esquema anterior, donde se pretende controlar la potencia de la red, la potencia de la pila de hidrógeno y la potencia del electrolizador. Se plantea mediante un modelo orientado al control donde el vector de variables de estado es donde $\text{SOC}(t)$ es el estado de la carga de la batería y $\text{LOH}(t)$ es el nivel de hidrógeno del tanque. El modelo matemático sería entonces:

$$\text{SOC}(t+1) = \text{SOC}(t) - \frac{\eta_{\text{bat}} T_s}{C_{\text{max}}} P_{\text{bat}}(t) \quad (2.2)$$

$$\text{LOH}(t+1) = \text{LOH}(t) + \frac{\eta_{\text{elz}} T_s}{V_{\text{max}}} P_{\text{elz}}(t) - \frac{T_s}{\eta_{\text{fc}} V_{\text{max}}} P_{\text{fc}}(t) \quad (2.3)$$

Donde las variables manipulables son $P_{\text{fc}}(t)$, la potencia de la pila de hidrógeno, $P_{\text{grid}}(t)$, la potencia de la red y $P_{\text{elz}}(t)$, la potencia del electrolizador.

La potencia de la batería, $P_{\text{bat}}(t)$, es la encargada de balancear el resto de potencias del bus DC, por lo tanto:

$$P_{\text{bat}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_{\text{elz}}(t) - P_{\text{fc}}(t) - P_{\text{grid}}(t) - P_{\text{gen}}(t) \quad (2.4)$$

Se define como perturbación medible la ecuación de:

$$d(t) = P_{\text{gen}}(t) - P_{\text{load}}(t) \quad (2.5)$$

Quedando así el modelo finalmente como:

$$\text{SOC}(t+1) = \text{SOC}(t) - \frac{\eta_{\text{bat}} T_s}{C_{\text{max}}} (P_{\text{elz}}(t) - P_{\text{fc}}(t) - P_{\text{grid}}(t) - d(t)) \quad (2.5)$$

$$\text{LOH}(t+1) = \text{LOH}(t) + \frac{\eta_{\text{elz}} T_s}{V_{\text{max}}} P_{\text{elz}}(t) - \frac{T_s}{\eta_{\text{fc}} V_{\text{max}}} P_{\text{fc}}(t) \quad (2.6)$$

2.3 Adaptación del modelo al vehículo

Para adaptar el modelo inicial al vehículo tomamos una serie de simplificaciones las cuales se describen a continuación. Eliminamos el electrolizador, ya que en el vehículo no disponemos de este. Los convertidores de potencia no se tienen cuenta a la hora de describir el modelo, así como el bus y en este caso la carga será un modelo de coche que se describe próximamente. La fuente de potencia eléctrica procedente de las placas fotovoltaicas también es suprimida, ya que el vehículo no dispone de estas. Con esto el modelo queda reducido a una batería, una pila de hidrógeno, su respectivo tanque y el sistema de control.

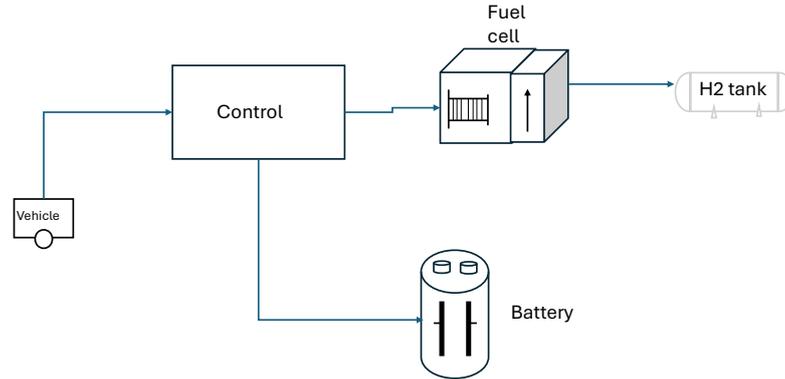


Figura 2.3 Esquema del Modelo Adaptado.

2.3.1 Modelo matemático simplificado

Al realizar las simplificaciones previamente descritas, tendremos como variable manipulable la potencia de la pila de hidrógeno, $P_{fc}(t)$. Como perturbación medible tenemos $P_{load}(t)$, la potencia de la carga, en nuestro caso el vehículo. El vector de variables de estados se mantiene igual al modelo original, y por último, el balance que efectúa la potencia de la batería, $P_{bat}(t)$, queda

$$P_{bat}(t) = P_{load}(t) - P_{fc}(t) \quad (2.7)$$

Quedando entonces el modelo del sistema como

$$SOC(t+1) = SOC(t) - \frac{\eta_{bat} T_s}{C_{max}} (P_{load}(t) - P_{fc}(t)) \quad (2.8)$$

$$LOH(t+1) = LOH(t) - \frac{T_s}{\eta_{fc} V_{max}} P_{fc}(t) \quad (2.9)$$

2.3.2 Modelo del coche

Partiendo del esquema de fuerzas de la figura 2.4, se tiene:

1. m , masa del vehículo.
2. D_a , drag.
3. W , peso.
4. F , fuerza de tracción.

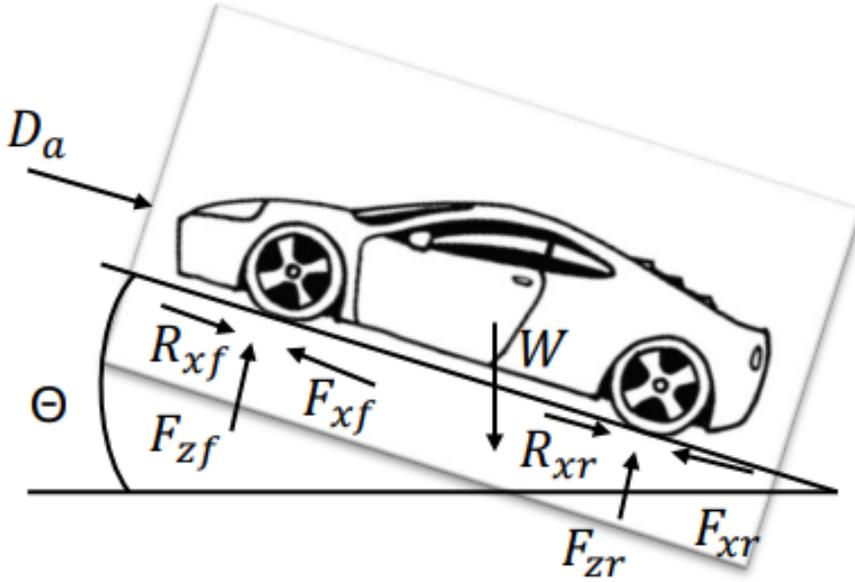


Figura 2.4 Esquema de fuerzas.

5. R , resistencia a la rodadura.

Aplicando la segunda Ley de Newton en la dirección vertical:

$$0 = W \cos \Theta - F_{zf} - F_{zr} \quad (2.10)$$

En la dirección horizontal:

$$ma_x = \left(\frac{W}{g}\right) a_x = m \frac{du}{dt} = F_{xr} + F_{xf} - W \sin \Theta - R_{xr} - R_{xf} - D_A + R_{hx} \quad (2.11)$$

La fuerza de resistencia aerodinámica viene dada por:

$$D_A = 0.5\rho C_d A(u + u_w)^2 \quad (2.12)$$

Donde tenemos:

1. ρ , densidad de 1.202 kg/m^3 .
2. C_D coeficiente de resistencia aerodinámica, con valor de 0.5.
3. sección transversal,

$$A = 0.9 \times \text{largo} \times \text{altura} \quad (2.13)$$

4. U_w , consideramos la situación ideal sin viento, por tano la velocidad del viento es nula. .

Resistencia a la rodadura debido a la deformación de la rueda y la superficie,

$$R_x = R_{xf} + R_{xr} = f(F_{zf} + F_{zr}) \quad (2.14)$$

donde f es típicamente 0.015.

Para el modelo consideramos que largo = 1.5 m y altura = 1.2 m. . Más adelante se propondrán distintos valores tanto para la velocidad, ángulo y aceleración. Tenemos que tomar una simplificación en las ecuaciones debido a que el vehículo FOX, tiene dos ejes con cuatro ruedas una en cada motor, vamos a tomar como simplificación que la fuerza se reparte por igual en ambos ejes.

La ecuación simplificada en el eje vertical es:

$$0 = W \cos \Theta - F_z \quad (2.15)$$

La ecuación simplificada en el eje horizontal es:

$$ma_x = \left(\frac{W}{g}\right) a_x = m \frac{du}{dt} = F_x - W \sin \Theta - R_x - D_A \quad (2.16)$$

Resistencia a la rodadura simplificada:

$$R_x = f(F_z) \quad (2.17)$$

2.4 Comprobaciones del modelo

Se va a llevar a cabo una simulación del modelo de espacio de estados con el fin de comprobar que las simplificaciones realizadas respecto al modelo inicial son correctas y el funcionamiento es el esperado. Lo esperado sería que tanto el nivel de hidrógeno como de batería disminuyesen a medida que pase el tiempo.

Para esta simulación concretamente aplicaremos una potencia de carga demandada por el vehículo de 10 kW, recordemos que esto es la perturbación medible del modelo. La potencia de la pila empleada es de 1.5 kW, recordemos que esta es la variable de control. Por tanto, haciendo el balance de potencias la batería aportará una potencia de 8.5 kW. Si se aplicase una potencia de batería negativa, lo esperado sería que el nivel de batería aumentase a lo largo del tiempo.

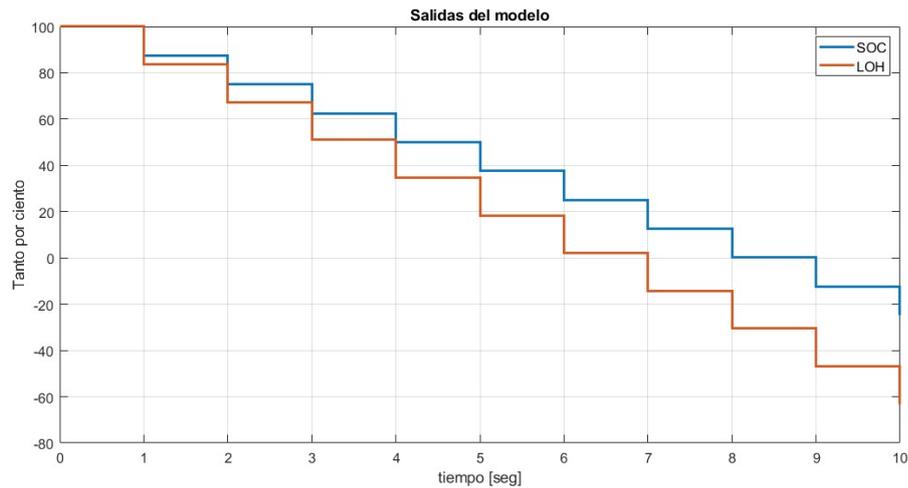


Figura 2.5 Simulación del Modelo de Espacio de Estados.

Simulando el modelo de espacio de estados obtenemos la gráfica anterior, teniendo en cuenta que el tiempo de muestreo del sistema es de 1 s, esperamos que partiendo de un valor inicial del cien por cien del estado de la carga y del valor de hidrógeno, este fuese descendiendo cada segundo.

Como podemos ver el valor de la carga y del nivel de hidrógeno desciende con el tiempo, comprobando así que las simplificaciones realizadas en el modelo funcionan correctamente y obtenemos la respuesta esperada.

2.5 Calibración del modelo

Con el objetivo de hacer una simulación lo más fiel posible al sistema real del vehículo FOX, se hace una calibración de los valores de carga y descarga de la batería y de descarga de la pila de hidrógeno.

Para la batería tendremos una capacidad máxima de 17.6 kWh, para la pila de hidrógeno una potencia máxima de 1.5 kW y para el tanque de hidrógeno un volumen máximo de 0.1167 m³ a 300 bar, que equivale a una masa máxima de 3.1458 kg.

Como modelo de pila de hidrógeno y tanque de hidrógeno usamos dos bloques de SIMULINK interconectados, el primero recibe una potencia, como máximo los 1.5 kW mencionados anteriormente, y como

salida obtenemos un consumo de hidrógeno. El tanque de hidrógeno por su parte recibe el consumo y la generación de hidrógeno, en este caso es nula. En función de estas dos entradas obtiene la variación del nivel de hidrógeno.

Tras realizar varios experimentos, trabajando con un nivel de hidrógeno entre el 10 y el 90 por ciento con unas potencias de entre 1 y 2 kW, obtenemos una pendiente media en el vaciado del tanque de hidrógeno de valor 8.1292×10^{-4} , equivalente al parámetro K_{fc} , que aparece en el modelo de espacio de estados.

Como modelo de batería usamos un bloque de SIMULINK, que tiene como entrada una potencia y como salidas, tanto la potencia como el SOC. Para obtener al igual que con la parte de hidrógeno, el parámetro k_{bat} , de carga y descarga, realizamos varias simulaciones entre el 10 y el 90 por ciento de estado de la carga a una potencia de unos 18 kW, obteniendo así un valor de 1.6756×10^{-5} .

2.6 Conclusión

Mediante las simplificaciones realizadas y la posterior calibración obtenemos valores reales de los parámetros de vaciado del tanque de hidrógeno y de carga y descarga de la batería. Una vez obtenidos estos resultados podemos tomar como punto de partida el modelo descrito mediante espacio de estados para diseño del posterior controlador y se obtuvo un modelo de coche lo más real posible para poder calcular posteriormente la potencia demandada en las simulaciones.

3 MPC

3.1 Introducción

Como se ha explicado en el Estado del Arte, el control predictivo es una de las técnicas de control más usadas en estos sistemas de potencia de vehículos híbridos. No obstante, no aprovechamos la optimización de la eficiencia energética, debido a que el control sólo calcula la potencia de la pila de hidrógeno, la de la batería es impuesta por el balance de potencias. Pero, destacamos la capacidad de manejar restricciones tanto para la potencia de la pila de hidrógeno, como niveles de carga y de hidrógeno.

3.2 Planteamiento Modelo de Espacio de Estados

Para el diseño del controlador predictivo me he basado en el libro [6], tal y como se ha descrito en el capítulo anterior partimos de un modelo en espacio de estados.

Dentro de este modelo tenemos la particularidad de que las salidas son las variables de estado del siguiente instante. Por tanto, el modelo en espacio de estados sería:

$$x(t+1) = Ax(t) + Qu(t) + Md(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = Dx(t) \quad (3.2)$$

Básandonos en las siguiente ecuaciones donde u , es la variable manipulable, d es la perturbación medible, y x , el vector de variables de estado.

Definimos el vector de variables de estado como: $x(t) = \begin{pmatrix} SOC(t) \\ LOH(t) \end{pmatrix}$, la variable manipulable como: $u(t) = P_{fc}(t)$, y la perturbación medible como: $d(t) = P_{load}(t)$. Mediante una analogía con las ecuaciones (2.8) y (2.9) obtenemos los valores de las matrices que describen el espacio de estados, estas ecuaciones eran de la siguiente forma:

$$SOC(t+1) = SOC(t) - \frac{\eta_{bat} T_s}{C_{max}} (P_{load}(t) - P_{fc}(t)) \quad (2.8)$$

$$LOH(t+1) = LOH(t) - \frac{T_s}{\eta_{fc} V_{max}} P_{fc}(t) \quad (2.9)$$

Por tanto se comprueba con facilidad que $A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$, $Q = T_s \begin{pmatrix} k_{bat} \\ -k_{fc} \end{pmatrix}$, $M = T_s \begin{pmatrix} -k_{bat} \\ 0 \end{pmatrix}$, y $D = \begin{pmatrix} 10 \\ 01 \end{pmatrix}$, debido a que la salida es la entrada en el siguiente instante. Donde $k_{bat} = \frac{\eta_{bat}}{C_{max}}$, y $k_{fc} = \frac{\eta_{fc}}{V_{max}}$.

3.3 Función de Costes

La función de costes empleada es la siguiente:

$$J = \sum_{k=1}^{N_c} (\alpha P_{fc}^2(t+k) + \beta \Delta P_{fc}^2(t+k)) + \sum_{k=1}^{N_p} (\lambda_1 (SOC(t+k) - SOC_{ref}(t+k))^2 + \lambda_2 (LOH(t+k) - LOH_{ref}(t+k))^2) \quad (3.3)$$

El primer término hace referencia al error cuadrático de la variable manipulable, el peso correspondiente a este término es α . El segundo término comprende el error cuadrático de la variación de la variable manipulable, el peso correspondiente a este término es β . Por último, el tercer término se encarga del seguimiento de referencia, los pesos de este último término son δ_1 y δ_2 .

Para poder realizar de forma más sencilla el desarrollo de la función de costes, (3.3), se hace un cambio en el modelo para usar como variable manipulable ΔP_{fc} . Partimos de la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{fc}(t) = P_{fc}(t) - P_{fc}(t-1) \quad (3.4)$$

De donde podemos despejar :

$$P_{fc}(t) = \Delta P_{fc}(t) + P_{fc}(t-1) \quad (3.5)$$

De manera que ahora podemos hacer el cambio en nuestro sistema de espacio de estados, (3.1) y (3.2), usando ahora como variable de control, $u(t) = \Delta P_{fc}(t)$, y sumando a este valor una constante igual al valor de la acción de control en el instante anterior, $C(t) = P_{fc}(t-1)$. Quedando así el modelo en espacio de estados de la forma:

$$x(t+1) = Ax(t) + Q(u(t) + C(t)) + Md(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = Dx(t) \quad (3.2)$$

Vamos a desarrollar la expresión de cada término de la función de costes en función de la variable manipulable u .

3.3.1 Desarrollo primer término

El primer término correspondiente a $\sum_{k=1}^{N_c} \alpha P_{fc}^2(t+k)$, podemos expresarlo como:

$$\sum_{k=1}^{N_c} \alpha P_{fc}^2(t+k) = [\Delta_{tri-inf} \mathbf{u} + \mathbf{C}]^T \alpha [\Delta_{tri-inf} \mathbf{u} + \mathbf{C}] \quad (3.8)$$

donde, \mathbf{u} , es un vector de dimensiones $[N_c \times 1]$, \mathbf{C} , es un vector de dimensiones $[N_c \times 1]$, que contiene las acciones de control del instante anterior al calculado. Y $\Delta_{tri-inf}$, es una matriz triangular inferior de dimensiones $[N_c \times N_c]$. α , es un escalar para indicar el peso en la función de costes.

3.3.2 Desarrollo segundo término

El segundo término correspondiente a $\sum_{k=1}^{N_c} \beta \Delta P_{fc}^2(t+k)$, sería

$$\sum_{k=1}^{N_c} \beta \Delta P_{fc}^2(t+k) = \mathbf{u}^T \beta \mathbf{u} \quad (3.9)$$

donde \mathbf{u} , tiene dimensiones de $[N_c \times 1]$, y β es un escalar para indicar el peso en la función de costes.

3.3.3 Desarrollo del tercer término

El tercer término correspondiente a $\sum_{k=1}^{N_p} (\lambda_1 (SOC(t+k) - SOC_{ref}(t+k))^2 + \lambda_2 (LOH(t+k) - LOH_{ref}(t+k))^2)$ tiene un desarrollo más complejo.

Podemos ver que:

$$\begin{pmatrix} x(t+1) \\ x(t+2) \\ \vdots \\ x(N_p) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t) + Qu(t) + Md(t) \\ x(t) + (Q|Q) \begin{pmatrix} u(t) \\ u(t+1) \end{pmatrix} + (M|M) \begin{pmatrix} d(t) \\ d(t+1) \end{pmatrix} \\ \vdots \\ x(t) + (Q \dots Q_{N_p}) \begin{pmatrix} u(t) \\ \vdots \\ u_{N_c} \end{pmatrix} + (M \dots M_{N_p}) \begin{pmatrix} d(t) \\ \vdots \\ d(N_p) \end{pmatrix} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Donde se esta considerando que $u(t) = P_{fc}$. Si hacemos el cambio de variable manipulable a $u(t) = \Delta P_{fc}$, la ecuación matricial sería la siguiente:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_{inicial} + \tilde{Q}(\Delta_{tri-inf}\mathbf{u} + \mathbf{C}) + \tilde{M}\mathbf{d} \quad (3.11)$$

Donde tenemos que $\mathbf{x}_{inicial}$ es una matriz de dimensiones $[2N_p \times 1]$, conteniendo el valor de las variables de estado iniciales repitiéndose. La matriz \tilde{Q} , es de dimensiones $[2N_p \times N_c]$, donde sus elementos son la matriz Q original del modelo. El vector \mathbf{u} , es de dimensiones $N_c \times 1$, y contiene los valores del incremento de la variable manipulable. La matriz $\Delta_{tri-inf}$, es una matriz triangular inferior de dimensiones $[N_c \times N_c]$. El vector \mathbf{C} , es de dimensiones $[N_c \times 1]$, y contiene los valores de la variable manipulable en el instante anterior. La matriz \tilde{M} , es de dimensiones $[2N_p \times N_p]$, y contiene la matriz original M repetida. Por último, el vector \mathbf{d} , es de dimensiones $[N_p \times 1]$, y contiene los elementos correspondientes a la perturbación medible. Por tanto el tercer término queda como:

$$(\mathbf{x}_{inicial} + \tilde{Q}(\Delta_{tri-inf}\mathbf{u} + \mathbf{C}) + \tilde{M}\mathbf{d})^T \lambda (\mathbf{x}_{inicial} + \tilde{Q}(\Delta_{tri-inf}\mathbf{u} + \mathbf{C}) + \tilde{M}\mathbf{d}) \quad (3.12)$$

Donde λ es una matriz de dimensiones $[2N_p \times 2N_p]$, siguiendo construida concatenando matrices de la siguiente forma: $\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$

3.3.4 Desarrollo final de la función de costes

La ecuación (3.3) queda entonces:

$$J = (\Delta_{tri-inf}\mathbf{u} + \mathbf{C})^T \alpha (\Delta_{tri-inf}\mathbf{u} + \mathbf{C}) + \mathbf{u}^T \beta \mathbf{u} + (\mathbf{x}_{inicial} + \tilde{Q}(\Delta_{tri-inf}\mathbf{u} + \mathbf{C}) + \tilde{M}\mathbf{d})^T \lambda (\mathbf{x}_{inicial} + \tilde{Q}(\Delta_{tri-inf}\mathbf{u} + \mathbf{C}) + \tilde{M}\mathbf{d}) \quad (3.13)$$

Desarrollando las multiplicaciones y despreciando los términos no dependientes del vector de variables manipulables, queda:

$$J = \alpha \mathbf{u}^T \Delta_{tri-inf}^T \Delta_{tri-inf} \mathbf{u} + 2\alpha \mathbf{u}^T \Delta_{tri-inf}^T \mathbf{C} + \beta \mathbf{u}^T \mathbf{u} + \delta [\mathbf{u}^T \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \tilde{Q} \Delta_{tri-inf} \mathbf{u} + 2\mathbf{u}^T \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \mathbf{x}_{inicial} + 2\mathbf{u} \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \tilde{Q} \mathbf{C} + 2\mathbf{u}^T \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \tilde{M} \mathbf{d}] \quad (3.14)$$

Donde podemos agrupar el término cuadrático y el término lineal de la forma:

$$H = \mathbf{u}^T (\alpha \Delta_{tri-inf}^T \Delta_{tri-inf} + \beta + \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \delta \tilde{Q} \Delta_{tri-inf}) \quad (3.15)$$

$$f = 2\mathbf{u}^T (\alpha \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q} + \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \mathbf{x}_{inicial} + \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \tilde{Q} + \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \tilde{M} \mathbf{d} - \Delta_{tri-inf}^T \tilde{Q}^T \delta \mathbf{x}_{ref}) \quad (3.16)$$

De esta forma obtenemos una expresión compatible con el método empleado para resolver el problema cuadrático de la siguiente manera:

$$\min_{\mathbf{u}} \mathbf{u}^T H \mathbf{u} + f^T \mathbf{u} \quad (3.17)$$

Donde se busca minimizar la función de costes. Las restricciones se puede especificar de la forma $A\mathbf{u} \leq b$, siendo \mathbf{u} el vector de la variable de control. También podemos definir límites en la variable de control de la forma $l \leq \mathbf{u} \leq u$.

3.3.5 Método de resolución de la función de costes

Para resolver la función de costes, se empleará una función de alto nivel de MATLAB, denominada *quadprog*, a continuación se describe el algoritmo que esta emplea.

El método empleado es denominado *active – set* o también conocido como método de proyección, este consta de tres fases:

1. Fase previa a la resolución, se simplifica el problema eliminando redundancias y simplificando las restricciones. Si el algoritmo detecta un punto inviable o un problema sin límites para su ejecución y proporciona un mensaje apropiado. Si por otro lado, se detecta un único punto viable, este sería la solución. En caso de que ninguna de las dos situaciones previas tengan lugar, el algoritmo continua con su siguiente fase. Cuando se consiga una solución se reconstruirá el problema eliminando las posibles simplificaciones que aquí se hayan llevado a cabo.
2. Fase 1 del Algoritmo, se trata de buscar una solución que satisfaga todas las restricciones sin tener en cuenta la función objetivo. Si no encuentra una posible solución de esta forma el algoritmo para, si en caso contrario, se encuentra una solución el siguiente paso es satisfacer los límites. Si se encuentra una solución se consider entonces solución viable de la Fase 1.
3. Fase 2 del Algoritmo, mediante una serie de iteraciones se busca la dirección que minimiza la función de costes. Si se consigue una dirección donde el problema se resuelva sin violar ninguna de las restricciones esta será tomada como solución, en caso contrario se busca el límite más cercano a esa dirección sin que viole dichas restricciones.

3.4 Conclusión

De cara a las simulaciones hemos concluido que la variable a controlar será la potencia de hidrógeno, mientras que la potencia de la batería vendrá establecida por el balance de potencias, esto resultará probablemente en una restricción a la hora de poder realizar un control más flexible, por otro lado, esto simplifica la función de costes, ya que si la incluyésemos como variable a controlar la potencia de la batería aparecerían sendos términos correspondientes a los errores cuadráticos.

También hemos concluido el efecto de los pesos de la función de costes, parámetros que se escogerán en función del objetivo deseado en cada simulación.

4 Experimentos en simulación

Mediante la toolbox SIMULINK de MATLAB realizamos el esquema de la figura 4.1. Se crea entonces un entorno de simulación para los distintos experimentos que se pretenden realizar con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del controlador previamente diseñado.

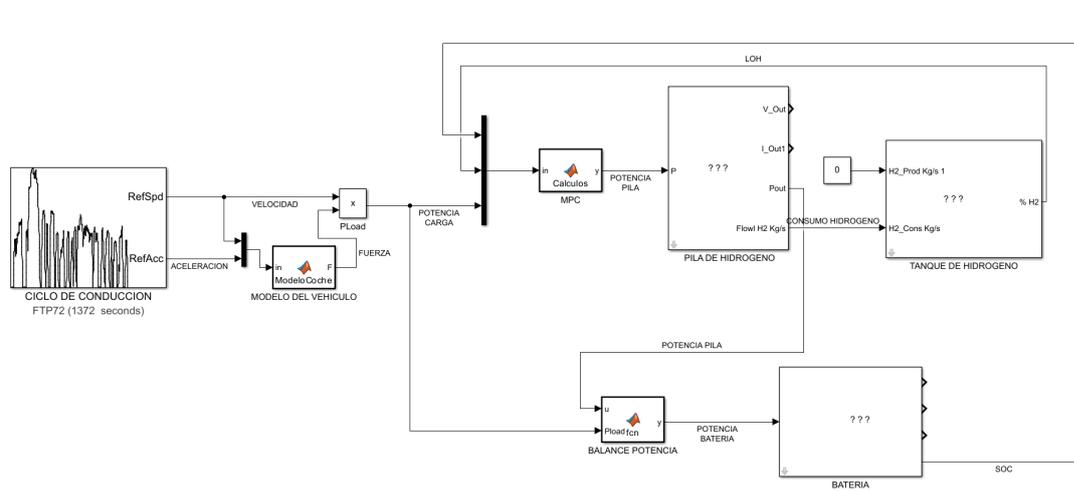


Figura 4.1 Esquema simulación en SIMULINK.

Se puede observar que la simulación está compuesta por varios elementos de suma importancia para la representación fiel de los distintos elementos del sistema de potencia relativos al vehículo FOX.

4.1 Ciclo de Conducción

Ubicado en la parte izquierda del esquema encontramos el bloque que genera el ciclo de conducción, dicho bloque proviene de la librería de MATLAB Vehicle Dynamics Blockset.

Este permite ser configurado para proporcionar tanto la velocidad, como la aceleración en cada instante de la simulación, permite también repetir cíclicamente el ciclo de conducción deseado si se pretendiese simular durante un tiempo más prolongado. Destaca la gran variedad de ciclos de conducción seleccionables que ofrece, pudiendo incluso llegar a importar desde un archivo el mismo, para este trabajo se emplearán dos en concreto: NEDC, el ciclo estándar de Europa hasta hace relativamente poco, y el WLTP, el nuevo ciclo de conducción estándar tanto para Europa como para el resto del mundo, este aspecto de la simulación relativa a la explicación del ciclo de conducción empleado será tratado más adelante. En último lugar, este bloque necesita ser configurado con un cierto tiempo de muestreo, en nuestro caso será de 1 segundo, ya que es un tiempo adecuado para la capacidad del microcontrolador que llevaría el vehículo a bordo.

4.2 Elementos del sistema de producción y almacenamiento de la energía

Ubicados en la mitad derecha de la figura 4.1 vemos los tres elementos que componen el sistema de producción y almacenamiento de energía, estos son: pila de hidrógeno, tanque de hidrógeno y batería. Todos estos bloques han sido extraídos de la librería SIMUGRID realizada por el profesor Miguel Ángel Ridaó.

Empezando por la pila de hidrógeno, está configurada por medio de una serie de parámetros internos a una potencia máxima de $1,5 \text{ kW}$ como se explicó en el capítulo 2. La pila recibe la potencia demandada y entrega como salida la potencia proporcionada, esto es porque a la pila se le puede exigir una potencia mayor a la máxima posible, caso en el que como salida obtendríamos la máxima a la salida. También tenemos como salida la tensión e intensidad de la misma, que para el objetivo de este trabajo no son relevantes. Por último, proporciona un consumo de hidrógeno que será una de las entradas del tanque de hidrógeno.

Continuamos con el tanque de hidrogeno, como parámetros de configuración tenemos el máximo peso de hidrógeno que tal y como se dijo en el capítulo 2 es de 3.1458 kg , y el porcentaje de nivel de llenado inicial del tanque, este parámetro es variable en función de la simulación. Como entradas recibe el hidrógeno consumido, que proviene de la salida de la pila de hidrógeno, y el producido, que para este caso es nulo, debido a que no se tiene ningún tipo de elemento que proporcione hidrógeno.

En último lugar, tenemos la batería que como entrada recibe la potencia demandada calculada en el balance de potencias, que se explica a continuación, como salida obtenemos la potencia proporcionada. La batería está configurada con la especificación descrita en el capítulo 2, como parámetro variable en la simulación tenemos el porcentaje de carga inicial que posee, que al igual que en el tanque de hidrógeno, es variable en función de la simulación.

4.3 Balance de Potencias

Ubicado en la parte izquierda de la figura 4.1 se localiza un bloque Function, con tiempo de muestreo de 1 segundo al igual que el ciclo de conducción. Este bloque alberga un código en forma de función que calcula la potencia demandada a la batería sabiendo la potencia de carga y la potencia de la pila de hidrógeno.

Es un código basado en la ecuación del balance de potencias. Este dice que toda la potencia consumida debe ser igual a la suministrada en un caso ideal sin pérdidas que es el que a este trabajo concierne. Quedando por tanto la ecuación:

$$P_{load} = P_{fc} + P_{bat} \quad (4.1)$$

Vemos entonces que en este caso ya que la potencia de la carga es la perturbación medible, que es proporcionada mediante el cálculo realizado en el modelo del vehículo, y que la potencia de la pila es la variable manipulable, proporcionada por el controlador predictivo, el balance de potencia se ocupará de calcular la potencia de la batería necesaria para cumplir dicho balance.

4.4 Modelo del vehículo

Ubicado en la parte izquierda de la figura 4.1 se localiza el bloque Function encargado de calcular la potencia de carga, es decir, la demandada por el vehículo, en función de su modelo. Este tiene también un tiempo de muestreo de 1 segundo.

Este bloque en función de la aceleración y velocidad instantánea calcula, siguiendo las ecuaciones 2.3.2, la fuerza necesaria para poder conseguir esa aceleración y posteriormente al multiplicarla por la velocidad obtenemos la potencia. Como entrada recibe tanto la aceleración como la velocidad del vehículo determinada por el ciclo de conducción. Como parámetros del código tenemos que definir la masa, 700 kg , el coeficiente de resistencia aerodinámica con valor de 0.3 y la velocidad del viento, que para este trabajo será nulo. Posteriormente se harán una serie de simulaciones variando el ángulo de inclinación del vehículo para probar distintas situaciones.

4.5 Controlador predictivo

Ubicado en el centro del esquema se encuentra el bloque Function que ejecuta el código relativo al controlador, este tiene un tiempo de muestreo de 1 segundo.

Recibe como entradas tanto el estado de la carga, SOC, como el nivel de hidrógeno, LOH, y la potencia demandada por el vehículo. Al principio del código se leen las entradas y se definen el horizonte de control y

de predicción, ambos valores dependen de la capacidad de cálculo de la que se disponga, en este caso al tener un ordenador de sobremesa, usamos como valores 3 y 5 respectivamente. Posteriormente definimos el valor del incremento de la variable de control inicial, como un vector de ceros de tamaño igual al horizonte de control. A continuación definimos los cuatro valores de los pesos, α , para el valor la variable de control, β , para el valor del incremento de la variable de control, δ_1 , para el seguimiento de la referencia del nivel de hidrógeno, δ_2 , para el seguimiento de la referencia del estado de la carga.

En segundo lugar, definimos las matrices necesarias para el cálculo del término lineal y el término cuadrático. La matriz triangular inferior se define obteniendo los elementos por debajo de la diagonal principal de una matriz de unos cuadrada de dimensión igual al horizonte de control. Luego calculamos la matriz correspondiente al espacio de estados, relativa a la variable manipulable y la perturbación medible. De esta forma repitiendo esa matriz podemos definir la matriz \hat{Q} y \hat{M} . Para definir la matriz relativa a los pesos del seguimiento de referencia, definimos una inicial de la forma: $\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$ luego la repetimos hasta crear una matriz cuadrada de dimensión igual al horizonte de predicción, para poder eliminar los elementos no deseados, recorremos con un bucle anidado todas las filas y columnas de esa matriz y si no pertenece dicho elemento a la diagonal principal se convierte en nulo. Procedemos a definir la matriz de las variables de estado iniciales, y luego, repetimos dicha matriz hasta conseguir una matriz columna de tamaño igual al horizonte de predicción. Con la matriz de las perturbaciones medibles hacemos el mismo proceso y por último, del mismo modo definimos la matriz de las variables de estado de referencia.

Finalmente, en el código se resuelve el problema cuadrático mediante la función de alto nivel proporcionada por MATLAB, `quadprog`. Esta función calcula el valor mínimo de \mathbf{u} , en base a la ecuación 3.17. La función en la modalidad empleada en este trabajo, recibe como argumentos la matriz H , la matriz f , una matriz A y un vector b , que se emplean para implementar restricciones en el cálculo, que se verán más adelante. Por último, la función recibe un vector, l_b , para el límite inferior del valor de la variable manipulable, y un vector, u_b , para el límite superior. También recibe un vector con el valor inicial del incremento de la variable manipulable, y un vector, `options`, con la configuración de la función. Las restricciones sobre el incremento de la variable de control, se imponen de la forma:

$$A * \mathbf{u} = b \quad (4.1)$$

A es una matriz de dimensiones $N_c \times N_c$, y el vector columna b de dimensiones N_c . Donde recordemos que \mathbf{u} , es el incremento de la acción de control, por tanto para formular una restricción sobre el incremento, usaremos una matriz A diagonal, y en el vector b expresaremos el límite que deseamos. En cuanto a los vectores que expresan el límite inferior y superior, no tiene sentido usarlos sobre el incremento de la acción de control, ya que esta la estamos restringiendo con la ecuación anterior. Es por eso que los utilizamos para poner un límite en la propia acción de control, esto se puede conseguir restando al valor límite la acción de control en el instante anterior, que en el código se almacena como una variable persistente.

De este modo podemos restringir, tanto la acción de control, como su incremento, lo que tendrá consecuencias en la elección de los pesos en las posteriores simulaciones.

4.6 Simulación con ciclo de conducción NEDC

En esa sección vamos a usar como ciclo de conducción el NEDC, New European Driving Cycle, este era el estándar usado en Europa. Este ciclo se emplea para comprobar las emisiones de dióxido de carbono y el consumo de combustible. Consiste en la repetición cuatro veces de un ciclo urbano, UDC, Urban driving cycle, y una última parte de un ciclo extraurbano, EUDC, Extra-urban driving cycle. Simula las condiciones de conducción urbana, donde encontramos cambios en la demanda de aceleración, así como momentos donde el acelerador está en lo que se considera encendido/apagado instantáneo. También tiene una parte representando la conducción en una autopista. Combinamos estas situaciones cada una con su tiempo adecuado.

Como se puede ver en la figura 4.2, al tener un rango amplio de velocidades esto implicará mayor aceleración o deceleración, lo que concuerda con el objetivo de representar condiciones de carga sobre el vehículo dinámicas. Sin embargo, los tiempos donde la velocidad es constante son reducidos, ya que se pretende simular el continuo movimiento del conductor de pisar y levantar el pie del acelerador.

4.6.1 Caso de estudio I

En este caso de estudio vamos a hacer una simulación donde pretendemos comprobar si el vehículo funciona del modo híbrido deseado, que en este caso sería priorizar el consumo de hidrógeno antes que el de la batería.

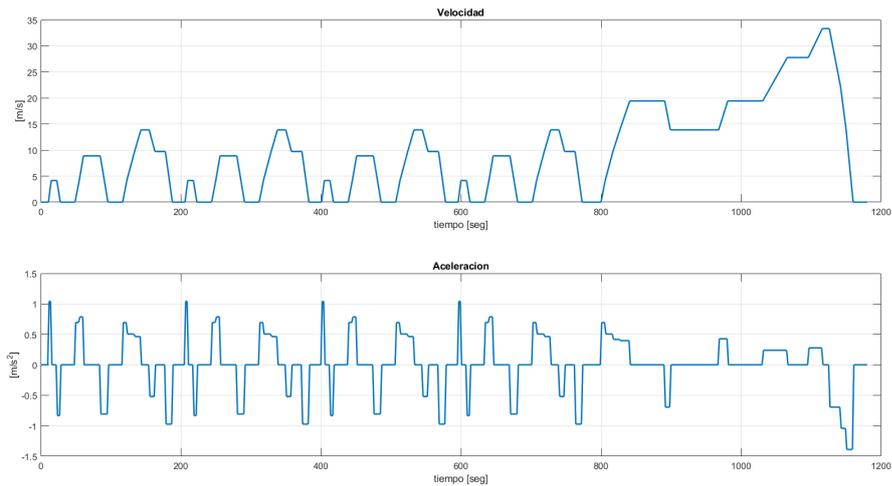


Figura 4.2 NEDC.

Para ello, los pesos de la función de costes relativos tanto a la acción de control como al incremento de la misma se mantendrán a uno, para poder dar prioridad a la pila de hidrógeno frente a la batería debemos usar el peso δ_1 mayor que δ_2 . Sin elegir esta configuración para los pesos obtendríamos un consumo nulo de hidrógeno, ya que el controlador en ningún momento tiene en cuenta que la potencia demandada no se vea satisfecha por la batería. Por este motivo no se puede priorizar el consumo de la batería frente al de hidrógeno.

El valor empleado se ha obtenido mediante experimentos hasta conseguir el objetivo deseado, siendo el valor de δ_1 , 1×10^7 y el valor de δ_2 , 1×10^{-7} . A parte usaremos como estado inicial del tanque de hidrógeno y de la batería del 50 %, como referencia usaremos el mismo valor que el inicial para el estado de la batería y del 5 % del valor inicial para el tanque de hidrógeno. Esto es debido a que al exigir un menor seguimiento de referencia del nivel de hidrógeno frente al de la batería, deberíamos conseguir que se priorizase la aportación de por parte de la pila de hidrógeno. Si mantuviésemos la referencia de hidrógeno igual a la inicial, pese a tener un peso bajo, el controlador tendería a usar la potencia de la batería para conseguir un seguimiento de referencia del nivel de hidrógeno adecuado.

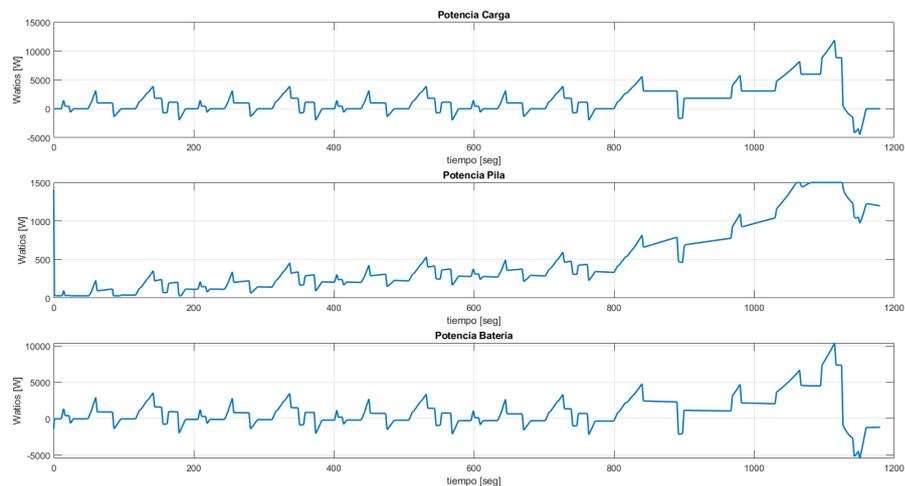


Figura 4.3 Consumo de Potencias.

La simulación tiene una duración de 1180 segundos, que es la duración del NEDC. Podemos observar que, en efecto, se está dando prioridad al hidrógeno, ya que se consume potencia en la pila, cuando con la batería tendría capacidad de sobra para soportar la potencia de la carga. No obstante, vemos que la aportación de potencia por parte de la pila es mucho menor en comparación a la de la batería.

Es por eso que proponemos la modificación del peso α , el cual es relativo al valor de la acción de control, si usamos un valor menor que el actual, recordemos que era 1, podremos dar menos importancia al valor de

la acción de control, lo que debería de proporcionar mayores valores de potencia de la pila de hidrógeno. Podemos apreciar como ocurre lo esperado, ya que obtenemos un consumo de potencia de la pila más elevado

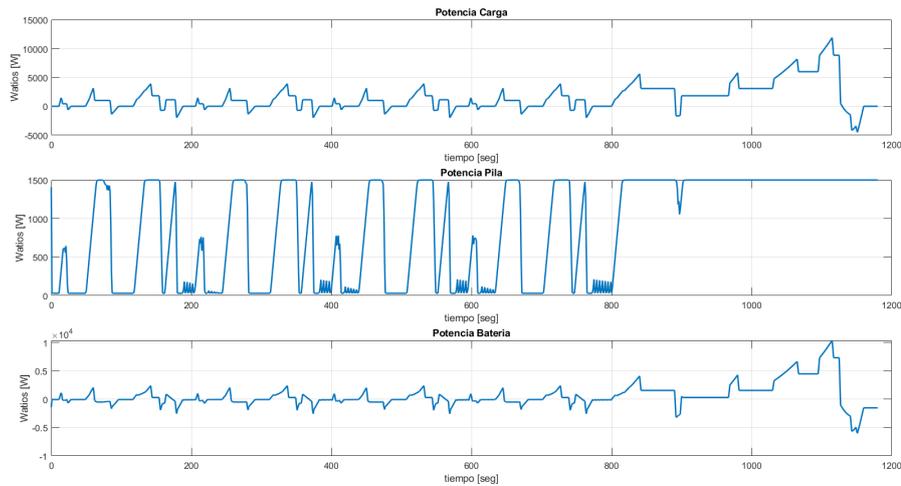


Figura 4.4 Consumo de Potencias con $\alpha = 1$.

en la figura 4.4 que en la figura 4.3. En cuanto a la variación del estado del tanque de hidrógeno y de la batería obtenemos la figura 4.5. Vemos como tenemos un valor constante en la batería, mientras que en el

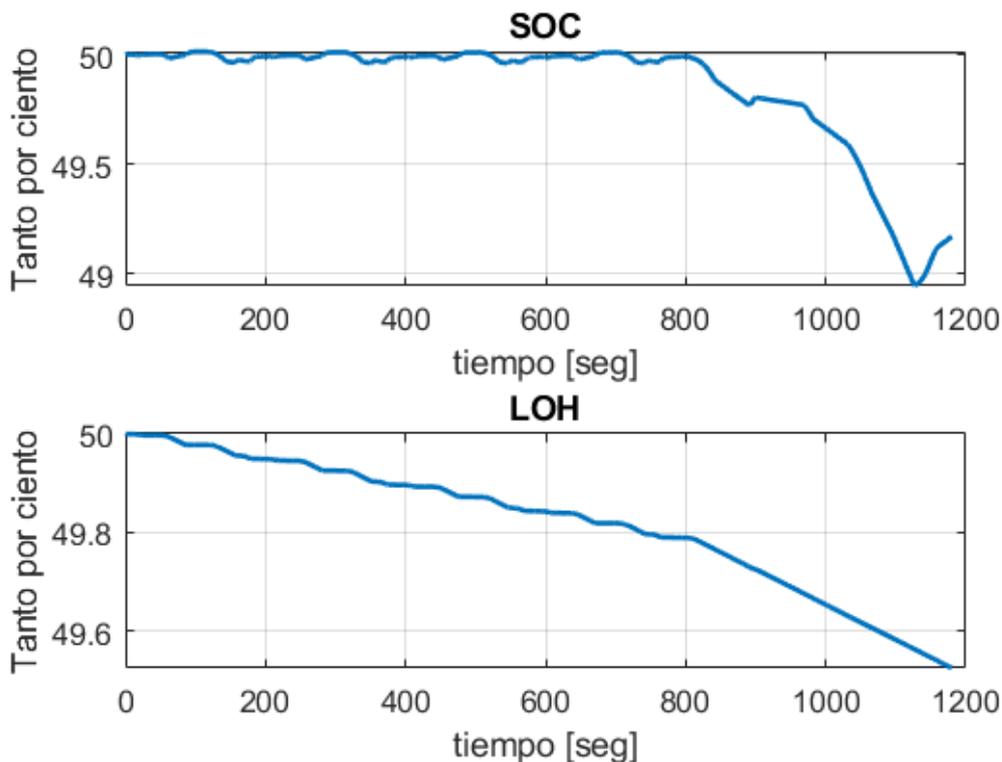


Figura 4.5 Variación de los estados de carga.

hidrógeno el consumo es mucho más pronunciado, que era lo que pretendíamos.

Por último, vamos a comprobar la capacidad del peso β , este hace efecto sobre el incremento de la acción de control. Su variación no debería de ser muy relevante, ya que este incremento está limitado dentro de las restricciones del controlador, en este caso a un incremento de $100W$, vamos a comprobar como afectaría si usásemos un peso menor del actual, recordemos que es 1, ahora usaremos el valor 1×10^{-2} . Vemos que

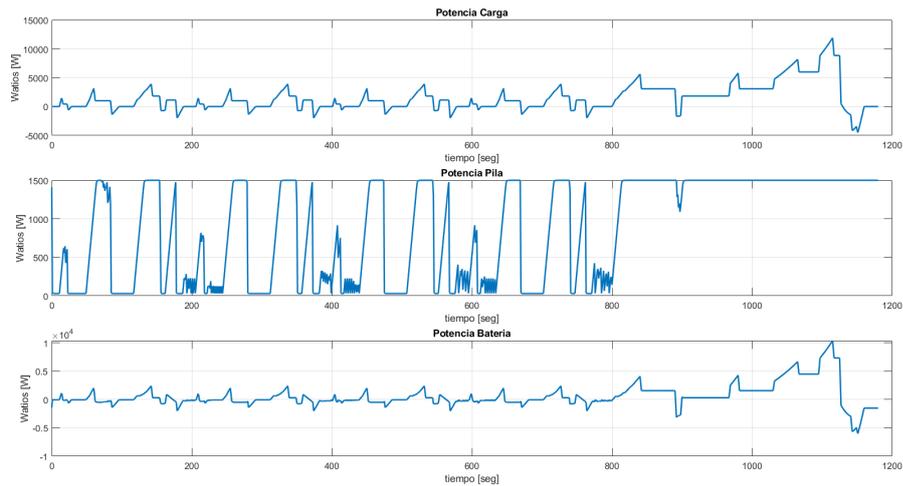


Figura 4.6 Consumo de potencias con $\beta = 1$.

como habíamos explicado el consumo de potencia de la pila no varía de forma significativa, ya que tiene una restricción muy rígida dentro del propio controlador. Si por lo contrario, elevásemos el valor del peso β obtendríamos unos incrementos menores en el valor de la potencia de la pila, llegando al caso límite, este peso sería tan restrictivo que la potencia de la pila sería cercana a cero.

4.6.2 Caso de Estudio II

En el siguiente caso vamos a cambiar el ángulo de inclinación del vehículo simulando pendientes, tanto ascendentes como descendentes. Usaremos un ángulo α con valor de 3.43 grados, que sería la media de inclinación positiva en Europa para carreteras principales. El valor para el descenso, será el mismo pero con signo negativo.

Durante esta primera simulación usaremos el ángulo positivo, es decir, una cuesta en sentido ascendente. Vamos a tomar como punto de partida las conclusiones de 4.6.1, concretamente el valor de los pesos δ_1 y δ_2 , con la idea de mantener la prioridad del consumo de hidrógeno frente al de la batería.

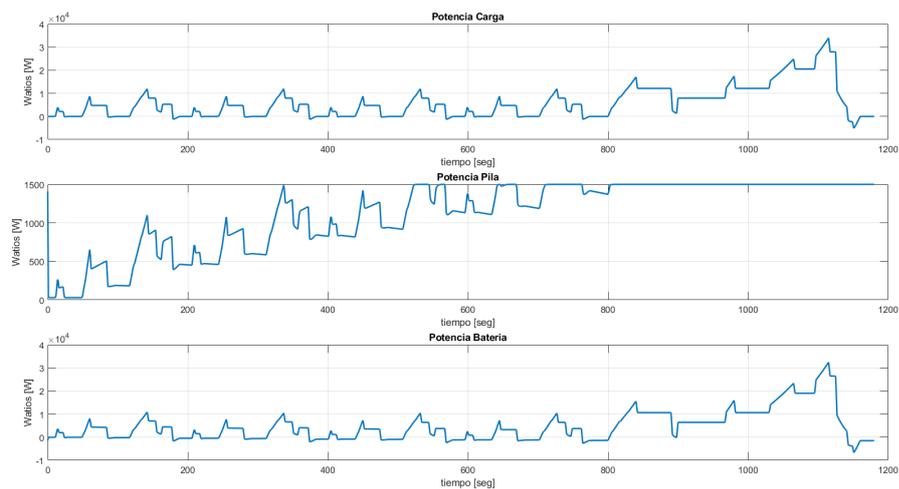


Figura 4.7 Consumo de potencias en pendiente ascendente.

Podemos ver comparando con 4.3, como considerando $\alpha = 1$, obtenemos valores mayores en el consumo de potencia por parte de la pila de hidrógeno, esto es debido a que la potencia que demanda el vehículo es mayor. Pero comprobamos que seguimos manteniendo la prioridad de hidrógeno frente a la batería vista en el apartado anterior. Vemos en 4.8 que ahora el estado de la batería no se mantiene constante, porque a

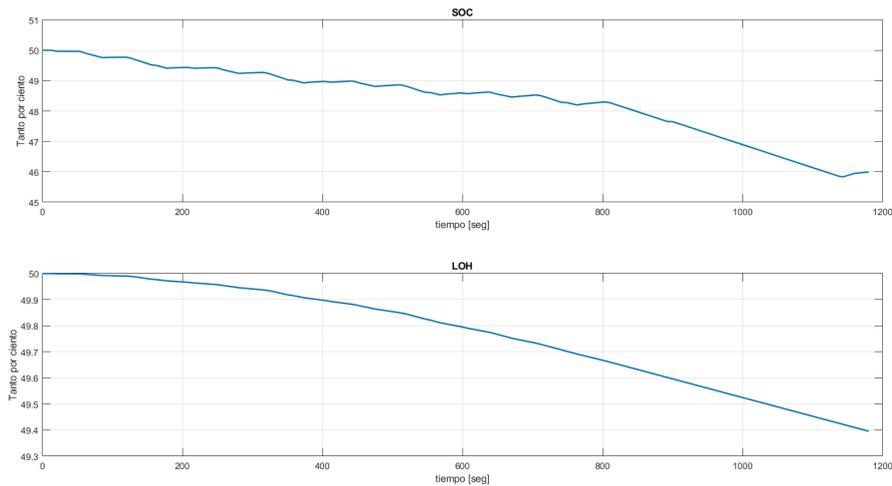


Figura 4.8 Estado del tanque y batería en pendiente ascendente.

diferencia de antes, la potencia demandada por el vehículo es mayor y no puede proporcionarla enteramente la pila de hidrógeno.

Ahora al igual que antes, vamos a comprobar la utilidad de los pesos α y β , usaremos el mismo valor que en la sección anterior. Esto debería producir una situación en la que la acción de control tenga desde el primer momento un valor elevado, no sólo cuando se llega al ciclo extra-urbano en la parte final.

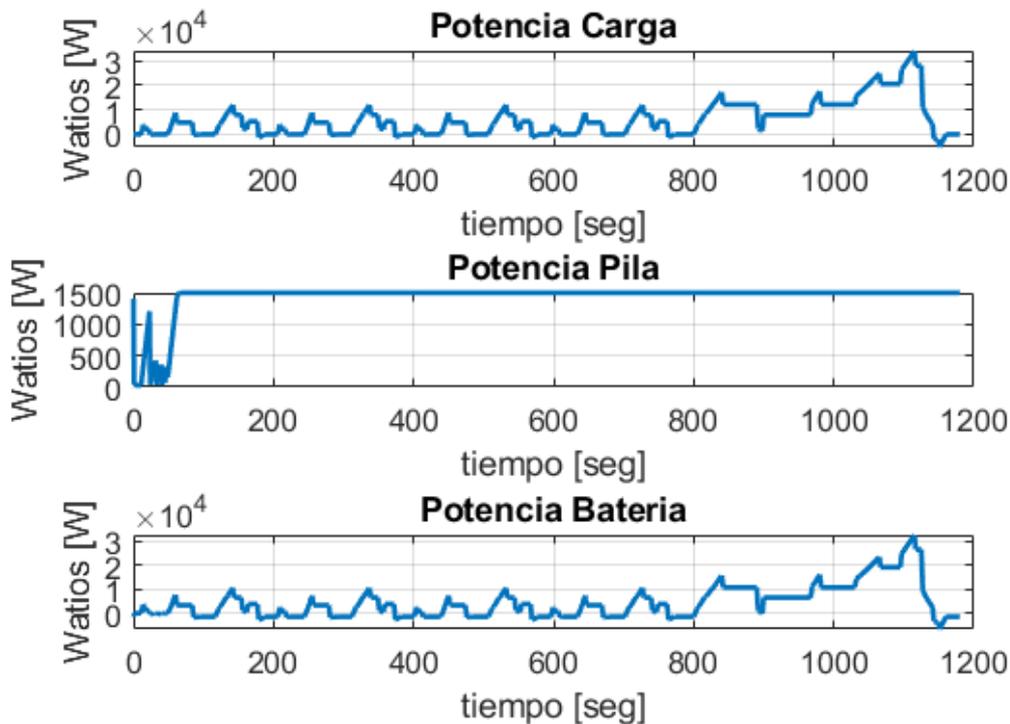


Figura 4.9 Consumo de potencias con pesos $\alpha = 1 \times 10^{-2}$ y $\beta = 1 \times 10^{-2}$.

Podemos observar que en 4.9, obtenemos un consumo de hidrógeno mucho mayor ya que la potencia alcanza su valor máximo mucho antes que en el anterior caso, tal y como esperábamos.

En cuanto a los estados del tanque de hidrógeno y la batería, vemos que ahora como cabría esperar ambos estados decremantan de una manera mucho más brusca.

Ahora vamos a comprobar como sucede lo contrario a lo descrito previamente cuando usamos un ángulo

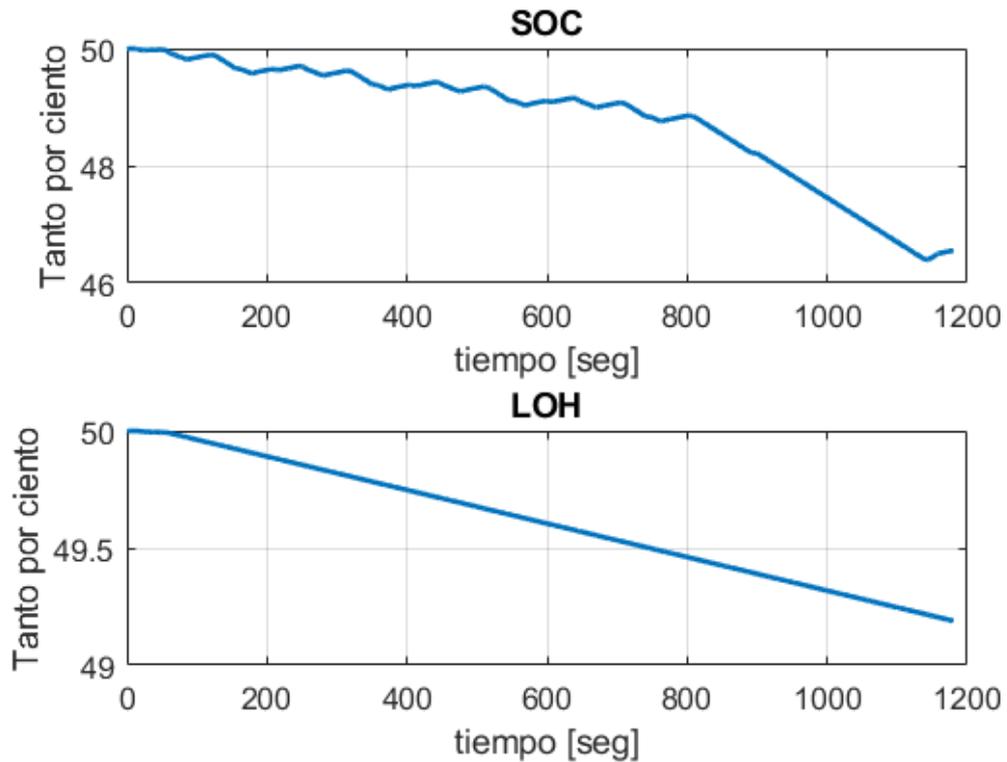


Figura 4.10 Estado batería y tanque de hidrógeno con $\alpha = 1 \times 10^{-2}$ y $\beta = 1 \times 10^{-2}$.

negativo, es decir, cuando simulamos una pendiente descendente. En este caso, directamente vamos a probar usando los valores de los pesos del caso anterior.

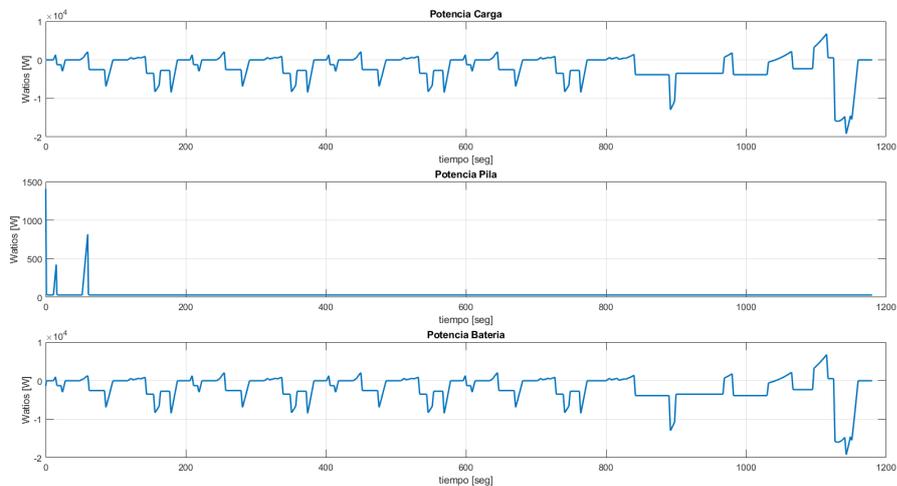


Figura 4.11 Potencia consumidas con pendiente descendente.

Podemos ver que al ser una pendiente descendente la potencia demandada pasa a ser en gran medida negativa, como la potencia de la pila está restringida con un límite inferior de 30W, entonces toda la potencia negativa irá a la batería lo cual tiene sentido ya que provocará que se cargue la batería. Esto se puede comprobar en la figura 4.12.

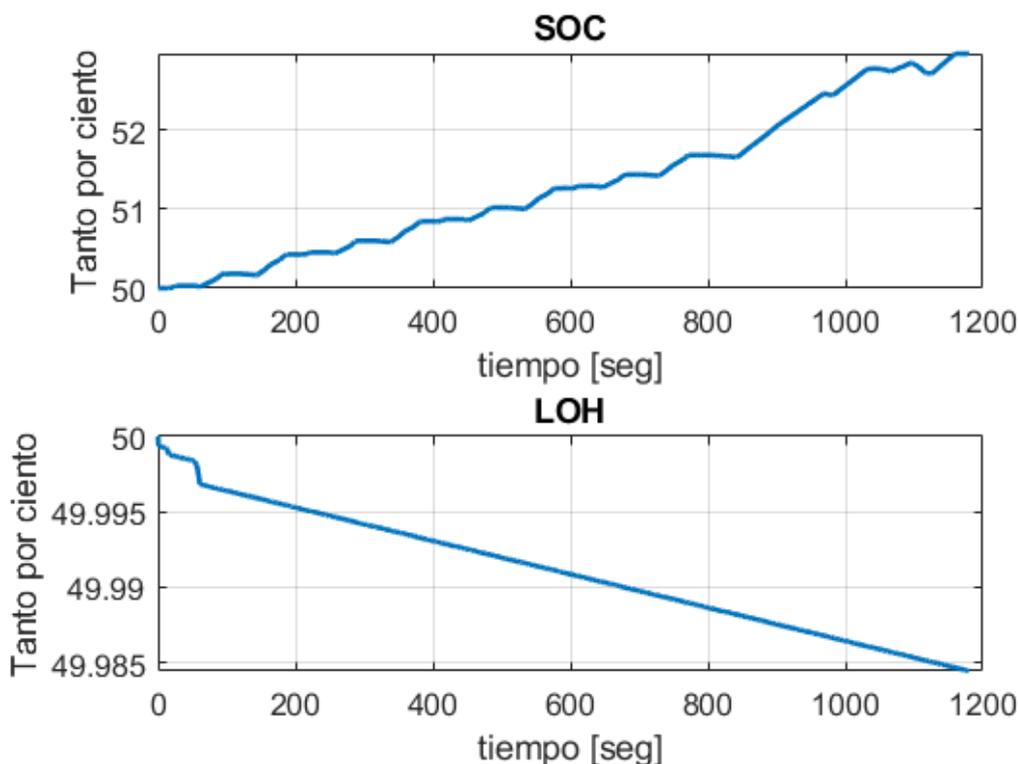


Figura 4.12 Estado del tanque de hidrógeno y batería con pendiente descendente.

4.7 Simulación con WLTP

El WLTP, Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure, es el ciclo de conducción más moderno empleado para determinar niveles de emisión y de consumo de combustible, tanto para vehículos de combustión interna, como para vehículos eléctricos e híbridos. Es aceptado por China, Japón, Estados Unidos y la Unión Europea. Este estándar adelantó el visto previamente, NEDC, ya que no es representativo de los estilos modernos de conducción. Para conseguir que sea más representativo este ciclo dura 30 minutos en vez de 20, su perfil de velocidades es mucho más dinámico, consiste en aceleraciones más rápidas y pequeñas frenadas. Las velocidades medias han sido incrementadas a $46.5 \frac{km}{h}$ y $131.3 \frac{km}{h}$, y la distancia recorrida es de 23.25 km, el doble respecto al NEDC.

Existen tres categorías distintas dependiendo del ratio entre potencia y peso del vehículo. En el caso del vehículo FOX, el peso es de 700 kg y la potencia es la suma de la pila y la batería, la potencia máxima capaz de suministrar sería de 7264 W, por tanto, el ratio es de 10.3771. Corresponde entonces a un vehículo de la clase 1, ya que aquí entran los vehículos con ratio menor a 22. Esta clase tiene partes de baja y media velocidad.

4.7.1 Simulación en terreno plano

Vamos a proceder a hacer una serie de simulaciones similares a las realizadas con el ciclo NEDC, para ello partiremos de un terreno plano. Con lo cual el ángulo de inclinación del vehículo, α , es 0.

En la primera prueba, queremos ver si el controlador es capaz de priorizar el uso de la pila de hidrógeno frente a la batería. Para ello como vimos anteriormente sólo podemos usar los pesos δ_1 y δ_2 , de forma que el primero, relativo al seguimiento de referencia del estado de la carga, sea mayor que el segundo, relativo al nivel de hidrógeno del tanque. Del mismo modo, fijamos la referencia del estado de la batería en torno al valor inicial del mismo, mientras que, la referencia del nivel de hidrógeno la fijamos mucho menor que el valor inicial.

Por ello en la siguientes simulaciones usaremos como estado inicial de la batería y del nivel de hidrógeno del 50%, como referencia de nivel de batería el mismo valor que el estado inicial, como referencia del nivel de hidrógeno un 5%, como δ_1 usaremos 1×10^7 , como δ_2 usaremos 1×10^{-7} , y como α y β dejaremos el valor unidad. Posteriormente estudiaremos como afecta al comportamiento del sistema su variación.

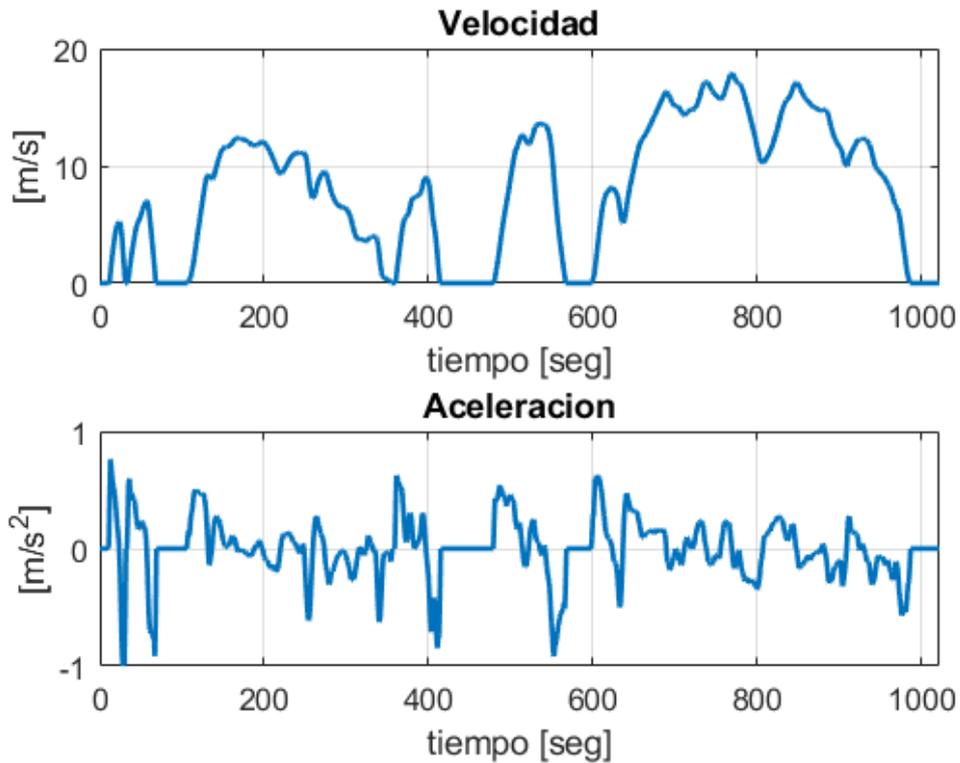


Figura 4.13 Ciclo WLTP.

La respuesta esperada por parte del sistema, será una combinación de ambas potencias, tanto la de la pila de hidrógeno como la de la batería.

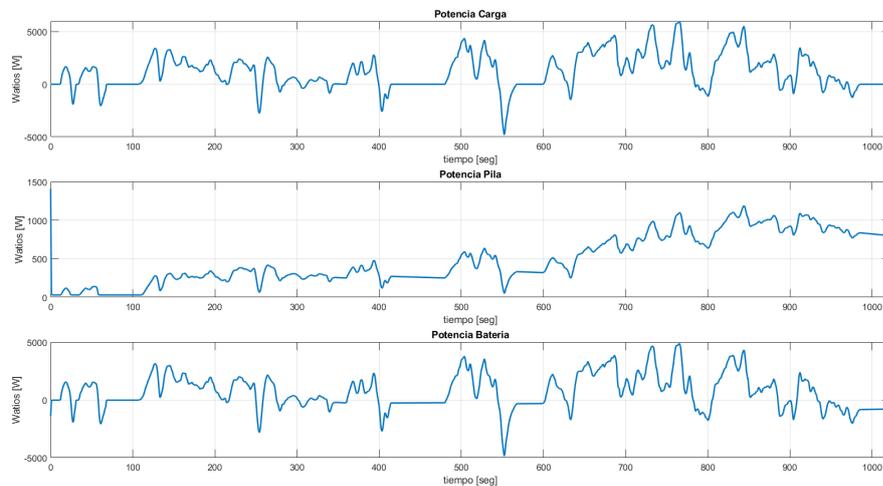


Figura 4.14 Consumo de potencias para $\alpha = 1$ y $\beta = 1$.

Como se puede ver en la figura 4.14, la potencia que demanda la carga es aportada, tanto por la pila de hidrógeno como por la batería. No obstante, vemos que no se prioriza demasiado el consumo de hidrógeno frente al de la batería, ya que todavía la pila tiene mucho margen hasta llegar al máximo que puede aportar, que sería 1500W.

En la figura 4.15 vemos como el consumo de hidrógeno tiene una pendiente poco pronunciada, hecho el cual no buscamos, ya que la idea es priorizar el hidrógeno frente a la batería. Para solucionar esto podemos manipular el valor del peso α , ya que es el que afecta al valor de la acción de control, si usamos uno de valor relativamente bajo, esta podrá tomar valores más elevados. Efectuamos entonces la simulación con

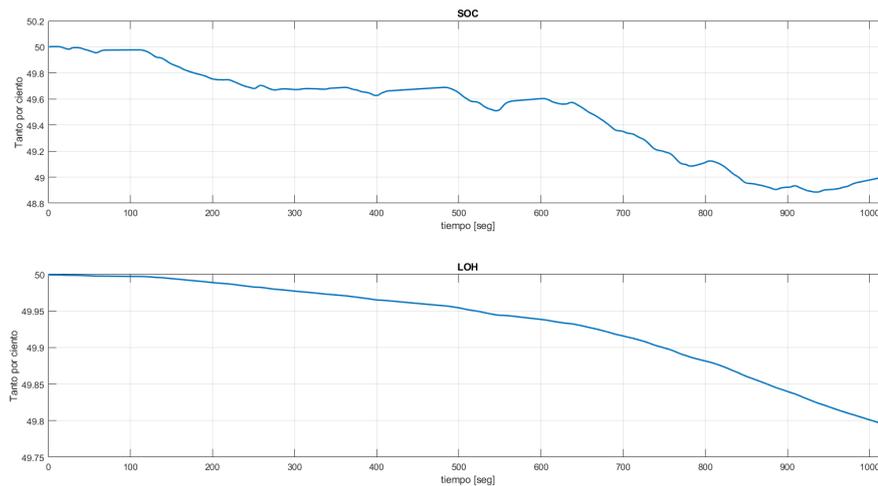


Figura 4.15 Estado de la batería y el tanque de hidrógeno para $\alpha = 1$ y $\beta = 1$.

$\alpha = 1 \times 10^{-1}$, por lo que ahora el valor de la potencia aportada por la pila de hidrógeno debe ser mayor que antes.

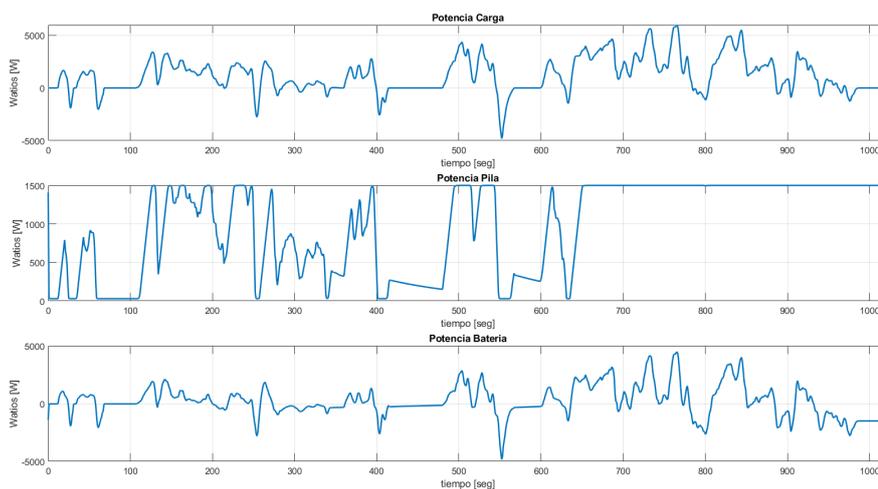


Figura 4.16 Consumo de potencias para $\alpha = 1 \times 10^{-1}$ y $\beta = 1$.

Podemos ver que en la figura 4.16 la potencia que aporta la pila de hidrógeno es mucho mayor que antes, de hecho en la parte final de la simulación satura al valor máximo que puede aportar de potencia, esto es debido a que en esa parte se alcanzan las mayores velocidades. En cuanto al estado de la batería y el tanque podemos ver que conseguimos reducir el consumo de la batería, mientras que obtenemos una pendiente más pronunciada en el consumo de hidrógeno, objetivo de la simulación.

Por último, falta comprobar la influencia del peso β , el cual afecta al incremento de la acción de control, como se dijo en la sección anterior este parámetro no debería de ser decisivo debido a que el propio controlador tiene una restricción en el incremento de la acción de control de 100W. Tras realizar diversos experimentos, establecemos el valor del peso en 1×10^5 , debido a que si usábamos valores menores que la unidad, no se producían cambios significativos, recordemos que el incremento máximo está limitado. Sin embargo, al usar un valor mayor que la unidad podremos apreciar cambios significativos. Podemos ver que ahora el valor de la potencia suministrada por la pila de hidrógeno toma valores mucho más elevados, y de hecho, no produce tanta variación, en vez de esto se queda en valores constantes durante más tiempo, lo que favorece la prioridad del consumo de hidrógeno. Como estamos dando un peso mayor al incremento de la acción de control, esta busca ser más constante y al contrario de como podríamos pensar, los valores no salen más pequeños, debido a que el peso α , si es menor que la unidad permite tomar valores elevados de la acción de control.

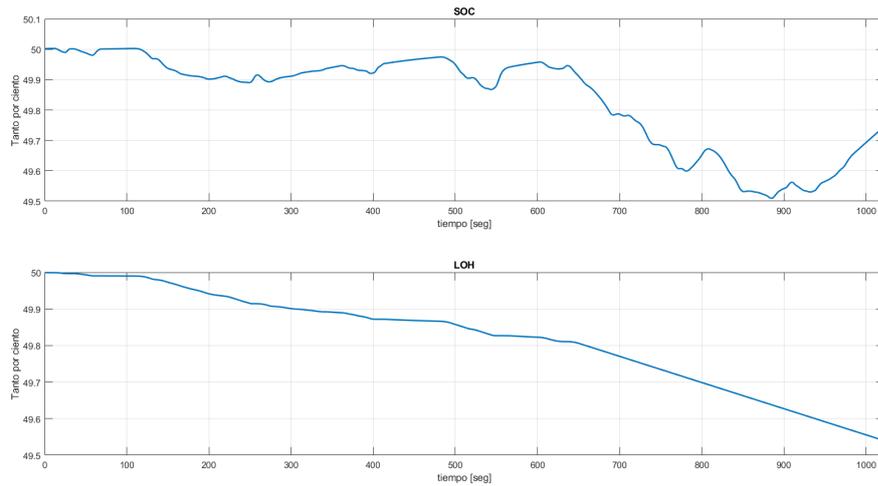


Figura 4.17 Estado de la batería y el tanque de hidrógeno para $\alpha = 1 \times 10^{-1}$ y $\beta = 1$.

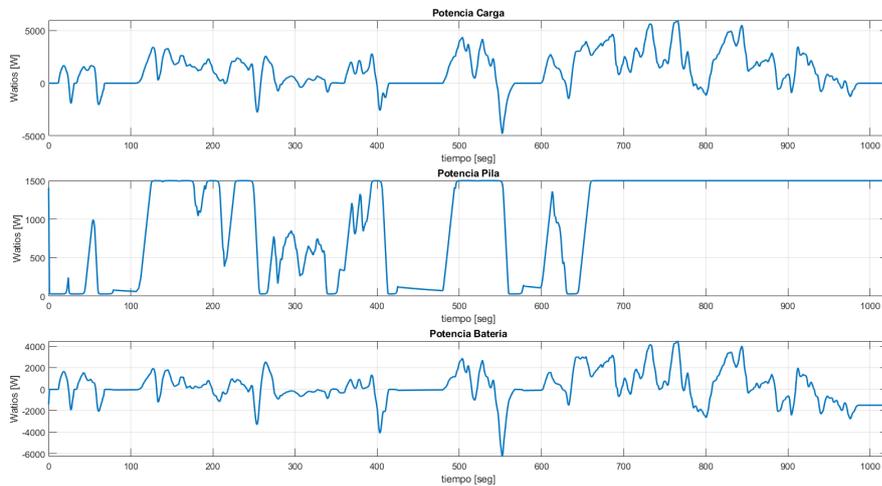


Figura 4.18 Consumo de potencias para $\alpha = 1 \times 10^{-1}$ y $\beta = 1 \times 10^5$.

4.7.2 Simulación con terreno elevado

Ahora vamos a proceder a realizar una simulación cambiando el ángulo de inclinación. Usaremos como ángulo de inclinación, α , 3.43, que es el valor medio de inclinación positiva en Europa para carreteras principales, el valor de descenso será igual pero con sentido negativo. Para simplificar la simulación vamos a partir de los datos empleados en la última simulación realizada. Donde recordemos que teníamos como referencia de hidrógeno un 5%, de batería un 50%, $\alpha = 1 \times 10^{-1}$, $\beta = 1 \times 10^{-5}$, $\delta_1 = 1 \times 10^7$ y $\delta_2 = 1 \times 10^{-7}$.

Podemos ver en la figura 4.19 que al estar en una pendiente ascendente llegamos a niveles de potencia demandada superiores al límite que puede proporcionar el vehículo que es alrededor de 7000W, esto ocurre como se puede ver en las parte correspondientes a las velocidades más elevadas.

4.7.3 Simulación con terreno descendente

Vamos a usar ahora el ángulo de signo negativo para indicar que estamos bajando una pendiente, con lo que esperamos que la potencia demandada sea mínima y además se produzcan potencias negativas en la batería lo que provoquen que esta se cargue. Podemos ver en la figura 4.20 que la potencia demandada por la carga la mayoría del tiempo es negativa, como la potencia de la pila no puede ser negativa, de hecho no puede ser nula porque el límite inferior son 30W, toda esta potencia negativa irá a la batería lo que provocará un incremento en su estado de la carga, así como un nivel prácticamente constante en el nivel de hidrógeno, como se puede ver en la figura 4.21.

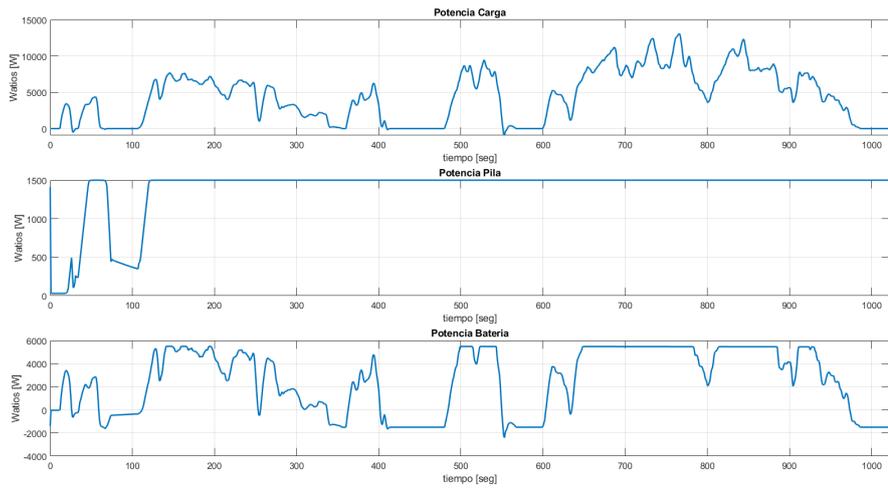


Figura 4.19 Consumo de potencias para inclinación de 3.43 grados.

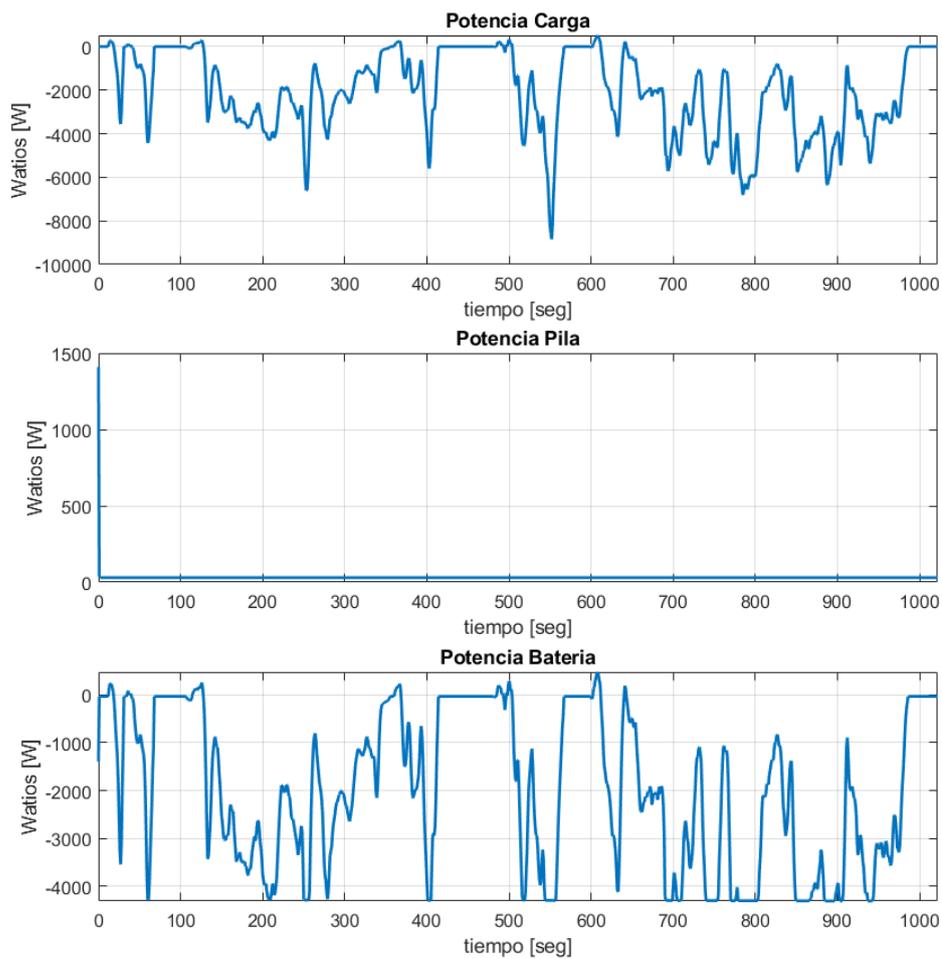


Figura 4.20 Consumo de potencias para inclinación de -3.43 grados.

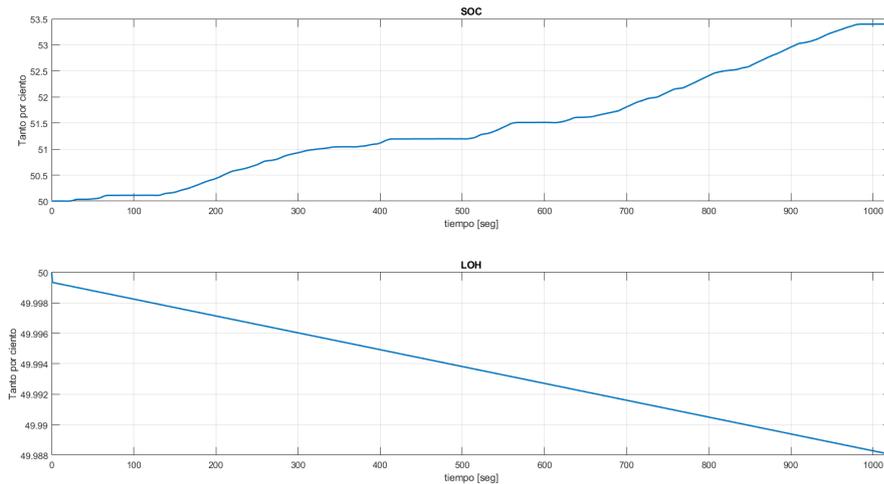


Figura 4.21 Estado de la batería y el tanque de hidrógeno para inclinación de -3.43 grados.

4.7.4 Simulación de larga duración en terreno plano

Ya que este ciclo de conducción es el más estandarizado actualmente, vamos a realizar una simulación más larga donde se repita cuatro veces el ciclo de conducción, lo que sería una hora y diez minutos aproximadamente de conducción, donde podamos apreciar una mayor descarga de la batería y descenso del nivel de hidrógeno. Mediante esta simulación podremos comprobar también los casos más extremos donde el nivel de hidrógeno y la carga de batería se agotan.

Para la simulación usaremos los mismo parámetros y referencias que hemos estado empleando para las anteriores simulaciones, estos serían, como referencia de hidrógeno un 5% , de batería un 50% , $\alpha = 1 \times 10^{-1}$, $\beta = 1 \times 10^5$, $\delta_1 = 1 \times 10^7$ y $\delta_2 = 1 \times 10^{-7}$. Podemos observar como se repite el patrón de potencia demandada

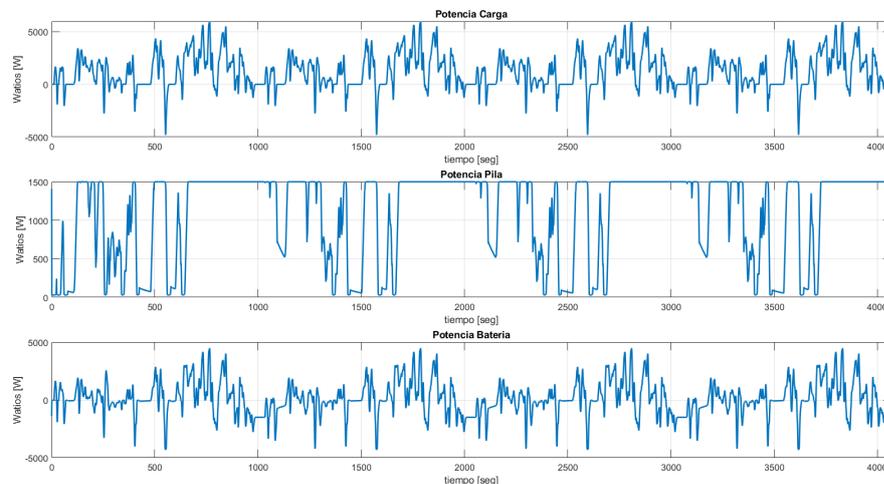


Figura 4.22 Potencias consumidas durante 4 ciclos de conducción.

durante todo el tiempo, es por esto que realmente no varía el comportamiento del vehículo. Realmente no obtenemos ningún tipo de conclusión, salvo que los cálculos de las potencias concuerdan con el tiempo. Como consecuencia de repetir el ciclo de conducción vemos que el comportamiento de la batería a lo largo del tiempo es que sufre unos procesos de carga y descarga alrededor de un 0.5% lo que nos indica que no se está empleando la batería de forma preferente. Mientras que vemos que el consumo de hidrógeno es alrededor del 2% , por lo que si tiene un nivel de preferencia respecto a la batería, ya que si mediante los pesos diésemos preferencia al consumo de potencia de la batería frente al de hidrógeno entonces la pendiente del nivel de hidrógeno sería menos pronunciada.

La siguiente simulación representa el caso límite en el cual la batería tiene un nivel de carga mucho menor

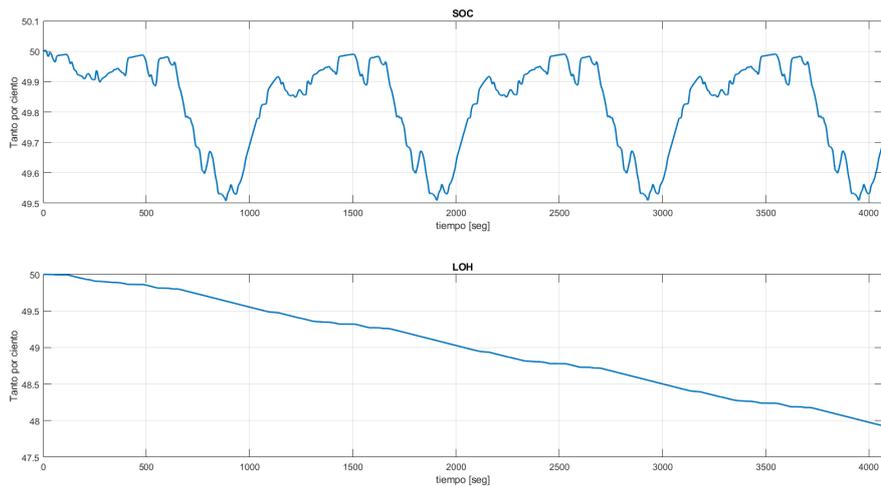


Figura 4.23 Estado de la batería y nivel de hidrógeno durante 4 ciclos de conducción.

que el nivel de hidrógeno existente en el tanque de hidrógeno, en este caso lo esperado por el vehículo sería usar siempre el máximo posible de la potencia suministrada por la pila de hidrógeno con la intención de cargar la batería. Para ello vamos a emplear los mismos pesos de las anteriores simulaciones, pero la referencia de la batería debería de establecerse a un valor alto en este caso 90% y el del tanque de hidrógeno si podría ser muy bajo, indicando así que queremos que el tanque se descargue. Para ello añadiremos al controlador una sección denominada fase de carga, donde en función del nivel de carga de la batería se decidirá establecer un nivel de referencia mayor o menor. Se propone entonces que en esta sección fijemos el nivel mínimo admisible de carga de la batería al 10%, si se alcanza este valor entendemos que hay que cargar la batería, por lo que fijamos la referencia de la misma al 90%, mientras mantenemos la del hidrógeno relativamente baja, en torno al 10%.

La reacción esperada del sistema, será que la potencia de la pila sature lo antes posible de modo que aporte lo máximo posible y permita a la batería cargarse el mayor tiempo disponible. Para ello continuamos con la simulación de larga duración.

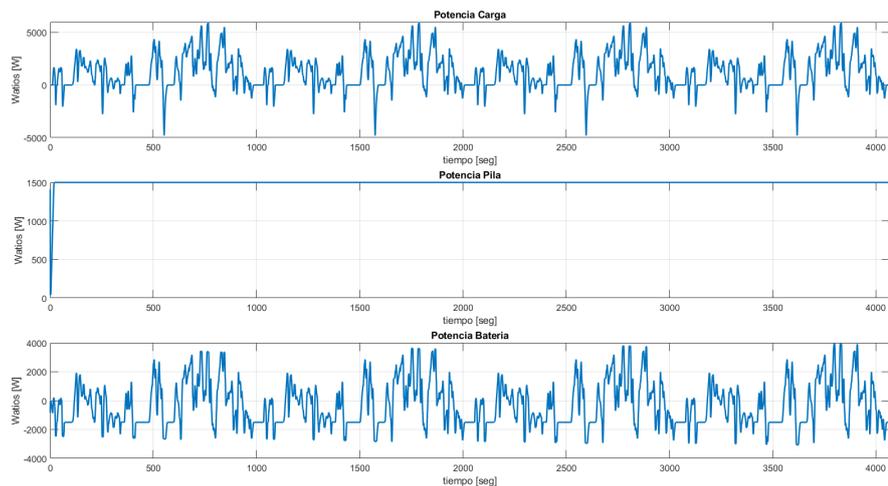


Figura 4.24 Potencias consumidas durante la fase de carga.

Podemos observar en la figura, 4.24, como la potencia proporcionada por la pila de hidrógeno satura de forma casi inmediata, lo que hace que la potencia que debe aportar la batería es mínima, exceptuando en los tramos de mayores velocidad donde si debe proporcionar ayudar en proporcionar la potencia demandada, podemos decir entonces que si mantuviésemos las velocidades iniciales, que representan un tramo dentro de ciudad podríamos cargar la batería.

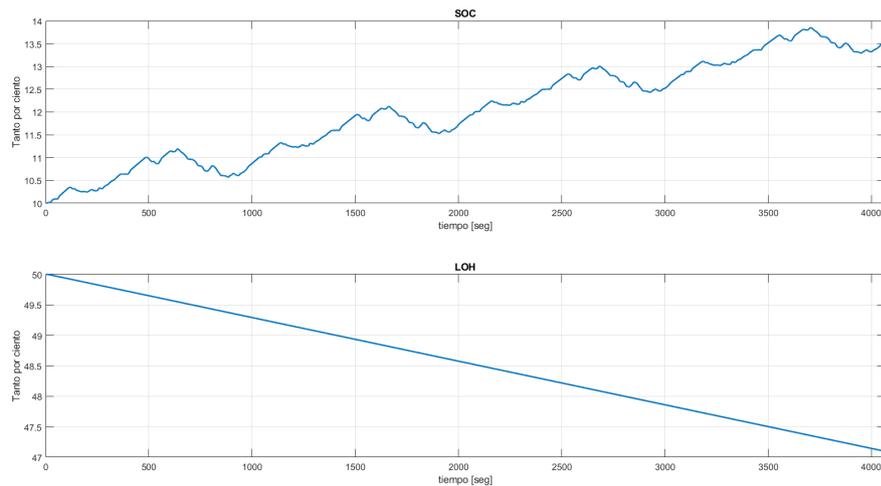


Figura 4.25 Estado de carga de la batería y nivel de hidrógeno en la fase de carga.

Como se puede apreciar en la figura 4.25, la batería se carga un 4% en aproximadamente una hora de funcionamiento, mientras que el nivel de hidrógeno del tanque se reduce un 3% en el mismo tiempo, esto significa que si continuásemos en esta fase de carga hasta obtener un nivel de carga en la batería del 30% tardaría unas 5 horas, que significaría una reducción en el nivel de hidrógeno del tanque hasta el 35%. Por tanto, obtendríamos unos estados tanto de carga como de nivel de hidrógeno similares, con lo que podríamos volver al funcionamiento normal. Para poder mantener este comportamiento de fase de carga usaremos una variable persistente donde almacenaremos la información del estado de carga, que cuando se alcance el valor deseado de la batería dejará de hacer efecto.

Por otro lado, tenemos una situación totalmente contraria, donde la batería tendría un estado de la carga muy elevado, mientras que el nivel de hidrógeno fuese muy reducido, cercano a cero. En este caso, el controlador no tiene en cuenta que el tanque de hidrógeno tiene el nivel a cero y por tanto, la pila no puede proporcionar potencia, es por esto que se añade una sección en el código llamada 'tanque vacío', donde si se da esta situación la potencia que demanda el controlador a la pila será nula. Como podemos comprobar en las figuras 4.26 y

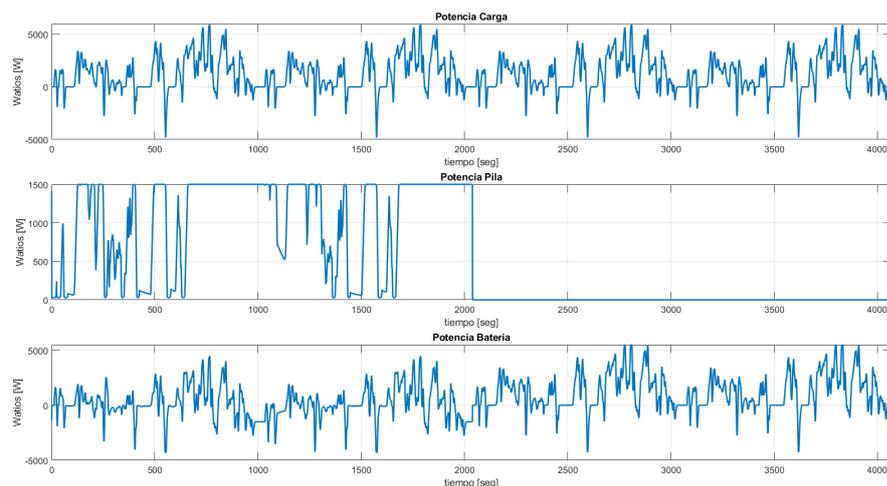


Figura 4.26 Potencias consumidas en situación de vaciado del tanque de hidrógeno.

4.27 cuando el nivel de hidrógeno alcanza el valor nulo, lo que implica que no se puede proporcionar potencia por parte de la pila de hidrógeno, esto al no ser contemplado por el controlador, se añade en forma de bucle global que se ejecuta siempre y cuando haya hidrógeno en el tanque, si no dará como salida una potencia nula.

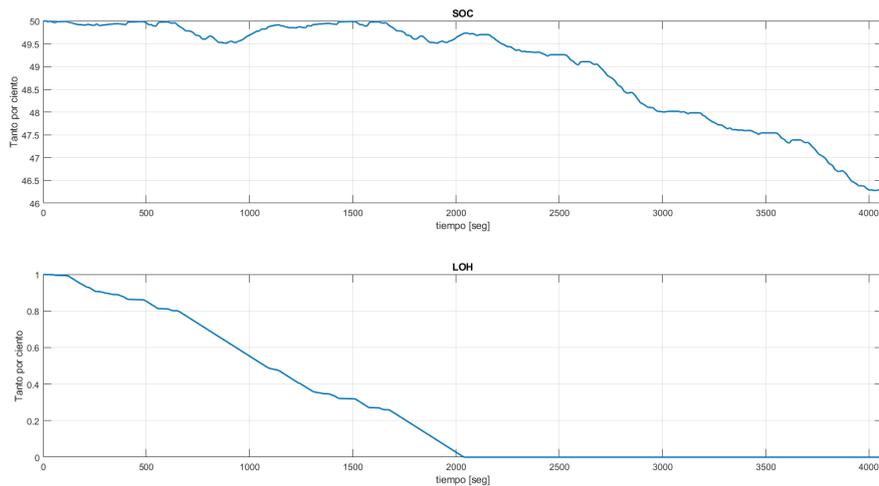


Figura 4.27 Estado de carga de la batería y nivel de hidrógeno cuando está vacío.

4.8 Conclusiones

Tras realizar las distintas simulaciones con ambos ciclos de conducción se pueden extraer algunas conclusiones relativas al comportamiento del controlador.

En primer lugar, vemos como los pesos γ_1 y γ_2 son los más influyentes, ya que estos son los que imponen una prioridad de consumo de hidrógeno frente al consumo de batería. En ambos casos se emplean los mismo parámetros y se asume que estos son adecuados tras los experimentos realizados.

En segundo lugar, el peso α es el que marcará cuanto hidrógeno se consume, a menor valor de este parámetro antes saturará la potencia aportada por la pila de hidrógeno. Comparando el comportamiento ante ambos ciclos de conducción este peso es menor en el NEDC que en el WLTP, concretamente un orden de magnitud menor. Al tener esta situación se puede concluir que será con el WLTP donde tengamos un mayor margen de maniobra respecto a este parámetro ya que haciéndolo tan solo un orden de magnitud menor que la unidad ya se obtienen cambios.

En tercer lugar, el peso β regula la velocidad a la que la potencia de la pila satura, cuanto mayor sea penalizaremos más que haya variaciones en el incremento lo que desembocará en una pronta saturación del valor de la pila. Con el ciclo de conducción NEDC comprobamos el comportamiento obtenido cuando este peso es menor que la unidad, mientras que con el WLTP comprobamos el comportamiento obtenido cuando este es mayor que la unidad. Vemos que al usar un valor menor que la unidad no se obtiene ningún cambio en el comportamiento del control, sin embargo al usar un valor mayor que la unidad si obtenemos cambios en la velocidad de saturación del valor de la pila como se ha explicado previamente.

En cuanto a las simulaciones con elevación positiva y negativa del terreno el control responde de la misma forma ante ambos ciclos de conducción. Cuando el terreno tiene una inclinación positiva el valor de la pila de hidrógeno satura de forma casi inmediata, mientras que cuando el valor de la inclinación es negativo el valor de la pila se mantiene en el mínimo a la vez que la batería va recargando su nivel.

Por último, mencionar la situación de carga simulada con el ciclo WLTP, donde vemos que el control es capaz de detectar una necesidad de carga de la batería y prioriza de forma más agresiva el consumo de hidrógeno, lo que desemboca en una saturación inmediata de la potencia de la pila, ya que es necesario que esta aporte lo máximo posible desde el principio. Sin embargo, en la fase de vacío en el tanque de hidrógeno simplemente se demanda toda la potencia de la batería. Situación ante la que el control no actúa y es el balance de potencias el que se encarga de gestionar la entrega de la potencia necesaria.

5 Instalacion Embarcada

En este capítulo trataremos sobre la implementación del controlador, previamente diseñado y simulado bajo diversas condiciones, en el vehículo real. Para ello se desarrolla un código en lenguaje C utilizando la opción Real Time de Linux, la cual se basa en la instalación de un patch sobre este sistema operativo, ya que en el vehículo el microcontrolador estará basado en este sistema operativo. El esquema de funcionamiento de este microcontrolador sería un sistema de varios hilos atendiendo a la siguiente figura.

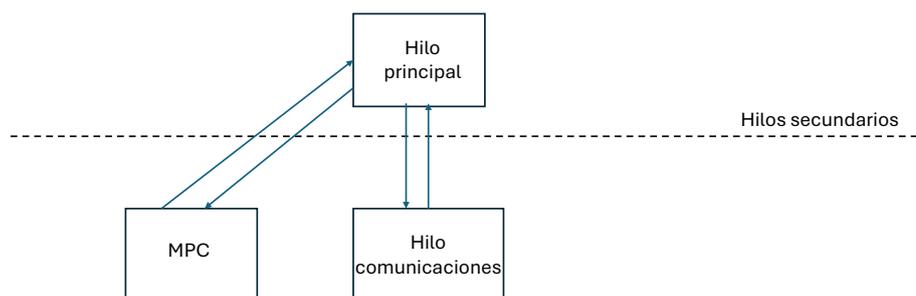


Figura 5.1 Esquema de hilos para la instalación embarcada.

La idea sería tener un hilo principal encargado de gestionar la prioridad de los demás hilos, así como las llamadas a los mismos. Como hilos secundarios tendríamos dos distintos, uno relativo a al cálculo del controlador y otro encargado de la comunicación con la batería, la pila de hidrógeno y el tanque de hidrógeno. En este trabajo sólo se especificará el código correspondiente al hilo del controlador predictivo, ya que tanto el principal como el de comunicaciones sobrepasan el alcance de este trabajo, no obstante se harán sendos pseudocódigos a modo indicativo de su funcionamiento.

5.1 Hilo principal

Este hilo sería el encargado de configurar los hilos secundarios, asignarles una prioridad y efectuar su llamada. La asignación de prioridades es una parte clave del funcionamiento del sistema ya que marcará el orden de ejecución de los hilos. En principio la idea sería que el hilo de comunicaciones, que recibe la información de la pila, el tanque y la batería, debe ejecutarse siempre antes que el controlador. Esto es porque el controlador necesita como entradas los datos proporcionados por los distintos elementos. Seguramente para tomar estas medidas habrá que esperar cierto tiempo donde se hará la media de la información recibida, es por eso que

este hilo siempre debe ejecutarse antes. La idea sería ejecutar una única vez el hilo principal, mientras que los secundarios se ejecutarían cada período asignado. Para saber el tiempo mínimo haría falta saber cuanto es la frecuencia máxima a la que puede trabajar el microcontrolador.

5.2 Hilo comunicaciones

Este hilo deberá ser el encargado de gestionar la comunicación vía CAN con los distintos elementos del sistema de potencia. Por un lado, recibirá información acerca del estado de la batería, tanto el nivel de carga, como distintos parámetros para controlar el correcto funcionamiento de la batería. Por otro lado, recibirá esta misma información pero relativa al tanque de hidrógeno. No obstante, deberá de ser capaz de enviar información a través de esta comunicación CAN hacia la pila de hidrógeno y la batería con el objetivo de indicar la potencia demandada a estos elementos.

5.3 Hilo de control

El hilo de control será el encargado de, dadas una entradas acerca del estado de la batería y el nivel de hidrógeno, proporcionar el nivel de acción de control, en este caso potencia en vatios, para poder alcanzar la aceleración dada por la acción de aceleración del vehículo. Este hilo, como se ha indicado previamente, deberá esperar la correcta ejecución del hilo de comunicaciones para poder ejecutarse, ya que si el primero no llegase a completar su ejecución completa el segundo tampoco podría porque estaría usando datos falsos o incorrectos, lo que provocaría un fallo en el sistema de control del vehículo.

Por esta idea previamente descrita se usa el sistema operativo LINUX con su versión Real Time. En caso del hilo de control, que es el que a este trabajo hace referencia, se ha programado de forma que contiene una función definida, la cual representa el cálculo del control basada en el código de MATLAB previamente explicado. Luego mediante el bucle principal se asigna la prioridad al hilo y se llama con la función previamente en el código.

5.4 Propuesta de funcionamiento

Como propuesta de funcionamiento de programa en tiempo real mediante el lenguaje C para el control del sistema de potencia del vehículo, se adjuntan una serie de códigos que conformaría el programa a carga en el mismo con el objetivo de ponerlo a prueba.

Este programa se basa en la estructura de los tres hilos definida previamente. Consta de un programa principal, correspondiente al hilo principal, que va a ser el encargado de crear los otros dos hilos secundarios con su respectiva prioridad. Esto se lleva a cabo aprovechando la programación enfocada al tiempo real. Primeramente, se bloquea la memoria del proceso en RAM con el fin de evitar la paginación, esto es debido a que el proceso no debe sufrir demoras en aplicaciones de tiempo real. Para conseguir que el hilo del controlador espere que termine el hilo de comunicaciones empleamos mutex y variables de condición. Para asignar prioridades se usa la planificación FIFO, una política que sigue el orden de llegada, asignamos la máxima al hilo de comunicaciones, ya que es más prioritario.

6 Conclusiones

6.1 Adaptación del Modelo

Se ha conseguido adaptar el modelo inicial de la microrred para representar de forma fiel el modelo del sistema de energía del vehículo FOX, para esto se llevaron a cabo simulaciones donde se pudo comprobar el comportamiento deseado del modelo. Para obtener una mayor precisión en este modelo, se hizo una calibración de sus parámetros en base a las características de este sistema de energía propio del vehículo FOX.

No obstante, se deja como posible mejora la realización de experimentos en el laboratorio obteniendo las medidas de la batería, pila y tanque de hidrógeno real que se emplearán el vehículo, con el fin de poder comprobar de una forma más precisa el correcto modelado de los componentes.

6.2 Diseño del Controlador

Se ha diseñado el controlador basado en el modelo previamente desarrollado y que mediante simulaciones hemos podido comprobar que cumple con el objetivo de gestionar la entrega de potencia necesaria en función de la demandada por el vehículo. En las simulaciones realizadas con dos ciclos de conducción distintos se han producido resultados esperados, no hemos obtenido comportamientos no deseados.

No obstante, se han encontrado varias limitaciones, por un lado, la función de costes tiene un peso, β , que no termina de ser crítico para obtener el comportamiento correcto, por otro lado, no es posible hacer una configuración del control en la que se priorice el consumo de batería frente a hidrógeno, ya que la potencia aportada por la batería es consecuencia de la aportada por la pila de hidrógeno.

Como posible mejora se propone, la modificación de la función de costes para comprobar si es cierto que el peso, β , no es tan necesario como se ha propuesto. También se propone valorar un cambio en la función de costes para intentar que al potencia de la batería afecte a la misma de forma que, esta también sea acción de control y se puedan imponer restricciones sobre la misma.

6.3 Modelo del Vehículo

El objetivo ha sido cumplido obteniendo un modelo que tiene en cuenta las fuerzas que actúa sobre el vehículo tradicional de cuatro ruedas, para posteriormente adaptar las ecuaciones a un vehículo de tan solo dos ruedas. En las simulaciones se ha podido comprobar que el modelo del vehículo era correcto, ya que las potencias demandadas eran adecuadas para el peso y velocidad del vehículo.

Como posible mejora se podría tener en cuenta la velocidad del viento, en el caso de este trabajo se supuso nula por la situación ideal, no obstante no debería de tener mucho efecto, ya que el vehículo no debería estar expuesto a una alta velocidad de viento.

6.4 Simulación con Componentes Reales

Este objetivo ha podido ser realizado gracias a la consecución de los tres anteriores, no obstante se podría mejorar empleando otra estrategia de control para poder hacer una comparación con el control predictivo con

el fin de comparar la efectividad de estas. También se podría haber analizado el uso de ciclo de conducción personalizados para situaciones concretas a las que este vehículo se verá sometido, en este trabajo no se ha hecho así puesto que se pretendía comprobar con los estándares de automoción actuales.

6.5 Instalación embarcada

Este objetivo ha sido cumplido parcialmente debido a la imposibilidad de trabajar con el vehículo real, ya que tenía algunos componentes estropeados. Como solución se optó por hacer una propuesta de instalación embarcada.

En cuanto a la proposición de una instalación embarcada, se ha cumplido el objetivo planteado. Se ha realizado un esquema de funcionamiento de los hilos que, en principio, son estrictamente necesarios. También se ha diseñado un código listo para ser probado a bordo del vehículo. No obstante esto tiene sus limitaciones, ya que nada ha sido probado en tiempo real. Es por eso que se propone como mejoras la realización de la parte dedicada a la comunicación entre componentes del vehículo y posteriormente los experimentos en tiempo real con el código aquí desarrollado para poder corregir los fallos que este pudiese tener.

6.6 Conclusión Final

Tras el análisis de las conclusiones relativas a los objetivos propuestos al inicio del trabajo, se extrae la idea de desarrollar un controlador predictivo donde tanto la potencia de la batería como la de la pila de hidrógeno sean variables manipulables y el balance de potencia se lleve a cabo dentro de las restricciones del controlador. Esto permitiría cambiar la preferencia del consumo de hidrógeno y de batería, lo que desembocaría en un control adaptativo y mucho más flexible a la hora de elegir los parámetros, ya que ahora al controlar sólo la potencia de la pila de hidrógeno no podemos alterar el comportamiento de la batería de forma precisa, simplemente se puede cambiar su seguimiento de referencia lo que es poco preciso y poco robusto ante cambios en las condiciones de uso del vehículo.

Apéndice A

Códigos

Código A.1 Código MPC..

```
function y = Calculos(in)

%% Entradas

SOC=in(1);
LOH=in(2);
Pload=in(3);

% Parámetros del controlador
Np=5; % Horizontante Control
Nc= 3; % Horizonte Prediccion

%Parametros quadprog:
XO_ = zeros(3,1); % VALOR INICIAL DE INCREMENTO DE PFC

%% Pesos:
alpha = 1; betha=1; % Parametros de Pfc y incremento de Pfc
delta1=1; delta2=1; % Parametros variacion estados

%% Inicializacion

% Matriz triangular inferior
A= ones(Nc);
T_ = tril(A);
% Matriz B del modelo:
kbat = 1.56e-3; kfc=8.16e-3;
T = 1; % Perido de muestreo
B = [-(kbat)*T (kbat)*T; -T*(kfc) 0];
Q=B(:,1); M= B(:,2);
% Matriz Q y M ampliada:
Q_=repmat(Q,Np, Nc);
M_=repmat(M,Np ,Np);

% Matriz delta ampliada
```

```

Delta=[delta1 0;0 delta2];
Delta_=repmat(Delta,Np, Np);
for i=1:Np*2
    for j=1:Np*2
        if i~=j
            Delta_(i,j)=0;
        end
    end
end

% matriz X ampliada
X=[SOC;LOH];
X_=repmat(X,Np, 1);
% vector perturbacion
uno=ones(Np,1);
d=Pload;d_=d.*uno;
% Xref ampliada
SOCref=5;LOHref=5; %% 5 por cien de estado inicial de cada uno
Xref=[SOCref;LOHref];
Xref_=repmat(Xref,Np, 1);

%% Inicializacion de la variable de control
persistent u11;
if isempty(u11)
    u11=0;
end

%% QUADPROG

C_=u11*ones(Nc,1); % matriz de acciones de control pasada
v = ones(1,3); A = diag(v);
b = (100) * ones(3,1);
lb= (30-u11)*ones(3,1); % limite inferior de la accion de control
ub=(1500-u11)*ones(3,1); % limite superior de la accion de control
H= 2*(alpha*(T_.')*T_+(T_.')*(Q_.')*(Q_)*(T_)+beta);
f= 2*(alpha*(T_.')*(C_)+(T_.')*(Q_.')*Delta_*X_+(T_.')*(Q_.')*Delta_*Q_*(C_)+(
    T_.')*(Q_.')*Delta_*M_*d_ - (T_.')*(Q_.')*Delta_*Xref_);
options=optimoptions('quadprog','Algorithm','active-set');
usol= quadprog(H,f,A,b,[],[],lb,ub,XO_,options);

Pfc= usol(1,1)+u11;
u11=Pfc;

y= Pfc;
end

```

Código A.2 Balance de Potencias..

```

function y = fcn(u,Pload)
Pbat = Pload-u;
y = Pbat;

```

Código A.3 MPC incluyendo la fase de carga.

```

function y = Calculos(in)

%% Entradas
SOC = in(1);
LOH = in(2);
Pload = in(3);

% Parámetros del controlador
Np = 5; % Horizonte Control
Nc = 3; % Horizonte Predicción

% Parámetros quadprog:
X0_ = zeros(3,1); % Valor inicial de incremento de PFC

%% Pesos
alpha = 1e-1; betha = 1e5; % Parámetros de Pfc y incremento de Pfc
delta1 = 1e7; delta2 = 1e-7; % Parámetros variación estados SOC y LOH

%% Elección de referencia:
persistent Carga;
if isempty(Carga)
    Carga = 0;
end

if SOC <= 10 || Carga
    SOCref =90 ; LOHref = 10; % 5 por cien de estado inicial de cada uno
    Carga = 1;
else
    SOCref =50 ; LOHref = 50; % 5 por cien de estado inicial de cada uno
    Carga = 0;
end

%% Inicialización
% Matriz triangular inferior
A = ones(Nc);
T_ = tril(A);

% Matriz B del modelo
kbat = 1.6756e-05; kfc = 8.1292e-4;
T = 1; % Período de muestreo
B = [(kbat)*T -(kbat)*T; -T*(kfc) 0];
Q = B(:,1); M = B(:,2);

% Matriz Q y M ampliada
Q_ = repmat(Q, Np, Nc);
M_ = repmat(M, Np, Np);

% Matriz delta ampliada
Delta = [delta1 0; 0 delta2];
Delta_ = repmat(Delta, Np, Np);
for i = 1:Np*2
    for j = 1:Np*2
        if i ~= j
            Delta_(i,j) = 0;
        end
    end
end
end

```

```

end

% Matriz X ampliada
X = [SOC; LOH];
X_ = repmat(X, Np, 1);

% Vector perturbación
uno = ones(Np, 1);
d = Pload;
d_ = d .* uno;
% Xref ampliada
SOCref =90 ; LOHref = 10; % 5 por cien de estado inicial de cada uno
Xref = [SOCref; LOHref];
Xref_ = repmat(Xref, Np, 1);

%% Inicialización de la variable de control
persistent u11;
if isempty(u11)
    u11 = 0;
end

%% QUADPROG
C_ = u11 * ones(Nc, 1); % Matriz de acciones de control pasada
v = ones(1, 3); A = diag(v);
b = (100) * ones(3, 1);
lb = (30 - u11) * ones(3, 1); % Límite inferior de la acción de control
ub = (1500 - u11) * ones(3, 1); % Límite superior de la acción de control

H = 2 * (alpha * (T_.' ) * T_ + (T_.' ) * (Q_.' ) * (Q_) * (T_) + betha);
f = 2 * (alpha * (T_.' ) * (C_) + (T_.' ) * (Q_.' ) * Delta_ * X_ + (T_.' ) * (Q_.' ) * Delta_ * Q_ * (C_) + (T_.' ) * (Q_.' ) * Delta_ * M_ * d_ - (T_.' ) * (Q_.' ) * Delta_ * Xref_);
options = optimoptions('quadprog', 'Algorithm', 'active-set');

usol = quadprog(H, f, A, b, [], [], lb, ub, X0_, options);

Pfc = usol(1, 1) + u11;
u11 = Pfc;

y = Pfc;
end

```

Código A.4 Codigo en C del proceso principal.

```

#include <pthread.h>
#include <sched.h>
#include <sys/mman.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include "controller.h"
#include "communications.h"

pthread_mutex_t mutex;
pthread_cond_t cond;

```

```
int comms_ready = 0;

void *communication_task(void *arg) {
    if (init_communications()) {
        // Señalar que las comunicaciones están listas
        pthread_mutex_lock(&mutex);
        comms_ready = 1;
        pthread_cond_signal(&cond);
        pthread_mutex_unlock(&mutex);
    } else {
        fprintf(stderr, "Error en la inicialización de comunicaciones\n");
    }
    return NULL;
}

void *controller_task(void *arg) {
    pthread_mutex_lock(&mutex);
    while (!comms_ready) {
        pthread_cond_wait(&cond, &mutex);
    }
    pthread_mutex_unlock(&mutex);

    // Ejecutar cálculos del controlador
    Calculos(0.5, 0.5, 100.0);

    return NULL;
}

int main() {
    // Bloquear memoria para evitar paginación
    if (mlockall(MCL_CURRENT | MCL_FUTURE) != 0) {
        perror("mlockall failed");
        return -1;
    }

    // Inicializar mutex y variable condicional
    pthread_mutex_init(&mutex, NULL);
    pthread_cond_init(&cond, NULL);

    // Configurar la política de planificación en tiempo real
    struct sched_param comm_param, ctrl_param;
    comm_param.sched_priority = sched_get_priority_max(SCHED_FIFO);
    ctrl_param.sched_priority = sched_get_priority_max(SCHED_FIFO) - 1;

    // Crear atributos de los hilos
    pthread_attr_t comm_attr, ctrl_attr;
    pthread_attr_init(&comm_attr);
    pthread_attr_init(&ctrl_attr);
    pthread_attr_setstacksize(&comm_attr, PTHREAD_STACK_MIN);
    pthread_attr_setstacksize(&ctrl_attr, PTHREAD_STACK_MIN);
    pthread_attr_setschedpolicy(&comm_attr, SCHED_FIFO);
    pthread_attr_setschedpolicy(&ctrl_attr, SCHED_FIFO);
    pthread_attr_setschedparam(&comm_attr, &comm_param);
    pthread_attr_setschedparam(&ctrl_attr, &ctrl_param);
    pthread_attr_setinheritsched(&comm_attr, PTHREAD_EXPLICIT_SCHED);
    pthread_attr_setinheritsched(&ctrl_attr, PTHREAD_EXPLICIT_SCHED);
}
```

```

// Crear hilos
pthread_t comm_thread, ctrl_thread;
if (pthread_create(&comm_thread, &comm_attr, communication_task, NULL)) {
    fprintf(stderr, "Error creando hilo de comunicaciones\n");
    return 1;
}

if (pthread_create(&ctrl_thread, &ctrl_attr, controller_task, NULL)) {
    fprintf(stderr, "Error creando hilo del controlador\n");
    return 1;
}

// Esperar a que los hilos terminen
pthread_join(comm_thread, NULL);
pthread_join(ctrl_thread, NULL);

// Limpiar mutex y variable condicional
pthread_mutex_destroy(&mutex);
pthread_cond_destroy(&cond);

return 0;
}

```

Código A.5 Codigo en C del hilo de control.

```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <osqp.h>
#include "controller.h"

// Definición de parámetros del problema
#define Np 5
#define Nc 3
#define ALPHA 1
#define BETHA 1
#define DELTA1 1
#define DELTA2 1
// Función para crear una matriz CSC
OSQPCscMatrix* create_csc_matrix(OSQPInt n, OSQPInt m, OSQPInt nz, OSQPFloat* x
, OSQPInt* i, OSQPInt* p) {
    OSQPCscMatrix* matrix = (OSQPCscMatrix*)malloc(sizeof(OSQPCscMatrix));
    matrix->n = n;
    matrix->m = m;
    matrix->nz = -1;
    matrix->nzmax = nz;
    matrix->x = x;
    matrix->i = i;
    matrix->p = p;
    return matrix;
}

// Función para liberar una matriz CSC
void free_csc_matrix(OSQPCscMatrix* matrix) {
    free(matrix);
}

void Calculos(double SOC, double LOH, double Pload) {

```

```

// Variables y parámetros
double kbat = 1.6756e-05; kfc = 8.1292e-4; T = 1.0;
double SOCref = 5, LOHref = 5;
double Q[2] = {-kbat * T, -kfc * T};
double M[2] = {kbat * T, 0.0};
double XO_[3] = {0.0, 0.0, 0.0};
double lb[3], ub[3], b[3];
int i, j;

// Inicialización de matrices y vectores ampliados
double Q_[Np * Nc * 2];
double M_[Np * Np * 2];
double Delta_[Np * 2 * Np * 2];
double X_[Np * 2];
double d_[Np];
double Xref_[Np * 2];
double C_[Nc];

for (i = 0; i < Np; i++) {
    X_[2 * i] = SOC;
    X_[2 * i + 1] = LOH;
    d_[i] = Pload;
    Xref_[2 * i] = SOCref;
    Xref_[2 * i + 1] = LOHref;
}

for (i = 0; i < Np * 2; i++) {
    for (j = 0; j < Np * 2; j++) {
        if (i == j) {
            Delta_[i * Np * 2 + j] = (i % 2 == 0) ? DELTA1 : DELTA2;
        } else {
            Delta_[i * Np * 2 + j] = 0;
        }
    }
}

static double u11 = 0;
for (i = 0; i < Nc; i++) {
    C_[i] = u11;
}

for (i = 0; i < 3; i++) {
    lb[i] = (30 - u11);
    ub[i] = (1500 - u11);
    b[i] = 100;
}

// Construcción de la matriz T_
double T_[Nc * Nc] = {0};
for (i = 0; i < Nc; i++) {
    for (j = 0; j <= i; j++) {
        T_[i * Nc + j] = 1.0;
    }
}

// Construcción de Q_
for (i = 0; i < Np; i++) {

```

```

    Q_[2 * Nc * i] = Q[0];
    Q_[2 * Nc * i + 1] = Q[1];
}

// Construcción de M_
for (i = 0; i < Np; i++) {
    M_[2 * Np * i] = M[0];
    M_[2 * Np * i + 1] = M[1];
}

// Construcción de la matriz H
double H[3 * 3] = {0};
for (i = 0; i < Nc; i++) {
    for (j = 0; j < Nc; j++) {
        H[i * Nc + j] = ALPHA * T_[i * Nc + j] * T_[i * Nc + j] + BETHA;
    }
}

// Construcción del vector f
double f[3] = {0};
for (i = 0; i < Nc; i++) {
    f[i] = 2 * (ALPHA * C_[i] + Q_[i] * Delta_[i * Np * 2] * X_[i] + Q_[i] *
        Delta_[i * Np * 2] * M_[i] * d_[i] - Q_[i] * Delta_[i * Np * 2] *
        Xref_[i]);
}

// Crear las matrices en formato CSC
OSQPcscMatrix *P = create_csc_matrix(3, 3, 3, H, (OSQPInt[]){0, 1, 2}, (
    OSQPInt[]){0, 1, 2, 3});
OSQPcscMatrix *A = create_csc_matrix(3, 3, 3, (OSQPFloat[]){1.0, 1.0, 1.0},
    (OSQPInt[]){0, 1, 2}, (OSQPInt[]){0, 1, 2, 3});

// Definir las matrices y vectores necesarios para OSQP
OSQPSettings *settings = (OSQPSettings *)malloc(sizeof(OSQPSettings));
osqp_set_default_settings(settings);
settings->alpha = 1.6;

// Setup y solve
OSQPSolver *solver;
osqp_setup(&solver, P, f, A, lb, ub, 3, 3, settings);
osqp_solve(solver);

// Obtener la solución
double *solution = solver->solution->x;
for (i = 0; i < 3; i++) {
    printf("x[%d] = %f\n", i, solution[i]);
}

// Limpiar memoria
osqp_cleanup(solver);
free(settings);
free_csc_matrix(P);
free_csc_matrix(A);
}

```

Código A.6 Código en C de la cabecera del hilo de control.

```
#ifndef CONTROLLER_H
#define CONTROLLER_H

void Calculos(double SOC, double LOH, double Pload);

#endif // CONTROLLER_H
```


Índice de Figuras

1.1	Batería de iones de litio. Fuente: www.renaultgroup	4
1.2	Batería de Níquel-metal hidruro. Fuente: www.electriccarsguide.com.au	4
1.3	Batería de Estado Sólido. Fuente: www.arenaev.com	5
1.4	Batería de Litio-Azufre. Fuente: techxplore.com	6
1.5	PEMFC. Fuente: fuelcellsworks.com	7
2.1	Vehículo FOX	12
2.2	Esquema del sistema	13
2.3	Esquema del Modelo Adaptado	14
2.4	Esquema de fuerzas	15
2.5	Simulación del Modelo de Espacio de Estados	16
4.1	Esquema simulación en SIMULINK	23
4.2	NEDC	26
4.3	Consumo de Potencias	26
4.4	Consumo de Potencias con $\alpha = 1$	27
4.5	Variación de los estados de carga	27
4.6	Consumo de potencias con $\beta = 1$	28
4.7	Consumo de potencias en pendiente ascendente	28
4.8	Estado del tanque y batería en pendiente ascendente	29
4.9	Consumo de potencias con pesos $\alpha = 1 \times 10^{-2}$ y $\beta = 1 \times 10^{-2}$	29
4.10	Estado batería y tanque de hidrógeno con $\alpha = 1 \times 10^{-2}$ y $\beta = 1 \times 10^{-2}$	30
4.11	Potencia consumidas con pendiente descendente	30
4.12	Estado del tanque de hidrógeno y batería con pendiente descendente	31
4.13	Ciclo WLTP	32
4.14	Consumo de potencias para $\alpha = 1$ y $\beta = 1$	32
4.15	Estado de la batería y el tanque de hidrógeno para $\alpha = 1$ y $\beta = 1$	33
4.16	Consumo de potencias para $\alpha = 1 \times 10^{-1}$ y $\beta = 1$	33
4.17	Estado de la batería y el tanque de hidrógeno para $\alpha = 1 \times 10^{-1}$ y $\beta = 1$	34
4.18	Consumo de potencias para $\alpha = 1 \times 10^{-1}$ y $\beta = 1 \times 10^5$	34
4.19	Consumo de potencias para inclinación de 3.43 grados	35
4.20	Consumo de potencias para inclinación de -3.43 grados	35
4.21	Estado de la batería y el tanque de hidrógeno para inclinación de -3.43 grados	36
4.22	Potencias consumidas durante 4 ciclos de conducción	36
4.23	Estado de la batería y nivel de hidrógeno durante 4 ciclos de conducción	37
4.24	Potencias consumidas durante la fase de carga	37
4.25	Estado de carga de la batería y nivel de hidrógeno en la fase de carga	38
4.26	Potencias consumidas en situación de vaciado del tanque de hidrógeno	38
4.27	Estado de carga de la batería y nivel de hidrógeno cuando está vacío	39
5.1	Esquema de hilos para la instalación embarcada	41

Índice de Códigos

A.1	Código MPC.	45
A.2	Balance de Potencias.	46
A.3	MPC incluyendo la fase de carga	47
A.4	Código en C del proceso principal	48
A.5	Código en C del hilo de control	50
A.6	Código en C de la cabecera del hilo de control	53

Bibliografía

- [1] M. Bercibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van den Bossche, *Battery technologies for electric and hybrid vehicles*, Journal of Energy Storage **25** (2019), 100825.
- [2] K. Berntorp, M. Andersson, T. Klintberg, C. Olander, P. D. Larsen, H. Sjövall, P. Alvfors, S. Karlsson, and M. Blom, *Thermal management of a hydrogen fuel cell vehicle: Modelling, simulation and experimental validation*, International Journal of Hydrogen Energy **45** (2020), no. 31, 16021–16034.
- [3] Carlos Bordons, Félix García-Torres, and Miguel A. Ridao, *Basic energy management systems in microgrids*, Model Predictive Control of Microgrids (Cham : Springer International Publishing, ed.), Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 93–94.
- [4] R. Carter, A. Cruden, and P. J. Hall, *Design and control of a battery-ultracapacitor hybrid energy storage system for electric and hybrid vehicles*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **60** (2011), no. 8, 3518–3526.
- [5] L. Dong, H. Chen, and F. Sun, *A review on driving strategies of fuel cell electric vehicles: Focus on hydrogen consumption optimization and energy management strategies*, Applied Energy **276** (2020), 115479.
- [6] Eduardo F. Camacho and Carlos Bordons, *Model predictive control*, London : Springer London : Imprint: Springer, 2007.
- [7] Yanjun Huang, Hong Wang, Amir Khajepour, Hongwen He, and Jie Ji, *Model predictive control power management strategies for hevs: A review*, **341** (2017), 91 – 106.
- [8] A. Khaligh and Z. Li, *Battery technologies for electric and hybrid vehicles: Recent advances and future prospects*, IEEE Transactions on Vehicular Technology **59** (2010), no. 6, 2806–2814.
- [9] Z. Liang, Q. Zhang, H. Zhang, B. Zhao, and M. Li, *Recent progress in the development of advanced batteries for electric vehicles*, Energy Storage Materials **24** (2020), 85–102.
- [10] X. Liu, X. Lin, Q. Li, and Y. Wang, *Recent advances in hydrogen storage materials and fuel cell technologies for electric vehicles*, Journal of Alloys and Compounds **821** (2020), 153507.
- [11] G. Papaharalabos, M. C. Georgiadis, S. Papadopoulou, A. Doukelis, E. Theodorakopoulos, G. Papa-
giannis, and J. B. Theocharis, *Development and validation of a dynamic model of a polymer electrolyte
membrane fuel cell for automotive applications*, Energies **13** (2020), no. 5, 1083.
- [12] G. Plett, *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*, Artech House, 2015.
- [13] M. C. Smart, B. V. Ratnakumar, and L. D. Whitcanack, *Advanced battery concepts for battery electric
vehicles*, Electrochemical Society Interface **28** (2019), no. 1, 51–57.
- [14] J. M. Tarascon, *Lithium-ion battery technologies for electric and hybrid vehicles*, Nature Materials **10**
(2011), 621–623.

- [15] Siang Fui Tie and Chee Wei Tan, *A review of energy sources and energy management system in electric vehicles*, **20** (2013), 82 – 102.
- [16] W. Zhang and M. Wei, *Current status and future perspective of proton exchange membrane fuel cell vehicles (pemfcvs)*, *International Journal of Hydrogen Energy* **45** (2020), no. 4, 2662–2682.
- [17] Y. Zhang, H. Lu, and G. Liu, *Hydrogen production technologies for fuel cell electric vehicle applications*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **121** (2020), 109680.

