

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC Centro Tecnológico
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Modelado y Control de un Vehículo Híbrido Basado en Pilas de Combustible

*Informe presentado a la Universidad Federal de Santa Catarina
como un requisito para la aprobación de la disciplina:*

DAS 5511: Proyecto de Fin de Carrera

Gillian Tessari da Costa

Florianópolis, Julio de 2012

Modelado y Control de un Sistema de Vehículo Híbrido Basado en Pilas de Combustible

Gillian Tessari da Costa

Tutores:

Ramon Costa Castelló, Dr.

Firma del Tutor

Julio Elias Normey Rico, Dr.

Firma del Tutor

Este informe ha sido juzgado en el contexto de la disciplina

DAS 5511: Proyecto de Fin de Carrera

y aprobado en su forma final por el

Curso de Ingeniería de Control y Automatización

Agradecimientos

Agradeço primeiramente ao meu orientador da UPC, professor Ramon Costa e à grande ajuda do professor Jordi Riera. Muito obrigada pela paciência e atenção durante este semestre. Também agradeço ao meu orientador e professor da UFSC, Julio Normey Rico, pelos anos de ensino e compreensão.

Aos amigos da Catalúnia que foram minha família durante estes 7 meses e amenizaram as saudades de casa. E finalmente aos meus amigos, namorado e família que sempre estiveram ao meu lado, acreditando no meu sucesso e dando todo o apoio que eu precisava. Graças a vocês foi mais fácil superar esta etapa da minha vida, muito obrigada a todos.

Resumen

La continua demanda de energía y el modelo de consumo actual exigen la búsqueda de nuevas alternativas de obtención de energía. Este trabajo es una contribución para el estudio de soluciones para esta problemática. Se proponen métodos de minimización del consumo de hidrógeno en un vehículo basado en pilas de combustible. El modelo del vehículo estudiado también tiene una batería como fuente secundaria.

Se proponen estrategias de gestión de energía que buscan maneras de conseguir un compromiso entre utilización de la pila de combustible o de la batería, a fines de minimizar el consumo de hidrógeno o/y mantener la carga de la batería en una referencia deseada.

Algunas de las estrategias propuestas aplicadas en un modelo no lineal del sistema son basadas en reglas heurísticas sencillas y de fácil implementación y las demás utilizan un modelo lineal híbrido que tiene variables discretas para la formulación de una lógica de conmutación de los modos de operación del sistema. Una de las estrategias heurísticas es implementada con este modelo y además una estrategia de control MPC es desarrollada para una posterior comparación de eficiencia.

Abstract

The continuous energy demand and the current consumption model require researches for new alternatives of energy obtainment. This work is a contribution to the study of solutions for this problem. Some methods of hydrogen consumption minimizing in a fuel cell-based vehicle are proposed. The model of the studied vehicle also has a battery as a secondary source.

The proposed energy management strategies seek for ways of achieving a compromise between using the battery and fuel cell system to minimize the consumption of hydrogen and/or maintain battery charge in a required reference.

Some of the proposed strategies applied in a non-linear model system are based on heuristic rules that are simple and easy to implement and others use a hybrid linear model that has discrete variables to formulate the logic of the system operation mode switching. One of the heuristic strategies is designed with this model and also an MPC control strategy is developed to a later comparison of efficiency.

Índice de figuras

1.1	Consumo de energía mundial (cuatrillones de Btu), 1990 - 2035 (<i>Fuente: Energy Information Administration</i>)	1
1.2	Consumo de energía final en España, 2010 (<i>Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (La energía en España)</i>)	2
1.3	Consumo de energía por sectores en España, 2006 (<i>Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, DAE</i>)	3
1.4	Funcionamiento de la Pila de Combustible	6
2.1	Esquema del sistema del coche	13
2.2	Curva de polarización de la pila	13
2.3	Curva de carga de la batería	16
3.1	Esquema del modelado del sistema	18
3.2	Ciclos de conducción en una ciudad y en autopista	19
3.3	Par y velocidad angular de las ruedas en autopista	22
3.4	Potencia del motor para una resposta a un escalón positivo y a una rampa	23
3.5	Esquema del sistema de generación de energía	24
3.6	Esquema en Simulink del modelo de la batería	26
4.1	Par y potencia del motor para los dos ciclos de conducción	30
4.2	Salidas de la pila para potencia de 10kW	31
4.3	Balances de potencias	31
4.4	Cargas y descargas de la batería	32
4.5	Energías disipadas	32
5.1	Mapa de consumo de hidrogeno	34
5.2	Puntos de operación del sistema de la pila para la primera estrategia	37

5.3	Puntos de operación del sistema de la pila para la segunda estrategia .	39
5.4	Resultados de las simulaciones con las estrategias propuestas	42
5.5	Seguimiento de referencia y energía disipada con la estrategia heurística 1	43
5.6	Resultados obtenidos con la estrategia heurística 1	44
5.7	Seguimiento de referencia y energía disipada con la estrategia heurística 2	44
5.8	Resultados obtenidos con la estrategia 2	45
5.9	Seguimiento de referencia con la estrategia optimizada	45
5.10	Resultados obtenidos con la estrategia optimizada	46
5.11	Comparación de los modelos lineal y no lineal	49
5.12	Concepto de la modelización híbrida	50
5.13	Potencias obtenidas con el modelo no lineal y lineal híbrido	54
5.14	Corriente y SOC de la batería y consumo de hidrógeno obtenidos con el modelo no lineal y lineal híbrido	55
5.15	Evolución de los eventos relacionados a la potencia de la pila	56
5.16	Evolución de los eventos relacionados a la corriente de la batería	56
5.17	Evolución de los eventos relacionados a la saturación de la corriente de la batería	57
5.18	Esquema del modelo del control MPC híbrido	58
5.19	Esquema de Control	61
5.20	$Q.u = [0.6 \ 0.4]$	62
5.21	$Q.u = [0.4 \ 0.6]$	62
5.22	$Q.u = [1 \ 0]$	63
5.23	$Q.u = [0 \ 1]$	63
5.24	$Q.y = [1 \ 10^{-5} \ 0]$	64
5.25	$Q.x = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-6}]$	64

5.26 $Q.y = [1 \ 10^{-5} \ 0]$	65
5.27 $Q.x = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10]$	65
5.28 $Q.y = [1 \ 10^{-4} \ 0]$	66
5.29 $Q.x = [0 \ 10^{-3} \ 0 \ 0 \ 1]$ y $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$	66
5.30 $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$ con límite superior de variación de $4000W_s^{-1}$	67
5.31 $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$ - con límite superior de variación de $5000W_s^{-1}$	67
5.32 $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$ - Ciclo de conducción en ciudad	68
5.33 $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$ y $Q.x = [0 \ 10^{-3} \ 0 \ 0 \ 1]$ - Ciclo de conducción en ciudad .	68

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Motivación	3
1.2	Las Pilas de Combustible	4
1.3	Sistemas MLD y PWA	7
1.3.1	Sistemas de Dinámica de Lógica Mixta (MLD)	8
1.3.2	Sistemas Afines Definidos a Tramos(PWA)	9
1.4	Objetivos	10
1.5	Contenido	11
2	Descripción del Sistema	12
2.1	Pilas de Combustible de Membrana Polimérica (PEM)	13
2.2	Baterías Litio-Ion	14
2.3	Motor Síncrono de Imanes Permanentes	15
2.4	Sistema Convertidor de Potencia	16
2.5	Tanque de Hidrógeno	17
3	Modelado	18
3.1	Ciclo de Conducción	19
3.2	Sistema del Vehículo	20
3.2.1	Vehículo	20
3.2.2	Transmisión	22
3.2.3	Motor	22
3.2.4	Acondicionamiento de la Potencia Eléctrica	23

3.3	Sistema de Gestión de Energía	24
3.3.1	Batería	25
3.3.2	Pila de Combustible	26
3.3.3	Depósito de Hidrógeno	27
3.3.4	Resistencia de Carga	28
4	Validación del Modelo	29
4.1	Comportamiento del Sistema	29
4.2	Resultados de las Simulaciones	30
5	Gestión de Energía	33
5.1	Objetivos de los SGEs en un Vehículo Híbrido	33
5.2	Estrategias Heurísticas	36
5.2.1	Primera Estrategia	36
5.2.2	Segunda Estrategia	38
5.3	Estrategia Basada en Programación no Lineal	40
5.4	Resultados de las Simulaciones	41
5.5	Modelo Lineal del Sistema	47
5.6	Estrategia Heurística Híbrida	48
5.6.1	Sistemas Afines Conmutados	50
5.6.2	Generador de Eventos	51
5.6.3	Máquina de Estados Finitos	52
5.6.4	Selector de modos	52
5.6.5	Comparación de los Sistemas No Lineal y Lineal Híbrido	54
5.7	Estrategia MPC Híbrido	57
5.7.1	Modelo del Control MPC Híbrido	57
5.7.2	Control MPC Híbrido	59

<i>Índice general</i>	xi
5.7.3 Resultados de las Simulaciones	61
5.8 Comparación y Discusión de los Resultados	69
6 Conclusión	70
Apéndice A - Estados del Sistema Lineal para la Estrategia Heurística	72
Apéndice B - Estados del Sistema Lineal para la Estrategia MPC Híbrido	74
Referencias	75

1 Introducción

El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. El modelo económico actual, dependiente de continuo crecimiento, exige también una demanda creciente de energía. Puesto que las fuentes de energía fósil y nuclear son finitas, muchos trabajos están siendo desarrollados buscando nuevos métodos para obtener energía. El empleo de dichas fuentes de energía es limitado y también acarrearán consigo problemas como la progresiva contaminación.

Por ello se buscan fuentes alternativas. Segundo los estudios enseñados en la *International Energy Outlook 2011* [1], el consumo de la energía mundial en 2008 era de 505 cuatrillones de Btu¹ y se estima que aumentará para 619 cuatrillones de Btu en 2020 y para 770 cuatrillones de Btu en 2035 (figura 1.1).

El cambio que se busca para este siglo es la dicha energía alternativa. Es im-

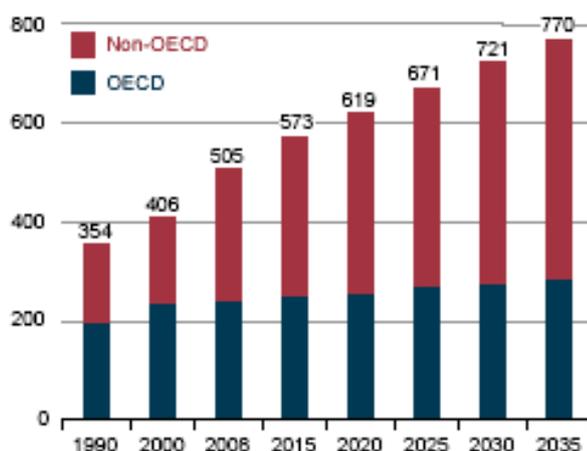


Figura 1.1: Consumo de energía mundial (cuatrillones de Btu), 1990 - 2035 (Fuente: *Energy Information Administration*)

portante reseñar que las energías alternativas, aunque sean renovables, también son finitas y como cualquier otro recurso natural tendrán un límite máximo de explotación. La figura (1.2) enseña el consumo energético en España en 2010, donde se ha desa-

¹British thermal unit

rollado este trabajo. Se puede ver que la mayor contribución energética proviene del petróleo, pero hubo un descenso de su demanda tras el desarrollo de nuevas tecnologías en el sector de transporte y el aumento de 11,1 % (en relación a 2009) en el consumo de energías renovables (destaca el crecimiento de los biocarburantes).

Además de la transición a estas nuevas energías, también es necesario que

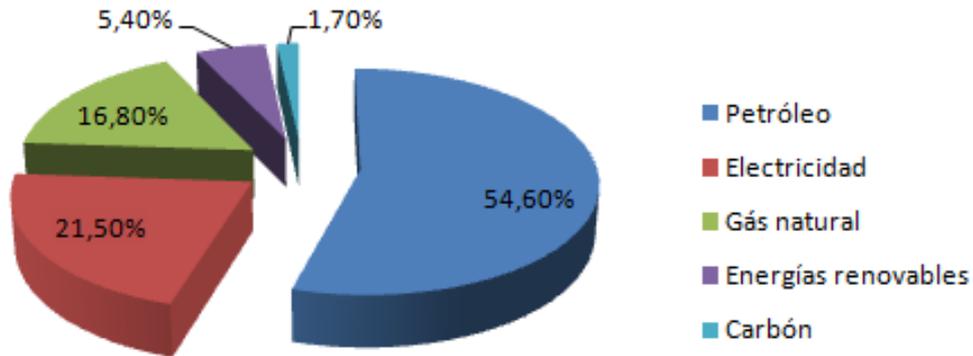


Figura 1.2: Consumo de energía final en España, 2010 (Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (*La energía en España*))

haya un cambio en el modelo económico actual que es basado en el crecimiento perpetuo. Es por ello por lo que surge el concepto del desarrollo sostenible, que se basa en las siguientes premisas:

- El uso de fuentes de energía renovables, evitándose las fuentes fósiles que terminarán agotándose;
- El uso de fuentes limpias, abandonando los procesos de combustión convencionales y la fisión nuclear;
- La limitación de la construcción de grandes infraestructuras de generación y distribución de energía eléctrica para fomentar el autoconsumo;
- La disminución de demanda energética mediante la mejora del rendimiento de los dispositivos eléctricos;
- La reducción del consumo innecesario, consumiendo menos y de manera más eficiente.

1.1: Motivación

Dada la problemática mundial, cada vez más se buscan alternativas sostenibles, sea por fuentes de energía renovables o/y por métodos de reducción de consumo energético. La figura (1.3) enseña el consumo de energía por sectores en España. Aunque el peso del consumo en el sector de transporte en España sea más elevado que en otros países, merece un tratamiento individual en el debate sobre energía y sostenibilidad, tanto por el consumo total de energía como por las emisiones de CO_2 .

Varios trabajos están en desarrollo en el campo de la automoción y tienen co-

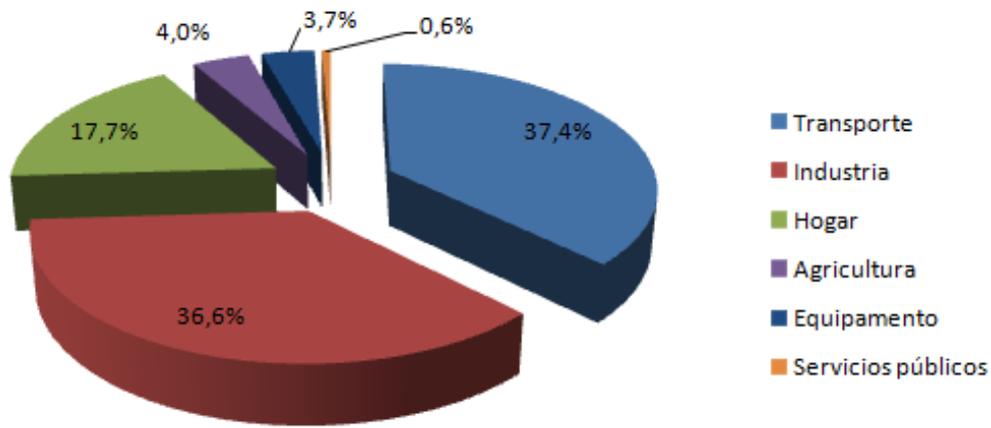


Figura 1.3: Consumo de energía por sectores en España, 2006 (Fuente: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, DAE)

mo objetivo buscar la mejor solución entre energía sostenible y costo. Uno de los focos de recientes estudios son las pilas de combustible, en especial este trabajo trata de las pilas basadas en el consumo de hidrógeno.

El Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial (OPTI) ha realizado no hace demasiado tiempo un estudio “Hidrógeno y Pilas de Combustible” donde se estima que en 2020 existirán en Europa nueve millones de vehículos propulsados por hidrógeno (5 % del parque automovilístico). Para atender la demanda de hidrógeno de dichos vehículos se requerirá un mínimo de 5000 a 10000 estaciones de servicio de hidrógeno. Estos datos fueron analizados en [2], donde se enseñan los requisitos más importantes para la aplicación de esta tecnología en la automoción, entre los cuales estan:

- El peso y volumen de todo el sistema ha de ser bajo;
- El tiempo de autonomía ha de ser largo;

- La temperatura de operación no debería ser excesivamente elevada;
- El tipo de combustible y el almacenamiento del mismo son críticos;
- La velocidad de respuesta ha de ser rápida, tanto en el calentamiento inicial como en la adaptación a la potencia demandada;
- La durabilidad de los componentes ha de ser alta, permitiendo una vida útil superior a 10 años.

Por ello, se dice que la pila de membrana polimérica (PEMFC), cuyo combustible es el hidrógeno, parece una de las más adecuadas para cumplir estos requerimientos. Con una baja temperatura de funcionamiento, alrededor de 80°C, las PEM pueden alcanzar rápidamente la temperatura operativa con una buena eficacia y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Este proyecto busca estudiar dos alternativas en términos energéticos para vehículos híbridos: la utilización de pilas de combustible de hidrógeno y la optimización del consumo de hidrógeno a través de estrategias de gestión de energía.

1.2: Las Pilas de Combustible

Desde mediados del siglo XIX ya se conocen los principios del funcionamiento de las pilas de combustible, mucho antes de que pudiesen intuirse sus aplicaciones. *Sir William Robert Grove* hizo público un experimento en 1839 que demostraba la posibilidad de generar corriente eléctrica a partir de una reacción electroquímica entre hidrógeno y oxígeno. En 1960 la NASA decidió emplear las pilas de combustible en sus misiones (Géminis y Apolo).

Las pilas (también llamadas celdas) de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de reacción directamente en energía eléctrica sin que medie ningún proceso de combustión [3]. Para ello es necesario suministrar combustible y oxidantes a sus electrodos. Como resultado de la reacción electroquímica se produce agua y energías térmica y eléctrica. El agua abandona la pila a través de los electrodos y la corriente eléctrica pasa a un circuito externo.

Las pilas de combustible son muy versátiles pues pueden trabajar con diferentes tipos de combustible (hidrógeno, metanol, bioetanol, biogás, gas natural) y a diferentes temperaturas. En principio, cualquier sustancia susceptible de oxidación química, que pueda suministrarse de forma continua a la pila, puede utilizarse como combustible.

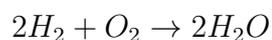
Del mismo modo, cualquier sustancia que se reduzca químicamente de forma suficientemente rápida puede servir como oxidante. Hidrógeno y oxígeno gaseosos son el combustible y oxidante elegidos en la mayoría de las aplicaciones de las pilas de combustible. El hidrógeno presenta una alta reactividad en presencia de catalizadores adecuados, puede obtenerse a partir de hidrocarburos, y alcanza una alta densidad energética. El oxígeno se obtiene directamente del aire siendo su almacenamiento fácil y económico.

Los elementos básicos de una pila de combustible son:

- Electrodo - cátodo y ánodo;
- Electrolito - sustancia encargada de transportar los iones producidos en las reacciones redox;
- La matriz - contiene el electrolito pero no es necesaria cuando éste es sólido;
- Placa bipolar - actúa como colector de corriente y distribuidor de gas.

A diferencia de la combustión convencional, en las pilas de combustible, comburente y combustible no entran en contacto directo. En el electrodo negativo, ánodo, tiene lugar la oxidación del combustible (semirreacción de oxidación) mientras que en el positivo, cátodo, ocurre la reducción del oxígeno del aire (semirreacción de reducción). El oxidante consume los iones positivos del electrolito y los electrones generados en el ánodo se mueven por la diferencia de potencial generada entre los electrodos.

El funcionamiento de las pilas, como explicado en [3], es muy sencillo. La reacción global que tiene lugar en una pila de combustible es la combinación de hidrógeno y oxígeno para formar agua:



Los gases pasan hacia el electrolito (figura (1.4)) a través de los poros de los electrodos, los oxidantes a través del cátodo y los combustibles a través del ánodo. Se produce una interfase electrodo-electrolito-reactivos que juega un papel determinante en el comportamiento electroquímico de la celda.

En esta interfase el gas se difunde hasta la superficie del electrodo mojada por el electrolito, donde reacciona electroquímicamente produciendo las cargas eléctricas que crean la corriente eléctrica exterior, y los iones que son transportados a través del electrolito cerrando el circuito. La interfase dificulta el acceso de los gases a los

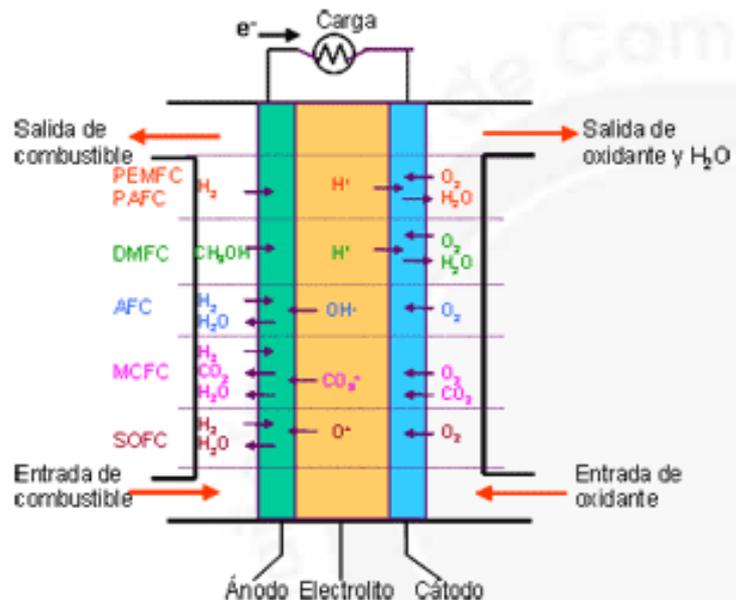


Figura 1.4: Funcionamiento de la Pila de Combustible
(Fuente: Asociación Española de Pilas de Combustible)

centros reactivos, donde se encuentra el catalizador, mientras que un contenido demasiado bajo de electrolito en la interfase limita el transporte de los iones a los lugares donde tiene lugar la reacción.

Hay diversas aplicaciones para las pilas de combustible [4], desde dispositivos portátiles (teléfonos móviles, ordenadores, pequeños electrodomésticos), aplicaciones portátiles a vehículos de todo tipo (coches, autobuses, barcos), hasta generadores estacionarios de calor y energía para empresas, hospitales, zonas residenciales, etc. Varios estudios buscan mejorar el desempeño de las pilas de combustible. El ICMA (Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón), por ejemplo, es uno de los centros de investigación de los materiales para pilas de combustible.

Además de los materiales, el control del componente también es muy importante. Los sistemas basados en pilas de combustible están formados por numerosos subsistemas asociados, con interacciones complejas entre sí. Cada uno de estos subsistemas presenta objetivos de control diferentes y muchas veces incompatibles.

En las pilas de combustible tipo PEM, la conducción de protones por parte de la membrana polimérica es directamente proporcional al contenido de agua en la misma. Es por ello que en este tipo de pilas se consigue una buena conducción de los protones de hidrógeno humidificando correctamente la membrana. Es de vital importancia tener un subsistema de humidificación bien controlado, pues por otro lado el exceso puede inundar los electrodos, disminuyendo la potencia generada por la pila o destru-

yendola.

Muchos modelos dinámicos son complejos y fuertemente no lineales. Además suele considerarse una temperatura fija en la pila, no incluyendo modelos dinámicos de su comportamiento. Dada esta característica experimental de la pila, es necesario conseguir una regulación de temperatura eficaz, de manera que permita realizar ensayos de membranas y catalizadores bajo condiciones fijas de funcionamiento. Hay diversos trabajos centrados en la problemática del control de las pilas de combustible como [5] y [6], que tratan de la gestión del agua a través de métodos de humidificación y de la gestión térmica con intercambio de calor por refrigeración, éste último también presenta propuestas de control de presión ánodo-cátodo y de oxigenación. Este trabajo considera que la pila de combustible ya es perfectamente controlada.

1.3: Sistemas MLD y PWA

Cuando se piensa en modelos de sistemas y sus dinámicas gobernadas por leyes físicas, luego se los asocian a ecuaciones diferenciales y en diferencias. Además, la mayoría de la teoría de control y herramientas son direccionadas a ellos. Por otro lado, hay muchas aplicaciones de sistemas que son constituidas por trozos descritos por *lógica*, como válvulas *on/off*, marchas o seleccionador de velocidad o evoluciones pendientes de reglas *if-then-else*. A menudo, el control de estos tipos de sistemas es hecho basado en reglas heurísticas deducidas de la operación práctica de la planta.

Para esta clase de sistemas, el diseño de los controladores lleva a esquemas jerárquicos y híbridos, con un nivel bajo compuesto por controladores continuos calibrados por cada subsistema dinámico para garantizar las propiedades deseadas y por controladores supervisórios discretos, que resuelven conflictos y planean las estrategias en un nivel más alto. Entretanto hay algunas aplicaciones en que no es posible hacer una separación en niveles jerárquicos dada la dependencia entre dinámica y hechos lógicos. En estos casos, no solo es difícil diseñar controladores retroalimentados, como también de se obtener un modelo de manera sistemática.

Hay muchos estudios recientes que proponen un tipo de modelización y control de sistemas descritos por leyes físicas, reglas lógicas y restricciones operacionales, donde la lógica es transformada en desigualdades lineales que contienen variables interas y continuas. Un marco para el desarrollo de estos sistemas que poseen la dicha dinámica de lógica mixta (MLD - *Mixed-Logical Dynamic*) es propuesto en [10]. La propuesta se trata de una descripción textual de los modelos cuyas ecuaciones

lineales dinámicas están sujetas a desigualdades lineales mixta-enteras, es decir, desigualdades que contienen variables continuas o binarias (o lógicas, o 0 – 1). Esto incluye estados físicos/discretos, entradas continuas/enteras, y variables auxiliares continuas/binarias. Sistemas MLD generalizan una grande parte de los modelos, entre ellos los sistemas lineales híbridos (que presentan un comportamiento continuo y discreto), las máquinas de estados finitos, algunas clases de sistemas a eventos discretos, sistemas lineales con restricciones y sistemas no lineales cuyas no linealidades se pueden modelizar por funciones lineales definidas a tramos.

Los sistemas afines definidos a tramos (*Piecewise Affine Systems (PWA)*) tienen la ventaja de permitir aproximar sistemas no lineales a partir de la definición de sub-modelos que se adaptan al comportamiento del sistema. El principal problema de esta definición es el alto número de pequeñas regiones necesarias para una buena representación. En las próximas subsecciones se presenta la generalización para estos dos métodos de representación de sistemas híbridos.

1.3.1: Sistemas de Dinámica de Lógica Mixta (MLD)

Segundo [9], el planteamiento de los sistemas MLD corresponde a:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + B_1u_k + B_2\delta_k + B_3z_k \\ y_k &= Cx_k + D_1u_k + D_2\delta_k + D_3z_k \\ E_1x_k + E_2u_k + E_3\delta_k + E_4z_k &\leq g, \end{aligned} \quad (1.1)$$

donde $x_k = [x_k^r \ x_k^b]$, $x_k^r \in \mathbb{R}^n$ es la parte continua del estado y $x_k^b \in \{0, 1\}^{n_b}$ es la parte discreta. De forma similar $y_k = [y_k^r \ y_k^b]$, $y_k^r \in \mathbb{R}^m$ es la parte continua de la salida, y $y_k^b \in \{0, 1\}^{m_b}$ es la parte discreta. Además, $u_k = [u_k^r \ u_k^b]$, donde $u_k^r \in \mathbb{R}^l$ es la parte continua de la entrada y $u_k^b \in \{0, 1\}^{l_b}$ es la parte discreta. Finalmente, $z_k \in \mathbb{R}^r$ y $\delta_k \in \{0, 1\}^{r_b}$ son variables auxiliares, y $A, B_{1,2}, B_3, C, D_1, D_2, D_3, E_1, E_2, E_3, E_4, g$ son parámetros del modelo.

En los sistemas MLD las expresiones lógicas de la parte discreta de un sistema híbrido son expresadas a través de igualdades o desigualdades. Se utilizan variables lógicas δ_k que pueden tomar valores 0 o 1, cotas superiores M , cotas inferiores m , y/o tolerancias positivas ε . Se puede convertir cualquier expresión lógica en una igualdad o desigualdad. El siguiente ejemplo se encuentra en [18], además de más informa-

ciones acerca de la construcción de las restricciones.

$$\begin{aligned} L_1 \wedge L_2 \text{ es equivalente a } \delta_1 + \delta_2 >= 1 \\ L_1 \vee L_2 \text{ es equivalente a } \delta_1 = 1, \delta_2 = 1 \end{aligned} \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \delta_3 = \delta_1 \delta_2 \text{ es equivalente a } \{ & -\delta_1 + \delta_3 <= 0 \\ & -\delta_2 + \delta_3 <= 0 \\ & \delta_1 + \delta_2 - \delta_3 <= 1 \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} y <= M\delta \\ y >= m\delta \\ y <= f(x) - (1 - \delta) \\ y >= f(x) - M(1 - \delta) \end{aligned} \quad (1.4)$$

1.3.2: Sistemas Afines Definidos a Tramos(PWA)

Con los sistemas afines definidos a tramos es posible aproximar un sistema no lineal por sub-sistemas lineales con grado de precisión arbitrario, lo que se traduce en una ventaja para el diseño de controladores. Entretanto, cuanto más pequeñas regiones se definen, más complicado se torna el problema en términos de diseño de controladores y de cálculos computacionales.

Es por ello que se debe hacer un compromiso entre una buena representación del sistema sin definir tantas regiones que se torne imposible de definir los modos de operación. Un sistema lineal afín definido a tramos puede ser descrito por [19]:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A^i x_k + B^i u_k + f^i \\ y_k &= C^i x_k + D^i u_k + g^i \end{aligned} \quad \text{para } \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix} \in X_i \quad (1.5)$$

donde $\{X_i\}_{i=1}^s$ es una partición poliédrica del espacio de estado-entrada. Cada X_i está dado por:

$$X_i \cong \left\{ \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix} \quad \text{tal que} \quad Q_i \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix} <= q^i \right\} \quad (1.6)$$

donde x_k, u_k, y_k denotan los vectores de estados, entradas y salida, respectivamente. En (1.3.2) $A_i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ y (A_i, B_i) es un par controlable. $C_i \in \mathbb{R}^{r \times n}$, $Q_i \in \mathbb{R}^{p_i \times (n+m)}$, f_i, g_i, q_i son vectores constantes adecuados. Notar que n es un número de estados, m de entradas, r de salidas y p_i de hiper-planos que definen el poliedro i .

1.4: Objetivos

El objetivo de este trabajo es estudiar, analizar y proyectar un modelo y control de un vehículo utilizando técnicas de control híbrido. Este control pretende gestionar la energía del sistema cuyos componentes son modelados de forma casi-estática. El sistema de potencia del vehículo es compuesto por una cadena de tracción formada por una pila de combustible como sistema principal y un conjunto de baterías como sistema de almacenamiento de energía. En este sistema hay varios lazos de control que pueden ser divididos en dos niveles. Un primer nivel trata de los controladores locales de los componentes (pila de combustible, convertidores, inversores) y el nivel superior estudia la gestión de potencia de los componentes.

La dinámica detallada de cada uno de los componentes puede ser importante en el diseño de controladores locales, sin embargo no es relevante en el conjunto total en algunos casos. Este caso en estudio considera que cada componente está correctamente controlado y el objetivo es simular el comportamiento del sistema de energía para diseñar controladores que regulen las potencias correspondientes.

Se proponen estrategias heurísticas empleadas en un modelo no lineal para comparación con un modelo lineal híbrido propuesto que es la principal contribución de este proyecto. Utilizándose de modelos descritos por dinámica de lógica mixta (MLD), también se propone un control MPC capaz de estabilizar este tipo de sistema en trayectorias de referencia mientras cumple con las restricciones y lleva en consideración el conocimiento cualitativo en la forma de reglas heurísticas.

Una secuencia de acciones de control futura es escogida de acuerdo con una predicción de la evolución del futuro del sistema y es aplicada a la planta hasta que nuevas mediciones estén disponibles. Cada secuencia es calculada automáticamente con la ayuda de una herramienta por medio de un procedimiento de optimización que tiene en cuenta dos objetivos: optimizar la performance de seguimiento de referencia y proteger el sistema de posibles violaciones de las restricciones. En el capítulo de gestión de energía se discute sobre las restricciones. El procedimiento adoptado es un problema lineal entero mixto o cuadrático para el que existen solucionadores computacionalmente eficientes.

Según las necesidades, puede aplicarse el mismo marco bien como herramientas de toma de decisiones de lazo abierto o de rechazo de perturbaciones de bucle cerrado. En resumen, en las principales ventajas que ofrece el método combinado MLD/MPC se incluyen la flexibilidad en la modelización y unos requisitos computacionales aceptables. Así, se tiene como principal objetivo la análisis y la aplicación

de un controles híbridos para la gestión de energía de un vehículo que utiliza pilas de combustible.

1.5: Contenido

El capítulo 2 trata de la descripción del modelo de cada uno de los componentes del sistema y de los resultados de las simulaciones independientes. El capítulo 3 trata del modelo completo y enseña los resultados obtenidos durante la validación. En el capítulo 4 se hace la validación del modelo propuesto con simulaciones y comentarios sobre el comportamiento del sistema. En el capítulo 5 es presentada la propuesta de control para la gestión de energía y los resultados obtenidos. Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones del trabajo.

2 Descripción del Sistema

El escopo de este trabajo no incluye el diseño de los componentes del vehículo, sin embargo la descripción básica del sistema [7] es importante para entender sus restricciones físicas además de los modelos y estrategias de control propuestas. Todas las informaciones sobre el coche, presentadas en este capítulo y además en este trabajo, fueron extraídas de [8], una vez que fue la referencia escogida para el desarrollo del modelo. El sistema de propulsión del vehículo fue diseñado para satisfacer las condiciones mínimas para un automóvil de turismo. Las características de automóviles de turismo están listadas abajo:

- Estos vehículos son autónomos y no dependen de redes de suministro de energía;
- Tienen un tiempo de recarga insignificante comparado al tiempo de conducción entre dos eventos de recarga;
- Pueden transportar de dos a seis personas y alguna carga útil;
- Aceleran de 0 a 100 km/h entre 10 y 15 segundos.

El modelo fue hecho en Simulink/Matlab basado en [8], cuya configuración se puede observar en la figura (2.1). La conexión mecánica se realiza a través de un motor eléctrico, el cual es único y puede ser alimentado desde cualquiera de las dos fuentes de energía: pila de combustible o baterías. El motor suministra la potencia necesaria para que el vehículo alcance la velocidad requerida por el ciclo de conducción determinado. Hay convertidores de potencia utilizados para conectar los subsistemas y un control que es responsable por la gestión de energía del sistema. En las próximas secciones hay una explicación de cada componente del sistema.

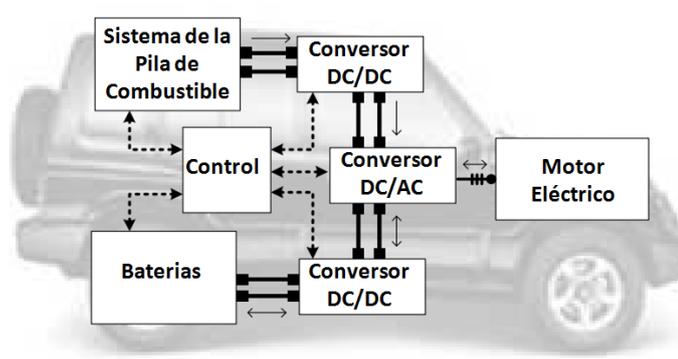


Figura 2.1: Esquema del sistema del coche

2.1: Pilas de Combustible de Membrana Polimérica (PEM)

Este tipo de pila de combustible es la más utilizada en aplicaciones automotivas debido a su rápida respuesta y baja temperatura de operación. La pila de combustible del prototipo estudiado suministra un máximo de $56kW$ de potencia, mientras el número de celdas es 256 y la salida de tensión está comprendida entre $150V$ y $247V$. La figura (2.2) presenta la curva de polarización suministrada por el fabricante.

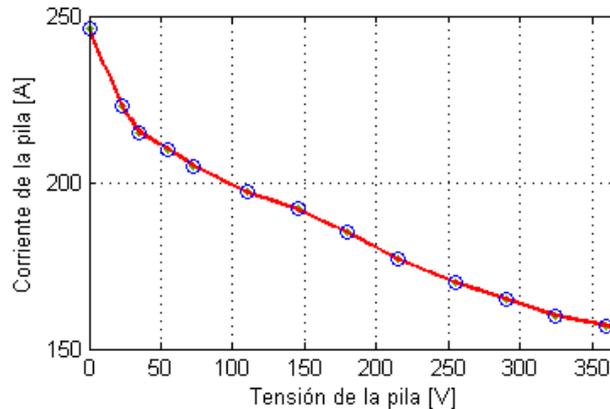


Figura 2.2: Curva de polarización de la pila

Las principales características de la pila PEM del vehículo están listadas en la tabla (2.1). El tamaño y peso del sistema de la pila de combustible son importantes propiedades que deben ser consideradas durante el diseño del proceso. Como se puede ver en la tabla, el peso del sistema es $96kg$ pero el peso de los dispositivos auxiliares no se incluye en estos datos. El aire de la pila es suministrado por un compresor que exige un gran consumo de energía. Se supone que ya hay un control del sistema de la pila de combustible en bajo nivel que considera el consumo del compresor para re-

gular la eficiencia del sistema.

Cuadro 2.1: Características de la pila de combustible PEM

Características	Valores
Potencia Nominal	56kW
Número de Celdas	256
Voltaje de Salida	150 – 247V
Frecuencia Ripple	5% a 1Hz
Peso	96kg
Dimensiones	480/200/578mm
Temperatura de Operación	5 – 45°C
Vida útil	1500h

La pila de combustible es refrigerada por líquidos (agua) porque el calor producido durante la operación de la pila no puede ser suprimido por un sistema de refrigeración de aire. El sistema de refrigeración comprende dos circuitos; en el primer circuito una bomba suministra el agua y en el segundo circuito hay un radiador que hace la transferencia de calor. Hay un sistema de recirculación para reducir las pérdidas de hidrógeno y aumentar la eficiencia total. Una válvula de humidificación y de hidrógeno también son parte del sistema y sirven para humidificar el aire y suministrar el hidrógeno necesario para la operación adecuada.

2.2: Baterías Litio-Ion

Debido a su densidad energética, las baterías Litio-Ion fueron incorporadas en el prototipo del vehículo. Este tipo de baterías tiene un ánodo de grafito, un cátodo hecho de litio y una solución de litio. Membranas son necesarias para separar los electrones de los iones de litio. Las baterías Litio-Ion tienen alta energía específica y densidad de potencia, por ello fueron rápidamente insertadas al mercado de electrónicos portátiles. Son estas las características que las hacen apropiadas para las aplicaciones automotivas. La energía específica (J/kg) es definida como la energía por unidad de masa y la densidad de potencia (W/m^2) es la cantidad de potencia distribuida por una cierta unidad de área. Ellas son inadecuadas para la comercialización por su alto costo y baja vida útil. La tabla abajo compara los diferentes tipos de baterías y señala las ventajas de las baterías Litio-Ion.

Cuadro 2.2: Comparación entre los diferentes tipos de baterías

Tipo	Wh/kg	W/kg	Ciclo de Vida
Plomo-ácido	35	180	600
Níquel-cadmio	50	120	1500
Litio-ion	135	430	1200

Las características de una batería individual están listadas en la tabla (2.3). Ocho baterías conectadas en serie son necesarias para atender las especificaciones de diseño. Las baterías tienen máximas corrientes, continua y discontinua, de descarga. El fabricante impone una corriente de descarga debido a las restricciones térmicas y para aumentar la durabilidad de la batería. Así, las baterías tienen tres modos de operación; carga, descarga continua y descarga discontinua, cada un con restricciones físicas diferentes. La capacidad mide la corriente para cargar y descargar la batería completamente durante un período de 5 horas.

Cuadro 2.3: Características de las baterías Litio-Ion

Características	
Tensión nominal	19,2V
Capacidad	65Ah
Energía específica	84Wh/kg
Densidad energética	117Wh/l
Descarga 23°C	
Máxima corriente de descarga	220A
Tensión de corte	15V
Carga	
Tensión de carga	21,9V
Máxima corriente de carga	30A
Tiempo de carga	2,5h

La curva de carga suministrada por el fabricante fue utilizada para la identificación de sus parámetros, figura (2.3).

2.3: Motor Síncrono de Imanes Permanentes

El motor eléctrico del prototipo es un desarrollo del Departamento de Electrónica de la Universidad de Sevilla. Se trata de un motor síncrono de imanes permanentes

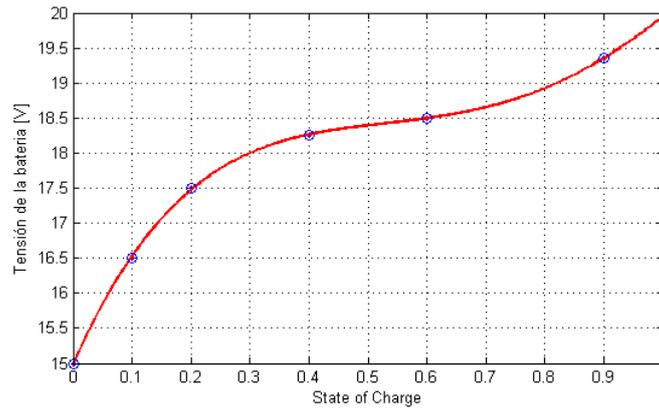


Figura 2.3: Curva de carga de la batería

(*Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)*) que es un motor eléctrico AC. El rotor es accionado por los imanes permanentes y el estátor es conectado a una corriente alterna y trifásica. El motor eléctrico está directamente acoplado a las ruedas traseras del prototipo. Esta unidad trabaja como un generador durante frenados regenerativos y como un motor el restante del tiempo. La pérdida de potencia es modelada con diferentes ecuaciones para cada caso como se muestra en la sección (3.2.3) del próximo capítulo. Además, la velocidad angular máxima del motor es $5676rpm$, la potencia máxima del motor es $66kW$ y el par máximo es $460Nm$.

Cuadro 2.4: Características del motor

Características	Valores
Máxima velocidad	$5976rpm$
Máxima potencia	$66kW$
Máximo par	$460Nm$
Peso	$75kg$
Diámetro	$300mm$
Longitud	$310mm$

2.4: Sistema Convertidor de Potencia

Hay dos diferentes convertidores DC/DC de energía empleados para conectar la pila de combustible y las baterías al bus DC. El convertidor DC/DC que conecta la pila de combustible al bus DC es unidireccional y ajusta la tensión de la pila de combustible a la tensión del bus DC, aumentándola. El otro convertidor DC/DC conecta las

baterías al bus DC y es bidireccional, por lo que aumenta o disminuye la tensión de la batería dependiendo del modo de carga o descarga.

2.5: Tanque de Hidrógeno

La autonomía exigida al vehículo es $100km$, que es equivalente a $2,4kg$ de hidrógeno para esta configuración de vehículo. Tres tanques de hidrógeno, cada uno con una presión de $350bar$, fueron instalados en el vehículo para satisfacer las exigencias europeas para vehículos movidos a combustible explosivo.

3 Modelado

La figura (3.1) enseña los componentes del sistema modelado. El modelo es no lineal y simula el comportamiento del vehículo bajo control. Se trata de un modelo casi-estático, combina las ecuaciones de los diferentes componentes y presenta los submodelos combinados.

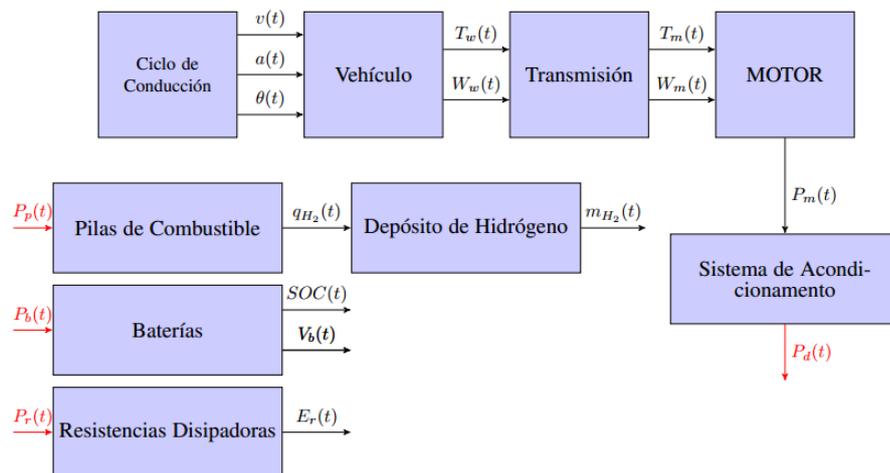


Figura 3.1: Esquema del modelado del sistema

donde $P_d(t) = P_p(t) + P_b(t) + P_r(t)$.

En este modelado hay dos submodelos: uno del vehículo y otro del sistema de generación de energía, tiene como entradas la velocidad y aceleración deseadas y como salida la potencia demandada por el motor ya con el acondicionamiento de potencia eléctrica. Los componentes serán presentados en las próximas secciones juntamente con sus principales características.

3.1: Ciclo de Conducción

El bloque de la figura (3.1) denominado "*Ciclo de conducción*" contiene informaciones sobre velocidad, inclinación del terreno y aceleración. En general suele utilizarse solamente la velocidad del vehículo pues la inclinación del terreno es difícil de calcular. Por ello, se lo considera plano y el ángulo se lo considera igual a 0.

Todos los ciclos de conducción, que fueron utilizados para realizar las diversas simulaciones presentadas, han sido obtenidos y adaptados del programa ADVISOR (*ADvanced Vehicle SimulatOR*), versión 2003, que es un *toolbox* para Matlab creado por el *Department of Energy (DOE)* y por el *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* para simular diferentes tipos de vehículos, incluso los coches eléctricos que son el foco de este trabajo.

El ciclo de conducción de una ciudad es caracterizado por una baja velocidad media y por muchas paradas debido a semáforos, cruces y rotondas. Por otro lado, el ciclo de conducción en autopista tiene una velocidad media más elevada, aceleraciones más suaves y algunos trozos de velocidad constante. En la figura (3.2) se presenta un ciclo de conducción por ciudad y uno por autopista junto con sus respectivas aceleraciones (ecuación (3.1)).

Se puede observar que la primera parte del ciclo de la ciudad tiene más para-

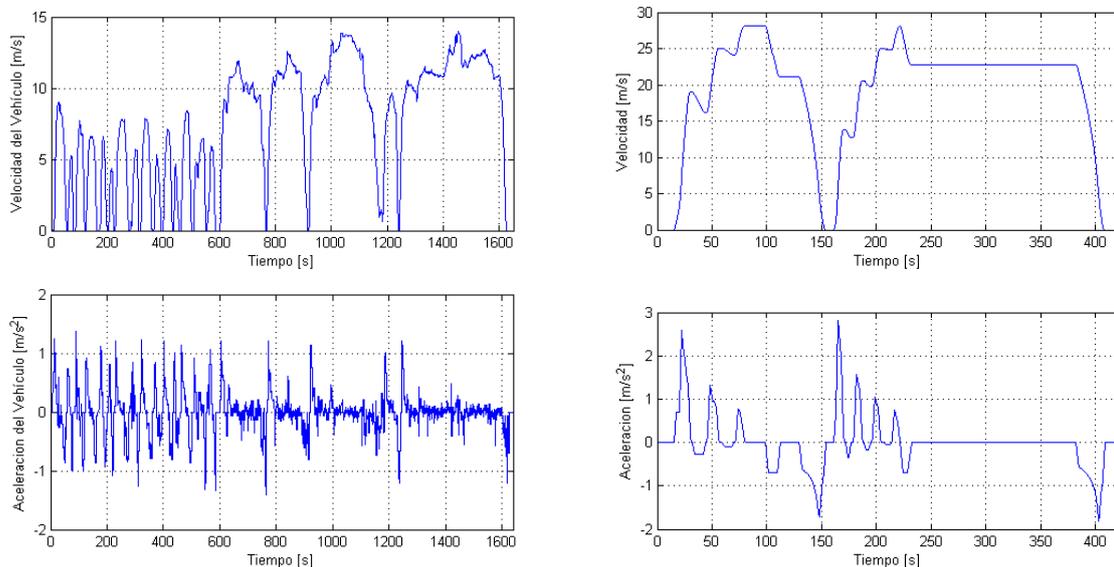


Figura 3.2: Ciclos de conducción en una ciudad y en autopista

das que la segunda que indica que el coche ha entrado en una vía rápida. En la gráfica inferior se observa que las variaciones de la aceleración son más bruscas en la primera parte donde el coche para y arranca con más frecuencia. El ciclo de conducción en

autopista es más suave, una vez que la velocidad es más constante que en una ciudad.

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} \quad (3.1)$$

Obsérvese como difiere la forma de las curvas de los dos ciclos lo que se traducirá en un comportamiento totalmente diferente del sistema. Por lo que para optimizar el funcionamiento del sistema tanto en ciudad como en autopista habrá que estudiar la gestión de potencia para cada uno de ellos.

3.2: Sistema del Vehículo

El sistema del vehículo representa la dinámica del vehículo y el balance de fuerzas necesario para la definición de la potencia demandada por el motor eléctrico para alcanzar un cierto ciclo de conducción. Este submodelo no es necesario para el diseño del control pero es necesario para calcular la demanda de potencia que el control de gestión de energía necesita suministrar para alcanzar el ciclo de conducción deseado. Su entrada es el perfil de velocidad y su salida es la demanda de potencia del motor. Los grupos de ecuaciones que pertenecen a este bloque están descritos más abajo en esta sección.

3.2.1: Vehículo

En el bloque de la figura (3.1) denominado "*Vehículo*" se calcula el par y la velocidad angular necesaria para alcanzar el ciclo de conducción determinado. Las entradas a este bloque son la velocidad lineal del vehículo dependiendo del tiempo, la aceleración dependiendo del tiempo para ese ciclo de conducción y por último la inclinación del terreno para el determinado ciclo de conducción. Como fue comentado anteriormente, el ángulo de inclinación se lo considera 0. En este bloque se calcula un balance de fuerzas en la rueda, ecuación (3.2).

$$F_t(t) = m_v \cdot a(t) + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t), \quad (3.2)$$

donde F_t es la fuerza de tracción en las ruedas, m_v es la masa del vehículo, F_a es la fuerza aerodinámica, F_r es la fuerza de rozamiento y F_g es la fuerza de gravedad. Las fuerzas F_a , F_t y F_g son calculadas por las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5), respectivamente.

Cuadro 3.1: Parámetros del vehículo

Parámetros	Valores
Massa del vehículo(M_v)	1850kg
Coefficiente de rozamiento(C_r)	0,011
Coefficiente aerodinámico(C_d)	0,34
Area frontal(A_f)	1,9765m ²
Radio de la rueda(R_w)	0,35m

$$F_a(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_d \cdot v^2(t) \quad (3.3)$$

$$F_r(t) = \text{sgn}(v) \cdot c_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\theta(t)) \quad v > 0 \quad (3.4)$$

$$F_g(t) = m_v \cdot g \cdot \sin(\theta(t)) \quad (3.5)$$

donde ρ_a ¹ es la densidad del aire, A_f es el área frontal del vehículo, c_d es el coeficiente aerodinámico, c_r es el coeficiente de rozamiento, g es la aceleración de la gravedad² y por último θ es el ángulo de inclinación de la carretera.

Los coeficientes (aerodinámico y de rozamiento) suelen variar con muchos factores pero en este caso de estudio se los considera constantes.

Por lo tanto, se obtiene el par de tracción aplicado sobre las ruedas y la velocidad angular:

$$\tau_w(t) = F_t(t) \cdot r_w w_w(t) = \frac{v(t)}{r_w}, \quad (3.6)$$

donde τ_w es el par de tracción sobre las ruedas, r_w es el radio de la rueda y w_w la velocidad angular.

Los valores de los parámetros del vehículo, utilizados en las simulaciones, fueron obtenidos del sistema estudiado en [8] y están listados en la tabla 3.1. La figura (3.3) presenta el resultado de estas simulaciones para el ciclo de conducción en autopista. En ella se puede ver la influencia que la aceleración lineal del vehículo tiene sobre el par de tracción sobre la rueda. En la parte inferior de dicha gráfica se muestran las velocidades angulares de la rueda que están fuertemente influenciadas por el ciclo de conducción ya que conservan la misma forma pero escaladas.

¹considerado 1,184kg/m³ a la temperatura de 25°C

²considerada 9,81(m/s²)

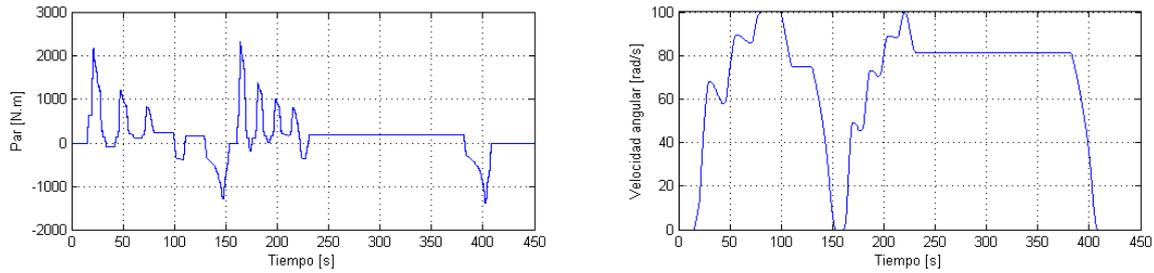


Figura 3.3: Par y velocidad angular de las ruedas en autopista

3.2.2: Transmisión

La “*Transmisión*” (siguiente bloque de la figura (3.1)) de los vehículos relaciona el par y la velocidad angular de las ruedas con el par y la velocidad angular del motor a través de un coeficiente denominado constante de transmisión. Este coeficiente puede variar dependiendo de la marcha en la que circule. En este caso de estudio se ha eliminado la caja de cambio, por lo tanto la transmisión es directa y el coeficiente es considerado constante. La deducción del valor del coeficiente viene de las especificaciones del motor, que para una velocidad lineal del vehículo de 150km/h ($41,67\text{m/s}$) la velocidad angular es 6000rpm ($628,32\text{rad/s}$).

$$w_e = \frac{\gamma \cdot v(t)}{r_w},$$

donde w_e es la velocidad angular del motor. Con el radio de la rueda de $0,35\text{m}$ se obtiene el coeficiente de transmisión γ igual a $5,427$.

Sabiendo que la transmisión es directa, el par en el motor τ_m y la velocidad angular w_m se obtienen de las ecuaciones (3.7) y (3.8).

$$\tau_m(t) = \frac{\tau_w(t)}{\gamma} \quad (3.7)$$

$$w_m(t) = w_w(t) \cdot \gamma \quad (3.8)$$

3.2.3: Motor

El bloque “*Motor*” calcula la potencia necesaria para seguir el ciclo de conducción suministrado para dicho motor funcionando en los modos, generador en el caso del frenado regenerativo y motor de tracción en el resto del tiempo. La demanda de potencia es negativa en modo de generador y positiva en modo de tracción. La potencia del motor viene determinada por el par y la velocidad angular mediante la siguiente

ecuación:

$$P_e(t) = \tau_e(t) \cdot \omega_e(t)$$

Esta potencia P_e todavía no tiene en cuenta las pérdidas por generación o consumo de energía por el motor. Sin embargo el cálculo de la potencia total necesita considerarlas, por lo que se obtienen las pérdidas por el fabricante como:

$$\begin{cases} P_{perdidas}(t) = 0,016 \cdot \tau_e^2 + 8,2 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_e^{1,5} & \text{si } \omega_e > 210 \text{rad/s} \\ P_{perdidas}(t) = 4,05 \cdot 10^{-9} \cdot \tau_e^2 \cdot \omega_e^2 + 8,2 \cdot 10^{-3} \cdot \omega_e^{1,5} & \text{si } \omega_e \leq 210 \text{rad/s} \end{cases}$$

Luego la potencia total demandada por el motor viene determinada para el caso de tracción por la ecuación (3.9) y para el caso del generador por la ecuación (3.10), en la cual se considera un rendimiento más pequeño y constante igual a 0.8.

$$P_m(t) = P_e(t) + P_{perdidas}(t) \quad \text{si } P_e(t) \leq 0 \quad (3.9)$$

$$P_m(t) = P_e(t) \cdot \mu_g \quad \text{si } P_e(t) > 0 \quad (3.10)$$

donde μ_g es la eficiencia del motor para la generación y $P_{perdidas}$ es la potencia de pérdidas durante la operación del motor anteriormente calculada. Para validar el modelo del vehículo algunas simulaciones fueron hechas. En la figura (3.4) se muestran dos resultados para diferentes entradas. La gráfica superior es la respuesta a una velocidad constante de $30m/s$ y la gráfica inferior la respuesta a una variación de velocidad de 0 a $30m/s$.

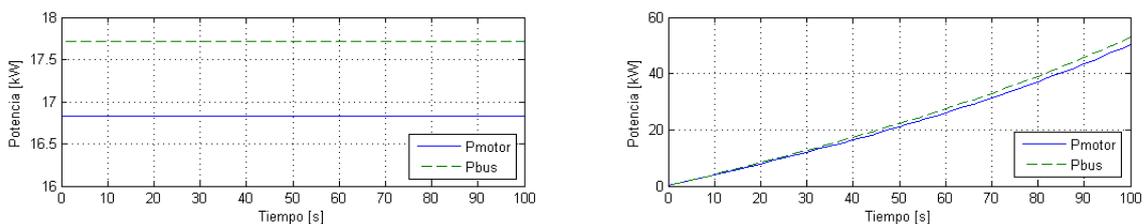


Figura 3.4: Potencia del motor para una respuesta a un escalón positivo y a una rampa

3.2.4: Acondicionamiento de la Potencia Eléctrica

En el “*Sistema de Acondicionamiento*” de la potencia eléctrica (último bloque de la figura (3.1)) mediante los convertidores electrónicos hay unas pérdidas de potencia debido a que los elementos de los circuitos no son ideales y tienen unas pérdidas

debidas al calentamiento, a la conmutación de los interruptores, etc... el modelo de estos sistemas de acondicionamiento va a considerarse como un simple rendimiento que se considera ser 0.95, representado por la siguiente ecuación:

$$P_{bus,DC} = \frac{P_m}{\mu_c}$$

La potencia demandada directamente a los sistemas de suministro de potencia es superior a la que demanda el motor pero con la misma forma que este, simplemente que está escalado.

3.3: Sistema de Gestión de Energía

Este submodelo calcula el balance de energía del vehículo para suministrar la demanda de potencia del motor eléctrico y para aprovechar la energía de frenado dada por el motor. El sistema de generación de energía es comprende el bloque de depósito de energía (baterías), el bloque de la pila de combustible y el bloque de la resistencia de frenado que están enseñados en la figura 3.5.

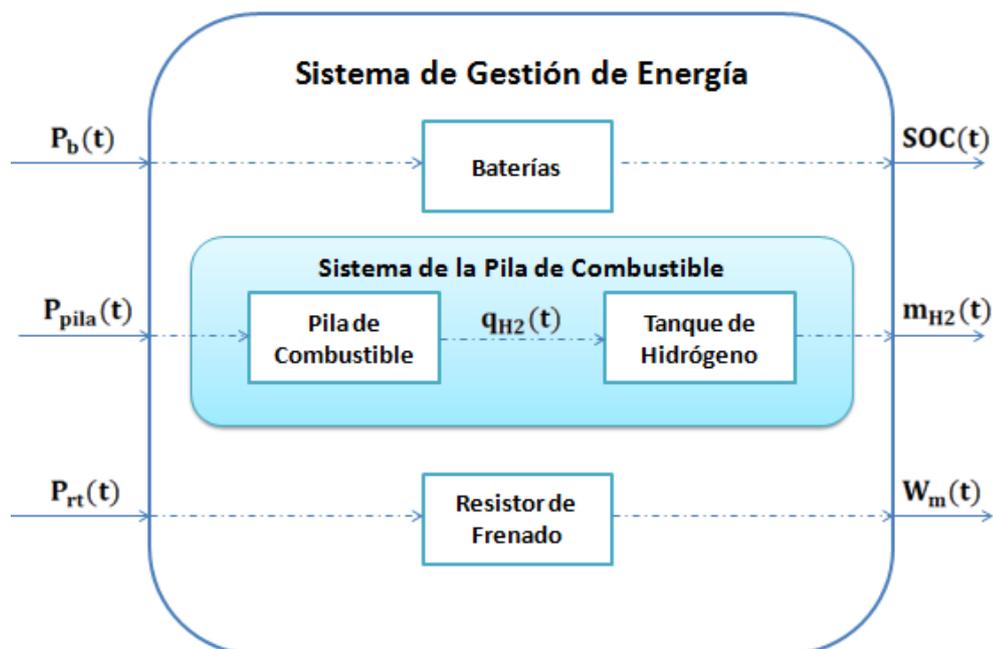


Figura 3.5: Esquema del sistema de generación de energía

3.3.1: Batería

Este bloque modela el rendimiento de una batería de ion-litio como un sistema de almacenamiento de energía, ESS (*Energy Storage System*). La potencia de entrada a la batería es positiva cuando es demandada al ESS y negativa cuando es suprida por el ESS. Su salida es el estado de carga, SOC (*State of Charge*). El SOC varía de 0 cuando las baterías están completamente descargadas a 1 cuando las baterías están completamente cargadas.

La corriente de carga o descarga, I_b , es calculada como:

$$I_b(t) = \frac{P_b(t)}{V_b(t) \cdot n_b},$$

donde P_b es la potencia de carga o descarga, V_b es la tensión de la batería y n_b es el número de baterías conectadas en serie, en este caso $n_b = 8$. Hay restricciones cuanto a la corriente en la batería, por lo que cuando en modo de carga la corriente máxima es $i_b = 220A$ y en modo de descarga es $i_b = 70A$. El SOC de la batería puede ser obtenido por la siguiente ecuación:

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{Q_b} \int_0^t \alpha(i_b(t)) \cdot \beta(T_b(t)) \cdot i_b(t) dt, \quad (3.11)$$

donde SOC_0 es el estado de carga inicial, α es el coeficiente que compensa la variación de la curva de carga debido a variaciones en la corriente, β es el coeficiente que compensa los efectos de la temperatura en la curva de descarga de la batería. Por fin, la temperatura de la batería es determinada por la siguiente expresión:

$$m_b \cdot c_p \cdot \frac{dT_b(t)}{dt} = i_b(t)^2 \cdot R_{b,1} + \frac{1}{R_{b,2}} (V_b(t) + E(t) + i_b(t) \cdot R_{b,1})^2 - h_c \cdot A_b \cdot (T_b(t) - T_a),$$

donde m_b es la masa de la batería, c_p es el calor específico de la batería, $R_{b,1}$ y $R_{b,2}$ son las resistencias internas de la batería, h_c es el coeficiente de transferencia de calor de la batería, A_b es el área activo, T_a la temperatura ambiente y $E(t)$ es el equilibrio potencial calculado por la ecuación:

$$E(t) = V_b(t) - R_b \cdot i_b(t),$$

donde R_b es la resistencia interna de la batería. Hay una relación entre SOC y tensión de la batería descrita por:

$$V_b(t) = n_b \cdot \sum_{k=0}^n c_k \cdot (1 - SOC^k(t)) + \lambda(T_b(t)) \quad (3.12)$$

Para simplificar el modelo se considera la temperatura constante y los coeficientes α y β de la ecuación (3.11) iguales a 1, por lo tanto el SOC se queda dependiente solamente de la integral de la corriente y de la capacidad y carga inicial de la batería. La ecuación (3.12) también puede ser generalizada mediante una curva de referencia de carga de la batería suministrada por el fabricante, presentada en la figura (2.3) del Capítulo 2.

Esta curva considera solo una batería, sin embargo para el cálculo de la corriente es necesario que se multiplique la tensión por el número de baterías (n_b) que están conectadas en serie. Por fin, se llega al esquema de la figura (3.6) para la representación del comportamiento de la batería.

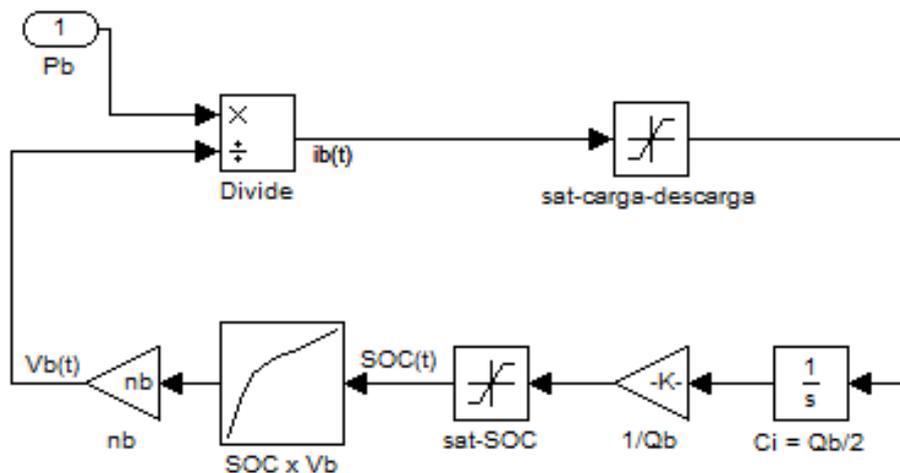


Figura 3.6: Esquema en Simulink del modelo de la batería

3.3.2: Pila de Combustible

El modelo de la pila de combustible es quasi-estático, pues no se consideran las dinámicas internas de la pila. Por ello la pila es caracterizada por una curva de polarización, obtenida del fabricante, que relaciona la intensidad demandada a la pila y la tensión. Por otro lado el control supervisor contiene informaciones de la cantidad de hidrógeno consumida e intenta minimizarla con diferentes estrategias. Se supone

que hay un controlador que controla la pila perfectamente y que funciona en cualquier punto de operación.

La entrada a este modelo es la potencia demandada a la pila y la salida es el consumo de hidrógeno. Este modelo tiene 2 bloques de ecuaciones que relacionan estas variables. El primer bloque modela el sistema de la pila de combustible y el segundo el sistema del tanque de hidrógeno. La potencia suministrada por la pila, $P_{pila,s}$, puede ser obtenida de:

$$P_{pila,s} = \frac{P_{pila,d}}{1 + 0,2s},$$

donde $P_{pila,d}$ es la potencia demandada a la pila de combustible por el controlador y la constante de tiempo es igual a 0,2. Este valor fue elegido para minimizar la tasa de degradación de la pila.

$$i_{pila} = \frac{P_{pila,s}(t)}{v_{pila}(t - 1)} \quad (3.13)$$

$$v_{pila}(t) = f(i_{pila}) \quad (3.14)$$

Las ecuaciones (3.13) y (3.14) representan la pila de combustible, donde i_{pila} es la intensidad de corriente demandada a la pila, v_{pila} es el voltaje suministrado por la pila y la función f es la curva de polarización que se presenta en la figura (2.2), la cual relaciona la corriente y la tensión. El consumo de hidrógeno es representado por la siguiente ecuación:

$$q_{H_2}(t) = m_{H_2} \cdot n \cdot \frac{i_{pila}(t)}{2 \cdot F},$$

donde $q_{H_2}(t)$ es la masa del hidrógeno consumido por la pila, m_{H_2} es la masa molar de hidrógeno³ en kg, n es el número de celdas⁴ y F es la constante de Faraday⁵.

3.3.3: Depósito de Hidrógeno

El sistema no puede consumir más hidrógeno de lo que hay en el depósito de hidrógeno, luego es importante cuantificar la cantidad de hidrógeno que se consume y la que queda en el tanque para hacer la correcta restricción física. El valor máximo de hidrógeno que se puede almacenar depende de las dimensiones del tanque, en este

³1g/mol

⁴La pila contiene 256 celdas

⁵96485C/mol

caso 2, $4kg$. La ecuación que modela el depósito es la siguiente:

$$m_{H_2, \text{tanque}}(t) = m_{H_2, \text{tanque}}^0 - \int_0^t q_{H_2}(s) ds,$$

donde $m_{H_2, \text{tanque}}(t)$ es la cantidad de hidrógeno que queda en el depósito en kg en el instante t y $m_{H_2, \text{tanque}}^0$ es la cantidad de hidrógeno que hay al inicio de la conducción en el tanque expresado también en kg .

3.3.4: Resistencia de Carga

El bloque de la resistencia de carga calcula la energía total disipada durante la carga de la batería. Su entrada es la potencia excedente de carga y su salida es la energía total disipada. La energía disipada, W_{dis} , es obtenida por:

$$W_{dis}(t) = \int_0^t P_{rc}(s) ds, \quad (3.15)$$

donde P_{rc} es la potencia de la resistencia de carga.

4 Validación del Modelo

En este capítulo los resultados de las simulaciones del modelo propuesto son presentados y discutidos para su validación. Se muestran los resultados para referencias de velocidad de los dos ciclos de conducción presentados anteriormente. La inclinación de la pista es considerada constante y igual a cero, en otras palabras, la pista es considerada perfectamente plana en todas las simulaciones. También hay simulaciones para la batería con diferentes corrientes para validación del modelo con los datos del fabricante.

4.1: Comportamiento del Sistema

Varias simulaciones fueron hechas para identificar el comportamiento del sistema y validar el modelo. Fueron consideradas diferentes referencias de velocidad (constante, rampas crecientes y decrecientes) y potencia de la pila (constantes y crecientes).

Dada la condición inicial de la pila de combustible (masa de hidrógeno inicial en el tanque) y la potencia que va a suministrar, además de la condición inicial del SOC de la batería y la referencia de velocidad para el vehículo (ciclo de conducción) es posible identificar el comportamiento del sistema.

A partir del perfil de velocidad se obtiene la potencia necesaria para que el motor pueda alcanzarlo. Un balance de potencias es hecho, ecuación (4.1), con la potencia demandada por el motor y la potencia suministrada por la pila de combustible para descubrir cuál la potencia que todavía la batería hay que suministrar. Esta ecuación todavía no contiene las informaciones de pérdidas de eficiencia debido a la presencia del bus.

$$P_b = P_m - P_{pila} \quad (4.1)$$

Cuando la potencia de balance es positiva quiere decir que la potencia del motor es más grande que la potencia suministrada por la pila. Por lo tanto la batería debe descargarse hasta que el balance de fuerzas sea cero (pila y batería consiguen suministrar la potencia del motor). Por otro lado si el balance de fuerzas es negativo la batería pasa a cargarse, pues hay un exceso de potencia, sea por la pila o por un frenado regenerativo del motor.

4.2: Resultados de las Simulaciones

En la figura (4.1) se muestran el par y la potencia demandada por el motor para seguir los distintos ciclos de conducción estudiados. Se puede observar que el caso de la conducción en ciudad (izquierda de la figura), la demanda de potencia por el motor es más fluctuante que en caso de la circulación en autopista (derecha de la figura).

Dada una potencia a la pila constante de $10kW$ se obtienen los resultados de la

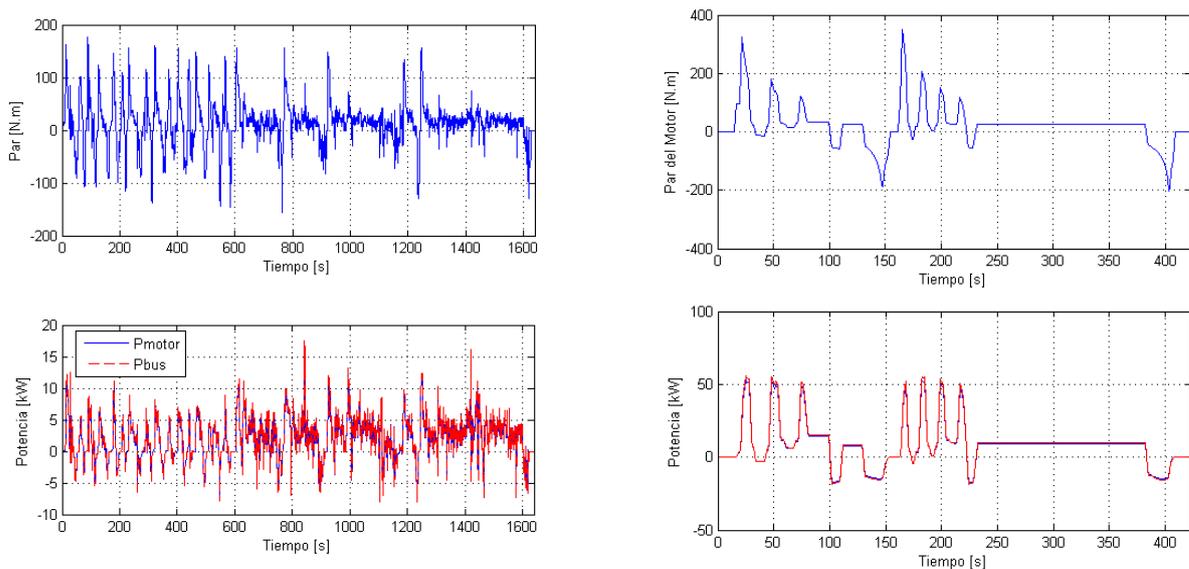


Figura 4.1: Par y potencia del motor para los dos ciclos de conducción

figura (4.2). En los dos casos se puede ver que el consumo de hidrógeno es constante, la masa de hidrógeno consumida aumenta y la masa restante en el tanque disminuye.

Como la pila de combustible es iniciada con una potencia que todavía no es utilizada por el motor, en los dos casos de ciclo de conducción (figura (4.3)), el balance de potencias empieza con valores negativos y luego que el motor pide más potencia y la pila no suministra lo suficiente para atender a la demanda, el balance se torna positivo. En el caso de la ciudad (izquierda), hay más variaciones en el balance de

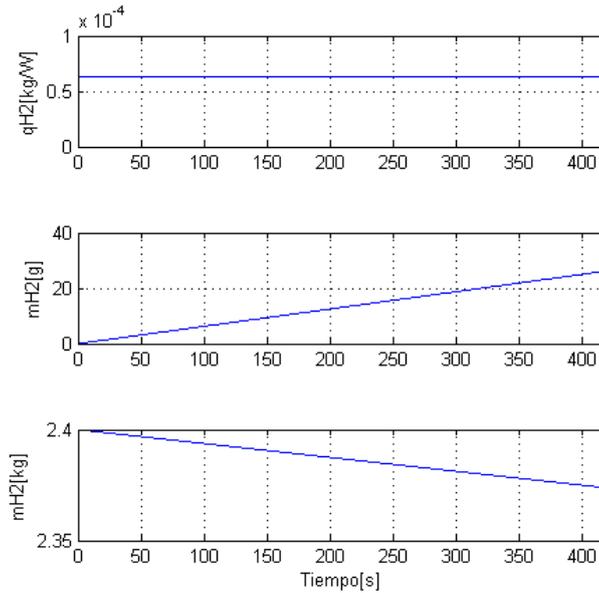


Figura 4.2: Salidas de la pila para potencia de 10kW

potencias, lo que afectará también la batería.

En las baterías, figura (4.4), se puede ver que la carga y descarga es depen-

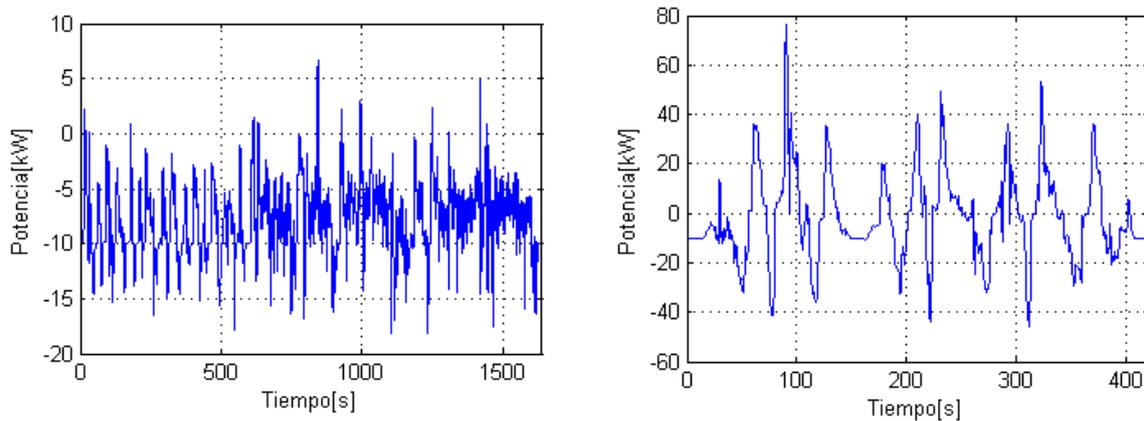


Figura 4.3: Balances de potencias

diente de la corriente que llega. Si el balance de potencias es positivo, la demanda del motor es más grande que la potencia suministrada por la pila, la corriente de la batería es positiva y ocurre una descarga, disminuyendo el SOC. Por otro lado, si el balance de potencias es negativo, la corriente que pasa por la batería es negativa y el SOC aumenta. El SOC para la ciudad aumenta más que el SOC para la autopista pues los constantes frenados generarán mucha potencia para cargar la batería. La tensión enseñada en las gráficas es del conjunto de las 8 baterías.

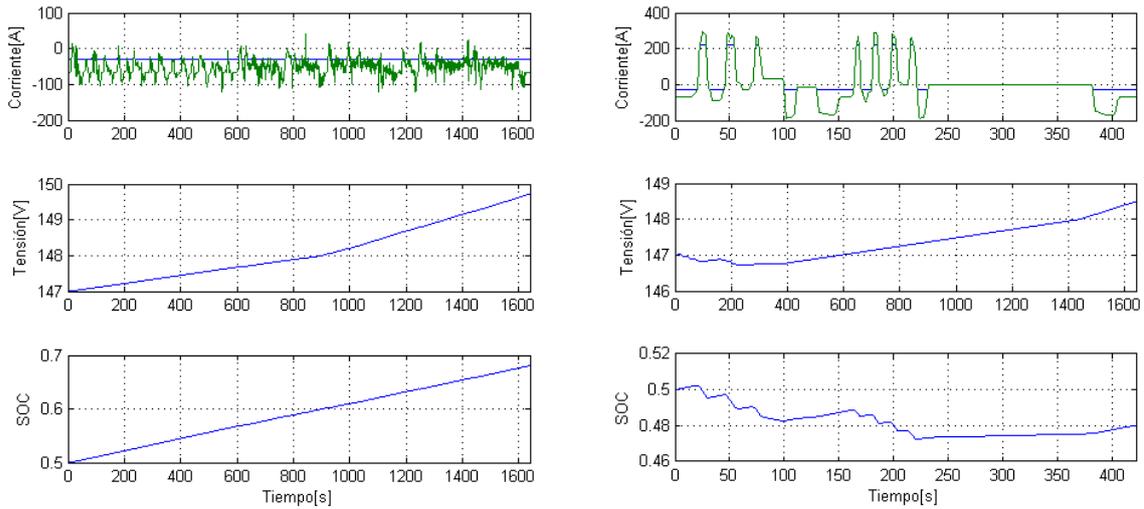


Figura 4.4: Cargas y descargas de la batería

La carga de la batería es limitada a corrientes de $30A$, como se puede ver en la figura (4.4). El resto de la corriente no aprovechada es disipada por una resistencia, lo que resulta en las energías disipadas de la figura (4.5). En una ciudad hay más frenados y la corriente de carga de la batería está casi siempre en su límite, por esto la potencia disipada es más grande que en una autopista.

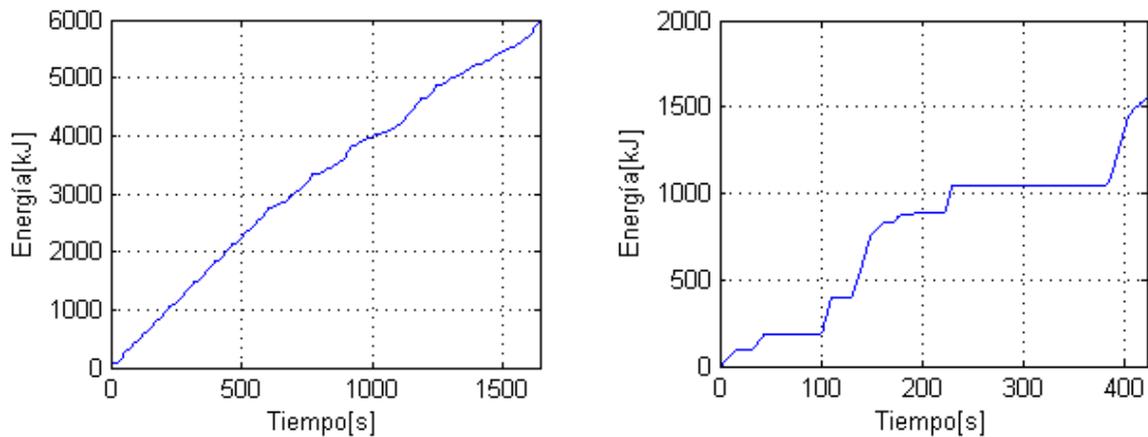


Figura 4.5: Energías disipadas

5 Gestión de Energía

El principal objetivo de un Sistema de Gestión de Energía (SGE) en un vehículo basado en pilas de combustible es mejorar su eficiencia a través de la reducción del consumo de hidrógeno durante un ciclo de conducción. Este capítulo muestra los controladores desarrollados para la gestión de energía del coche. Las dos primeras estrategias implementadas son basadas en reglas heurísticas provenientes del conocimiento de la performance de los componentes del sistema. Estas estrategias son útiles para la comparación con otras estrategias basadas en alguna técnica de optimización.

En este trabajo, son presentadas cuatro técnicas de gestión de energía para vehículos basados en pilas de combustible, todas hechas en Matlab/Simulink. Las estrategias heurísticas tienen en cuenta el conocimiento de un mapa de eficiencia de la pila de combustible. También se han desarrollado un control basado en programación no lineal con restricciones y un control avanzado basado en un modelo lineal, también con restricciones. En las próximas secciones se presentarán las estrategias de control, todos los parámetros utilizados se encuentran descritos en las tablas (5.1) y (5.2).

5.1: Objetivos de los SGEs en un Vehículo Híbrido

El mapa de consumo de hidrógeno de una pila de combustible muestra claramente una zona, abajo de una potencia límite, donde el consumo de hidrógeno es muy alto mientras en la zona abajo de esta potencia límite el consumo es significativamente bajo, como se puede ver en la figura (5.1). Esta curva fue obtenida del modelo del programa *Advisor*, comentado anteriormente, y puede ser aproximada por una razón de polinomios de la siguiente manera:

$$y(x) = \frac{p_1x^2 + p_2x + p_3}{x + q_1}, \quad (5.1)$$

donde y representa el consumo, x la potencia y los valores de los parámetros son $p_1 = 4,554 \cdot 10^{-7}$, $p_2 = 0,03351$, $p_3 = 170,1$ y $q_1 = 527,8$. La incertidumbre de la aproximación es dada por los siguientes parámetros:

- Límite de confianza: 95 %;
- Suma de cuadrados de los errores (*SSE*): 0.0005221;
- Coeficiente de determinación (*R-square*): 0.9905;
- Coeficiente de determinación ajustado al grado de libertad (*Adjusted R-square*): 0.987;
- Raíz del error cuadrático medio (error estándar) (*RMSE*): 0.008078;

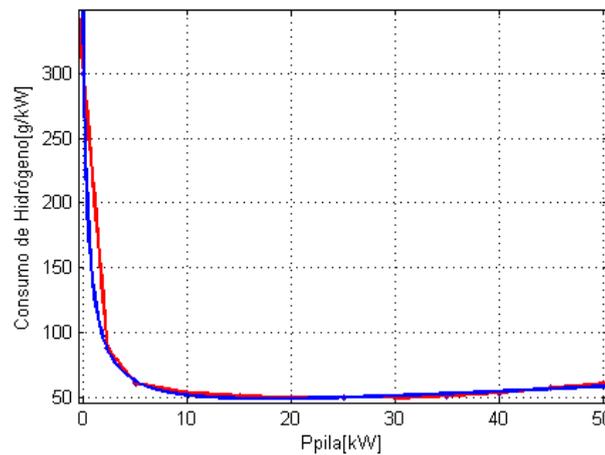


Figura 5.1: Mapa de consumo de hidrogeno

El principal objetivo de un sistema de gestión de energía es minimizar una función costo J , una expresión matemática que representa el consumo de hidrógeno acumulado durante el tiempo:

$$\min_X J(X) \quad \text{sujeto a } H(X) = 0 \quad \text{y } G(X) \leq 0, \quad (5.2)$$

donde el vector X es

$$X = \begin{bmatrix} P_{pila}(k) \\ P_b(k) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Esto significa que el SGE tiene que determinar el valor óptimo del sistema de potencia de la pila de combustible, $P_{pila}(t)$, y del sistema de almacenamiento de energía,

$P_b(t)$, a fin de minimizar la función costo $J(X)$

$$J(X) = \sum_{k=0}^{N_c} F(X(k))\Delta T, \quad (5.4)$$

donde $N_c = t_c/\Delta T$ es la duración del ciclo de conducción, asumiendo un período de muestreo constante $\Delta T = 1s$, y $F(X(k))$ es el mapa de consumo de hidrógeno del sistema de la pila de combustible dado por:

$$F(X(k)) = Cons_{H_2}(P_{pila}(k)) \quad (5.5)$$

La restricción $H(X) = 0$ de (5.2) significa que a cada instante de tiempo la potencia de carga en el bus DC debe ser satisfecha por la potencia de la pila y/o de la batería:

$$P_{pila}(k)\eta_B + P_b(k)\eta_{B/B}\eta_{bat} = P_{carga}(k) \quad k = 0, 1, \dots, N_c, \quad (5.6)$$

donde los coeficientes η_B , $\eta_{B/B}$ y η_{bat} son asumidos constantes.

Por otro lado, la restricción $G(X) \leq 0$ de 5.2 contiene las restricciones de las potencias de la pila y de la batería para todo k

$$P_{pila,min} \leq P_{pila}(k) \leq P_{pila,max} \quad (5.7)$$

$$\Delta P_{pila,tasa\ caida} \leq \frac{dP_{pila}(k)}{dt} \leq \Delta P_{pila,tasa\ subida} \quad (5.8)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(k) \leq SOC_{max} \quad (5.9)$$

La inecuación 5.7 contiene las restricciones de la potencia de la pila. La potencia máxima es limitada por la potencia nominal de la pila, mientras el mínimo comando de potencia de la pila debe ser limitado por un valor más bajo, cuya operación no es posible debido a la carga parasitaria muy grande, lo que reduce la potencia del sistema de la red.

Hay un fenómeno de retraso entre el inicio de la carga en el sistema de la pila y la respuesta del sistema de suministro de reactivo lo cual puede llevar a una falta de reactantes en la pila. Esto debe ser evitado restringiendo la dinámica requerida por la carga. Por lo tanto, se incrementa la potencia de la pila no más rápido que una cierta tasa de aumento de potencia ($\Delta P_{pila,tasa\ subida}$). Además, se propone que la potencia del sistema de la pila no baja más que una cierta tasa de caída de potencia ($\Delta P_{tasa\ caida}$) para evitar la sobrepresión en la pila. Las dos situaciones pueden ser administradas utilizando la batería como un búfer de potencias. Estas restricciones están formuladas en (5.8). La potencia máxima de la pila puede ser suministrada o almace-

nada dependiendo de la carga actual de la batería.

El comportamiento en el tiempo del sistema de la pila es condicionado por la dinámica del compresor y de relleno. Además de la minimización de J , otro importante objetivo del SGE es superar este inconveniente a través de una estrategia adecuada de gestión de energía. La estrategia consiste en: si a potencia solicitada a la pila excede una determinada tasa de elevación, entonces la tasa de elevación de potencia que la pila efectivamente suministra es limitada y el resto de la potencia es suministrada por la batería, si es posible de acuerdo con el valor actual del SOC(k). Si, por otro lado, la potencia solicitada a la pila excede la tasa máxima de caída, entonces la tasa de caída efectiva es limitada y la potencia excedente es absorbida por la batería si hay capacidad de almacenamiento.

5.2: Estrategias Heurísticas

Una de las características más importantes de un sistema de pilas de combustible es el mapa de eficiencia (figura (5.1)), una gráfica que muestra como la eficiencia cambia con la potencia. Se supone que el punto de operación del sistema de la pila es controlado y, portanto, los parámetros externos como la temperatura ambiente no tienen influencia sobre el mapa. Las estrategias aquí propuestas son de carácter comparativo entre los sistemas no lineal y lineal y para la estrategia de control avanzado. Su desarrollo se propone en [11] teniendo en cuenta un otro modelo con baterías y pila distintas. Los resultados suelen ser diferentes cuando estrategias específicas son aplicadas a otros modelos, lo que se puede observar en los resultados obtenidos.

5.2.1: Primera Estrategia

La primera estrategia propuesta es una estrategia de *quasi-load-following* donde el sistema de la pila es operado en una zona ventajosa donde la eficiencia es alta. En este caso, la zona de operación es limitada entre una potencia inferior ($P_{pila,baja}$) y una superior ($P_{pila,alta}$). El límite superior es impuesto por la potencia máxima que la pila puede suministrar (i.e., $P_{pila,alta} = P_{pila,max}$), mientras el límite inferior es determinado de acuerdo con la curva de eficiencia. Como mencionado antes, la eficiencia de una pila en bajas potencias es muy pobre debido a la potencia parasitaria. Debido al límite inferior, el Sistema de Gestión de Energía evita esta zona desfavorable.

Este SGE da prioridad para el suministro de potencia de la pila una vez que

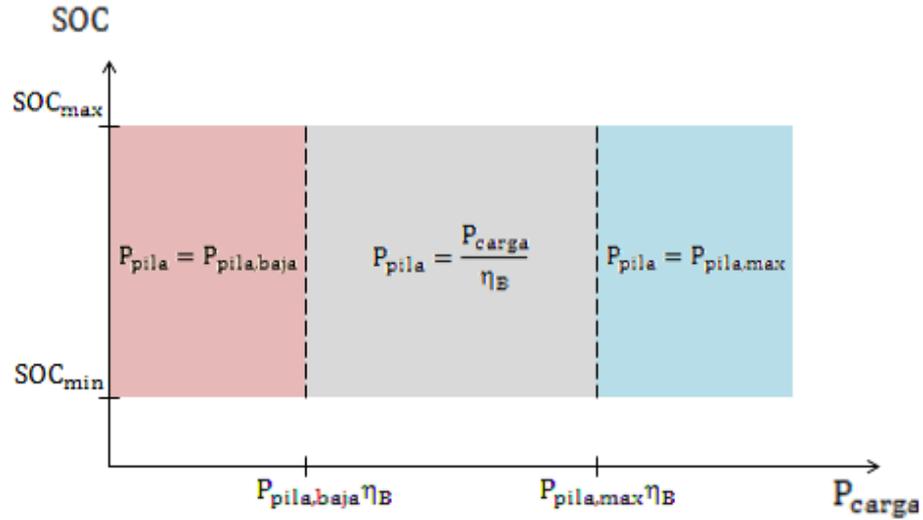


Figura 5.2: Puntos de operación del sistema de la pila para la primera estrategia

la pila es la fuente principal de suministro de potencia y el flujo de potencia directo al bus DC a través del convertidor de potencia de la pila tiene menos pérdidas que de la manera indirecta a través del convertidor de potencia de la batería, del sistema de la batería por sí mismo y de nuevo por el bus DC a través del convertidor de potencia de suministro de la carga. Así, dada la potencia actual $P_{carga}(k)$, si:

$$P_{pila,baja}\eta_B \leq P_{carga}(k) \leq P_{pila,max}\eta_B \quad (5.10)$$

y

$$\Delta P_{pila,tasa\ caida} \leq \Delta P_{carga}(k) \leq \Delta P_{pila,tasa\ subida}, \quad (5.11)$$

donde

$$\Delta P_{carga}(k) = P_{carga}(k) - P_{carga}(k-1) \quad (5.12)$$

entonces, el sistema de la pila opera en modo casi-seguimiento:

$$P_{pila} = \frac{P_{carga}(k)}{\eta_B} \quad (5.13)$$

Si, al revés

$$P_{carga}(k) \leq P_{pila,baja}\eta_B \quad (5.14)$$

entonces

$$P_{pila}(k) = P_{pila,baja} \quad (5.15)$$

y la batería almacena el resto de la potencia generada si no está muy cargada. Por otro lado, si la batería está completamente cargada, entonces $P_{pila}(k) = 0$. Reciproca-

mente, si

$$P_{carga}(k) \geq P_{pila,alta}\eta_B \quad (5.16)$$

entonces

$$P_{pila}(k) = P_{pila,max} \quad (5.17)$$

y la batería suministra el resto de la potencia de carga si hay energía suficiente en el sistema.

En todos los casos la potencia demandada en la batería es calculada como:

$$P_b = \frac{P_{carga} - P_{pila}\eta_B}{\eta_{BB}\eta_{ess}}, \quad (5.18)$$

donde η_{BB} , η_B son las eficiencias de los convertidores del bus y η_{ess} es la eficiencia del sistema de almacenamiento de energía.

En la figura (5.2) se indican los puntos de operación como función del $SOC(k)$ y de la potencia de carga $P_{carga}(k)$. Sin embargo, la transición entre los puntos de operación es limitada por las tasas máximas. Así, se tiene que:

$$P_{pila}(k) = \begin{cases} P_{pila}(k-1) + \Delta P_{pila,tasa\ caida}\Delta T, & \text{si } \Delta P_{pila}(k) \leq \Delta P_{pila,tasa\ caida} \\ P_{pila}(k-1) + \Delta P_{pila,tasa\ subida}\Delta T, & \text{si } \Delta P_{pila}(k) \geq \Delta P_{pila,tasa\ subida} \end{cases}$$

donde $\Delta P_{pila} = P_{pila}(k) - P_{pila}(k-1)$, con $P_{pila}(k)$ como calculada en (5.13), (5.15) o (5.17), de acuerdo con sus condiciones. La potencia $P_b(k)$ es calculada como en (5.18).

5.2.2: Segunda Estrategia

Esta segunda estrategia también es basada en el mapa de eficiencia de la pila y el sistema de la pila opera en sus puntos de máxima eficiencia para mejorar la economía de hidrogeno, aunque el punto de operación final de la pila es basado en la actual demanda de potencia y en el estado de carga de la pila. El comando de potencia de la pila es determinado de acuerdo con las siguientes reglas. La figura (5.3) indica los puntos de operación como función del $SOC(k)$ y de la potencia de carga $P_{carga}(k)$. Si la potencia de carga es

$$P_{pila,baja}\eta_B \leq P_{carga}(k) \leq P_{pila,alta}\eta_B \quad (5.19)$$

y el estado de carga

$$SOC_{bajo} \leq SOC(k) \leq SOC_{alto} \quad (5.20)$$

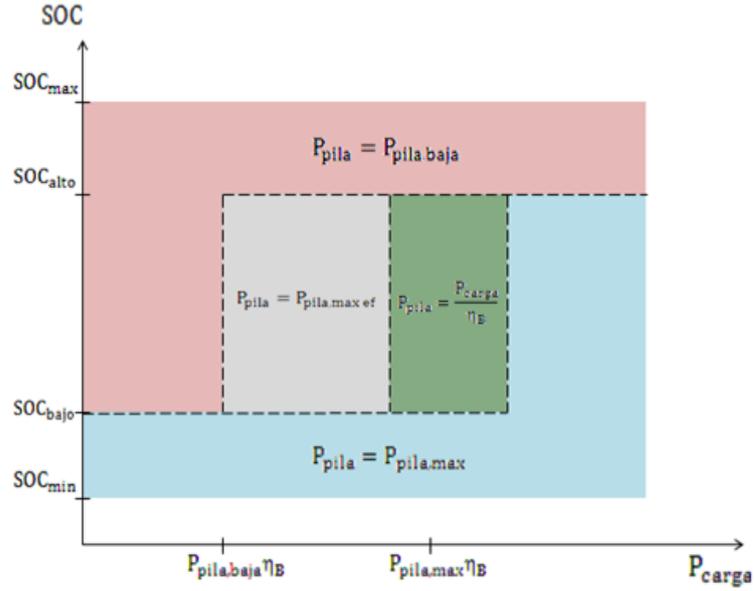


Figura 5.3: Puntos de operación del sistema de la pila para la segunda estrategia

entonces el sistema opera en su punto de máxima eficiencia

$$P_{pila}(k) = P_{pila,max\,ef} \quad (5.21)$$

La potencia para alcanzar la demanda de la carga viene de la batería si $P_{carga}(k) > P_{pila,max\,ef}$ (modo de descarga) o va para ella si $P_{carga}(k) < P_{pila,max\,ef}$ (modo de carga).

Si la potencia de carga es

$$P_{pila,alta}\eta_B \leq P_{carga}(k) \leq P_{pila,max}\eta_B \quad (5.22)$$

y el SOC es

$$SOC_{bajo} \leq SOC(k) \leq SOC_{alto} \quad (5.23)$$

entonces el sistema de la pila opera en su modo de seguimiento de la carga

$$P_{pila}(k) = \frac{P_{carga}(k)}{\eta_B} \quad (5.24)$$

Por otro lado, si

$$P_{carga}(k) \geq P_{pila,max}\eta_B \text{ y } SOC(k) \leq SOC_{alto} \quad (5.25)$$

o

$$SOC(k) \leq SOC_{bajo} \quad (5.26)$$

entonces la pila opera con su potencia máxima

$$P_{pila}(k) = P_{pila,max} \quad (5.27)$$

Si, al revés

$$P_{carga}(k) \leq P_{pila,baja}\eta_B \text{ y } SOC(k) \geq SOC_{bajo} \quad (5.28)$$

o

$$SOC(k) \geq SOC_{alto} \quad (5.29)$$

entonces la pila opera en su punto de operación más bajo

$$P_{pila}(k) = P_{pila,baja} \quad (5.30)$$

En todos los casos la potencia de la batería es calculada como (5.18). De la misma manera que en la primera estrategia, la transición entre los puntos de operación es realizada de acuerdo con las restricciones de mínima tasa de caída y máxima tasa de subida como enseñado en la subsección (5.2.1).

5.3: Estrategia Basada en Programación no Lineal

En esta estrategia, un problema de optimización con restricciones es resuelto a cada período de muestreo ΔT donde una función costo no lineal, que representa el consumo de hidrógeno, es minimizada. Dada la ecuación 5.2, donde la función costo $J(X)$ representa el consumo de hidrógeno de la pila en cada período de muestreo (5.5) y el $ConsH_2(P_{pila}(k))$ es el consumo de hidrógeno, modelado en kg/Wh , como función de la $P_{pila}(k)$. Esta relación proviene del mapa de consumo (5.1).

Las restricciones $H(X) = 0$ representan el balance de potencias en el bus DC como en 5.6 y las restricciones $G(X) \leq 0$ representan las limitaciones en $P_{pila}(k)$ y P_b . La potencia de la pila es limitada por un valor máximo y mínimo y por una tasa de subida y caída:

$$P_{pila,max}(k) = \max[P_{pila,alta}; P_{pila}(k-1) + \Delta P_{pila,tasa\ caida}\Delta T] \quad (5.31)$$

$$P_{pila,min}(k) = \min[P_{pila,baja}; P_{pila}(k-1) + \Delta P_{pila,tasa\ subida}\Delta T] \quad (5.32)$$

Por otro lado, $P_b(k)$ es limitada por un valor máximo y un mínimo que corresponden a los límites físicos de la batería:

$$P_{bmin} \leq P_b(k) \leq P_{bmax} \quad (5.33)$$

Todos los parámetros utilizados en las dos estrategias heurísticas y en la estrategia basada en programación no lineal se encuentran en las tablas (5.1) y (5.2).

Cuadro 5.1: Parámetros de los componentes utilizados en las estrategias

Parámetros	Símbolos	Valores
Máxima potencia de la pila	$P_{pila,max}$	15000W
Potencia de máxima eficiencia de la pila	$P_{pila,max\ ef}$	6000W
Máxima tasa de caída de la pila	$\Delta P_{pila,tasa\ caída}$	$-1000W s^{-1}$
Máxima tasa de subida de la pila	$\Delta P_{pila,tasa\ subida}$	$4000W s^{-1}$
Eficiencia del convertidor <i>Buck/Boost</i>	η_B	0,95
Eficiencia del sistema de almacenamiento de energía	η_{BB}	0,95
Eficiencia del convertidor <i>Boost</i>	η_{ess}	0,99
Límite inferior del estado de carga	SOC_{bajo}	0,3
Límite superior del estado de carga	SOC_{alto}	0,9
Estado de carga mínimo	SOC_{min}	0,2
Estado de carga máximo	SOC_{max}	1
Potencia máxima de la batería	P_{bmax}	24000W
Potencia mínima de la batería	P_{bmin}	-4700W

Cuadro 5.2: Parámetros $P_{pila,baja}$ y $P_{pila,alta}$ utilizados en las estrategias

Estrategía de gestión de energía	$P_{pila,baja}$ [W]	$P_{pila,alta}$ [W]
Primera estrategia heurística	1000	15000
Segunda estrategia heurística	1000	12000
Estrategía basada en programación no lineal	2000	15000

5.4: Resultados de las Simulaciones

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con las simulaciones de los controladores heurísticos y del control basado en programación no lineal. El estado de carga de la batería (SOC) es adoptado como 0.5 en todas las simulaciones para que haya un compromiso entre poder almacenar la mayor cantidad posible de carga cuando haya un frenado y poder suministrar la potencia necesaria para atender a picos de demanda del motor. La estrategia óptima presentada considera una pila *on/off*, que trabaja con su máxima eficiencia cuando la batería tiene SOC más bajo que 0.5 y se apaga cuando la batería está cargada más que la mitad.

Se puede observar en la figura (5.4) que el consumo de hidrógeno varía según la estrategia empleada y el ciclo de conducción. Se ha creado la estrategia óptima ya comentada anteriormente como base de comparación con las otras estrategias.

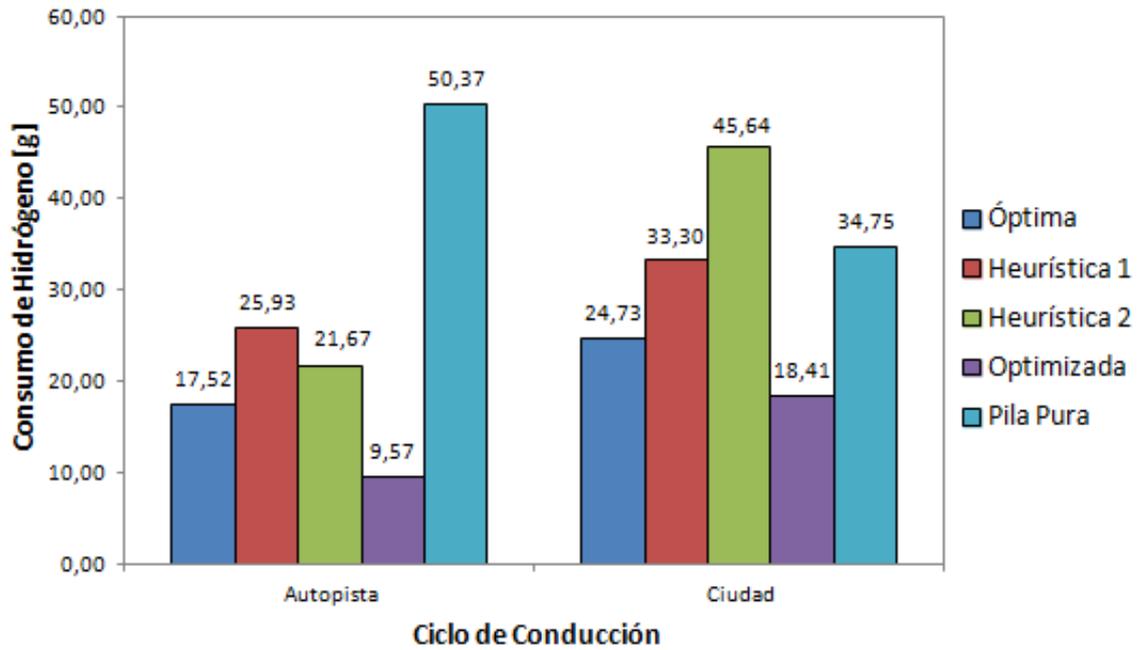


Figura 5.4: Resultados de las simulaciones con las estrategias propuestas

También se muestran los resultados de simulación para la utilización de una pila de combustible pura, o sea, un vehículo sin hibridación. Conviene destacar que esta estrategia no es empleable porque no consigue suministrar toda la demanda de potencia en ciclos de conducción con muchas variaciones de aceleración. Esto es debido a las restricciones de variación de la potencia de la pila. Su única utilidad es simular el peor caso de consumo de hidrógeno. Se puede ver que todas las estrategias empleadas son razonables en relación al consumo de hidrógeno, pues no poseen valores muy diferentes de la estrategia óptima y son mucho más eficientes que un vehículo sin batería.

Para el caso del ciclo de conducción en autopista, donde no hay muchas variaciones de aceleración, todas las estrategias presentan mejores resultados que un vehículo sin hibridación donde el funcionamiento depende solamente de la pila de combustible. La heurística 2 es mejor que la heurística 1 pues utiliza mejor la batería en los casos de picos de demanda de potencia.

Por otro lado, para el ciclo de conducción en ciudad la estrategia heurística 1 es mejor que la heurística 2, esto se debe a las variaciones bruscas de aceleración presentes en ciclos como este. Aunque el consumo de hidrógeno de la estrategia heurística 2 sea más grande que de la pila pura, se presenta más eficiente pues consigue suministrar toda la demanda de potencia sin que haya un consumo mucho más elevado.

En los dos casos, la mejor estrategia es la basada en programación no lineal que busca el menor consumo de hidrógeno a través de algoritmos de optimización basado en el mapa de consumo (5.1). Se puede ver que es todavía mejor que la estrategia óptima, ya que busca las regiones de mayor eficiencia y no llega a apagar la pila. La idea es evitar el funcionamiento en regiones con baja potencia, pues estas son las de mayor consumo de hidrógeno.

En las gráficas superiores de las figuras (5.5), (5.7) y (5.9) se presentan las salidas y sus referencias de potencia del motor para las estrategias empleadas en un ciclo de conducción en autopista. Todos los casos han conseguido seguir la referencia. La diferencia entre las salidas y referencias es debido a la limitación física de la batería, lo que se traduce en disipaciones de potencia enseñadas en las gráficas inferiores de cada figura. Esta disipación es más pequeña para la estrategia de programación no lineal una vez que hubo menos saturaciones de la corriente de carga de la batería. Observase también que la potencia suministrada es más grande que la demanda pues lleva en cuenta las pérdidas de potencia debido a las eficiencias del bus y sistema de almacenamiento.

Las figuras (5.6), (5.8) y (5.10) presentan las consignas de las pilas y baterías,

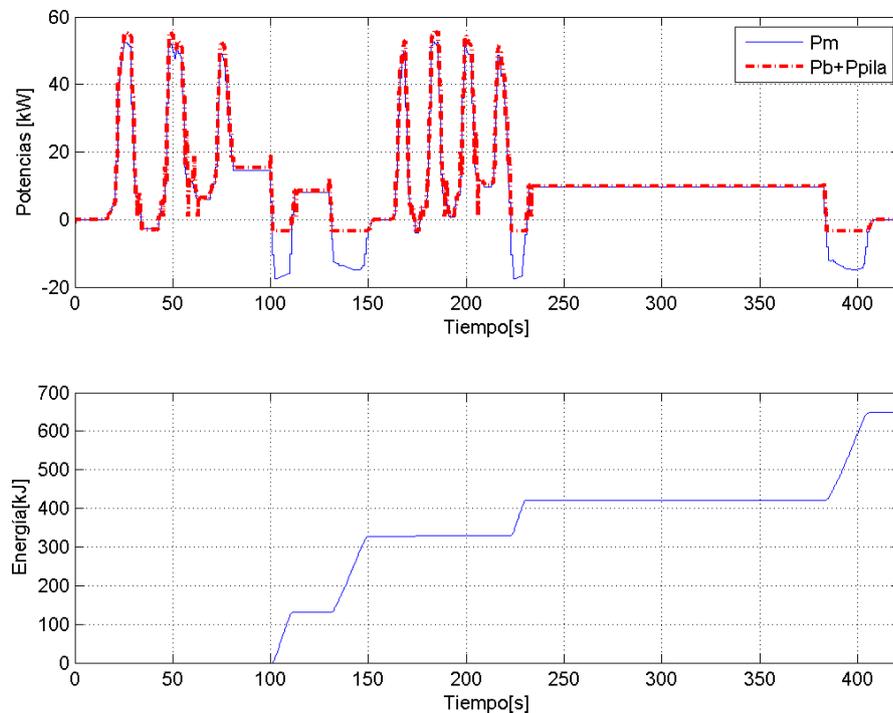


Figura 5.5: Seguimiento de referencia y energía disipada con la estrategia heurística 1

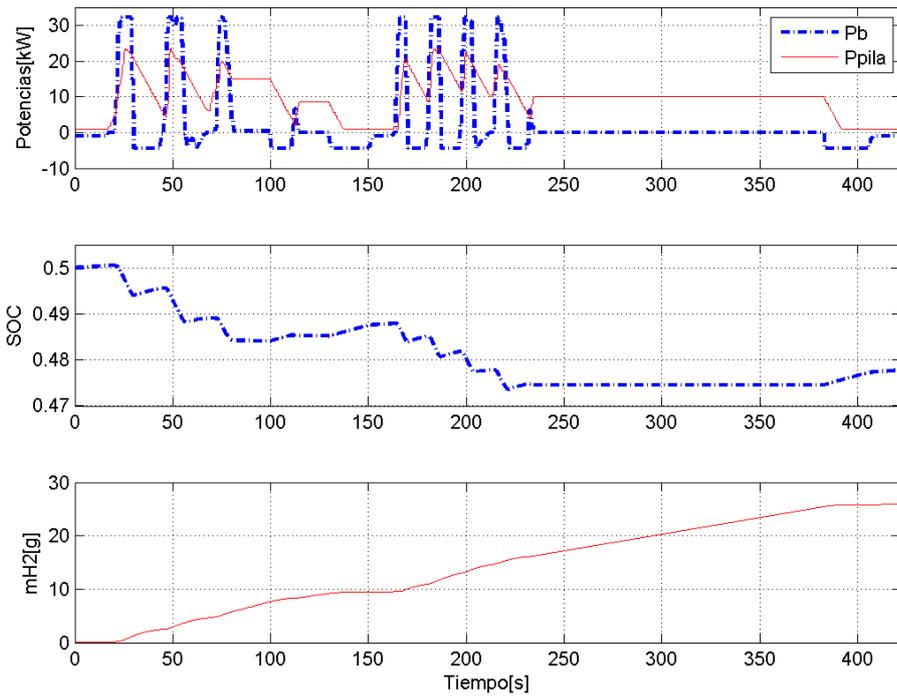


Figura 5.6: Resultados obtenidos con la estrategia heurística 1

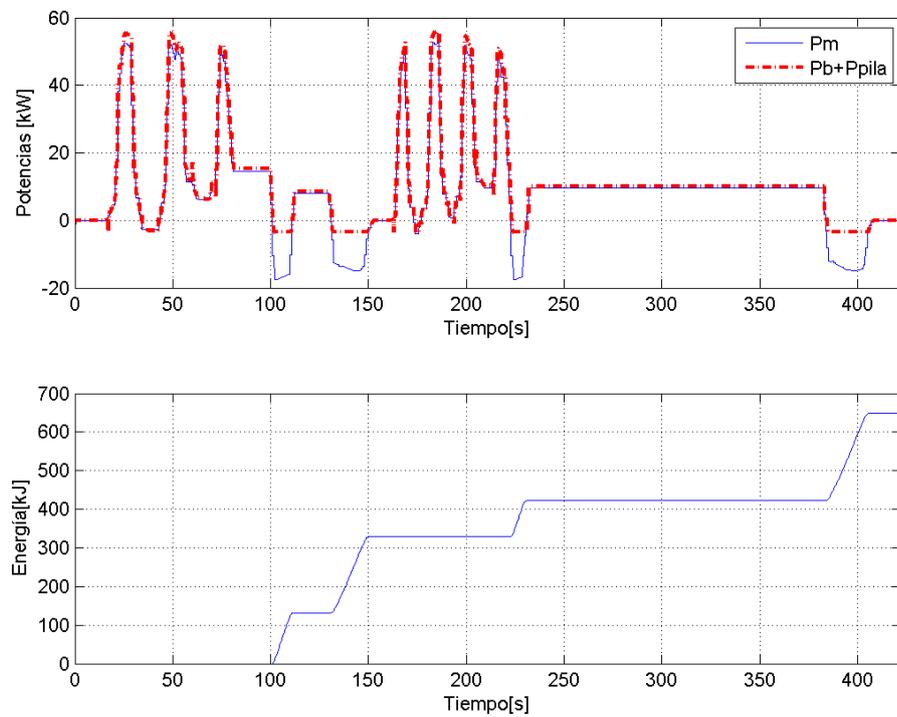


Figura 5.7: Seguimiento de referencia y energía disipada con la estrategia heurística 2

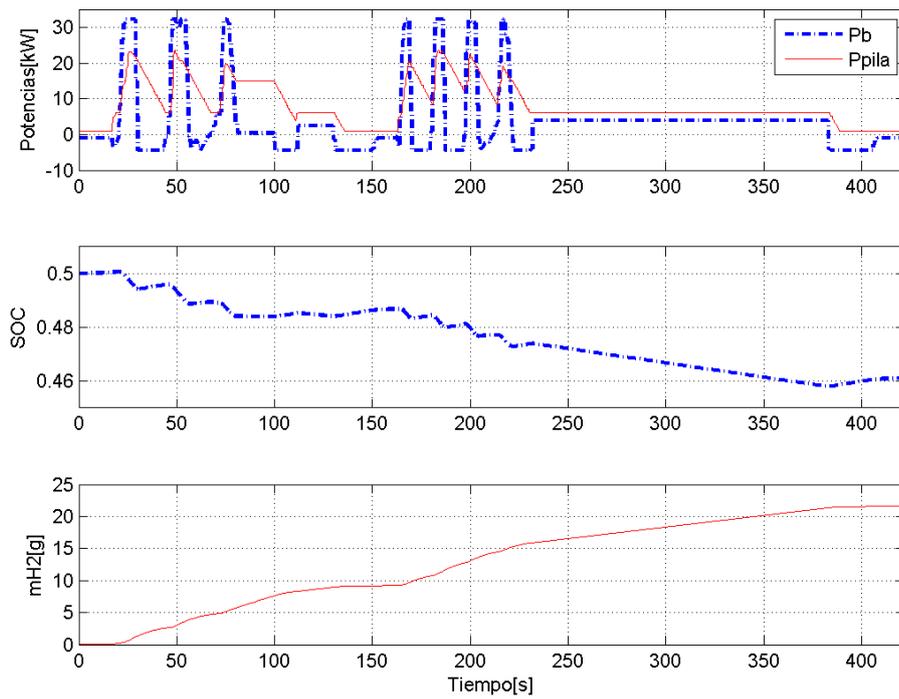


Figura 5.8: Resultados obtenidos con la estrategia 2

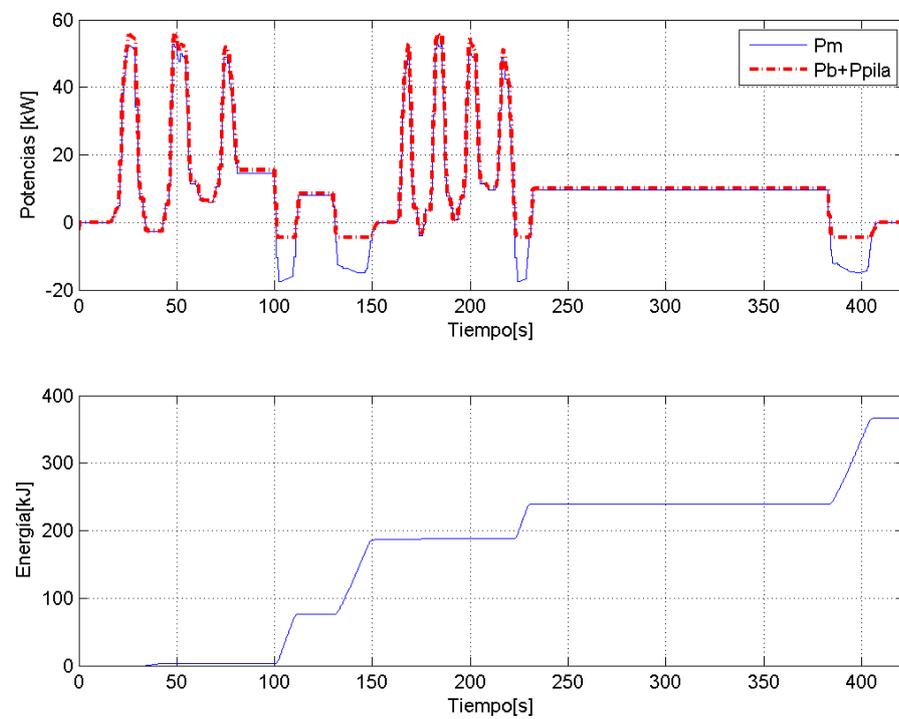


Figura 5.9: Seguimiento de referencia con la estrategia optimizada

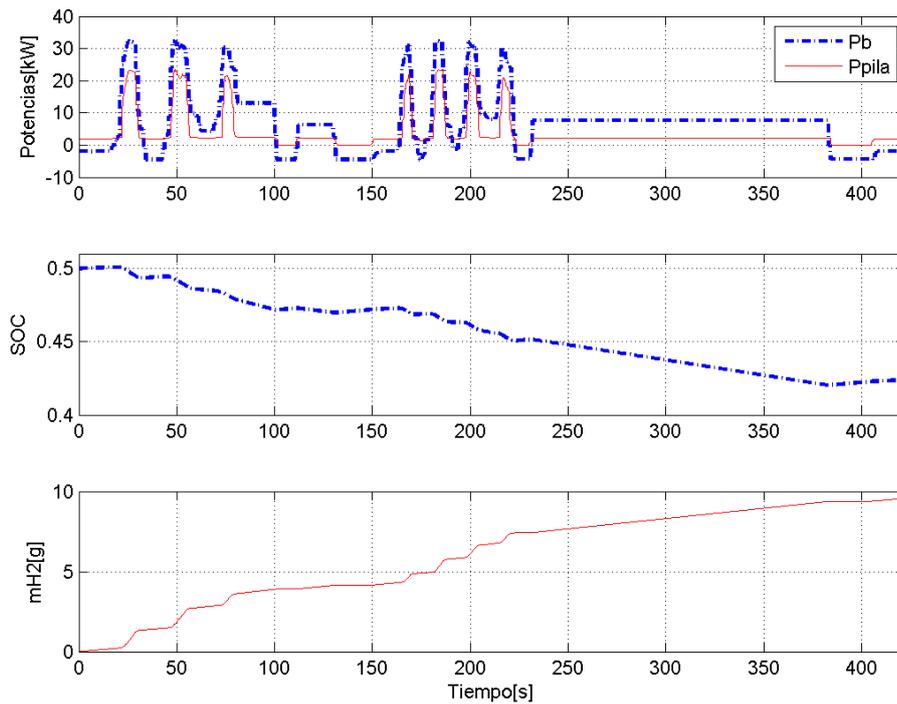


Figura 5.10: Resultados obtenidos con la estrategia optimizada

el estado de carga de la batería y el consumo de hidrógeno de la pila para cada caso. Se puede ver la diferencia de descarga de la batería y de consumo de hidrógeno de acuerdo con la estrategia empleada. Las restricciones de variación de la pila son más evidentes en las estrategias heurísticas una vez que la estrategia de optimización intenta conseguir un compromiso entre estas restricciones, seguimiento de referencia y minimización del consumo de hidrógeno.

Se observa que la pila suministra parte de la demanda del motor, pues atiende a sus restricciones de variación. La batería suministra la potencia restante y cuando no es posible debido a sus limitaciones, la pila hace un esfuerzo mayor que sus restricciones de variación suministrando lo que excede la capacidad de la batería.

Se concluye que, a través de la aplicación de estas estrategias, se puede hacer un control simple basado en reglas heurísticas y se obtienen resultados razonables de manera rápida y sencilla. Solo es necesario definir reglas que sean coherentes con las características del modelo.

5.5: Modelo Lineal del Sistema

Este modelo tiene por objetivo servir como base para la modelización híbrida y posterior aplicación del control MPC híbrido. Los subsistemas del vehículo y del frenado regenerativo fueron removidos de esta simplificación pues son necesarios solamente para el cálculo de la potencia demandada por el motor para alcanzar el ciclo de conducción deseado. Esta potencia es una de las referencias de los controles como se enseña en la secciones 5.6 y 5.7.2.

Desde aquí, el modelo lineal consiste en los submodelos de la batería y de la pila de combustible (Secciones (3.3.1) y (3.3.2), que fueron simplificados y linealizados. Las entradas del modelo son las demandas de potencia a la batería y a la pila y las salidas son el estado de carga (SOC), el consumo de hidrógeno y la potencia suministrada al motor. Las entradas y salidas son modeladas por potencia en lugar de corriente, una vez que la topología del vehículo contiene convertidores DC/DC. La linearización en términos de potencia es más complicada debido a las ecuaciones altamente no lineales de potencia de la batería. Luego, hay una linearización para cada punto de operación lo que resulta en un modelo descrito por trozos de sistemas afines.

La linearización del sistema de la pila de combustible considera la curva de polarización y la curva de consumo de hidrógeno correspondiente. Las ecuaciones lineales resultantes son:

$$P_{pila,s} = \frac{P_{pila,d}}{1 + 0,2s} \quad (5.34)$$

$$\frac{dm_{H_2}(t)}{dt} = 0,605 \cdot 10^{-5} P_{pila,s}(t), \quad (5.35)$$

Con respecto a la linearización del sistema de la batería, las dinámicas térmicas son despreciadas y se obtiene un modelo afin definido a tramos para los diferentes puntos de operación en modos de carga y descarga. Las ecuaciones lineales listadas abajo consideran todas las ocho baterías conectadas en serie. Hay dos métodos posibles para cargarse baterías de Litio-Ion. En aplicaciones automotivas las cargas suelen consumir la máxima potencia del frenado regenerativo rapidamente, así el método corriente-constante/voltaje-constante fue escogido. Este método mantiene la corriente de carga constante hasta que la batería llegue a 80 % de carga que es su límite

máximo de carga. Las ecuaciones del modelo de las baterías son:

$$I_b(t) = \begin{cases} 6,812 \cdot P_b(t) - 0,00464 \cdot V_b(t) & \text{si } P_b(t) < 0,5 \\ 6,824 + 6,812 \cdot P_b(t) - 0,0464 \cdot V_b(t) & \text{si } 0,5 \leq P_b(t) < 5 \\ 68,244 + 6,812 \cdot P_b(t) - 0,4645 \cdot V_b(t) & \text{si } P_b(t) \geq 5 \end{cases} \quad (5.36)$$

$$V_b(t) = \begin{cases} 154,9 - 6,914 \cdot 10^{-5} \cdot \int_0^t I_b(t) dt & \text{si } 0 \leq P_b(t) \\ -4,695 + 0,485376 \cdot SOC(t) & \text{si } P_b(t) < 0 \end{cases} \quad (5.37)$$

$$SOC(t) = 1 - 3,9124 \cdot 10^{-6} \cdot \int_0^t I_b(t) dt \quad (5.38)$$

donde los límites de la potencia de la batería están en kW .

Para validar la exactitud de la aproximación lineal se han hecho simulaciones en *Simulink/Matlab*, donde las salidas lineales y no lineales están comparadas en la figura (5.11). Los modelos fueron simulados con las mismas condiciones iniciales y las salidas fueron generadas por el control heurístico que se describe en la sección (5.2). La referencia de velocidad del modelo es el ciclo de conducción de la autopista. Se puede ver que los resultados son muy parecidos y que la linearización describe bien el comportamiento del sistema no lineal.

5.6: Estrategia Heurística Híbrida

En esta sección se presenta la estrategia que mezcla un modelo híbrido del sistema con un control heurístico. Como ya comentado anteriormente, los sistemas híbridos pueden ser modelados como un conjunto de ecuaciones diferenciales y pueden presentar entradas binarias y/o restricciones discontinuas. Hay muchos tipos de representaciones, sin embargo las más buscadas son las MLD y PWA.

El método elegido para la representación híbrida del modelo es el MLD y el lenguaje para su descripción es el *HYbrid System Description Language* (HYSDEL), cuya información se ha obtenido del manual [17]. El modelo del control híbrido es discreto y el período de muestreo es definido de acuerdo con el tiempo de respuesta del sistema.

En este caso, modelo y control son representados juntos. La entrada del modelo es la potencia de referencia del motor y las salidas son las potencias que la batería

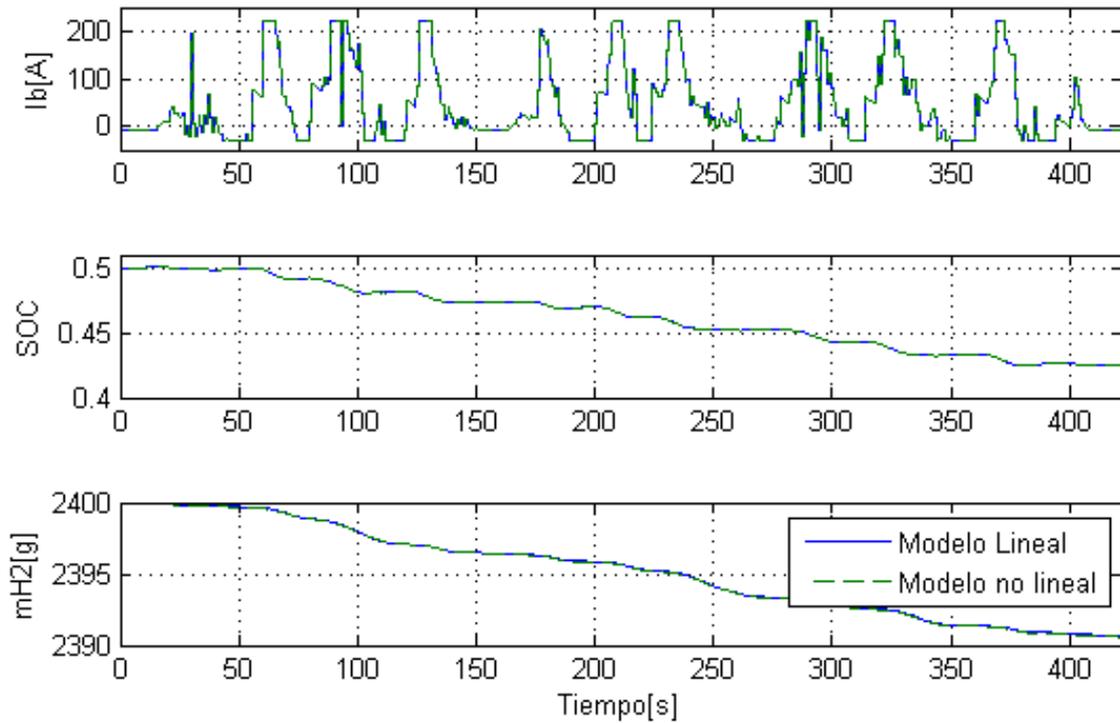


Figura 5.11: Comparación de los modelos lineal y no lineal

y la pila deben suministrar. Las condiciones de operación del sistema, referentes a la potencia demandada por el motor y a la potencia de la batería, son descritas por restricciones discontinuas. El período de muestreo es de $1s$, que es el mismo utilizado en las simulaciones en *Simulink/ Matlab*.

La estrategia heurística propuesta es similar a la primera estrategia empleada en la subsección (5.2.1). La diferencia es que las restricciones de variación de la potencia de la carga (demanda) y de la potencia de la pila (suministro) no están incluidas. Como el objetivo es validar el modelo lineal híbrido propuesto no hay grandes problemas y para elevar la eficiencia del control, las restricciones serán añadidas al modelo de control avanzado que es el principal objetivo de esta modelización. El concepto de la modelización híbrida esta representado en la figura (5.12) y cada uno de los componentes es un módulo y serán explicados en las próximas subsecciones.

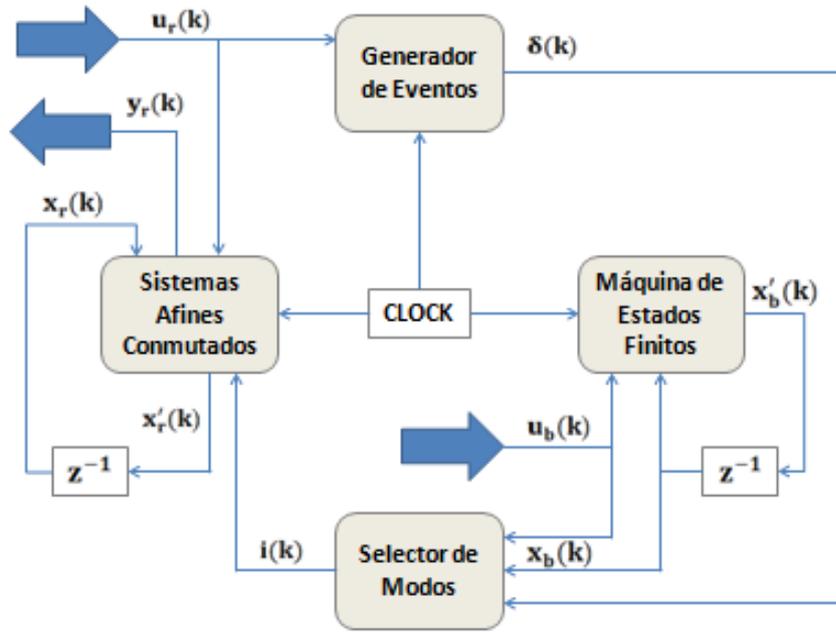


Figura 5.12: Concepto de la modelización híbrida

5.6.1: Sistemas Afines Conmutados

Como descrito en [20], un sistema afín conmutado es una colección de sistemas lineales afines:

$$\begin{aligned} x_r(k+1) &= A_{i(k)}x_r(k) + B_{i(k)}u_r(k) + f_{i(k)} \\ y_r(k) &= C_{i(k)}x_r(k), \end{aligned} \quad (5.39)$$

donde $k \in \mathbb{Z}^+$ es el indicador de tiempo, $u_r \in \mathfrak{U}_r \subseteq \mathbb{R}^{n_r}$ es el vector de entradas continuas externas, $x_r \in \mathfrak{X}_r \subseteq \mathbb{R}^{n_r}$ es el vector de estados continuos, $y_r \in \mathfrak{Y}_r \subseteq \mathbb{R}^{p_r}$ es el vector de estados continuos, $\{A_i, B_i, f_i, C_i\}_{i \in \mathfrak{I}}$ es una colección de matrices de dimensiones adecuadas, y el modo $i(k) \in \mathfrak{I}$ es una señal de entrada que determina la dinámica de actualización de los estados.

Sean $x_r(k) = [P_{pila}(k) \ P_b(k) \ q_{H_2}(k) \ SOC(k) \ I_b(k)]^T$, $u_r(k) = [P_m(k)]^T$ y $y_r(k) = [P_{pila}(k) \ P_b(k) \ q_{H_2}(k) \ SOC(k)]^T$. Las matrices $A_i(k)$, $B_i(k)$, $C_i(k)$ y $f_i(k)$ para cada región de operación de la planta están enseñadas luego abajo. Los parámetros de esta representación del sistema cambian de acuerdo con la conmutación de modos y se encuentran en el apéndice A en las tablas A.2, A.3 y A.4.

$$A_i(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{31} & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -3,9124 \cdot 10^{-6} T_s \\ 0 & a_{52} & 0 & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix}$$

$$B_i(k) = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C_i(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad f_i(k) = \begin{bmatrix} f_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_5 \end{bmatrix}$$

5.6.2: Generador de Eventos

Un generador de eventos es un objeto matemático que genera una señal lógica de acuerdo con la restricción lineal afin que debe ser satisfecha [20].

$$\delta(k) = f_H(x_r(k), u_r(k), k) \quad (5.40)$$

donde $f_H : \mathbb{R}^{n_r} \times \mathbb{R}^{m_r} \times \mathbb{Z}_{\geq 0} \rightarrow \mathfrak{D} \subseteq \{0, 1\}^{n_e}$ es un vector de funciones descriptivas de un hiperplano lineal, y $\mathbb{Z}_{\geq 0} = 0, 1, \dots$ es un conjunto de enteros no negativos. En particular, eventos de tiempo son modelizados como $[\delta_i(k) = 1] \leftrightarrow [a^T x_r(k) + b^T u_r(k) \leq c]$ donde el carácter sobrescrito i denota el i -ésimo componente del vector.

El modelo híbrido lineal propuesto para aplicación de la estrategia de control heurística tiene dos grupos de eventos. El primer grupo corresponde a la demanda de potencia del motor que se traducirá en la elección de suministro de potencia, por pila o por batería.

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 1 \text{ si } P_m \geq P_{pila,baja}\eta_B \text{ si no } 0 \\ \delta_2 &= 1 \text{ si } P_m \leq P_{pila,max}\eta_B \text{ si no } 0 \\ \delta_3 &= 1 \text{ si } P_m \geq P_{pila,alta}\eta_B \text{ si no } 0 \end{aligned}$$

El segundo grupo de eventos corresponde a los modos de operación de la batería. Según la potencia de la batería, la corriente sigue la región de linearización como

descripto en la subsección (5.5).

$$\begin{aligned}\delta_4 &= 1 \text{ si } P_b \geq 0 \text{ si no } 0 \\ \delta_5 &= 1 \text{ si } P_b \geq 500 \text{ si no } 0 \\ \delta_6 &= 1 \text{ si } P_b \geq 5000 \text{ si no } 0 \\ \delta_7 &= 1 \text{ si } P_b \geq 28000 \text{ si no } 0 \\ \delta_8 &= 1 \text{ si } P_b \leq -4700 \text{ si no } 0\end{aligned}$$

donde los eventos δ_4 , δ_5 y δ_6 corresponden a la linearización de la batería y los eventos δ_7 y δ_8 representan los límites de la corriente de descarga (220A) y carga (-30A) de la batería, respectivamente.

5.6.3: Máquina de Estados Finitos

De acuerdo con [20], una máquina de estados finitos (o automata) es un proceso dinámico discreto que evoluciona en función de una función lógica de actualización de estados:

$$x'_b(k) = f_B(x_b(k), u_b(k), \delta(k)), \quad (5.41)$$

donde $x_b \in X_b \subseteq \{0, 1\}^{n_b}$ es el estado booleano, $u_b \in U_b \subseteq \{0, 1\}^{m_b}$ es la entrada externa proveniente del generador de eventos, en este caso es nula, y $f_B : X_b \times U_b \times D \rightarrow X_b$ es una función lógica determinística.

En particular, este modelo de control híbrido no tiene estados booleanos definidos, por lo que los estados son correspondientes a las regiones de operación del modelo lineal. La elección del modo de operación es función del selector de modos.

5.6.4: Selector de modos

La lógica de elección del modo de operación $i(k)$ de los sistemas afines conmutados [20] depende del estado lógico $x_b(k)$, de las entradas booleanas $u_b(k)$ y de los eventos $\delta(k)$ a través de la función booleana: $f_m : \mathfrak{X}_b \times \mathfrak{U} \times \mathfrak{D} \rightarrow \mathfrak{I}$, que es llamada de selector de modos. La salida de esta función,

$$i(k) = f_M(x_b(k), u_b(k), \delta(k)), \quad (5.42)$$

es llamada de modo activo. Una conmutación ocurre en el instante k si $i(k) \neq i(k-1)$. En este ajuste de tiempo discreto, una conmutación de modos solamente ocurre en

instantes de muestreo, al revés del caso de sistemas híbridos de tiempo continuo.

Como no hay entradas ni estados booleanos en este modelo, la selección del modo de este sistema ocurre a través de los 8 eventos descritos en (5.6.2). Las expresiones lógicas que combina los eventos están descritas en el apéndice A, tabla (A.1). Para la construcción de esta tabla, se ha escogido el siguiente método de combinación de los eventos:

Cuadro 5.3: Método de combinación de los eventos

I_b/P_{pila}	P_{pila_1}	P_{pila_2}	P_{pila_3}
I_{b_1}	i_1	i_2	i_3
I_{b_2}	i_4	i_5	i_6
I_{b_3}	i_7	i_8	i_9
I_{b_4}	i_{10}	i_{11}	i_{12}
I_{b_5}	i_{13}	i_{14}	i_{15}
I_{b_6}	i_{16}	i_{17}	i_{18}

Las tres potencias de la pila de combustible y las seis corrientes de la batería son correspondientes a:

$$P_{pila_1} : P_{pila,baja} \leq P_m \leq P_{pila,max}$$

$$P_{pila_2} : P_m \leq P_{pila,baja}$$

$$P_{pila_3} : P_m \geq P_{pila,alta}$$

$$I_{b_1} : -4700 < P_b < 0$$

$$I_{b_2} : 0 \leq P_b < 500$$

$$I_{b_3} : 500 \leq P_b < 5000$$

$$I_{b_4} : P_b \geq 5000$$

$$I_{b_5} : P_b \geq 28000$$

$$I_{b_6} : P_b \leq -4700$$

donde las potencias de la pila siguen las condiciones heurísticas de la estrategia de la subsección (5.2.1), las cuatro primeras corrientes son correspondientes a la linearización del sistema y las dos últimas a las limitaciones físicas de la batería. Por lo tanto hay 18 modos posibles en que o sistema puede operar.

5.6.5: Comparación de los Sistemas No Lineal y Lineal Híbrido

En esta subsección se presentan y se comentan los resultados de la comparación entre el sistema no lineal y el sistema lineal híbrido tras la aplicación de la estrategia heurística 1 de la subsección (5.2.1) sin restricciones de variación. La

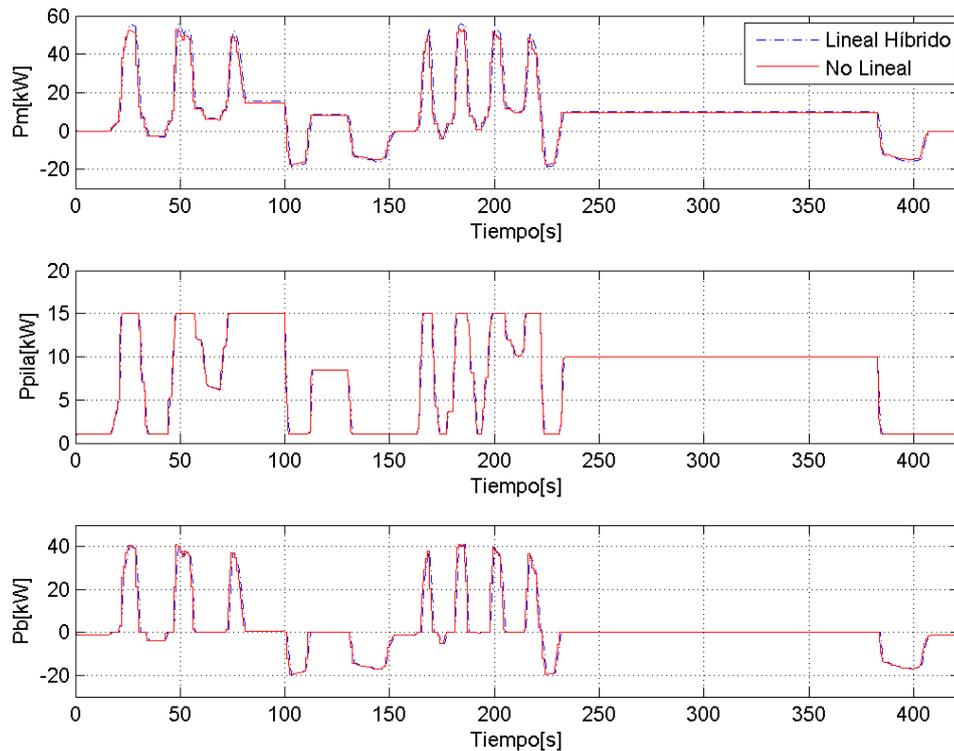


Figura 5.13: Potencias obtenidas con el modelo no lineal y lineal híbrido

figura (5.13) presenta los resultados de suministro de potencia al motor. La gráfica superior presenta las salidas de los sistemas no lineal y lineal híbrido y las dos gráficas inferiores las consignas de las potencias de la pila y de la batería. La figura (5.14) enseña la comparación del comportamiento de los sistemas lineales y no lineales de la batería y del tanque de hidrógeno. Como el estado de carga (SOC) es dependiente de la corriente de la batería, presenta un error de modelado similar a esta. A su vez, el consumo de hidrógeno es un modelo independiente y su aproximación lineal tiene un error más elevado que de la batería. Aún así, los resultados son buenos y se puede utilizar este modelo para el cálculo del control MLD/MPC.

En las figuras (5.15), (5.16) y (5.17) se enseñan las evoluciones de los eventos en el tiempo. Se puede ver la conmutación de los eventos, lo que se traduce en la

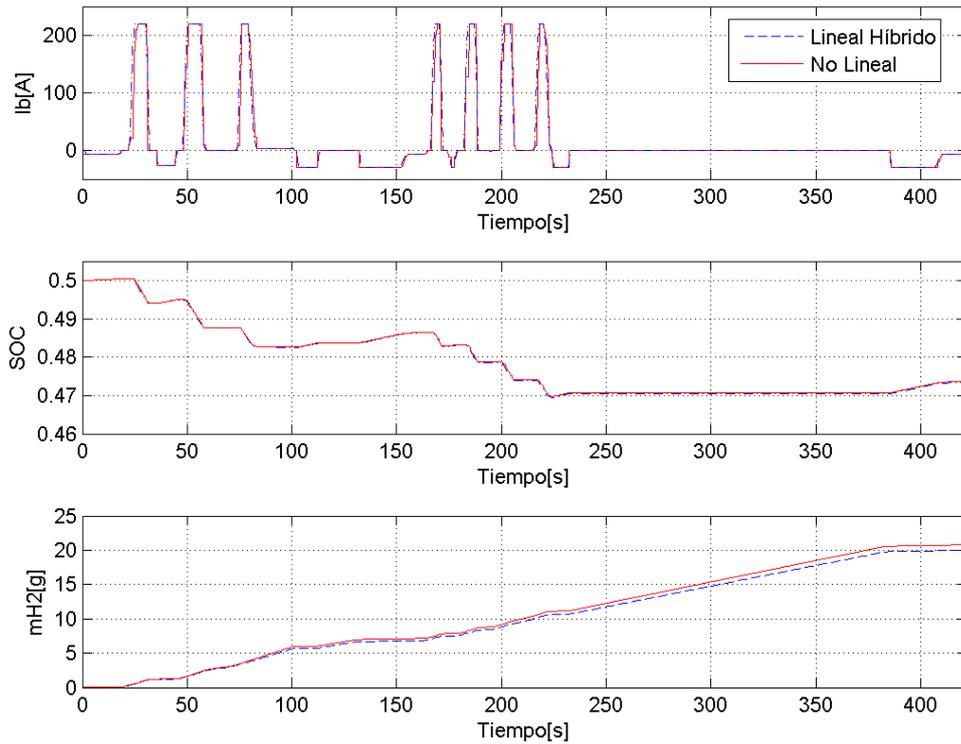


Figura 5.14: Corriente y SOC de la batería y consumo de hidrógeno obtenidos con el modelo no lineal y lineal híbrido

elección de una o otra región de operación del sistema (modo de operación 5.6.4). Los eventos de la figura (5.15) corresponden a la elección de las consignas de potencias de la pila y batería, que son las reglas heurísticas propuestas en 5.2.1. Los eventos de la figura (5.16) dicen a respecto de la linearización del sistema y los eventos de la figura (5.17) traducen los límites de corriente de carga y descarga de la batería.

Se puede ver que utilizándose la descripción textual *Hysdel* es posible obtener un modelo lineal híbrido con un comportamiento muy próximo del modelo no lineal. Esto será útil para el planteamiento del control avanzado, cuando se define la función de costo con los pesos necesarios para que el control envíe señales capaces de hacer con que el sistema siga la referencia respetando las restricciones. Este control será explicado en la próxima sección.

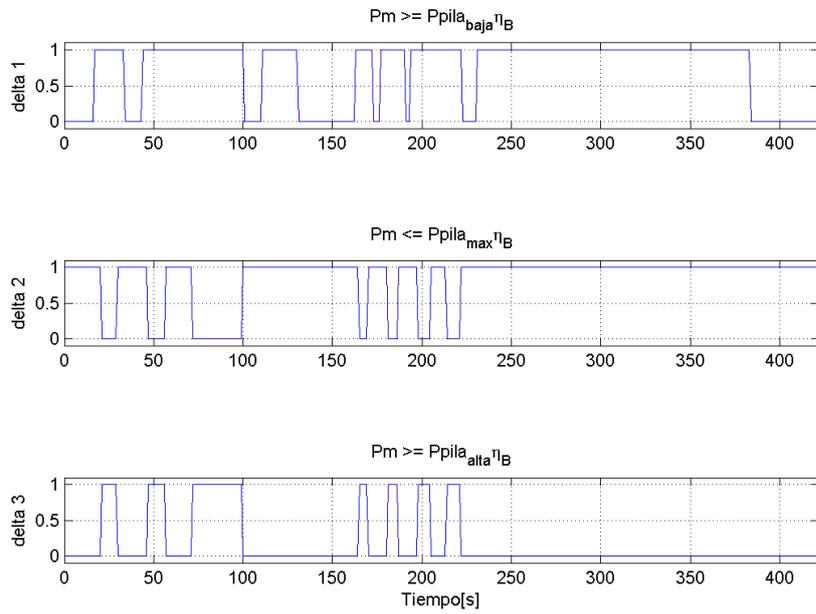


Figura 5.15: Evolución de los eventos relacionados a la potencia de la pila

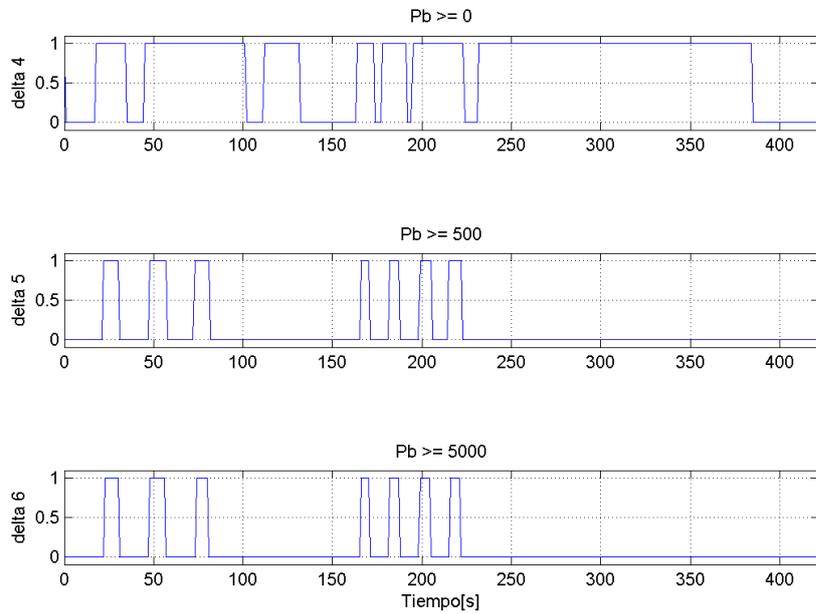


Figura 5.16: Evolución de los eventos relacionados a la corriente de la batería

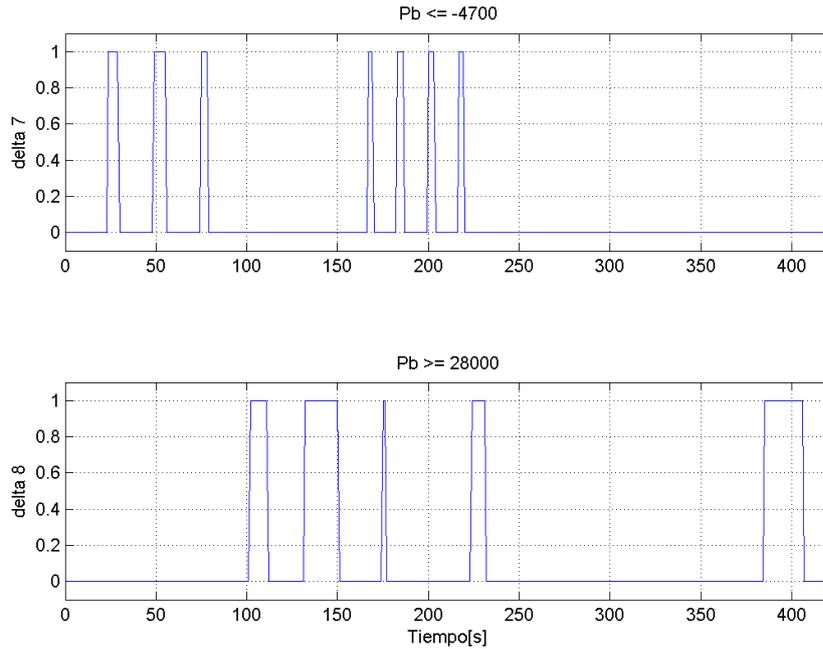


Figura 5.17: Evolución de los eventos relacionados a la saturación de la corriente de la batería

5.7: Estrategia MPC Híbrido

El segundo modelo híbrido incluye las restricciones discontinuas del sistema y es base para el diseño de un control MPC. Además, el modelo del control híbrido es discreto y el período de muestreo es de $20ms$, lo que está de acuerdo con el tiempo de respuesta de un conductor que es aproximadamente $1s$.

5.7.1: Modelo del Control MPC Híbrido

En esta subsección se describe el modelo híbrido MLD utilizado para hacer el diseño del control MPC. En la figura (5.18) se enseña el esquema del modelo del control MPC híbrido. Las entradas del modelo son las señales de control de las consignas de potencia de la pila y de la batería provenientes del MPC. Las salidas son el consumo de hidrógeno de la pila, el estado de carga de la batería y las potencias que efectivamente suministran los modelos de la pila y de la batería cuya suma es la potencia enviada al motor.

Así, el sistema afin conmutado, como descrito en la subsección (5.6.1), es re-

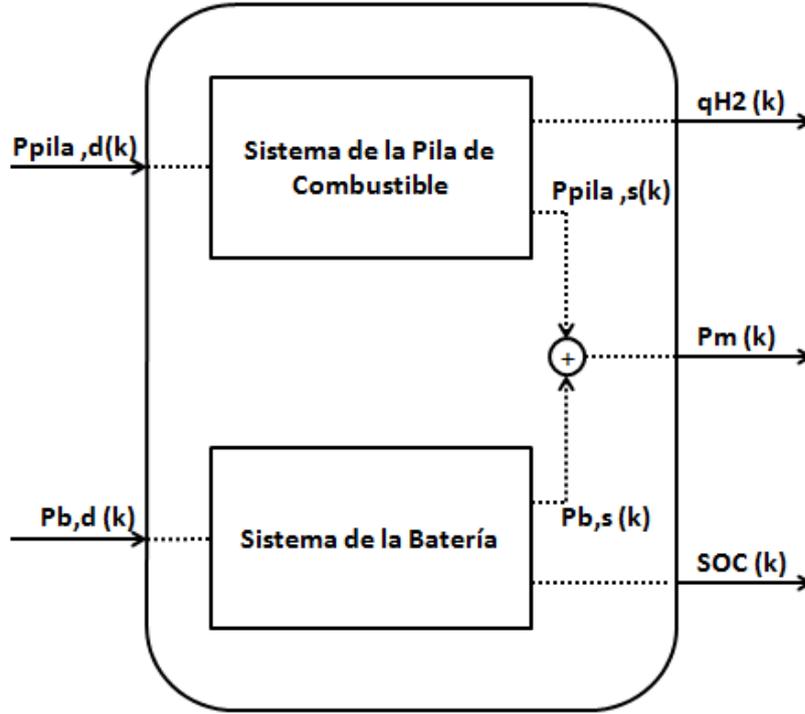


Figura 5.18: Esquema del modelo del control MPC híbrido

presentado por $x_r(k) = [P_m(k) \quad q_{H_2}(k) \quad SOC(k) \quad I_b(k)]$, $u_r(k) = [P_b(k) \quad P_{pila}(k)]^T$ y $y_r(k) = [P_m(k) \quad q_{H_2}(k) \quad SOC(k)]^T$ y las matrices $A_i(k)$, $B_i(k)$, $C_i(k)$ y $f_i(k)$ son:

$$A_i(k) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -3,9124 \cdot 10^{-6} T_s \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} \end{bmatrix}$$

$$B_i(k) = \begin{bmatrix} \eta_{BB}\eta_{ess} & \eta_B \\ 0 & b_{22} \\ 0 & 0 \\ b_{41} & 0 \end{bmatrix} \quad C_i(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad f_i(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

Para cada región de operación de la planta hay un sistema lineal donde los parámetros de esta representación cambian de acuerdo con la conmutación de modos y se encuentran descritos en el apéndice B en las tablas B.2 y B.3.

El generador de eventos, subsección (5.6.2), es compuesto por los siguientes

eventos:

$$\delta_1 = 1 \text{ si } P_{pila} \leq 0 \text{ si no } 0$$

$$\delta_2 = 1 \text{ si } P_b \geq 0 \text{ si no } 0$$

$$\delta_3 = 1 \text{ si } P_b \geq 500 \text{ si no } 0$$

$$\delta_4 = 1 \text{ si } P_b \geq 5000 \text{ si no } 0$$

donde δ_1 es el evento asociado a la linearización de la pila y δ_2 , δ_3 y δ_4 son los eventos referentes al modelo lineal de la batería.

La elección del modo de operación, subsección (5.6.4), es muy sencilla. La pila esta apagada o encendida y la batería funciona en alguna de las regiones de linearización, de acuerdo con el evento activado. Una región de la batería es correspondiente al evento δ_2 estar inactivo, que es cuando la batería se carga. Así, existen 2 modos de operación para la pila y 4 para la batería, lo que se traducen en 8 modos de operación del sistema, cuyas expresiones lógicas se encuentran en la tabla B.1.

Las restricciones físicas de la batería que en el modelo híbrido del control heurístico son modeladas como eventos, en este modelo son pasadas para el controlador como restricciones de los estados del sistema que deben ser cumplidas. Son ellas:

$$0,2 \leq SOC \leq 0,8 \quad (5.43)$$

$$-30 \leq I_b \leq 220 \quad (5.44)$$

Además de las restricciones de las señales de control P_b y P_{pila} :

$$-4700 \leq P_b \leq 66000 \quad (5.45)$$

$$0 \leq P_{pila} \leq 56000 \quad (5.46)$$

5.7.2: Control MPC Híbrido

La formulación MPC híbrida [12] está siendo utilizada en muchas aplicaciones industriales [13], [14], [15]. Esta subsección trata de la aplicación de estas técnicas en la gestión de energía en un vehículo híbrido. Ciertos aspectos, como estados de la pila de combustible y de la batería, pueden ser insertados en la acción de control, teniendo en cuenta la conmutación de la pila y de la carga/descarga de la batería. En este caso no se han añadido estados discretos para la formulación del modelo, lo que puede ser una propuesta futura.

En este trabajo, a cada período de muestreo, un problema de optimización de bucle abierto con horizonte finito es resuelto, asumiendo el estado actual como condición inicial para el problema. Basado en la filosofía de horizonte deslizante [16], solamente el primer elemento de la secuencia de control obtenida es aplicado al sistema híbrido. El mismo proceso es repetido posteriormente a cada período de muestreo, proporcionando una retroalimentación que permite rechazo a perturbaciones y seguimiento de referencias. Así, la función costo es formulada como:

$$\begin{aligned} \min_{\{u,\delta,z\}_0^{N-1}} & \sum_{k=1}^{N-1} \|Q_x(x(k|t) - x_{ref})\|_{\infty} + \sum_{k=0}^{N-1} \|Q_y(y(k|t) - y_{ref})\|_{\infty} + \\ & \sum_{k=0}^{N-1} \|Q_u(u(k|t) - u_{ref})\|_{\infty} + Q_{\rho}\epsilon^2 \end{aligned} \quad (5.47)$$

$$\text{sujetao} \left\{ \begin{array}{l} x(0|t) = x(t) \\ x(k+1|t) = Ax(k|t) + B_1u(k) + B_2\delta(k|t) + B_3z(k|t) \\ y(k|t) = Cx(k|t) + D_1u(k) + D_2\delta(k|t) + D_3z(k|t) \\ E_2\delta(k|t) + E_3z(k|t) \leq E_1u(k) + E_4x(k|t) + E_5 \\ u_{min} \leq u(t+k) \leq u_{max}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \\ x_{min} \leq x(t+k|t) \leq x_{max}, \quad k = 1, \dots, N \\ y_{min} \leq y(t+k|t) \leq y_{max}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \\ S_x x(N|t) \leq T_x \end{array} \right. \quad (5.48)$$

donde N representa los horizontes de predicción y control que son iguales en este caso, $x(k|t)$ es el estado del sistema MLD predicho en el tiempo $t+k$ empezando en el instante $x(0|t) = x(t)$, $z(k|t)$ y $\delta(k|t)$ son variables auxiliares continuas e booleanas predictas en el tiempo $t+k$, $y(k|t)$ es la salida del sistema MLD predicho en el tiempo $t+k$, $u(k)$ es la entrada del sistema MLD, u_{min} , u_{max} , y_{min} , y_{max} , x_{min} y x_{max} son las restricciones de obligación (*hard bounds*) en las entradas, salidas y estados, respectivamente y $\|x\|_{\infty} := \max(|x_i|, \dots, |x_n|)$ es la norma infinita. Además, $x_{ref}(k)$ y y_{ref} son el estado y salida de referencia, respectivamente, $\{x : S_x x \leq T_x\}$ es un subconjunto poliédrico de destino final del espacio de estados \mathbb{R}^n y Q_x y Q_y son los pesos de las matrices. En este caso en particular $u(k) = \begin{bmatrix} P_b & P_{pila,d} \end{bmatrix}$, $y(k) = \begin{bmatrix} P_m \end{bmatrix}^T$ y $x(k) = \begin{bmatrix} P_m & q_{H_2} & SOC & Ib \end{bmatrix}^T$.

El objetivo de control para esta aplicación es seguir la referencia de la demanda de potencia del motor para alcanzar el ciclo de conducción deseado y mantener la referencia del estado de carga de la batería. Si el controlador es diseñado para solamente minimizar el consumo de hidrógeno, la referencia del estado de carga debe

ser establecida próxima al límite bajo de descarga y la predicción futura del ciclo de conducción debe ser llevada en cuenta para que garanta la viabilidad del diseño del control.

Por otro lado, si el problema es garantizar la performance de la batería, el controlador debe mantener el estado de carga con un rango próximo a 0.5 para evitar degradación. En los testes realizados se han añadido las prestaciones y los resultados son comparados en relación a lo que se deseaba. La figura (5.19) enseña el esquema del MPC híbrido con sus variables de control, estados y salidas del sistema. El período de muestreo es de $0,02s$ y el horizonte de predicción es de 3 muestras.

Lo ideal sería que este horizonte fuera más grande, pero por limitaciones computacionales no se ha podido ampliarlo, lo que se traducirá en una sugerencia de mejora futura. En la próxima subsección se enseñan los resultados de las simulaciones para cada objetivo y los pesos de la función costo asociados a ellas.

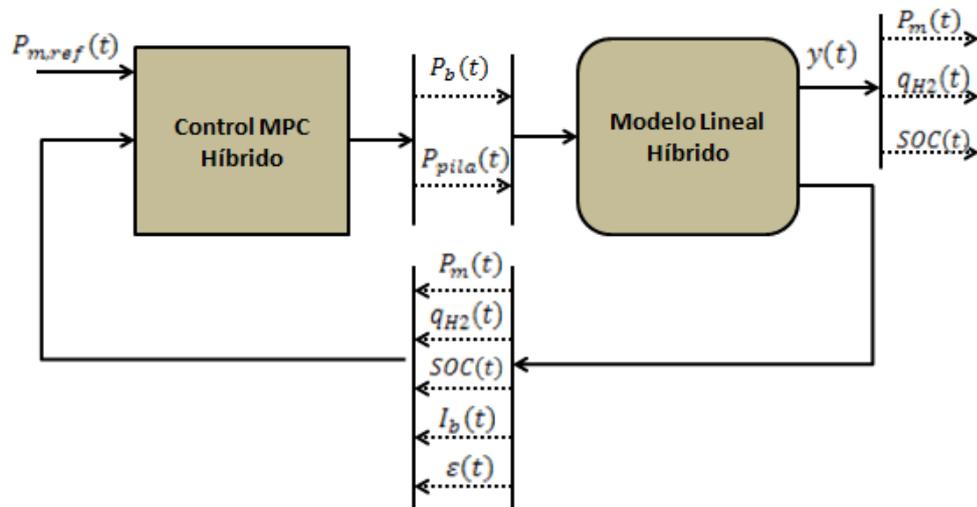


Figura 5.19: Esquema de Control

5.7.3: Resultados de las Simulaciones

En esta subsección se presentan las simulaciones para cada objetivo establecido al control y sus respectivos pesos. Todas las simulaciones toman como base el modelo descrito en la subsección (5.7.1). En los primeros testes se utiliza un ciclo de conducción que empieza con una aceleración, mantiene velocidad constante por un tiempo y luego hay un frenado hasta que el vehículo pare completamente. En el

teste final se hacen simulaciones con los ciclos de conducción estudiados. Los pesos aquí descritos son correspondientes a:

$$Q \cdot x = \begin{bmatrix} P_m & q_{H_2} & SOC & I_b & \epsilon \end{bmatrix}$$

$$Q \cdot y = \begin{bmatrix} P_m & q_{H_2} & SOC \end{bmatrix}$$

$$Q \cdot u = \begin{bmatrix} P_b & P_{pila} \end{bmatrix}$$

donde epsilon es la variable auxiliar de error que deberá ser minimizada cuando se pretende que el estado de carga se mantenga en una referencia. Se adoptan valores nulos a un peso cuando no se lo considera en la ecuación.

Pesos en las señales de control

Para las primeras simulaciones se han dado pesos para las señales de control para comprobar como el control elige el suministro de potencias de la pila e de la batería.

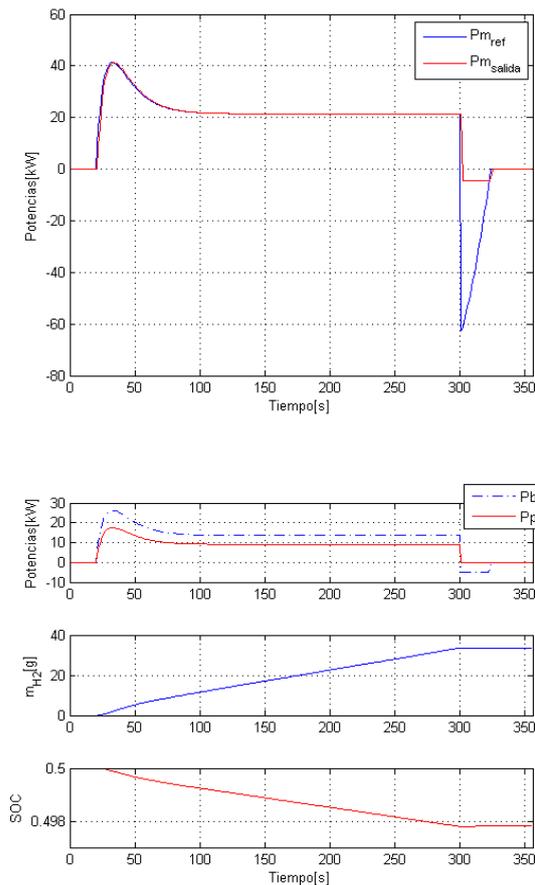


Figura 5.20: $Q \cdot u = [0.6 \ 0.4]$

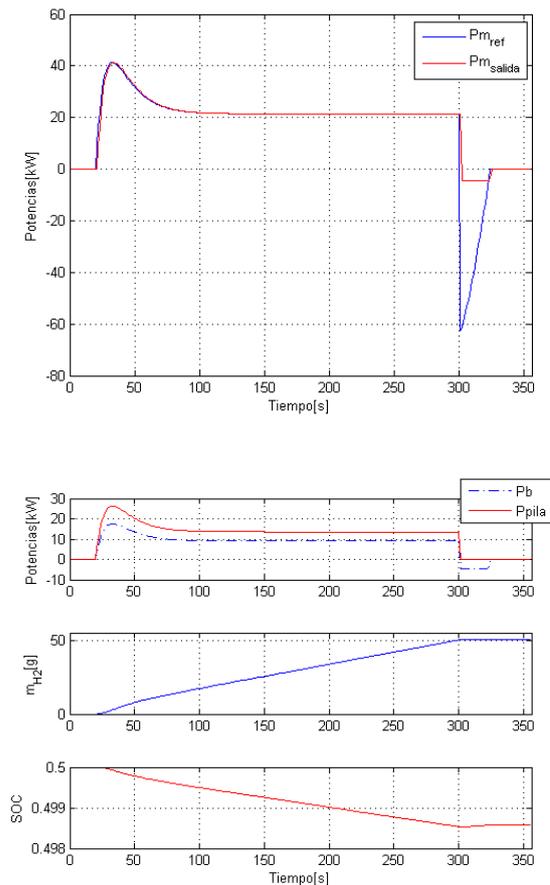


Figura 5.21: $Q \cdot u = [0.4 \ 0.6]$

En las figuras (5.20) y (5.21) se puede ver que los pesos de las señales de con-

trol influncian en el suministro de potencias. Cuando hay más peso para un esfuerzo de control, la potencia correspondiente a este control es más pequeña que la potencia que recibe menos peso. Consecuentemente, hay influencias sobre el consumo de hidrógeno y descarga de la batería. Tanto en esta como en las otras simulaciones, la pila no es capaz de almacenar toda la potencia proveniente del frenado regenerativo, por ello la salida es saturada en una potencia de $P_b = -4700W$.

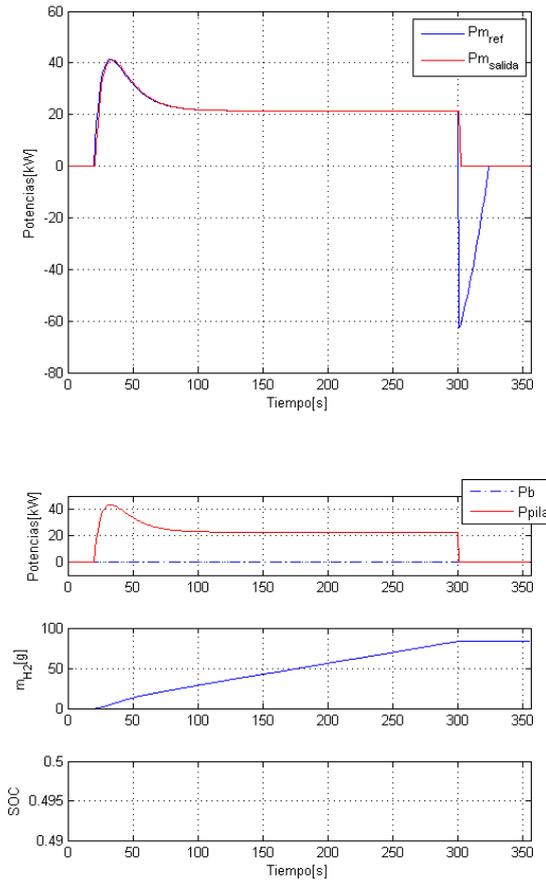


Figura 5.22: $Q.u = [1 \ 0]$

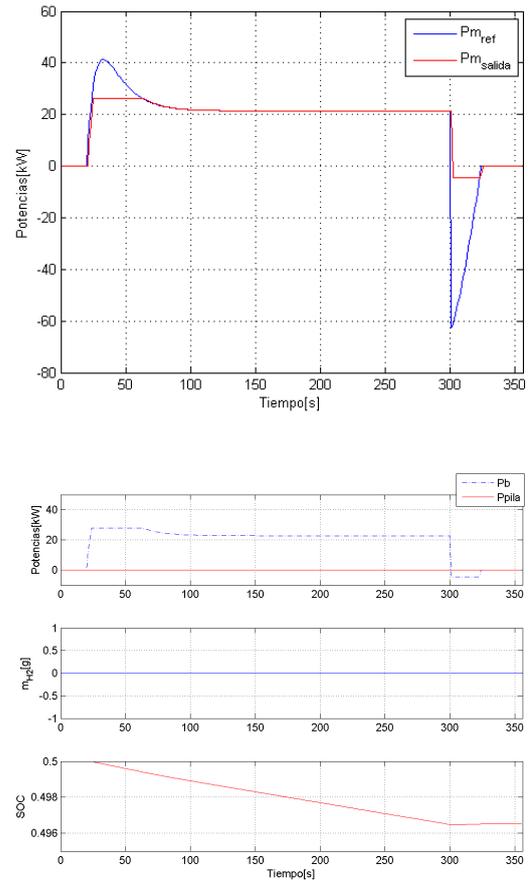


Figura 5.23: $Q.u = [0 \ 1]$

Las figuras (5.22) y (5.23) también corresponden a ponderaciones del esfuerzo de control, solo que en estos dos casos hay peso máximo para una señal y mínimo para la otra. El resultado cuando hay peso máximo para la potencia de la batería es que la pila suministra toda la demanda de potencia, ya cuando es la potencia de la pila que recibe esfuerzo máximo, la batería no consigue suministrar toda la demanda de potencia debido a su limitación de corriente de descarga, lo que se traduce en no seguimiento de referencia. Esto se puede solucionar poniéndose un peso mayor, pero no máximo para la potencia de la pila, por ejemplo 0.9, y así la pila suministrará solamente

la potencia que la batería no puede suministrar.

Pesos en las salidas P_m y q_{H_2} o en el estado SOC

En estas dos simulaciones se ha ponderado las salidas y los estados. En la figura (5.24) la ponderación de la salida de consumo de hidrógeno tiene como objetivo minimizar el consumo. Se puede ver que la batería funciona en la mayor parte del tiempo y el consumo de hidrógeno se queda próximo a $23g$.

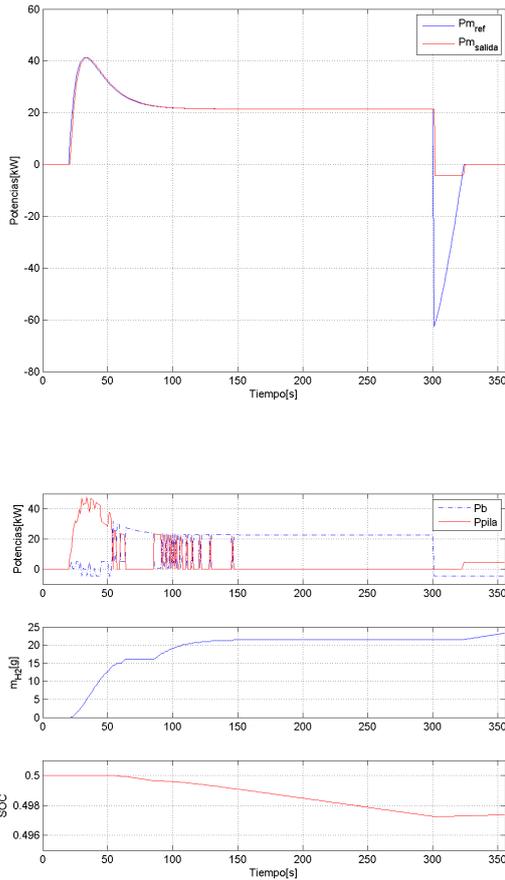


Figura 5.24: $Q.y = [1 \ 10^{-5} \ 0]$

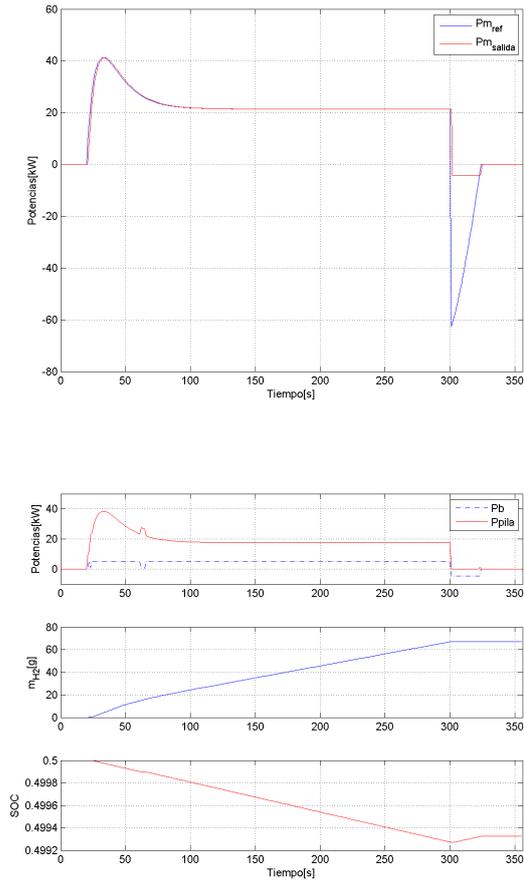


Figura 5.25: $Q.x = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10^{-6}]$

La figura (5.25) enseña el resultado para la ponderación de un estado auxiliar (epsilon) que ha sido añadido para representar el error entre referencia y estado SOC. El objetivo de este peso es crear una restricción suave (*soft constraint*) del error del estado de carga. El control debe intentar mantener el estado de carga en un rango de $0,5 \pm 0,1$, como resultado se tiene que la pila suministra la mayoría de la demanda de potencia y la batería se descarga menos que en otros casos. Caso la batería llegase a descargarse más, la pila intentaría suministrar potencia suficiente para atender a la demanda de potencia del motor y cargar la batería al mismo tiempo, como se puede notar en un leve pico de potencia en la consigna de la pila.

Pesos en las salidas y estados

Estas simulaciones corresponden a la ponderación conjunta de estados y salidas. De esta manera, el control busca un compromiso entre minimizar el consumo de hidrógeno y mantener la batería con el estado de carga inicial. En la figura (5.26) se puede ver que el control decide por mantener la carga de la batería próxima a la mitad en detrimento del consumo de hidrógeno que se queda cerca de 90g.

Para hacer con que el control intente priorizar el consumo de hidrógeno, además

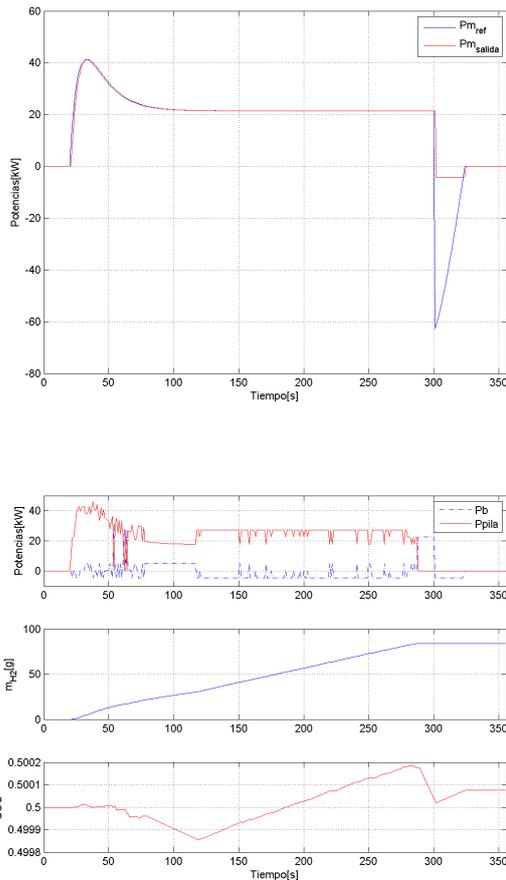


Figura 5.26: $Q.y = [1 \ 10^{-5} \ 0]$

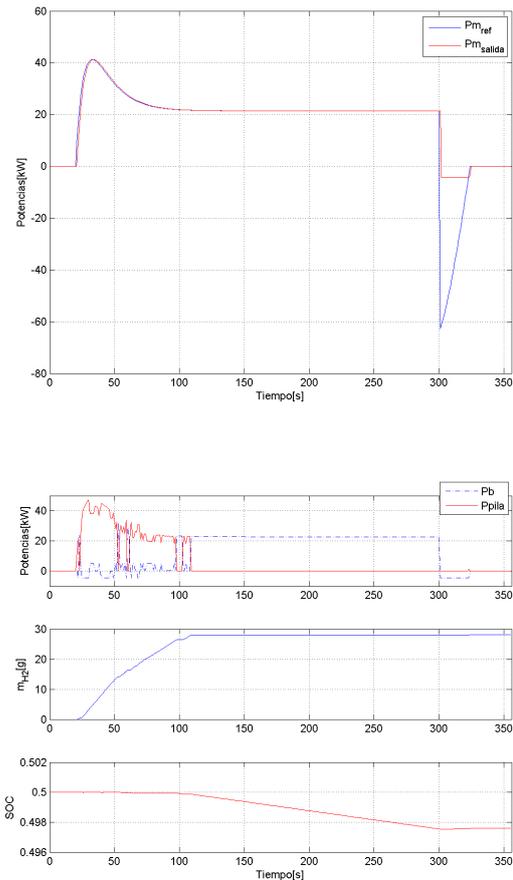


Figura 5.27: $Q.x = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10]$

de los pesos se ha elevado el error del control para $0,5 \pm 0,2$. El resultado se puede ver en la figura (5.27). Donde la pila suministra la carga a principio pero después se apaga para disminuir el consumo de hidrógeno. Todavía estas simulaciones no llevan en cuenta la restricción de variación de la potencia de la pila.

Pesos en las salidas P_m y q_{H_2} con adición de las restricción de variación de potencia de la pila

Como la pila tiene una dinámica relacionada al consumo de oxígeno y hidrógeno, no puede suministrar potencia instantaneamente. Por ello, en estas simulaciones se ha

añadido la restricción de variación de la potencia de la pila de combustible $-1000 \leq \delta P_{pila} \leq 4000$. En la figura (5.28) se puede ver que la potencia de la pila sube más lentamente y que, como no hay peso para la potencia de la batería en este caso, se prioriza el consumo de hidrógeno y la batería suministra la mayor parte de la demanda de potencia.

En la figura (5.29) se ha adicionado el error del estado de carga con el objetivo de minimizarlo. El controlador intenta conseguir un compromiso entre minimizar hidrógeno y mantener el estado de carga en 0.5. Como esta conmutación de la potencia de la pila no es buena para los componentes y el estado de carga de la batería no baja tan rápidamente, se ha optado por mantener apenas el objetivo de minimizar el consumo de hidrógeno de la pila.

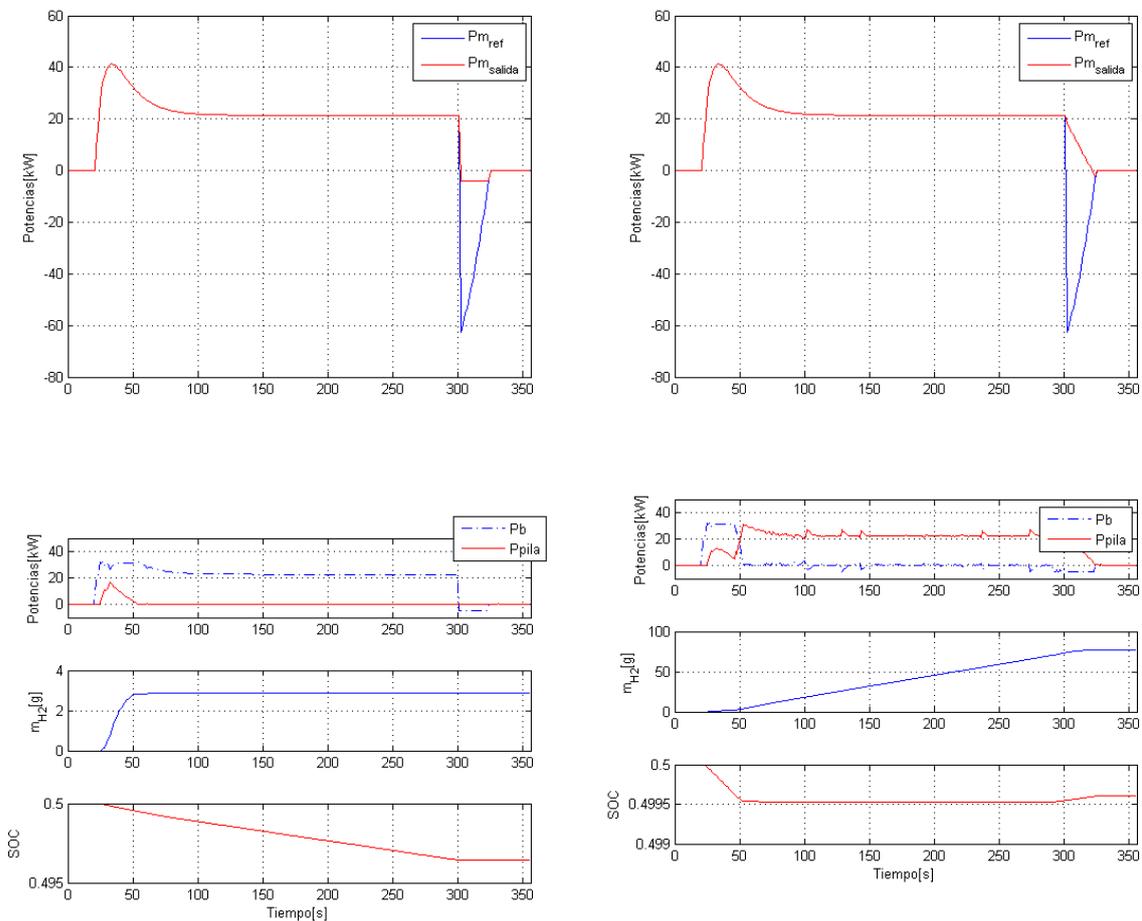


Figura 5.28: $Q.y = [1 \ 10^{-4} \ 0]$

Figura 5.29: $Q.x = [0 \ 10^{-3} \ 0 \ 0 \ 1]$ y $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$

Simulaciones con los ciclos de conducción estudiados

En estas simulaciones se prioriza la minimización del consumo de hidrógeno teniendo en cuenta la restricción de variación de la potencia de la pila.

- Ciclo de conducción en autopista

En la figura (5.30), aunque los suministros de potencia estean dentro de lo que se pretendia, el seguimiento de referencia no es bueno, esto ocurre a causa de la restricción de variación de la pila y por la limitación de corriente de descarga de la batería. Para atender la demanda de potencia requerida, se ha optado por suavizar la restricción para $-1000 \leq \delta P_{pila} \leq 5000$. Así, como se puede ver en la figura (5.31), la demanda es completamente satisfecha sin que se altere mucho el consumo de hidrógeno. En cada una de las figuras también se enseña la energía disipada final.

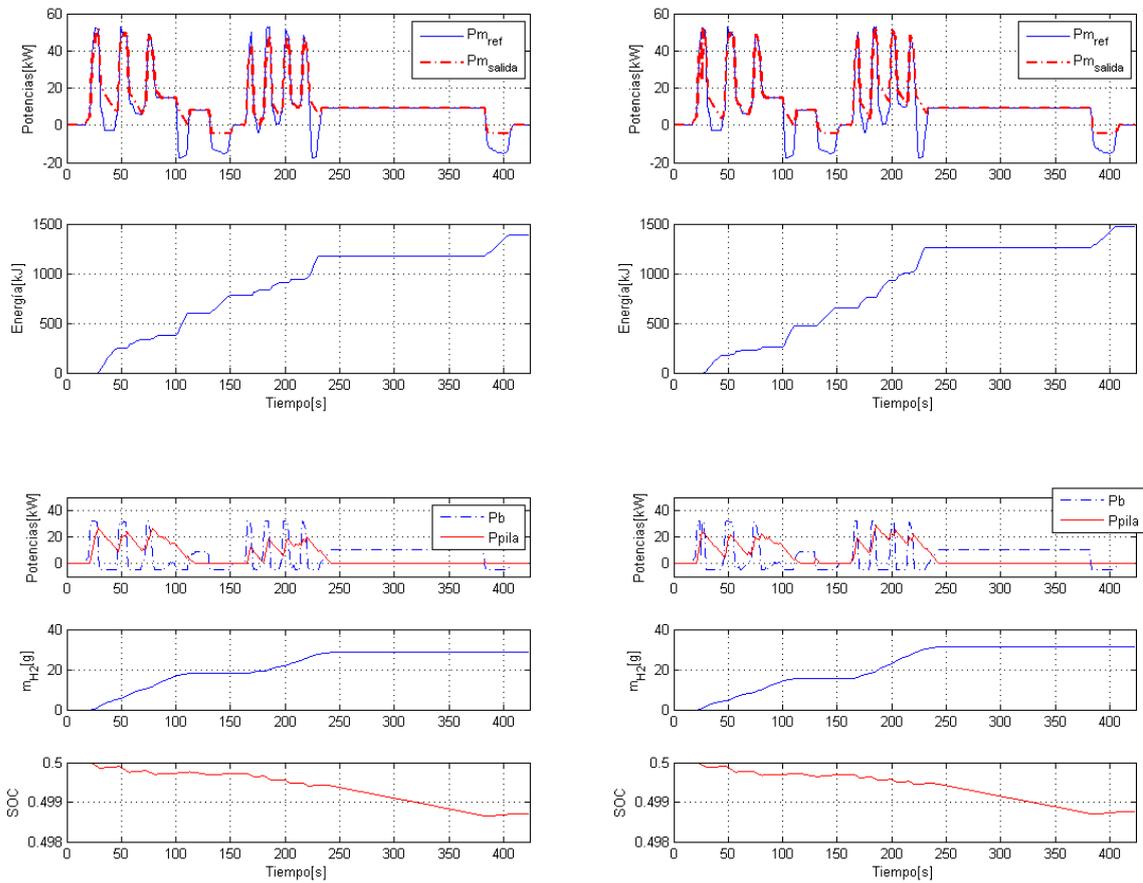


Figura 5.30: $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$ con límite superior de variación de $4000W s^{-1}$

Figura 5.31: $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$ - con límite superior de variación de $5000W s^{-1}$

- Ciclo de conducción en ciudad

La figura (5.7.3) presenta los resultados para los mismos pesos de la última simulación para el ciclo de conducción en autopista. Se observa que, como hay muchas aceleraciones, frenados y el objetivo es consumir poco hidrógeno respectando la restricción de la potencia de la pila, la única consigna disponible es de la batería, así que la pila no suministra ninguna potencia al motor. Con la adición de la minimización del error del estado de carga, figura (5.33), se puede ver que la pila entra en funcionamiento. La restricción de variación de la potencia es cumplida y el consumo de hidrógeno se queda cerca de $30g$. Se observa que el método de elección de los pesos de la función costo depende de muchos factores, entre ellos, la característica del ciclo de conducción. Es posible conseguir un compromiso entre consumo y performance y encontrar la mejor manera de suministrar la demanda de potencia requerida.

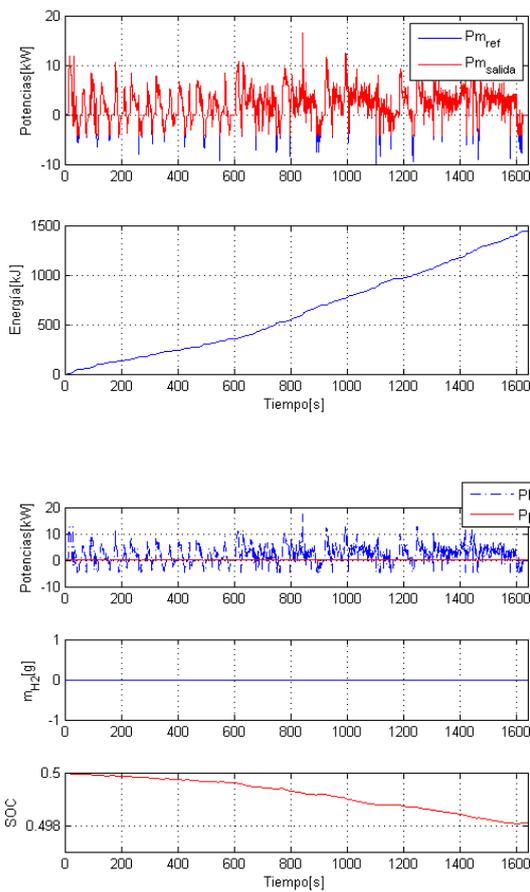


Figura 5.32: $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$ - Ciclo de conducción en ciudad

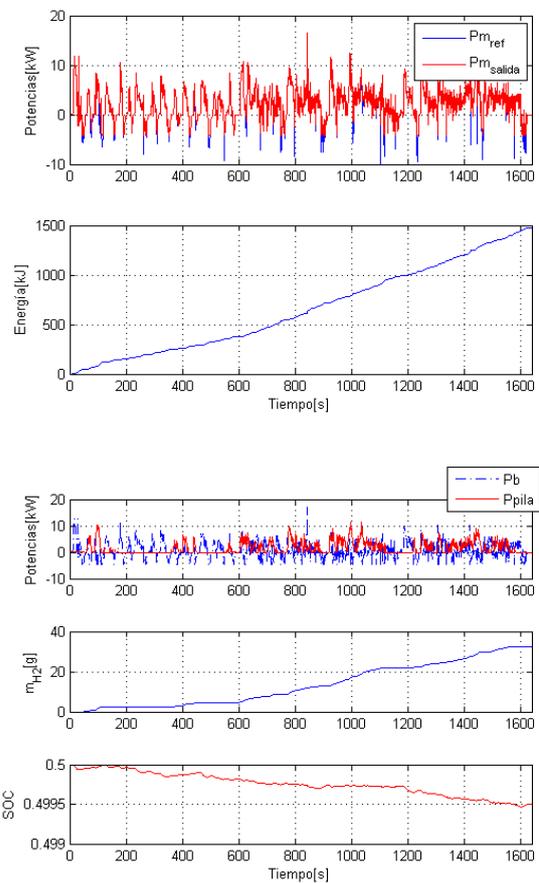


Figura 5.33: $Q.y = [1 \ 10^{-3} \ 0]$ y $Q.x = [0 \ 10^{-3} \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ - Ciclo de conducción en ciudad

5.8: Comparación y Discusión de los Resultados

Con el resultado del mejor control MPC/MLD aplicado al sistema en un ciclo de conducción en autopista, el consumo de hidrógeno fue de $30g$, mientras que con la aplicación de la estrategia heurística 2, el consumo se queda en $21,67g$. Para el ciclo de conducción en ciudad el consumo es similar al de la estrategia avanzada, $30g$, y para la misma estrategia heurística 33, $3g$, ya para la estrategia heurística 1 es de $24,73g$.

Hay que tener en cuenta que el control avanzado intenta utilizar pila y baterías en conjunto, buscando la mejor manera de satisfacer los objetivos requeridos. Es posible, apenas alterando los valores de los pesos, cambiar el suministro de potencias y llegar a los objetivos sin muchos esfuerzos. También conviene tener en cuenta que la performance de la batería solo es considerada en la estrategia avanzada híbrida.

Hay que recordar que el horizonte de predicción del control avanzado ha sido limitado por esfuerzos computacionales, lo que podría ser un factor de grande influencia caso fuera posible ampliarlo.

Aunque la aplicación de métodos avanzados de control sea eficiente y mas facilmente adaptable a diferentes objetivos y ciclos de conducción, a través de estrategias mucho más sencillas, como las heurísticas, es posible conseguir un resultado razonable.

6 Conclusión

Sin duda el tema de este trabajo es foco de muchos proyectos en estudio en la actualidad. Optimizar la autonomía de un vehículo movido a energía renovable no solo es una contribución para cuestiones ambientales, como para el desarrollo de la propia tecnología. Este proyecto intenta contribuir para el avance de las pesquisas envueltas en energías alternativas a través del desarrollo de métodos de minimización de consumo y mejora de performance.

El modelo del sistema propuesto es basado en pilas y baterías de un sistema real y ya había sido implementado y testado en [8]. Así, este proyecto es una colaboración para futuros trabajos que podrán enfocarse en su implementación, lo que no ha sido posible debido a la planta real no estar configurada y lista para experimentaciones.

Todas las estrategias propuestas fueron aplicadas con suceso al modelo del sistema y presentaron resultados satisfactorios. Las estrategias heurísticas se presentaron como las más simples y sencillas en su desarrollo, sin embargo las estrategias avanzadas son más adaptables a diferentes objetivos y ciclos de conducción. Apenas con un cambio de pesos en la función de costo es posible conseguir los resultados pretendidos.

Las prestaciones del control MPC/MLD están limitadas a cuestiones computacionales, sin duda la posibilidad de ampliarse el horizonte de predicción haría gran diferencia en el suministro de potencia debido a la restricción de variación de la potencia de la pila. De esta manera, la pila suministraría carga a la batería antes que el motor pudiese potencia al sistema y estaría preparada para recibir picos de demanda de potencia sin ultrapasar sus límites. Aunque esta hipótesis no tenga sido implementada, los resultados conseguidos con el control avanzado fueron satisfactorios y su gran ventaja en relación a otros métodos es su flexibilidad.

Una gran contribución de este proyecto fue la utilización de modelos híbridos, que utilizan eventos discretos como factores de selección del modo de operación del sistema. Así, es posible representar un modelo no lineal a través de modelos lineales definidos a tramos y desarrollar controladores para cada trozo lineal. Con este tipo de

representación también es posible definir señales de control y estados discretos, lo que puede ser un factor de identificación de las operaciones de la pila y de la batería para utilización en otros métodos de ahorro de energía.

La presencia de una fuente secundaria de energía combinada con estos y muchos otros métodos de minimización de consumo tornan la utilización del hidrógeno una alternativa posible, dada la dificultad y costo envueltos en su obtención. El futuro de la tecnología no puede basarse en fuentes inesgotables de energía y proyectos como este visan intentar incentivar y viabilizar la utilización de energías limpas.

Como sugerencia de trabajos futuros hay que estudiar la ampliación del horizonte de predicción para garantía de mejores resultados. También se puede añadir señales discretas de control para definición de estados de operación del sistema (con pila apagada/encendida y batería cargando/descargando). También se puede hacer una mejora en el modelo de la batería introduciéndose las dinámicas debido a diferentes condiciones de temperatura y en la descarga de la batería, a través de variables discretas, adicionar una conmutación para descargas discontinuas.

APÉNDICE A – Estados del Sistema Lineal para la Estrategia Heurística

Cuadro A.1: Definición de los modos de operación del sistema

Modo	Condición
i_1	$\delta_1 \& \delta_2 \& \bar{\delta}_8 \& \bar{\delta}_4$
i_2	$\bar{\delta}_1 \& \bar{\delta}_8 \& \bar{\delta}_4$
i_3	$\delta_3 \& \bar{\delta}_8 \& \bar{\delta}_4$
i_4	$\delta_1 \& \bar{\delta}_2 \& \delta_4 \& \bar{\delta}_5 \& \bar{\delta}_7$
i_5	$\bar{\delta}_1 \& \delta_4 \& \bar{\delta}_5 \& \bar{\delta}_7$
i_6	$\delta_3 \& \delta_4 \& \bar{\delta}_5 \& \bar{\delta}_7$
i_7	$\delta_1 \& \delta_2 \& \delta_5 \& \bar{\delta}_6 \& \bar{\delta}_7$
i_8	$\bar{\delta}_1 \& \delta_5 \& \bar{\delta}_6 \& \bar{\delta}_7$
i_9	$\delta_3 \& \delta_5 \& \bar{\delta}_6 \& \bar{\delta}_7$
i_{10}	$\delta_1 \& \delta_2 \& \delta_6 \& \bar{\delta}_7$
i_{11}	$\bar{\delta}_1 \& \delta_6 \& \bar{\delta}_7$
i_{12}	$\delta_3 \& \delta_6 \& \bar{\delta}_7$
i_{13}	$\delta_1 \& \delta_2 \& \delta_7$
i_{14}	$\bar{\delta}_1 \& \delta_7$
i_{15}	$\delta_3 \& \delta_7$
i_{16}	$\delta_1 \& \delta_2 \& \bar{\delta}_4 \& \delta_8$
i_{17}	$\bar{\delta}_1 \& \delta_8$
i_{18}	$\delta_3 \& \delta_8$

Cuadro A.2: Parámetros del sistema lineal híbrido

I_b/P_{pila}	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	i_6
b_1	$1/\eta_B$	0	0	$1/\eta_B$	0	0
f_1	0	1000	15000	0	1000,00	15000
a_{52}	0,006812	0,006812	0,006812	0,006812	0,006812	0,006812
a_{54}	-0,0023	-0,0023	-0,0023	0	0	0
a_{55}	0	0	0	$3,2116e^{-7}Ts$	$3,2116e^{-7}Ts$	$3,2116e^{-7}Ts$
f_5	0,0218	0,0218	0,0218	0	0	0

Cuadro A.3: Parámetros del sistema lineal híbrido

I_b/P_{pila}	i_7	i_8	i_9	i_{10}	i_{11}
b_1	$1/\eta_B$	0	0	$1/\eta_B$	0
f_1	0	1000	15000	0	1000
a_{52}	0,006812	0,006812	0,006812	0,006812	0,006812
a_{54}	0	0	0	0	0
a_{55}	$3,2116e^{-6}Ts$	$3,2116e^{-6}Ts$	$3,2116e^{-6}Ts$	$3,2116e^{-5}Ts$	$3,2116e^{-5}Ts$
f_5	0	0	0	0	0

Cuadro A.4: Parámetros del sistema lineal híbrido

I_b/P_{pila}	i_{12}	i_{13}	i_{14}	i_{15}	i_{16}	i_{17}	i_{18}
b_1	0	$1/\eta_B$	0	0	0	0	0
f_1	15000	0	1000	15000	0	1000	15000
a_{52}	0,006812	0	0	0	0	0	0
a_{54}	0	0	0	0	0	0	0
a_{55}	$3,2116e^{-5}Ts$	0	0	0	0	0	0
f_5	0	220	220	220	-30	-30	-30

APÉNDICE B – Estados del Sistema Lineal para la Estrategia MPC Híbrido

Cuadro B.1: Definición de los modos de operación del sistema

Modo	Condición
i_1	$\delta_1 \& \delta_2 \& \bar{\delta}_3 \& \bar{\delta}_4$
i_2	$\delta_1 \& \delta_2 \& \delta_3 \& \bar{\delta}_4$
i_3	$\delta_1 \& \delta_2 \& \delta_3 \& \delta_4$
i_4	$\delta_1 \& \bar{\delta}_2 \& \bar{\delta}_3 \& \bar{\delta}_4$
i_5	$\bar{\delta}_1 \& \bar{\delta}_2 \& \bar{\delta}_3 \& \bar{\delta}_4$
i_6	$\bar{\delta}_1 \& \delta_2 \& \bar{\delta}_3 \& \bar{\delta}_4$
i_7	$\bar{\delta}_1 \& \delta_2 \& \delta_3 \& \bar{\delta}_4$
i_8	$\bar{\delta}_1 \& \delta_2 \& \delta_3 \& \delta_4$

Cuadro B.2: Parámetros del modelo MPC híbrido

I_b/P_{pila}	i_1	i_2	i_3	i_4
a_{43}	0	0	0	-0,0023
a_{44}	$3,2116e^{-7}Ts$	$3,2116e^{-6}Ts$	$3,2116e^{-5}Ts$	0
b_{41}	0,0068125	0,0068125	0,0068125	0,0068125
f_4	0	0	0	0,0218
b_{22}	0	0	0	0

Cuadro B.3: Parámetros del modelo MPC híbrido

I_b/P_{pila}	i_5	i_6	i_7	i_8
a_{43}	-0,0023	0	0	0
a_{44}	0	$3,2116e^{-7}Ts$	$3,2116e^{-6}Ts$	$3,2116e^{-5}Ts$
b_{41}	0,0068125	0,0068125	0,0068125	0,0068125
f_4	0,0218	0	0	0
b_{22}	$0,0605e^{-5}Ts$	$0,0605e^{-5}Ts$	$0,0605e^{-5}Ts$	$0,0605e^{-5}Ts$

Referencias

- [1] Energy Information Administration, *International Energy Outlook 2011*, <http://www.eia.gov>, último acceso 16/03/2012.
- [2] DUFOUR, J., *Utilización de pilas de combustible en automoción: ventajas, inconvenientes y retos*, <http://www.madrimasd.org/blos/energiasalternativas/2011>, último acceso 16/03/2011.
- [3] Asociación Española de Pilas de Combustible, *Funcionamiento de las Pilas de Combustible*, <http://www.appice.es>, último acceso 18/06/2012.
- [4] Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón, *Pilas de Combustible: La Energía del Futuro*, <http://www.icma.unizar-csic.es/WebICMA/>, último acceso 18/06/2012.
- [5] AGUIRRE, A. M., *Descripción y Modelado de una Pila de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico*, Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [6] KUNUSCH, C., PULESTON, P. F., MAYOSKY, M. A., SERRA, M., y RIERA, J., *Tópicos de Control Automático para Sistemas de Celdas de Combustible*.
- [7] ARXER, M., y MARTÍNEZ, L., *Proyecto Hercules: Contributing to the development of the hydrogen infrastructure*, J. Power Sources, 171, 224-227, 2007.
- [8] ARCE, A. R., *Advanced Control for Fuel Cell Systems*, Thesis de Máster, Universidad de Sevilla, 2010.
- [9] BEMPORAD, A., *Modeling, Control, and Reachability Analysis of Discrete-Time Hybrid System*, University of Siena, 2003.
- [10] BEMPORAD, A., y MORARI, M., *Control of Systems Integratin Logic, Dynamics, and Constraints*, Automatica 35, 407-427, 1999.
- [11] FEROLDI, D., SERRA, M., y RIERA, J., *Design and Analysis of Fuel-Cell Hybrid Systems Oriented to Automotive Applications*, IEEE Transactions on Vehicular Technology 58, 9, Noviembre 2009.
- [12] BEMPORAD, A., HEELMELS, W. H., y SCHUTTER, B. D., *On Hybrid System and Closed-Loop MPC Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control 47, 5, 25, 863-869, 2002.
- [13] CAIRANO, S. D., BEMPORAD, A., KOLMANOVSKY, I., y HOVRAT, D., *Model Predictive Control of Nonlinear Mechatronic Systems: An Application to a Magnetically Actuated Mass Spring Damper*, En Proc. 2nd IFAC Conf. Anal. Des. Hybrid Syst., 241-246, Itália, 2006.

- [14] GIORGETTI, N., BEMPORAD, A., TSENG, H., y HOVRAT, D., *Hybrid Model Predictive Control Application Towards Semi-Active Suspension*, Int. J. Control 79, 5, 521-523, 2006.
- [15] GIORGETTI, N., RIPACCIOLI, G., BEMPORAD, A., KOLMANOVSKY, I., y HOVRAT, D., *Hybrid Model Predictive Control of Direct Injection Stratified Charge Engines*, IEEE/ASME Transactions Mechatronics 11, 5, 2006.
- [16] CAMACHO, E. F., y BORDONS, C., *Model Predictive Control*, Springer-Verlag, Londres, 2004.
- [17] TORRISI, F. D., BEMPORAD, A., BERTINI, G., HERTACH, P., JOST, D., y MIGNONE, D., *HYSDEL 2.0.5 - User Manual*, 2002.
- [18] CARPINTERO, D. A. M., *Diseño y Evaluación de Algoritmos Evolutivos para Estrategias de Control Predictivo Híbrido No Lineal*, Tesis de Grado, Universidad de Chile, 2010.
- [19] SONTAG, E.D., *Nonlinear regulation: the piecewise linear approach*, IEEE Trans. Automat. Control, 26(2):346-358, 1981.
- [20] TORRISI, F. D., BEMPORAD, A., *HYSDEL - A tool for generating computational hybrid models*, IEEE Trans. on Control Syst. Technol., 12, 2, 235-249, 2004.