

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ing. Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Estudio de estrategias de control para la gestión
energética eficiente y detección de fallos
en vehículos eléctricos híbridos

Autor: Álvaro Carrizosa Rendón

Tutor: Ascensión Zafra Cabeza

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

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ing. Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Estudio de estrategias de control para la gestión energética eficiente y detección de fallos en vehículos eléctricos híbridos

Autor:

Álvaro Carrizosa Rendón

Tutor:

Ascensión Zafra Cabeza

Profesora Titular

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

Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Grado: Estudio de estrategias de control para la gestión energética eficiente y detección de fallos en vehículos eléctricos híbridos

Autor: Álvaro Carrizosa Rendón
Tutor: Ascensión Zafra Cabeza

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

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Con este trabajo doy por finalizada una etapa de mi vida, por lo que veo necesario agradecer el apoyo a todas las personas que me han acompañado estos años.

En primer lugar, a todo el personal que hace posible el día a día en la ETSI, porque con su trabajo, todos ellos han puesto su granito de arena en hacer posibles mis estudios. Pero sobre todo, a los profesores y profesionales que han contribuido a mi formación, porque nadie mejor que ellos ha sabido transmitirme la pasión por la ingeniería y su capacidad de transformar el mundo. Y en especial, a Asun, por haberme permitido realizar el Trabajo Fin de Grado en un tema tan interesante y haber estado a mi disposición en la manera que lo ha estado a pesar del curso tan atípico que hemos vivido.

En segundo lugar, agradecer a mis compañeros todo el apoyo mutuo a lo largo de los años. Porque, sin ellos, las largas sesiones de proyectos y prácticas de laboratorio no hubieran sido tan llevaderas.

A mis amigas y amigos, tanto a los que ya estaban como a los que se han ido sumando. Porque son ellos los que me han apoyado tanto en lo académico como en lo personal y me han demostrado a lo largo de estos años que seguirán a mi lado una vez finalice esta etapa.

Por último, me gustaría agradecer el apoyo recibido a lo largo de estos años por mi familia.

A mis abuelas, por haber estado siempre tan orgullosas de mis progresos. A mi abuelo, por enseñarme que el uso de la tecnología no entiende de edades y transmitirme la importancia de esforzarse en los estudios, aunque no haya podido ver como finalizo los míos.

A mi padre, por haber sido siempre un referente para mí en lo académico y haberme transmitido su pasión por los números y la investigación desde pequeño.

Y en especial, a mi madre y a mi hermana, mis referentes en el esfuerzo y la constancia. Pero sobre todo, porque son ellas las que me han apoyado y soportado en los mejores y peores momentos a lo largo de toda la carrera.

Gracias.

*Álvaro Carrizosa Rendón
Sevilla, 2020*

Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se realiza un estudio comparativo de distintas técnicas de control clásico y control inteligente con el objetivo de realizar una gestión eficiente de los recursos energéticos del vehículo así como analizar la posibilidad de incluir una rutina de detección de fallos.

Para llevar a cabo todo ello, en primer lugar se realiza una etapa de modelado y linealización del comportamiento energético del conjunto motores-pila-batería en base a los modelos independientes realizados en proyectos anteriores [8], [6] y [10].

Una vez realizado el modelo completo, se ha implementado un entorno de simulación para el vehículo y se ha realizado un estudio de validación, comprobando que dicho modelo se ajusta al comportamiento del vehículo FOX, simulado mediante la librería *MicrogirdLib*.

Una vez validado el modelo se han implementado diferentes controladores clásicos (PID) y controladores predictivos basados en modelo (MPC) comparando las notables ventajas del enfoque multiobjetivo de éste último frente a la respuesta ofrecida por los diferentes controladores PID desarrollados.

Además, aprovechando las cualidades del controlador MPC también se propone una rutina de detección de fallos que permite analizar el estado del vehículo frente al comportamiento esperado y detectar incongruencias en el funcionamiento, actuando en consecuencia buscando una conducción segura y proteger los dispositivos.

Abstract

The aim of this project is to analyze different techniques of classic control and intelligent control in order to reach an efficient management of the vehicle's energy resources as well as to analyze the possibility of including a fault detection routine.

For this purpose, the behaviour and interaction of the group motors-fuel cell - battery have been modeled and linearized basing the models in the previous project [8], [6] and [10].

Once the complete model has been made, a simulation environment for the vehicle has been implemented and a validation study has been carried out, verifying that said model adjusts to the behavior of the FOX vehicle, simulated by the *MicrogirdLib* library.

Using the complete model, different classical controllers (PID) and model-based predictive controllers (MPC) have been implemented, comparing the notable advantages of the multi-objective approach of the MPC compared to the response offered by the different PID controllers developed.

In addition, taking advantage of the qualities of the MPC controller, a fault detection routine is also proposed that allows analyzing the state of the vehicle against the expected behavior and detecting inconsistencies in operation, acting accordingly in order to have a safety driving and not damage the ower devices.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo	1
2 El vehículo FOX	3
2.1 Historia de los vehículos eléctricos	3
2.2 Descripción del vehículo FOX	5
3 Estrategias de control	9
3.1 Control PID	9
3.2 Control MPC	11
4 Modelado de los componentes	15
4.1 Balance energético	15
4.2 La batería de ión-litio	16
4.3 La pila de combustible	20
4.4 El tanque de hidruros metálicos	23
4.5 El motor eléctrico	24
5 Modelo energético completo	29
5.1 Aplicación sobre el vehículo FOX	29
6 Implementación del control PID	37
6.1 Entorno de simulación	37
6.2 Diseño del controlador	38
6.3 Resultados obtenidos	42
6.4 Conclusiones	47
7 Implementación del control MPC	49
7.1 Entorno de simulación	49
7.2 Diseño del controlador	50
7.3 Resultados obtenidos	54
7.4 Comparativa funcionamiento MPC - PID	55
8 Incorporación de rutina de detección de fallos	59

8.1	Planteamiento	59
8.2	Resultados obtenidos	60
8.3	Conclusiones	64
9	Conclusiones y líneas futuras de trabajo	65
9.1	Conclusión final	65
9.2	Líneas futuras de trabajo	65
	Apéndice A Código para la implementación del PID	67
	Apéndice B Código para la implementación de la rutina de detección de fallos	69
	<i>Índice de Figuras</i>	71
	<i>Índice de Tablas</i>	73
	<i>Índice de Códigos</i>	75
	<i>Bibliografía</i>	77

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivo	1
2 El vehículo FOX	3
2.1 Historia de los vehículos eléctricos	3
2.1.1 Clasificación de vehículos con motores eléctricos	3
2.2 Descripción del vehículo FOX	5
2.2.1 Motores	5
2.2.2 Batería	5
2.2.3 Pila de combustible	6
2.2.4 ECU	7
2.2.5 Sensores	7
3 Estrategias de control	9
3.1 Control PID	9
3.1.1 Componentes del controlador	9
3.1.2 Ventajas y desventajas	10
3.2 Control MPC	11
3.2.1 Componentes del controlador	11
3.2.2 Ventajas y desventajas	13
4 Modelado de los componentes	15
4.1 Balance energético	15
4.2 La batería de ión-litio	16
4.2.1 Modelo simplificado	17
4.3 La pila de combustible	20
4.3.1 Modelo simplificado	21
4.4 El tanque de hidruros metálicos	23
4.4.1 Modelo simplificado	24
4.5 El motor eléctrico	24
4.5.1 Modelo simplificado	25
4.5.2 Validación del modelo	26
5 Modelo energético completo	29
5.1 Aplicación sobre el vehículo FOX	29

5.1.1	Modelo completo	29
5.1.2	Validación del modelo	30
5.1.3	Segundo ensayo de validación	34
6	Implementación del control PID	37
6.1	Entorno de simulación	37
6.1.1	Simplificaciones realizadas	38
6.2	Diseño del controlador	38
6.2.1	Establecimiento de la referencia	38
6.2.2	Modelo del sistema y especificaciones de control	39
6.2.3	Discretización del control PID	40
6.2.4	Sintonización de parámetros	40
6.3	Resultados obtenidos	42
6.3.1	Caso ideal	42
6.3.2	Saturación de la señal de control	43
6.3.3	Inclusión de los motores	45
6.4	Conclusiones	47
7	Implementación del control MPC	49
7.1	Entorno de simulación	49
7.2	Diseño del controlador	50
7.2.1	Definición de la función de coste	50
7.2.2	Establecimiento de las restricciones	50
7.2.3	Sintonización de parámetros	50
	Criterio empleado	51
	Sintonización de los parámetros δ_i	51
	Sintonización de los parámetros α y λ	51
	Ajuste de los parámetros T_c , N_u y N_c	53
7.3	Resultados obtenidos	54
7.4	Comparativa funcionamiento MPC - PID	55
8	Incorporación de rutina de detección de fallos	59
8.1	Planteamiento	59
8.2	Resultados obtenidos	60
8.2.1	Estudio de los niveles de carga	60
	Prueba 1	60
	Prueba 2	60
8.2.2	Estudio de errores en los dispositivos	61
	Detección de fuga de H_2	61
	Funcionamiento anómalo de la pila de combustible	61
	Funcionamiento anómalo de la batería	62
	Detección de discrepancias en la posición	63
8.3	Conclusiones	64
9	Conclusiones y líneas futuras de trabajo	65
9.1	Conclusión final	65
9.2	Líneas futuras de trabajo	65
	Apéndice A Código para la implementación del PID	67
	Apéndice B Código para la implementación de la rutina de detección de fallos	69
	<i>Índice de Figuras</i>	71
	<i>Índice de Tablas</i>	73
	<i>Índice de Códigos</i>	75

Bibliografía

77

Notación

A	Amperio
$A \cdot h$	Amperio hora
cm^2	centímetro cuadrado
H_2	Hidrógeno
K	Grado Kelvin
kW	Kilovatio
kg	Kilogramo
km	kilómetro
km/h	kilómetros por hora
L	Litro
$N \cdot m$	Newton por metro
s	Segundo
V	Voltio
W	Vatio
BMS	Sistema gestor de la batería
ECU	Unidad de control electrónico
MHL	Tanque de hidruros metálicos
LOH	Estado de carga del tanque de hidruros metálicos
SOC	Estado de carga de la batería
P_{fc}	Potencia de la pila de hidrógeno
P_{bat}	Potencia de la batería de ión-Litio
$P_{motores}$	Potencia demandada por los motores
P_{neta}	Potencia neta
FCV	Vehículo de celda de combustible
EV_{ext}	Vehículo eléctrico de autonomía extendida
$FCVH$	Vehículo eléctrico híbrido batería - pila
EV	Vehículo eléctrico de batería
HEV	Vehículo híbrido
$PHEV$	Vehículo híbrido enchufable
PID	Controlador con efecto proporcional, integral y derivativo
MPC	Control predictivo basado en modelo
J	Función de coste
N_u	Horizonte de control
N_1, N_2	Horizonte de predicción

1 Introducción

En esta sección se pretende presentar ante el lector la temática y el contexto sobre el que se desarrolla este proyecto.

1.1 Motivación

El economista Jeremy Rifkin promueve la idea de que actualmente nos encontramos inmersos en una tercera revolución industrial cuyos cinco pilares básicos son los siguientes:

La transición hacia energías 100% renovables, la evolución a "un edificio = una pequeña central eléctrica", el desarrollo de baterías recargables, pilas de combustible y otras tecnologías de almacenamiento de energía, el desarrollo de la red eléctrica inteligente y el desarrollo del transporte basado en vehículos eléctricos propulsados por electricidad renovable [15].

Dicha tesis quedó avalada institucionalmente en una Declaración del Parlamento Europeo [5] que insta a las diferentes instituciones de la Unión Europea a perseguir diferentes hitos ecologistas en base a estos cinco pilares.

Este proyecto no solo se desarrolla en una continua evolución de la industria entorno a la eficiencia energética, sino también en un momento histórico marcado por una inminente crisis climática y un vertiginoso desarrollo tecnológico que ha permitido la incorporación de sistemas inteligentes en nuestro día a día. Es por ello que actualmente es una necesidad el estudio, desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías que permitan una movilidad sostenible basada en una gestión eficiente de energías limpias como principal palanca de freno del cambio climático.

1.2 Objetivo

El principal objetivo de este proyecto consiste en el estudio y desarrollo de un sistema inteligente capaz de realizar una gestión eficiente de la energía en un vehículo híbrido eléctrico y que además incorpore técnicas de detección de fallos basado en el conocimiento previo del sistema. Para ello, se usará como referencia el funcionamiento y los componentes del vehículo híbrido eléctrico FOX.

Como punto de partida se tiene el trabajo *Modelado Energético de vehículo eléctrico híbrido* [8], que modela el comportamiento de los motores del vehículo FOX y los incorpora a la librería *MicrogridLib* de Simulink que ya contempla la simulación de pilas de hidrógeno y baterías. por tanto, la primera etapa del proyecto se centra en la incorporación de dichos motores a los elementos ya creados para conseguir un entorno de simulación que se asemeje al vehículo FOX.

En segundo lugar se pretende hacer un modelo completo del balance energético del vehículo en base a los distintos modelos matemáticos independientes definidos en los trabajos *Automatización de una microrred con doble banco de baterías* [6] y *Gestión de Energía en Sistemas con Fuentes Renovables y Almacenamiento de Energía Basado en Hidrógeno Mediante Control Predictivo* [10]. A partir de ello se plantea la incorporación de diferentes estrategias de control junto a un análisis comparativo entre estrategias clásicas (PID) y estrategias de control inteligente (control predictivo MPC).

Por último se pretende incorporar una rutina de detección de fallos y analizar sus resultados en el entorno de simulación elaborado.

2 El vehículo FOX

En esta sección se pretende acercar al lector al concepto de vehículo híbrido eléctrico y exponer las características del vehículo empleado en este trabajo.

2.1 Historia de los vehículos eléctricos

A pesar de la creencia popular, los coches eléctricos no sólo no son una novedad del siglo XXI, sino que son anteriores a los vehículos de gasolina y diesel, pero el contexto histórico y tecnológico inclinó la balanza hacia los de combustión fósil, algo que está cambiando hoy en día.

Entorno a 1830 aparece el primer coche eléctrico de la mano de Robert Anderson, cuya fuente de energía se trataba de una batería no recargable. El desarrollo científico-tecnológico del siglo XIX sobre baterías y motores eléctricos permitió que a principios de siglo XX ya circularan coches de este tipo por las grandes urbes como Londres o Nueva York. Se trataban de motores de corriente continua alimentados por una batería con una autonomía inferior a los 30km y una velocidad máxima de 25km/h.

Los primeros coches de gasolina aparecen en los años 20, siendo menos deseosos que los eléctricos por su elevado precio, por ser ruidosos, por desprender un fuerte olor, y por requerir de mucha experiencia para poder manejarlos adecuadamente. Sin embargo, fue en los años 30 cuando la balanza empezó a inclinarse en favor de los vehículos de combustión fósil condenando a los vehículos eléctricos a su temporal desaparición; Los hallazgos de petróleo en Estados Unidos abarató el precio del combustible significativamente, además, las ciudades comenzaban a estar conectadas por carretera, por lo que la autonomía de las baterías empezó a ser un factor clave, algo que sigue siéndolo a día de hoy.

La Crisis del Petróleo (1973) junto con la concienciación de los efectos nocivos de la contaminación reactivan el interés en el desarrollo tecnológico asociado a los vehículos eléctricos. Entre otras cosas, a lo largo del siglo XX se ha ido desarrollando la electrónica de potencia, la cual permite combinar las baterías (que ofrecen corriente continua) con motores de corriente alterna, más adecuados para grandes potencias durante largos periodos de uso continuado. Además, la electrónica de potencia permitió la incorporación de técnicas de freno regenerativo, esenciales en la batalla por conseguir mayor autonomía. Esto ha conseguido que la eficiencia de un motor eléctrico sea superior al 90%, mientras que la de un vehículo de combustión interna se encuentra en torno al 20%. Sin embargo, la autonomía y el coste sigue siendo el punto débil de estos vehículos en la actualidad [13].

2.1.1 Clasificación de vehículos con motores eléctricos

Las principales ventajas que los usuarios encuentran en los vehículos de combustión interna frente a otras alternativas son evidentes: mayor velocidad alcanzada, mayor autonomía y menor coste.

Sin embargo, los vehículos eléctricos ofrecen ciertas ventajas frente a los habituales: menor necesidad de mantenimiento, conducción más cómoda, menor emisión de agentes contaminantes y no dependen de combustibles fósiles importados desde países terceros [8].

En la actualidad, los vehículos de combustión interna (gasolina y diesel) siguen copando la mayor parte del parque automovilístico español, pero la alternativa intermedia de vehículos híbridos que combinan un motor eléctrico con uno propulsado por un combustible fósil es cada vez mayor, lo que nos indica que los vehículos eléctricos serán una realidad cuando queden solventados los problemas de autonomía actuales, hasta entonces, contamos con un largo camino de modelos que combinan ambas tecnologías, así como modelos que exploran otras técnicas de obtención de la energía.

Entre estas alternativas a los vehículos de combustión pura, encontramos diferentes modalidades interesantes, una clasificación bastante extendida es la siguiente [17]:

- Vehículo híbrido *HEV*: Por lo general, el motor de combustión interna ejerce la mayor funcionalidad, siendo el motor eléctrico auxiliar. La batería también es utilizada para sistemas auxiliares. La carga se consigue mediante el motor de combustión y el freno regenerativo.
- Vehículo híbrido enchufable *PHEV*: En este caso, el motor eléctrico juega un mayor papel. El motor de combustión sólo es arrancado al inicio de la conducción si la batería está descargada o si se requiere mayor velocidad. La batería se recarga conectándola a la red eléctrica además de los métodos descritos en los *HEV*.
- Vehículo eléctrico de batería *EV*: Cuentan únicamente con motores eléctricos. La recarga de las baterías se consigue mediante la red eléctrica. Entre sus ventajas se encuentra el fácil mantenimiento y ser cero emisiones durante la conducción.
- Vehículo de celda de combustible *FCV*: También conocidos como vehículos de hidrógeno. Se impulsan mediante motores eléctricos alimentados gracias a la corriente eléctrica que surge mediante la generación de vapor de agua a partir de oxígeno e hidrógeno. La autonomía es muy similar a la de coches propulsados por combustibles fósiles y la conducción es cero emisiones (sólo vapor de agua).
- Vehículo eléctrico de autonomía extendida *EV_{ext}*: Como primera solución a los problemas de autonomía, se han desarrollado vehículos eléctricos que incorporan un generador de combustible capaz de recargar la batería durante la conducción, dicho combustible puede ser tanto un combustible fósil (gasolina o diesel) o un combustible limpio (hidruros metálicos como en los vehículos de pila de combustible).
- Vehículo eléctrico híbrido *FCHV*: Se trata de una última evolución que incorpora únicamente motores eléctricos pero con diferentes fuentes de energía trabajando en paralelo. Por un lado, contaría con las baterías al igual que un vehículo eléctrico *EV*, por otro lado, contaría con producción de electricidad mediante pilas de combustible al igual que un *FCV*. De esta manera se consiguen combinar las ventajas de ambas variantes.

Tabla 2.1 Tipos de vehículos con motor eléctrico.

Tipo	M. Eléctrico	M. Combustión Interna	Batería	Pila de combustible
<i>HEV</i>	X	X	(No enchufable)	-
<i>PHEV</i>	X	X	(Enchufable)	-
<i>EV</i>	X	-	X	-
<i>FCV</i>	X	-	-	X
<i>EV_{ext}</i>	X	(generador)	X	(según combustible)
<i>FCHV</i>	X	-	X	X

2.2 Descripción del vehículo FOX

Como se describe en [4] y [2], el vehículo FOX es un proyecto del Laboratorio de Control de Células de Combustible del departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla. Específicamente se trata de la adaptación de un chasis fabricado por SilverCars adaptado para albergar cuatro motores eléctricos independientes (uno en cada rueda) los cuales son alimentados por una batería de Ión-Litio y una pila de combustible conectada a un tanque de hidruros metálicos.



Figura 2.1 Vehículo FOX.

A continuación se describen los elementos principales del vehículo FOX que desempeñan un papel relevante en este proyecto:

2.2.1 Motores

Una de las características principales del vehículo FOX es la peculiaridad de contar con cuatro motores eléctricos, permitiendo un control individual especializado rueda a rueda obteniendo un resultado más eficiente.

Los motores son capaces de aportar individualmente 7kW y un par máximo de 78Nm. Para su funcionamiento son alimentados por corriente alterna mediante circuitos inversores y carecen de escobillas. Esto se traduce en menor pérdidas mecánicas y menor peso, lo que implica mayor versatilidad para el control, más eficiencia y, por tanto, más autonomía.

Para su control, se encuentran comunicados con la unidad de control mediante el bus CAN, transmitiéndosele una señal de 0V a 5V que es traducido mediante electrónica de potencia a las magnitudes correspondientes.

2.2.2 Batería

La batería del vehículo está compuesta por 24 celdas de entre 3.2V y 72V agrupada en 6 paquetes. Su funcionalidad consiste en transformar la energía química almacenada en ella, en energía eléctrica que alimente a los motores, así como aprovechar los excesos de energía y almacenarlos para su posterior uso. El modelo usado se trata de una batería de Ión-Litio, la cual emplea fosfato de hierro y manganeso ($LiFeMnPO_4$) en el cátodo. Como se describe en [8], las ventajas principales de esta batería frente a otras análogas usadas en el mercado son su gran estabilidad térmica y química que aportan mayor seguridad, así como su alta densidad energética junto a una larga vida. Sin embargo, la ventaja más importante de esta batería es su impacto sobre el medio ambiente, menor a sus análogas, lo cual va en la línea de trabajo de este proyecto; la movilidad sostenible.

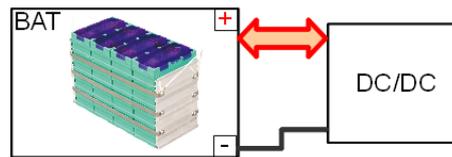


Figura 2.2 Batería de Ión-Litio acompañada de un convertidor de potencia.

Junto a la batería también se encuentra instalado el sistema gestor de la batería o BMS (por sus siglas en inglés *Battery Management System*) que incorpora múltiples funcionalidades como las siguientes:

- Protección de las celdas: Su objetivo es sencillo pero fundamental; Mantener el punto de operación entre los límites de diseño con el fin de no dañar la batería.
- Control de carga: Gestiona una carga adecuada ya que una mala gestión es una de las causas más frecuentes de daños en las baterías.
- Determinación del SOC: Informa del estado de carga de la batería, lo cual es necesario conocer en los análisis y técnicas de control inteligente que se plantean en este proyecto.
- Comunicación entre la batería y el equipo de carga: La batería se encuentra conectada con la ECU gracias a el BMS mediante un bus CAN, método de comunicación habitual en los vehículos actuales.
- Otras utilidades: También cuenta con otras funcionalidades como crear un historial de carga, almacenaje de información por parte del fabricante o calcular el estado de salud de la batería, lo cual ayuda a prolongar su vida útil.

2.2.3 Pila de combustible

Como elemento complementario a la batería, el vehículo FOX también cuenta con una pila de H_2 de tipo PEM. El funcionamiento de ésta se centra en la introducción de hidrógeno diatómico por el ánodo de la pila en paralelo a oxígeno diatómico por el cátodo, obteniendo como resultado agua y corriente eléctrica gracias a los electrones liberados.

El nombre se debe a que el electrolito está compuesto por una membrana polimérica.

Para su correcto funcionamiento la pila de tipo PEM también cuenta con un sistema de refrigeración por aire y con un convertidor DC/DC que la conecta con el resto del sistema.

Además, anexo a la pila de combustible se encuentra el tanque de hidruros metálicos. 2 depósitos con una capacidad total de 70 litros que almacenan hidruros metálicos que son utilizados para la inyección del hidrógeno en el ánodo.

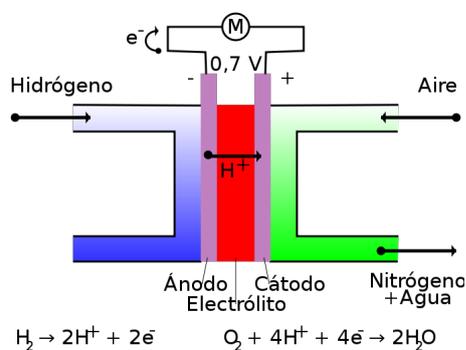


Figura 2.3 Funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM. Fuente: Wikipedia [9].

2.2.4 ECU

La ECU (unidad de control electrónico) es la unidad de control principal del vehículo y está compuesto por un microprocesador, una memoria y una serie de entradas y salidas para estar en continua comunicación con los demás periféricos. Entre otras funcionalidades, alberga los controladores de tracción del vehículo.

2.2.5 Sensores

Para que la ECU lleve a cabo su cometido, se sirve de la información aportada por múltiples sensores que aporten información sobre el estado de los dispositivos del vehículo y la conducción.

- La BMS aporta información sobre el estado de carga, tensión e intensidad de la batería.
- También es medida la velocidad angular e intensidad que circulan por los motores y convertidores.
- Mediante 3 potenciómetros se recoge la información asociada a la conducción deseada (pedal de freno y aceleración, así como inclinación del volante).
- Mediante 4 potenciómetros lineales paralelos a los amortiguadores se recoge la información de las suspensiones sobre cada rueda, lo que servirá, por ejemplo, para estudiar las fuerzas verticales a las que se encuentra sometido el vehículo.
- Un último dispositivo que integra una IMU (Unidad de medidas inerciales) y un GNS (sistema de navegación por satélite) permite conocer la posición, velocidad y aceleraciones a las que se ve sometido el vehículo.

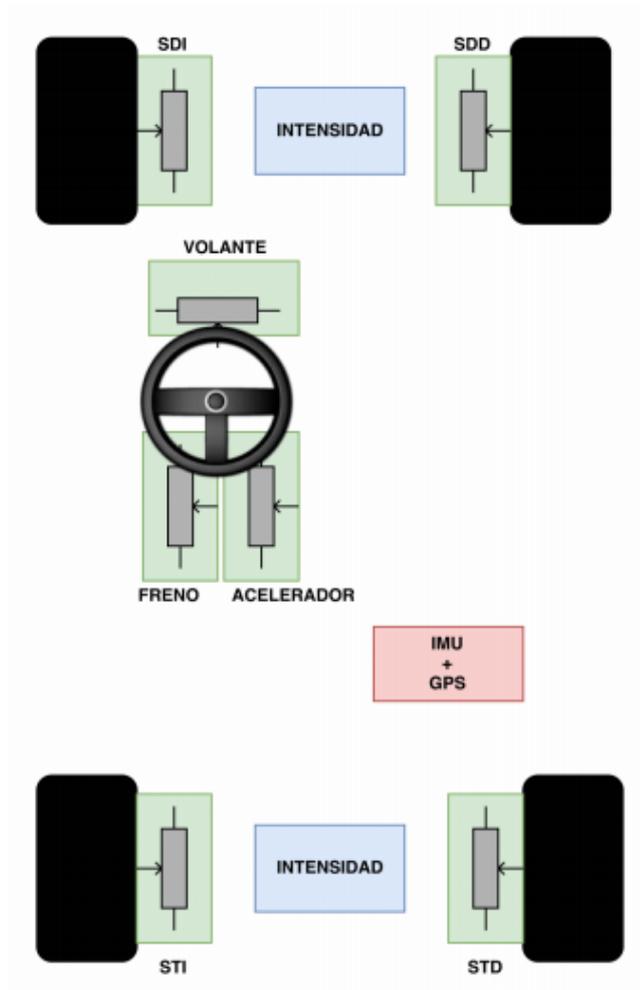


Figura 2.4 Esquema de los sensores en el FOX. Fuente: [3].

3 Estrategias de control

Un sistema de control es el conjunto de dispositivos coordinados con el objetivo de generar y modificar automáticamente las entradas de un sistema para obtener las salidas deseadas. En este capítulo se pretende exponer de manera teórica las estrategias de control que se han empleado así como sus principales características, ventajas y desventajas.

3.1 Control PID

El controlador proporcional, integral y derivativo (PID) es una metodología de control clásico basada en el estudio del error cometido entre las salidas deseadas y las obtenidas. En concreto, la señal de control es proporcional al error (P), proporcional a la variación del error (D) y proporcional al error acumulado (I).

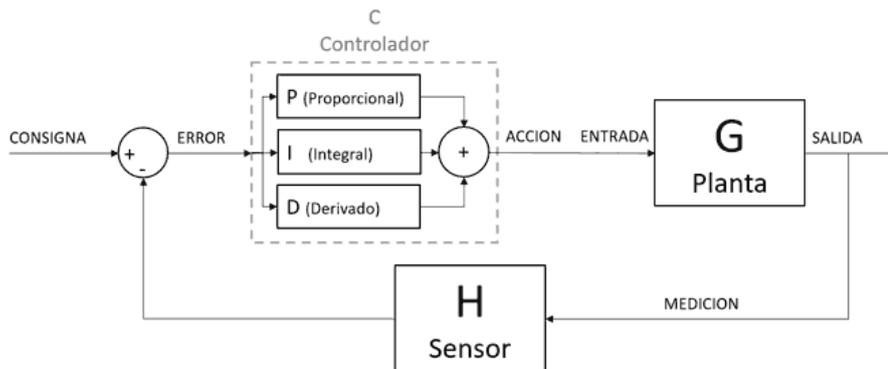


Figura 3.1 Esquema de control mediante PID. Fuente de la imagen: [12].

Siendo u la señal de control aplicada sobre el sistema, $e(t)$ la diferencia entre la salida del sistema y la deseada, y K las constantes del efecto proporcional, integral y derivativo, la formulación de esta metodología es la siguiente:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

3.1.1 Componentes del controlador

- Componente proporcional: El efecto proporcional genera una señal de control mayor conforme mayor sea el error, sin embargo, cuando la salida no sea la deseada pero el error cometido sea pequeño, el efecto proporcional no será lo suficientemente notable como para entrar en juego, sucediendo un error en régimen que no puede solventar un control únicamente proporcional.
- Componente integral: El efecto integral es el encargado de corregir los errores en régimen permanente. Al tratarse de una componente proporcional al error acumulado, el pequeño error que no es corregido

por el efecto proporcional, va incrementando poco a poco la señal de control hasta que tome suficiente fuerza como para corregirlo.

En ocasiones, cuando la referencia se sitúa en valores inalcanzables o ante un cambio brusco de ésta, la señal de control calculada es superior al valor máximo que se permite aplicar (saturación). Si este fenómeno sucede durante un periodo prolongado de tiempo se puede producir el fenómeno conocido como Windup, el cual consiste en que la integral del error toma un valor tan elevado que supera al efecto proporcional y al derivativo prolongando la saturación de la señal de control durante un largo periodo de tiempo.

Si el controlador es implementado digitalmente, existe la posibilidad de establecer mecanismos antiwindup como establecer un valor máximo de la integral del error o no actualizar su valor durante la saturación de la entrada. Sin embargo, ante una implementación mediante circuitos electrónicos analógicos, tal efecto es difícil de evitar.

- **Componente derivativa:** El efecto derivativo tiene un carácter anticipativo. La funcionalidad de esta componente se centra en corregir la señal de control observando cómo va evolucionando el error; Si el error va en aumento a pesar de la señal de control aplicada, el efecto derivativo aumentará su fuerza, si por el contrario, se está reduciendo drásticamente el error, reduce la señal de control para evitar sobreoscilaciones en torno al punto de equilibrio deseado, esto reducirá notablemente el tiempo necesario para alcanzar la referencia permitiendo respuestas más rápidas.

Se trata de una componente esencial en los sistemas que cuentan con una deriva entre la aplicación y el resultado, ya sea por la existencia de retraso entre que se calcula la nueva señal de control y su aplicación o porque existe una diferencia de tiempo considerable entre el instante en el que se tomaron las medidas de la salida y el instante en el que se aplica la señal de control.

Es importante resaltar que una mala consideración de los ruidos presentes en el sistema o en los dispositivos de medida, puede acarrear que el efecto derivativo actúe como un amplificador del ruido localizado en altas frecuencias. Es por ello que el controlador PID suele acompañarse de un filtro de altas frecuencias el cual debe diseñarse debidamente para filtrar el ruido pero no anular el efecto derivativo.

Por esta misma causa, es interesante analizar la respuesta frecuencial del sistema y las frecuencias a las que se desea trabajar, en ocasiones basta con un controlador proporcional-integral para cumplir especificaciones temporales de control y no someterse a la incertidumbre del ruido.

3.1.2 Ventajas y desventajas

Entre las principales ventajas del controlador PID encontramos las siguientes:

- Se trata de un controlador fácil de diseñar e implementar tanto en analógico (circuito electrónico) como en digital (microcontrolador).
- Es aplicable a multitud de sistemas.
- Existen métodos de ajuste manual-empírico de los parámetros que no precisan de conocimiento del sistema.
- Permite obtener salidas sin error en régimen permanente.
- Ofrece una respuesta rápida ante el rechazo de perturbaciones.

En cuanto a las principales desventajas:

- Una implementación analógica es restrictiva frente a modificaciones.
- Difícil aplicación en sistemas no lineales o variantes en el tiempo.
- Necesidad de mecanismos Anti-Windup (difícil en analógica).
- No garantiza la estabilidad del sistema.

- No ofrece una respuesta óptima.

Aunque esta metodología no garantice un control óptimo y pueda comprometer la estabilidad del sistema, que siga utilizándose tras más de un siglo desde sus primeras aplicaciones en la navegación, son un indicador de que se trata de una buena metodología de control que ofrece soluciones satisfactorias en multitud de aplicaciones.

3.2 Control MPC

El control predictivo basado en modelo (o MPC por sus siglas en inglés) es una metodología de control que deja a un lado las técnicas clásicas, enfocadas en el estudio entrada-salida, centrándose en la utilización de modelos para calcular la señal de control óptima en base a predicciones del comportamiento futuro y las restricciones de control y del sistema.

La estrategia de control se centra en el principio de horizonte móvil, consistente en hallar la señal óptima a aplicar en un instante de tiempo en base a una secuencia de futuras señales y un horizonte de predicción determinado. [1]

3.2.1 Componentes del controlador

El MPC consta de dos elementos principales: El modelo del sistema y el optimizador.

El modelo es el encargado de predecir futuras salidas del sistema en base a entradas y salidas pasadas junto a entradas futuras. Esto permitirá conocer de antemano cómo evolucionaría el sistema ante tales entradas futuras y evaluar su calidad. También existe la posibilidad de añadir un modelo de las perturbaciones que afectan al sistema.

Por otra parte, el optimizador es el bloque funcional que analiza los errores futuros con el fin de encontrar las futuras entradas óptimas. Para ello compara las salidas predichas por el modelo frente a la trayectoria de referencia y, en base a la función de coste especificada para el control y las restricciones definidas del sistema, evalúa la calidad de la respuesta del sistema asociada a dichas entradas.

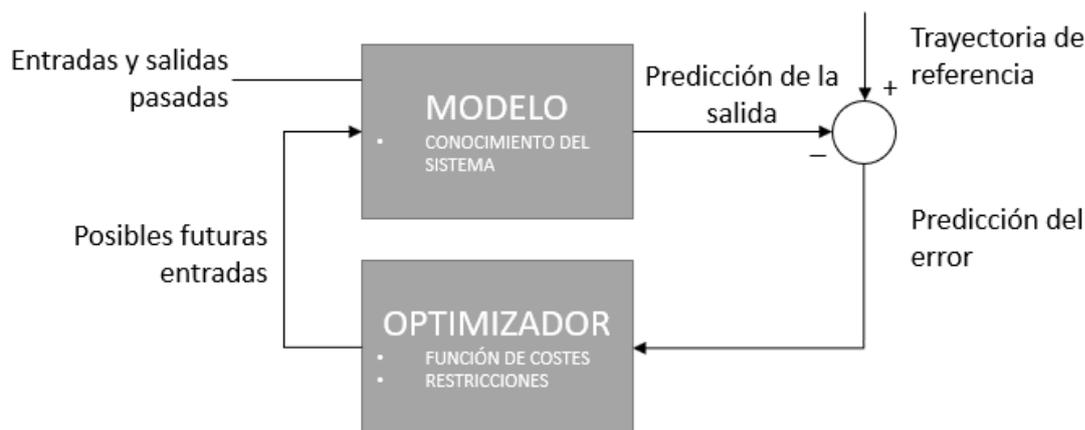


Figura 3.2 Esquema de funcionamiento de un MPC.

Una de las principales ventajas del MPC es su gran versatilidad. El modelo puede ser implementado con multitud de variantes (función de transferencia, respuesta impulsional, espacio de estados... o incluso técnicas más novedosas como redes neuronales o modelos de lógica borrosa) [14].

En cuanto a la referencia, es importante discernir entre dos conceptos: Salidas de referencia y trayectorias de referencia. El primer concepto hace alusión a la salida que se desea que alcance el sistema, sin embargo, para

evitar cambios bruscos en el sistema, suele definirse una trayectoria suavizada entre la salida actual del sistema y la nueva referencia. Cómo de acusada sea dicha trayectoria será diseñada en base a las especificaciones de control y la naturaleza del sistema.

Para entender correctamente el optimizador, es necesario hablar de los siguientes conceptos: Horizonte de predicción, horizonte de control, horizonte deslizante y función de coste:

- Horizonte de predicción N_1, N_2 : Para analizar el impacto de una cadena de entradas, se analiza cómo se ajustan las predicciones a la trayectoria de referencia a lo largo del horizonte de predicción, comprendido por los instantes de tiempo entre $(t + N_1)$ y $(t + N_2)$.
- Horizonte de control N_u : A la hora de estudiar las predicciones, se analizan una combinación de N_u entradas, a partir de dicho instante temporal se mantiene fija la entrada de cara a las predicciones.
- Horizonte deslizante: A pesar de calcularse entradas y se analizan las predicciones entre $(t + N_1)$ y $(t + N_2)$, se aplica la técnica de horizonte deslizante, es decir, cada instante de tiempo se recalcula una nueva secuencia de señales de control y nuevas predicciones, corrigiendo así posibles desviaciones en los estados del sistema y errores en la predicción.
- Función de coste J: Es la función matemática con la que se estudia analíticamente cuán buena es una secuencia de control. Generalmente se plantea como una ponderación de las predicciones de error y de los esfuerzos de control, poniendo especial énfasis en los instantes de tiempo más inmediatos. Es aquí donde se establecen los objetivos (minimizar el error con el menor esfuerzo de control posible) y por tanto, la primera entrada de la secuencia de señales de control que la minimice será la señal de control óptima.

Como se puede intuir, estudiar predicciones de salida para N instantes de tiempo en base a N señales de control independientes se traduce en un coste computacional muy elevado, es por ello que se recurre a incorporar el concepto de horizonte de control anteriormente descrito junto a otras técnicas como funciones base y restricciones.

Incluir funciones bases significa diseñar las combinaciones de señales de control en base a un patrón. Es decir, en lugar de diseñar N entradas de control independientes, se generan las combinaciones en base a una función prediseñada, como por ejemplo, una cadena polinómica.

Otra de las ventajas de los controladores MPC es que permiten incluir fácilmente restricciones físicas o de especificaciones de manera que queden contempladas en la solución óptima. Además, dicha inclusión implica un problema más acotado, y por tanto, menos coste computacional.

Entre las restricciones más comunes se incluyen limitar los valores máximos y mínimos de las señales de control y de las salidas, al igual que sus velocidades y sus aceleraciones. También es habitual restringir el número máximo de intervalos hasta alcanzar la referencia, o acotar posibles sobreoscilaciones.

Como conclusión, una formulación genérica habitual de la función de costes a minimizar sería de la siguiente manera:

$$J_k = \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i (r_{k+i} - x_{k+i})^2 + \sum_{n=0}^{N_u-1} \beta_n \Delta u_{k+n}^2 \quad (3.2)$$

Donde N_1 y N_2 definen el horizonte de predicción, N_u el horizonte de control, α_i es el coeficiente de ponderación del error predicho, y β_n el coeficiente de ponderación de los esfuerzos de control. En cuanto a r , x y u , se tratan respectivamente de la trayectoria de referencia, la predicción de la variable a controlar y la señal de control propuesta.

3.2.2 Ventajas y desventajas

Entre las principales ventajas del controlador MPC encontramos las siguientes:

- La señal de control será óptima en base a los criterios y limitaciones establecidos.
- Permite controlar sistemas con múltiples entradas y múltiples salidas.
- Permite incluir restricciones.
- Permite el control de sistemas complejos, incluso no lineales.
- Permite controlar adecuadamente sistemas con retardos significativos.
- Buen resultado en sistemas cuya futura referencia sea conocida.

En cuanto a las principales desventajas:

- Según el sistema y las restricciones, puede tener un gran coste computacional.
- Precisa de un modelo del sistema a controlar, como la señal es optimizada para éste, debe conocerse el sistema en profundidad.
- Un modelo demasiado complejo puede traducirse en un tiempo de cálculo superior al periodo de control, impidiendo el correcto funcionamiento.
- Si el modelo no es completo o se presentan perturbaciones no esperadas, el resultado puede ser impredecible.

4 Modelado de los componentes

Una vez detalladas las estrategias de control que se van a seguir, el siguiente paso es la implementación sobre el modelo energético del vehículo FOX. Con este fin, el capítulo se compone de las siguientes secciones: Balance energético, modelado de los diferentes componentes del sistema y estructura del controlador.

4.1 Balance energético

Como ya se comentó anteriormente, el vehículo eléctrico híbrido FOX consta de diferentes elementos que demandan, aportan y almacenan energía. El balance energético sucede en un bus al que están conectados los siguientes componentes: batería de ión-litio, pila de combustible anexa al tanque de hidrógeno y cuatro motores eléctricos. Además, se contempla la incorporación de supercondensadores que almacenen y aporten picos de potencia a gran velocidad. Una vez incorporado, la estructura del bus quedará de la siguiente manera:

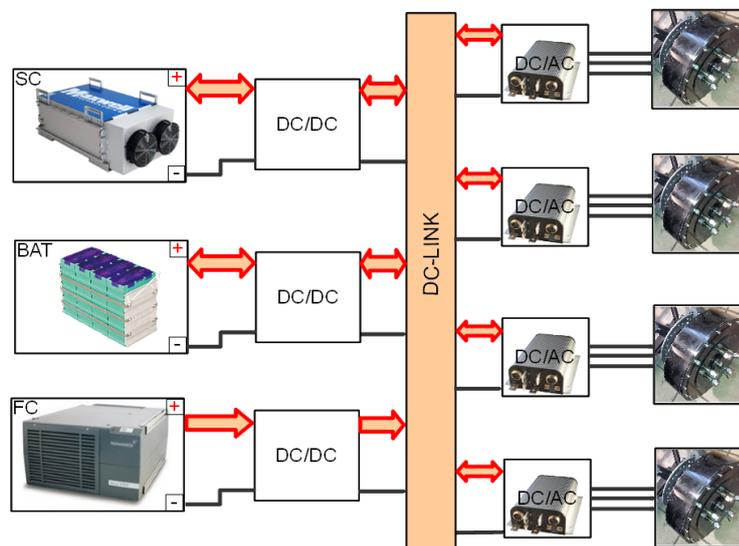


Figura 4.1 Topología del vehículo híbrido eléctrico FOX.

Para el criterio de signos se ha seguido el indicado en [8], por el cual la demanda o absorción de energía es negativa (motores en funcionamiento y batería almacenando), y ceder potencia tiene signo positivo (freno regenerativo, batería descargándose, pila de combustible en funcionamiento). De esta manera, el balance energético en el bus queda expresado con la siguiente fórmula:

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

El objetivo es conseguir que la potencia neta sea cero, lo que implica que los motores consiguen obtener toda la potencia demandada y que las baterías son capaces de aprovechar completamente la energía mediante el freno regenerativo.

4.2 La batería de ión-litio

Para modelar la batería se han seguido las ecuaciones descritas en [6]. Según dicho modelo, la tensión en bornes de la batería depende de la corriente aplicada, la resistencia interna y la tensión interior, la cual varía según si la batería se encuentra cargándose o descargándose.

$$V_{bat} = V_{interna} + R_i \cdot I_{bat} \quad (4.2)$$

$$C_{out,t} = \int_0^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (4.3)$$

Durante la carga de la batería, la tensión interna queda descrita por la siguiente ecuación:

$$V_{interna} = V_{bat0} - K_{bat} \cdot \frac{C_{120}}{C_{120} - C_{out,t}} \cdot (I_{bat}^* + C_{out,t}) + A_{bat} e^{-B_{bat} C_{out,t}} \quad (4.4)$$

Durante la descarga, la tensión interna queda descrita por la siguiente ecuación:

$$V_{interna} = V_{bat,0} - K_{bat} \cdot \frac{C_{120}}{C_{120} - C_{out,t}} \cdot C_{out,t} - K_{bt} \cdot \frac{C_{120}}{0.1 \cdot C_{120} + C_{out,t}} \cdot I_{bat}^* + A_{bat} e^{-B_{bat} C_{out,t}} \quad (4.5)$$

Los significados de los términos anteriormente utilizados son los siguientes:

- V_{bat0} : Tensión en bornes ante circuito abierto.
- A_{bat} : Amplitud de la zona exponencial.
- B_{bat} : Inversa de la constante de tiempo de la zona exponencial.
- K_{bat} : Constante de polarización de la batería.
- C_{120} : Capacidad máxima de la batería.
- $C_{out,t}$: Capacidad actual de la batería.
- I_{bat}^* : Dinámica de baja frecuencia de la corriente.

Paralelamente, para calcular el estado de carga, se compara $C_{out,t}$ frente a C_{120} , ya que uno supone el estado de carga y otro la carga máxima teórica.

$$SOC = 100 \cdot \left(1 - \frac{C_{out,t}}{C_{120}}\right) \quad (4.6)$$

No hay que olvidar que dicho modelo tendrá diferentes parámetros en función del punto de operación y condición de trabajo, por lo que es importante obtenerlos experimentalmente para tener un modelo fiel al sistema real.

La parametrización utilizada para modelar la batería de ión-litio ha sido cotejada con los técnicos del laboratorio siendo los valores utilizados los siguientes:

Tabla 4.1 Parámetros de la batería de ión-litio.

Parámetro	Valor
Voltaje en circuito abierto $V_{bat,0}$	76,80 V
Máxima capacidad de carga C_{120}	100 Ah
Constante de polarización K_{bat}	0,006215 V
Amplitud de la zona exponencial A_{bat}	11,053 V
Inversa de la constante temporal en la zona exponencial B_{bat}	2,452 Ah ⁻¹
Resistencia interna R	0,07 Ω
Corriente máxima de carga-descarga I_{max}	100 A
Carga inicial de la batería SOC	80 %
Rango Seguro SOC	20%-80 %

4.2.1 Modelo simplificado

Analizando las expresiones de carga 4.4 y descarga 4.5 y los parámetros de caracterización en la tabla 4.1, es posible realizar un modelo discreto simplificado que modele adecuadamente el comportamiento de la batería en los puntos de operación en torno a los cuales se desea trabajar.

Para el modelo, no se contempla como entrada la potencia demandada sino la corriente de entrada saturada entre los valores máximos y mínimos, la cual es calculada por la potencia exterior y el voltaje en bornes:

$$I(k) = \frac{P_{in}(k)}{V_{bat}(k)} \in [-I_{max}, I_{max}] \quad (4.7)$$

El nuevo estado de carga viene dado por dicha corriente y el estado de carga anterior:

$$C_{out}(k+1) = C_{out}(k) + \frac{T}{3600} \cdot I_{bat}(k) \in [0, C_{120}] \quad (4.8)$$

En cuanto al modelado de la tensión, es algo más complejo, pues su formulación cuenta con términos exponenciales y términos proporcionales a la carga y a la corriente.

En primer lugar, es notable que la zona exponencial sólo entra en juego para niveles de carga muy bajos en torno a los que no se espera trabajar, por lo que dichos términos pueden obviarse.

En segundo lugar, es posible hacer una linealización de los demás términos consiguiendo un modelo más simple con un error admisible.

Comenzando por el término proporcional a la capacidad de carga actual, éste puede ser sustituido por la recta de regresión por mínimos cuadrados sin cometer un gran error si se considera que el voltaje nominal de la pila es de 76,80V:

$$V_1(t) = 0,8018 + 0,03249 \cdot C_{out}(t) \quad (4.9)$$

En la gráfica 4.2 puede apreciarse el error que se comete con tal aproximación. En cuanto al término dependiente de la capacidad actual y proporcional a la corriente, es posible sustituirlo por $V_2(t) = 0,0575 \cdot I_{bat}(t)$.

El error que se comete en los casos más extremos ($I = \pm 100A$) puede verse en la gráfica 4.3.

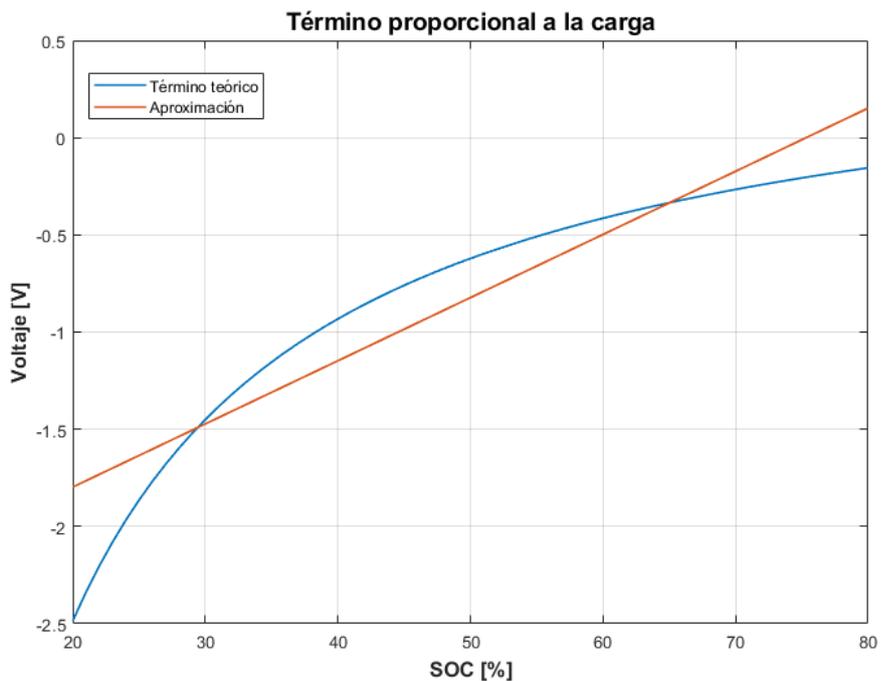


Figura 4.2 Componente de la tensión proporcional al estado de carga.

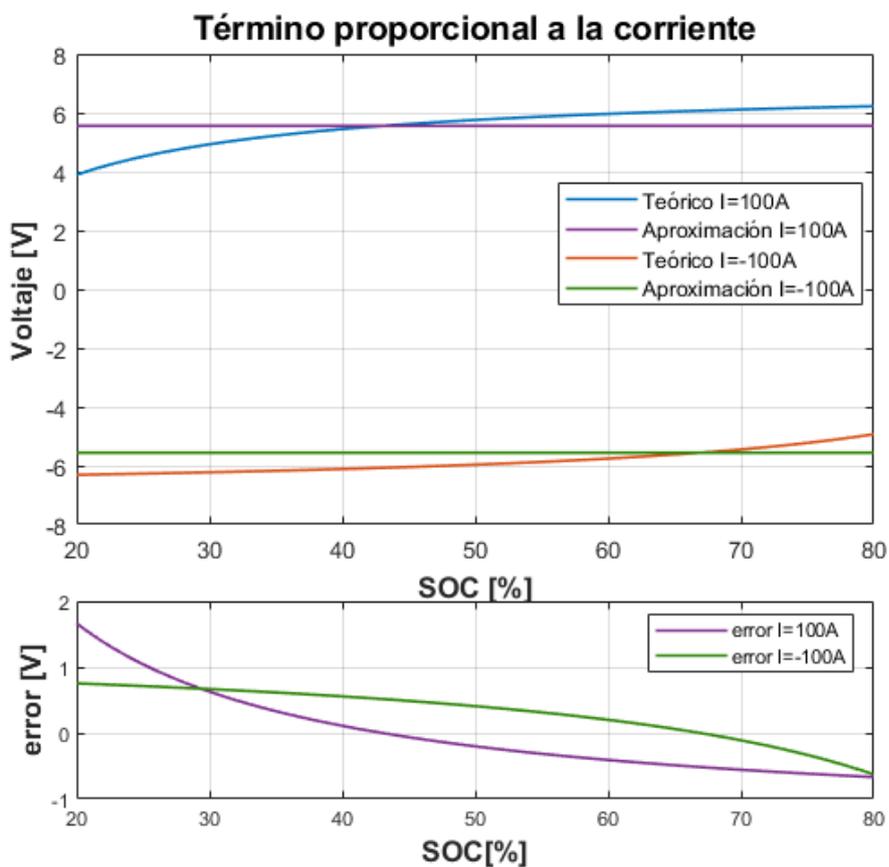


Figura 4.3 Componente de la tensión proporcional a la corriente.

Tras ambas simplificaciones es posible establecer la expresión simplificada de la tensión de la batería con la ecuación 4.10. Los errores cometidos en los casos extremos de $I_{bat} = \pm 100A$ pueden verse en la gráfica 4.4

$$V_{bat}(t) = 77,6018 - 0,03249 \cdot C_{out}(t) + 0,0575 \cdot I_{bat} \quad (4.10)$$

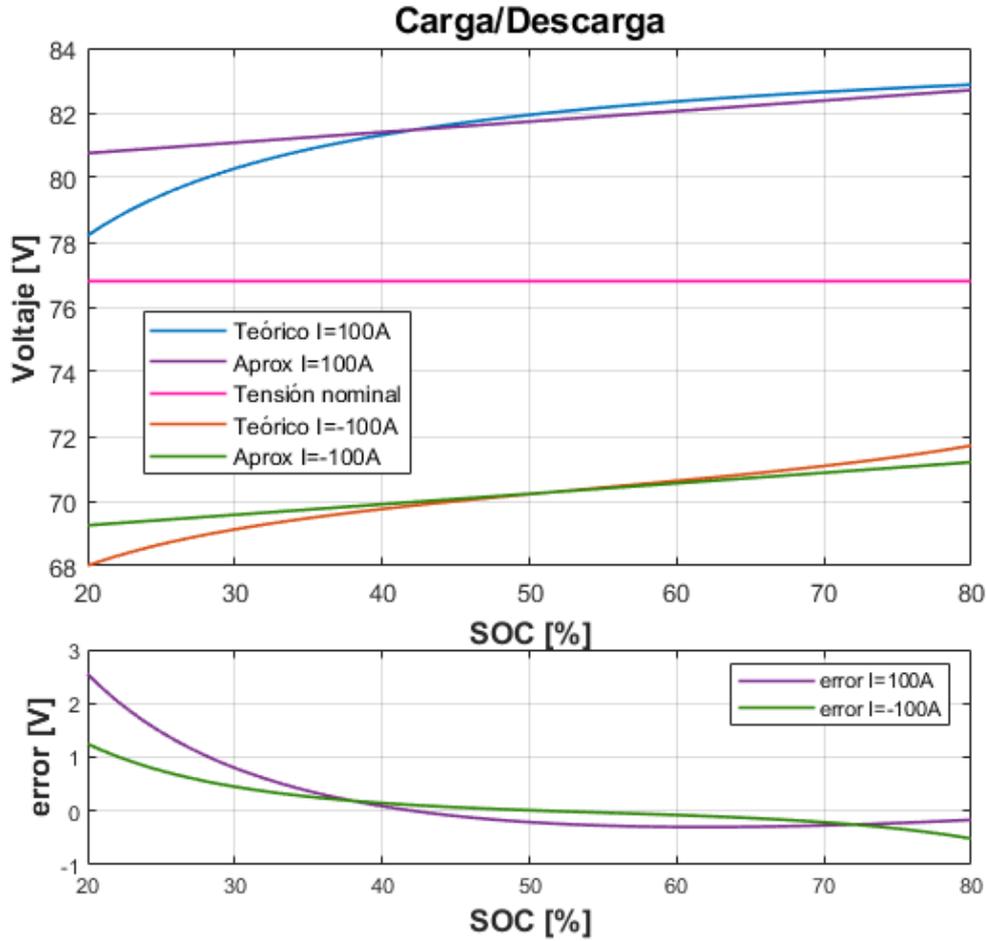


Figura 4.4 Modelo teórico de la batería vs. aproximación.

Este modelo también puede ser expresado en el espacio de estados con las siguientes expresiones:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -0,03249 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T/3600 \\ 0,0575 \end{bmatrix} \cdot I_{bat}(k) \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} V_{bat}(k) \\ SOC(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -100/C_{120} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 77,6018 \\ 100 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Además, si se desea realizar un cálculo preliminar de cuánto variaría el estado de carga de la batería en pequeños periodos de tiempo, algo que será muy útil en técnicas de control predictivo, una opciones es seguir las directrices del trabajo [16]. Dado que la potencia depende linealmente tanto de la tensión como de la corriente, y la variación en la capacidad es directamente proporcional a la corriente, pueden realizarse las

siguientes simplificaciones:

$$I(t) = -C_{120} \cdot \frac{\partial SOC}{\partial t} = \frac{P(t)}{V(t)} \rightarrow \partial SOC(t) = \frac{P(t)}{-C_{120} \cdot V(t)} \cdot \partial t \quad (4.13)$$

Por último, tras lo observado en la gráfica 4.4, es posible discretizar el estado de carga considerando $V(t)$ como una constante de valor la tensión nominal de la batería.

De esta manera, la expresión discretizada tendría la forma:

$$\frac{\Delta SOC(k)}{\Delta T} = \frac{SOC(k+1) - SOC(k)}{T_c} = -\frac{100 \cdot P(k)}{3600 \cdot V_N \cdot C_{120}} \rightarrow \Delta SOC(k) = -T_c \cdot \frac{100 \cdot P(k)}{3600 \cdot V_N \cdot C_{120}} \quad (4.14)$$

Lógicamente este modelo simplificado no dará valores exactos, especialmente en torno a puntos de operación bastantes alejados a los centrales de la gráfica 4.4 y tendrá un error acumulativo. Sin embargo, es posible utilizar dicho valor como indicativo de cuánto variaría la batería, y si periódicamente se corrige la magnitud con mediciones reales, es posible obtener buenos resultados habiendo suprimido el error acumulativo.

4.3 La pila de combustible

Para el modelado de la pila de combustible se ha optado por el modelo propuesto en [10] basado en la combinación de un modelo térmico (dinámico) y de un modelo electroquímico (estático). Dicho modelo consta de múltiples parámetros, los cuales son obtenidos a partir de mediciones experimentales.

De los manuales técnicos se obtienen las presiones del oxígeno y el hidrógeno, el área efectiva de la membrana A_{fc} y la temperatura nominal T_{st}^0 de cada stack.

Experimentalmente se obtienen parámetros que relacionan incrementos de voltaje en base a la variación de la presión del oxígeno y a la variación de la temperatura de cada stack.

Haciendo uso de estos parámetros experimentales y teóricos, la curva se ajusta mediante 4 puntos experimentales que recojan la relación intensidad - tensión en diferentes secciones de la curva de polarización. Siendo $j = \frac{I}{A_{fc}}$, la ecuación que define la tensión en cada celda es la siguiente:

$$V_{celda} = U_o + K_{1t} \cdot (T_{st} - T_{st}^0) - K_{1act} \cdot (1 - e^{-\frac{j}{K_{2act}}}) - K_{1conc} \cdot j^{1+K_{2conc}} - j \cdot R \quad (4.15)$$

Los parámetros U_o , K_{1t} , K_{1act} , K_{2act} , K_{1conc} y K_{2conc} son parámetros experimentales y teóricos dependientes de los valores anteriormente descritos. Esta nomenclatura es equivalente a la empleada en la librería *MicrogridLib* de *Simulink* desarrollada en el departamento. Sin embargo, es sencillo identificar términos y observar que se trata de una expresión equivalente a las ecuaciones propuestas en la tesis doctoral de la que se ha extraído el modelo [10].

Considerando que la ecuación para la tensión de una única celda es la descrita en 4.15, la tensión total de la pila será dicho valor multiplicado por el número de celdas (n) con las que cuente la pila.

$$V_{fc} = n \cdot V_{celda} \quad (4.16)$$

Por último, el caudal de H_2 demandado es proporcional al número de celdas, a la corriente que las atraviesa, e inversamente proporcional a la constante de Faraday y a 2 por contar cada molécula con dos electrones. Siendo I la intensidad que atraviesa la pila, la expresión queda determinada por la presente ecuación:

$$\dot{H}_2(t) = \frac{I \cdot n}{2 \cdot 96485,33289} \cdot \left[\frac{2}{1000} \cdot \frac{Kg}{s} \right] \quad (4.17)$$

Los parámetros utilizados tras consultar con los técnicos del laboratorio se muestran en las tablas 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2 Constantes experimentales de la pila de combustible.

Parámetro	Valor
K_{1r}	0,00293
K_{1act}	0,066098
K_{2act}	0,012705
K_{1conc}	0,028396
K_{2conc}	8,0011

Tabla 4.3 Parámetros físicos de la pila de combustible.

Parámetro	Valor
U_o	0,93 V
Resistencia interna R	0,29179 Ω
Temperatura del Stack	293 K
Temperatura nominal del Stack	296K
Area efectiva de la membrana A_{fc}	61 cm^2
Número de celdas	60
Corriente máxima	36 A
Potencia máxima admisible	1,2 kW
Rango recomendado de trabajo	[100W, 900W]

4.3.1 Modelo simplificado

A diferencia de lo que ocurría con la batería, la pila de combustible tiene un funcionamiento más complejo que impide una fácil simplificación que modele el comportamiento dinámico de la pila. No obstante, en el intervalo de trabajo $P \in [0W, 1200W]$ y $I_{fc} \in [0A, 36A]$ existe bastante linealidad en las curvas características en régimen estacionario que relacionan $V_{fc}(t)$, I_{fc} y P_{fc} .

Como el rango de trabajo idóneo para un correcto funcionamiento y no reducir la vida útil de la pila es el rango $P \in [100W, 900W]$, las linealizaciones se han realizado por mínimos cuadrados buscando minimizar el error en dicho rango.

La relación $I - V$ en régimen estacionario puede ser simplificada por la recta:

$$V_{fc}(I_{fc}) = -0,2914 \cdot I_{fc} + 51,88 \quad (4.18)$$

La relación $P - V$ en régimen estacionario por la recta:

$$V_{fc}(P_{fc}) = -0,00638 \cdot P_{fc} + 52,04 \quad (4.19)$$

La relación $P - I$ en régimen estacionario por la recta:

$$I_{fc}(P_{fc}) = 0,02188 \cdot P_{fc} - 0,5539 \quad (4.20)$$

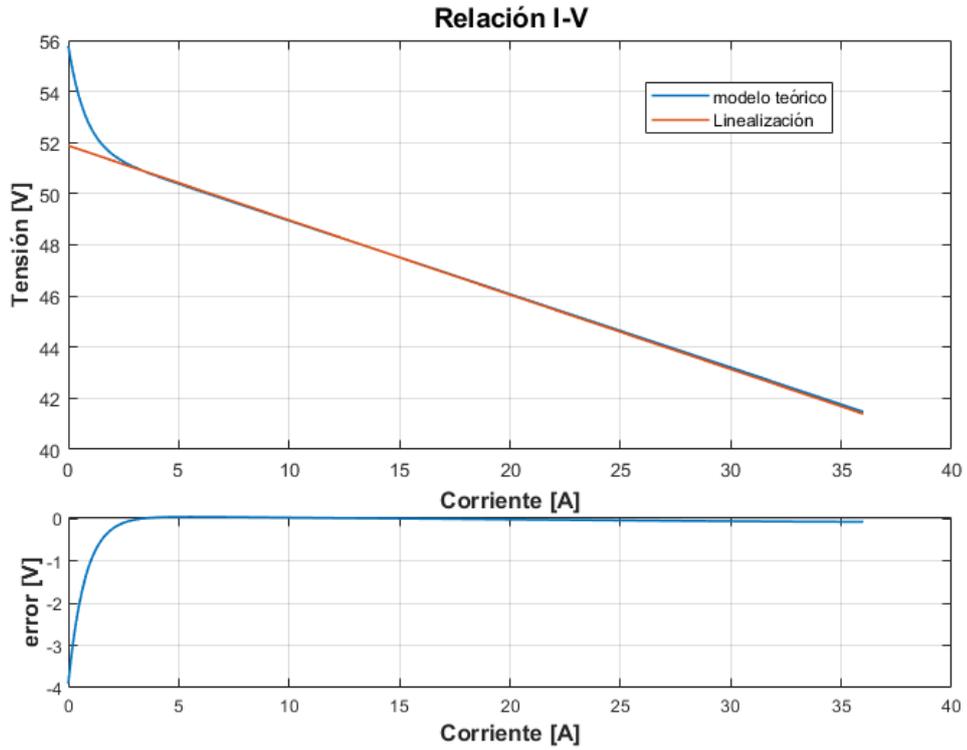


Figura 4.5 Linealización relación puntos de trabajo $I_{fc} - V_{fc}$.

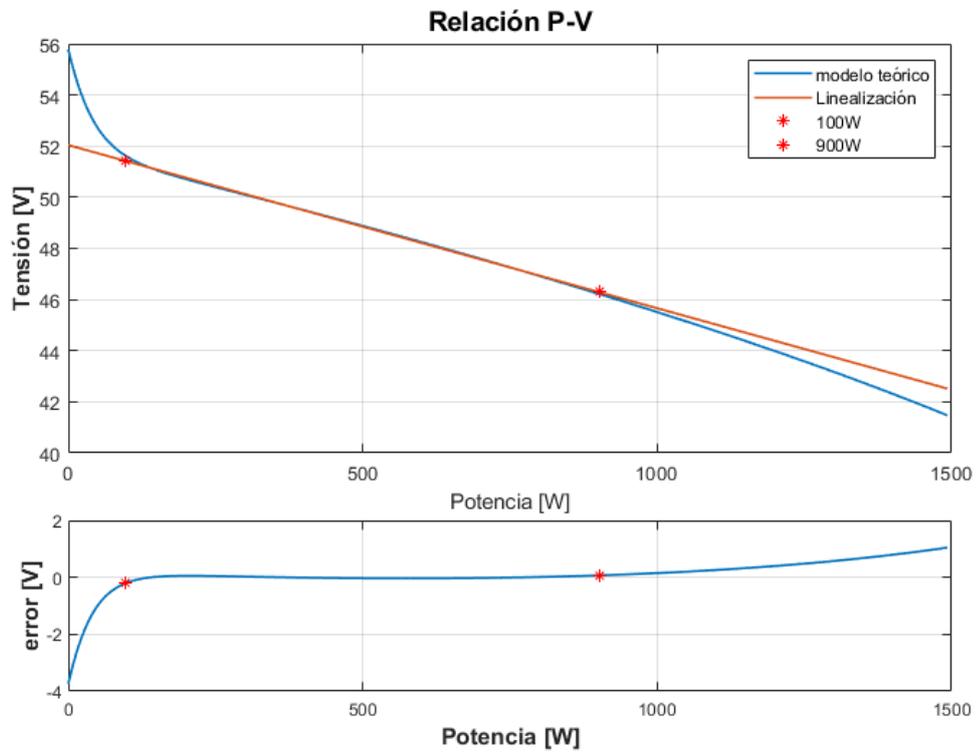


Figura 4.6 Linealización relación puntos de trabajo $P_{fc} - V_{fc}$.

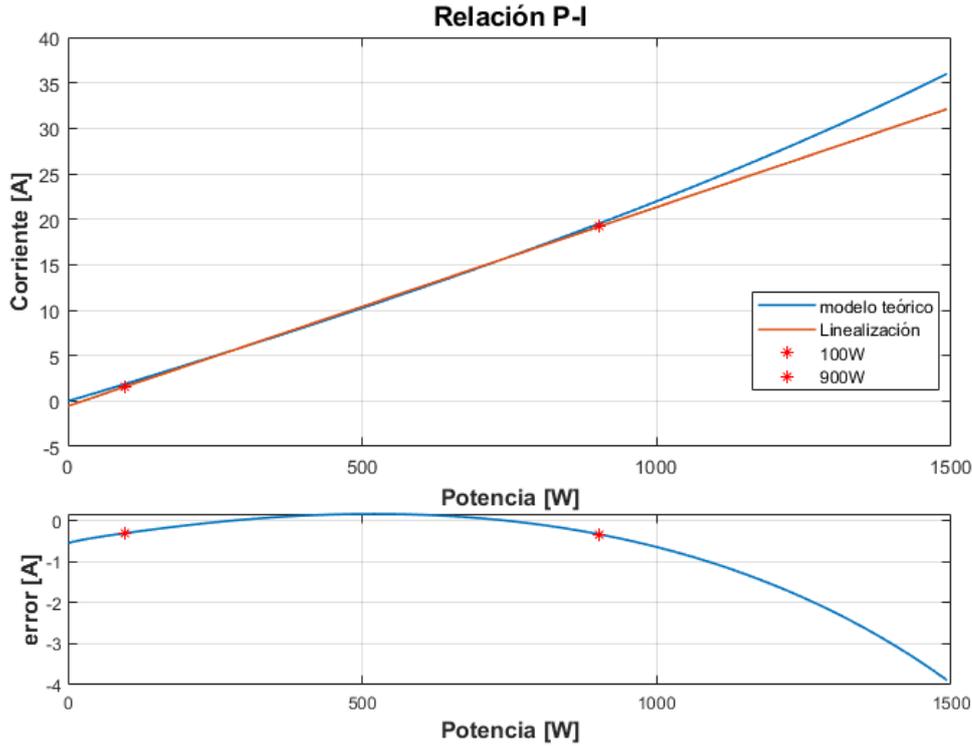


Figura 4.7 Linealización relación puntos de trabajo $P_{fc} - I_{fc}$.

En cuanto al flujo de H_2 entre el tanque y la pila, considerando que el vehículo FOX cuenta con una pila de combustible de 60 celdas, la ecuación 4.17 puede ser sustituida por:

$$\dot{H}_2(t) = I_{fc}(t) \cdot 6,218561744343483 \cdot 10^{-7} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (4.21)$$

Además, si se aplican las linealización de 4.20 sobre 4.21 se consigue la siguiente expresión:

$$\dot{H}_2(t) = (P_{fc}(t) \cdot 1,360621309662354 - 34,44461350191855) \cdot 10^{-8} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (4.22)$$

4.4 El tanque de hidruros metálicos

En nuestro caso, únicamente habrá que contemplar la idea de que el tanque se descarga, ya el proceso de carga nunca se llevará a cabo durante la conducción.

Como se describe en [10], el modelado del sistema de almacenamiento de hidruros metálicos es un proceso muy complicado que se centra en realizar un balance de masas y energía y requiere de múltiples hipótesis que reduzcan los factores que intervienen en el proceso.

Por simplicidad, se ha recurrido al modelado implementado en la librería *MicrogridLib* que estima la carga futura del tanque basada en la carga actual y en el flujo de hidrógeno que demanda el electrolizador.

$$LOH(t) = LOH(t_o) \cdot \left[1 - 11,2 \int_{t_o}^t \dot{H}_2(\tau) d\tau \right] \quad (4.23)$$

La parametrización utilizada para modelar el tanque ha sido cotejada con los técnicos del laboratorio siendo los valores utilizados los siguientes:

Tabla 4.4 Parámetros del tanque de combustible.

Parámetro	Valor
Estado de carga inicial	50 %
Capacidad del tanque	7000 L
Peso a máxima capacidad	1,2175 kg

4.4.1 Modelo simplificado

Dado que se trata de una aproximación en torno a un punto de operación (el estado de carga en el instante de partida), no es aconsejable utilizar dicha expresión durante un largo periodo de tiempo, en su lugar es aconsejable trabajar en un escenario discreto actualizando el estado de carga en breves periodos de tiempo T_c utilizando la expresión 4.23 discretizada:

$$LOH(k+1) = LOH(k) \cdot [1 - 11,2 \cdot \dot{H}_2(k) \cdot T_c] \quad (4.24)$$

Si por el contrario se desea una expresión lineal mantenida a lo largo del tiempo e independiente de las condiciones de partida (útil para el control MPC), la propuesta es sustituir la salida por una expresión dependiente de las condiciones iniciales:

$$\left[\frac{LOH(k+1)}{LOH(0)} \right] = 1 - 11,2 \cdot T_c \cdot \sum_{i=0}^k \dot{H}_2(i) \quad (4.25)$$

Expresión que puede traducirse a espacios de estado de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0,5339 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,02188 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{fc}(k) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{H}_2(k) \\ \frac{LOH(k)}{LOH_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,218561744343483 \cdot 10^{-7} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -T_c \cdot 6,964789153664701 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Analizando los resultados de las simulaciones, se observa como la diferencia entre el nivel del tanque y el esperado no difiere en más de un 0,05 %, mientras que trascurrido una hora el error acumulado supone una diferencia de casi un 10 % bajo el nivel real, por lo que se sugiere no utilizar esta expresión durante largos periodos de tiempo o, en su defecto, reiniciar cada varios minutos los estados y qué consideramos estado de carga LOH_0 .

4.5 El motor eléctrico

El modelo de los 4 motores eléctricos es la pieza clave de todo el modelado del vehículo, ya que si desconocemos la energía que precisa el vehículo para poder realizar la trayectoria de referencia, es imposible aplicar estrategias de control inteligente sobre el vehículo. En el Trabajo fin de Grado [8] se realiza el modelado completo para los motores del vehículo FOX.

El modelo propuesto analiza la velocidad y la aceleración del vehículo y procesa los datos en diferentes etapas hasta alcanzar la salida: La potencia demandada por cada motor.

En primer lugar, mediante el bloque *vehicle* se traduce la velocidad y aceleración en velocidad angular, aceleración angular y torque de cada rueda. Para ello se contemplan las diferentes pérdidas que tiene el vehículo (aerodinámicas, resistencia de rodadura, y pérdidas de resistencia de aceleración debido a la

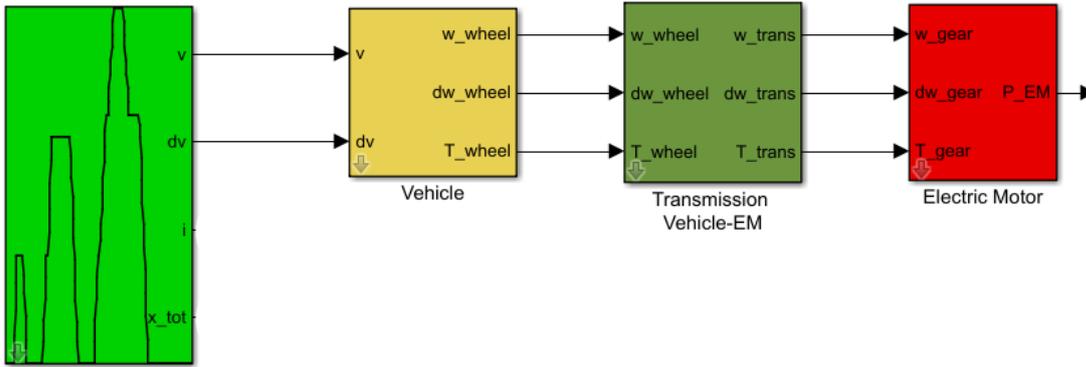


Figura 4.8 Estructura de bloques empleada para el cálculo de P_{em} .

inercia).

Un segundo bloque traduce los parámetros de rueda a motor. Es decir, las salidas serán la velocidad angular, aceleración angular y par generado en el eje del motor de cada rueda. La velocidad y aceleración angular del eje será proporcional a la de las ruedas aplicando la relación de transmisión, mientras que el torque necesario por el motor contempla el de la rueda más términos asociados a la eficiencia de transmisión y a las pérdidas por ralentí.

La tercera y última etapa se encarga de traducir la velocidad angular y el torque, en potencia demandada. Para ello interviene una tercera componente que es la eficiencia, la cual se obtiene mapeando muestras experimentales del motor funcionando a distintas velocidades y torques.

Como se comenta en [8], el mapa de eficiencia aplicado no se corresponde al vehículo FOX pero sí a un motor de características similares, cuyo mapa de eficiencia puede encontrarse en [7]. Para el mapeado de la eficiencia se emplea la siguiente fórmula de aproximación bidimensional basándose en los puntos experimentales más cercanos:

$$\eta(T_{em}, \omega_{em}) = \frac{(\omega_2 - \omega_{em})(T_2 - T_{em})\eta_{11} + (\omega_1 - \omega_{em})(T_1 - T_{em})\eta_{22}}{(\omega_2 - \omega_1)(T_2 - T_1)} - \frac{(\omega_2 - \omega_{em})(T_1 - T_{em})\eta_{12} + (\omega_1 - \omega_{em})(T_2 - T_{em})\eta_{21}}{(\omega_2 - \omega_1)(T_2 - T_1)} \quad (4.28)$$

De esta manera, la potencia demandada por un motor P_{em} en función de la velocidad angular del eje w_{em} y el torque T_{em} si éste último es positivo:

$$P_{em} = \eta(T_{em}, \omega_{em}) \cdot T_{em} \cdot \omega_{em} \quad (4.29)$$

Y la potencia cedida por el freno regenerativo en caso de que el torque sea negativo:

$$P_{em} = \frac{1}{\eta(T_{em}, \omega_{em})} \cdot T_{em} \cdot \omega_{em} \quad (4.30)$$

Todas las ecuaciones y una explicación más detallada puede encontrarse en [8].

Las especificaciones empleadas para modelar los motores del vehículo híbrido eléctrico FOX son las descritas en [8], las cuales fueron consultadas con los técnicos del laboratorio:

4.5.1 Modelo simplificado

Gracias a estos parámetros y aplicando el conocimiento en [8] es inmediato la realización de un modelo simplificado que halle el torque y la velocidad angular del eje del motor, a partir de los cuales puede mapearse la eficiencia y calcular la potencia demandada o cedida por los motores.

Tabla 4.5 Parámetros de los motores.

Parámetro	Valor
Masa del vehículo	400,238kg
Diámetro de las ruedas delanteras	0,504m
Diámetro de las ruedas traseras	0,54m
Área frontal del vehículo	$2m^2$
Coefficiente de fricción	0,008
Coefficiente de resistencia	0,2
Coefficiente 'Rotating Mass'	5%
Relación de transmisión	3,5
Eficiencia de transmisión e_{GT}	98%
Pérdidas por ralentí	0W
Factor de escala del motor	1:1
Inercia del motor	$0,1 \text{ kg} \cdot m^2$
Potencia auxiliar	0W
Par máximo del motor	78 Nm
Par máximo aplicado	70 Nm
Velocidad angular máxima	$500 \text{ rad} \cdot s^{-1}$

Siendo u la velocidad media del vehículo en el intervalo, \dot{v}_m la variación de velocidad entre medidas, y h el intervalo temporal entre cada medida, las expresiones que modelan el motor son las siguientes:

$$T_{em} = 2,3901420 + 0,0179580 \cdot u(t)^2 + \left(1,3409962 + \frac{31,9781994}{h}\right) \cdot \dot{v}_m(t); \quad (4.31)$$

$$\omega_{em} = 13.409961685823754 \cdot u(t); \quad (4.32)$$

4.5.2 Validación del modelo

Para validar el modelo se ha comparado la potencia aproximada frente al modelo de *Simulink* elaborado en otro trabajo [8]. Se han empleado distintos perfiles de conducción con $h = 0.01s$ para analizar el error cometido ante diferentes circunstancias.

Analizando ambos perfiles de conducción se observa como el modelo caza perfectamente el comportamiento de la demanda de los motores y es en la potencia negativa, asociada al freno regenerativo en la que existe un ligero error. Por tanto, podemos concluir que el modelo es adecuado para poder ser utilizado en un sistema de control cuyo objetivo es satisfacer la demanda de los motores.

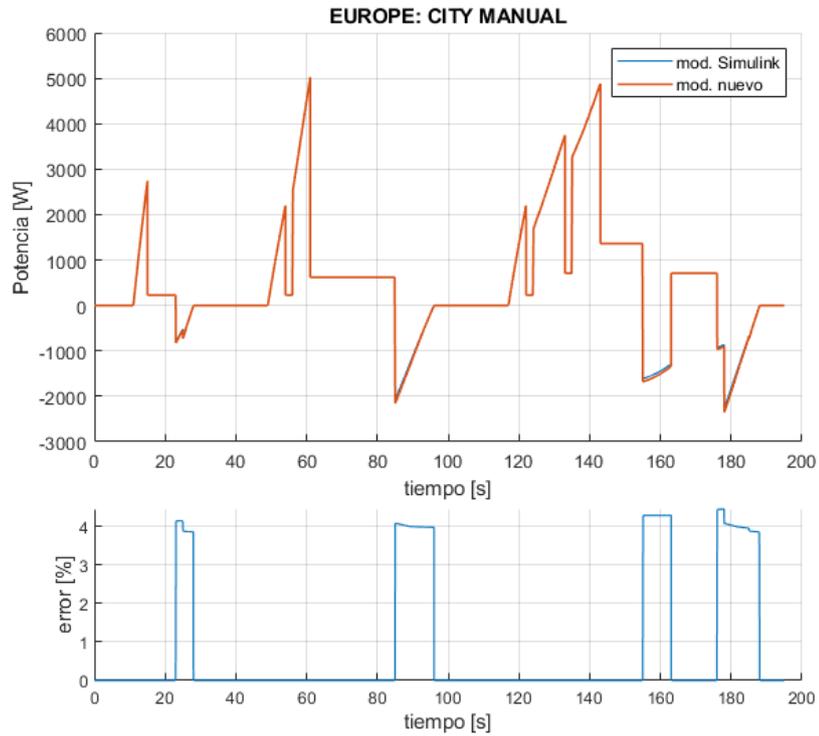


Figura 4.9 Estudio del error cometido por modelo simplificado EUROPE CITY MANUAL.

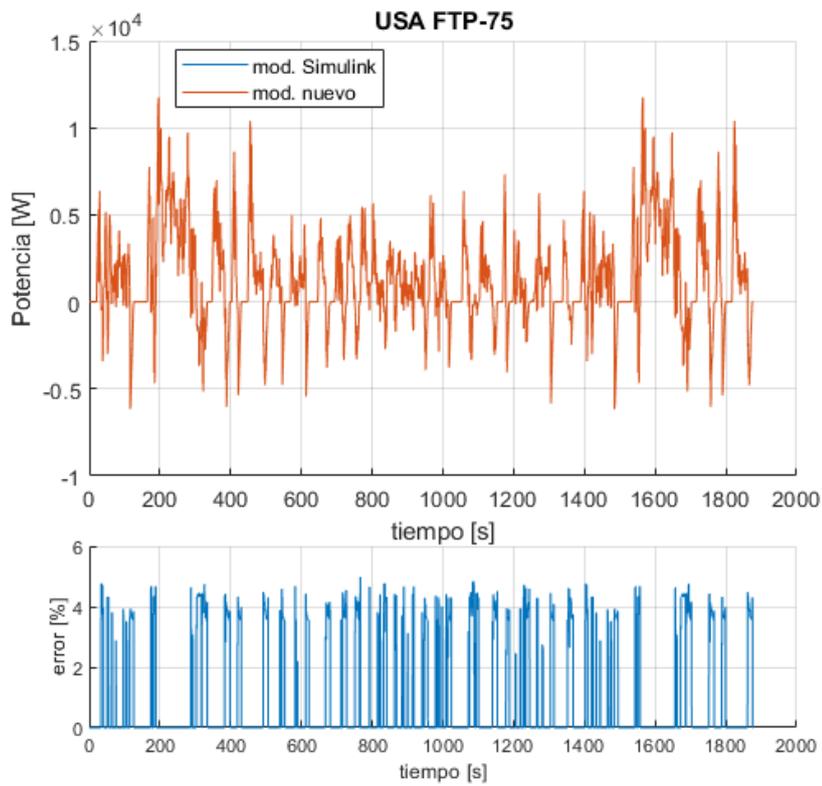


Figura 4.10 Estudio del error cometido por modelo simplificado USA FTP-75.

5 Modelo energético completo

La utilización de modelos matemáticos abre un enorme abanico de posibilidades en el mundo de la inteligencia artificial, el internet de las cosas y el aprendizaje automático. Por un lado, permiten crear sistemas híbridos físicos digitales, donde elementos electromecánicos sean sustituidos por sistemas simulados. Por otro lado, si se cuenta con un buen modelo, permiten acceder en tiempo real a variables del sistema que de por sí no son accesibles o su medición no es aconsejable por diversas razones como presentar gran incertidumbre o existir retrasos inadmisibles en la medida. Esta herramienta es muy utilizada en la industria actual, pues ha sido posible sustituir determinados sensores por sistemas digitales que simulan el comportamiento de la planta y aportan al usuario nuevas mediciones con gran exactitud.

5.1 Aplicación sobre el vehículo FOX

En este proyecto se hace uso de esta idea para implementar un modelo del vehículo eléctrico híbrido con dos finalidades:

En primer lugar, conocer las medidas que deben ser recibidas por los diferentes sensores y, de esta manera, poder detectar fallos en el sistema físico. Cuanto más exacto sea el modelo digital, más fácil será una detección precoz de un mal funcionamiento en cualquiera de las componentes, sin embargo, mayor complejidad en el sistema, implica mayor coste computacional, lo cual no siempre es deseable. Sin embargo, es muy importante ser consciente de que un modelo demasiado simple o un modelo incompleto puede conllevar a detección de fallos inexistentes, al igual que sucedería si el modelo partiese de premisas erróneas o no contemplase adecuadamente todas las circunstancias.

En segundo lugar, conocer de antemano los estados futuros del sistema permite contemplar múltiples escenarios de control y escoger aquel que más se ajuste a las especificaciones, que pueden ir mucho más allá de seguir una referencia, ayudando a optimizar el proceso en base a dos criterios: El uso eficiente de los recursos energéticos de los que se dispone, y a hacer un uso adecuado de los distintos componentes con el fin de que sus vidas útiles no se vean afectadas.

5.1.1 Modelo completo

En base a los modelos teóricos anteriores, junto a una posterior etapa de ajuste manual, es posible realizar un modelo completo del vehículo FOX. De esta manera, conociendo el perfil de velocidades que se pretende realizar y la potencia que se va a solicitar a la pila de combustible, es posible estimar con exactitud diferentes parámetros como la potencia demandada por los motores, la cedida por el freno regenerativo, el estado de carga del tanque de hidruros metálicos, el hidrógeno consumido por la pila de combustible o el estado de carga de la batería.

Para estimar la potencia demandada por los motores se hace uso de las expresiones 4.31 y 4.32 y del mapa experimental de la eficiencia del motor.

Una vez conocida la potencia demandada, y la que se desea solicitar a la pila de combustible, los demás

parámetros pueden obtenerse mediante las siguientes expresiones:

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ x_3(k+1) \\ x_4(k+1) \\ x_5(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 11,2 \cdot T_c & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0,5 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ b_3 & -b_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{fc}(k) \\ P_m(k) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{H}_2(k) \\ LOH(k) \\ \Delta SOC(k) \\ SOC(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -LOH(0) & 0 & 0 & LOH(0) \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & SOC(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ x_3(k) \\ x_4(k) \\ x_5(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{fc}(k) \\ P_m(k) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\begin{aligned} a_{15} &= -34,44461350191855 \cdot 10^{-8} \\ a_{35} &= 0,2456204391 \cdot 10^{-5} \cdot T_c \\ b_1 &= 1,360621309662354 \cdot 10^{-8} \\ b_3 &= 7,359058197 \cdot 10^{-6} \cdot T_c \end{aligned} \quad (5.3)$$

5.1.2 Validación del modelo

Para la validación del modelo se ha realizado una simulación de más de 20 minutos cuyo perfil de conducción coincide con el *Europe : NEDC – manual* con la excepción de haber reducido la velocidad (y la aceleración) con un factor de escala 0,33. La potencia demandada por los motores se actualiza cada $h = 0,1$ segundos, mientras que el espacio de estados tiene un periodo de muestreo de $T_c = 0,01$ segundos. Por último, las condiciones de partida han sido tanto la batería como el tanque de hidruros metálicos cargados al 50%. En cuanto a la gestión de la potencia, se ha limitado el rango de trabajo de la pila de hidrógeno entre 100 y 900W, de esta manera, la pila siempre aportará todo lo necesario en ese rango, mientras que la batería aportará la demanda restante. En caso de que los motores cedan energía (o demanden menos de 100W) la batería utilizará el excedente para aumentar su estado de carga.

Como se observa en la gráfica del perfil 5.1, se trata de un perfil de conducción que alcanza los 40 kilómetros por hora y que cuenta con aceleraciones y frenadas bruscas pero también progresivas y también cuenta con periodos de tiempo de velocidad mantenida a diferentes magnitudes, desde 10 kilómetros por hora hasta los 40 de velocidad máxima, lo cual permite observar el comportamiento del modelo en diferentes circunstancias.

Observando la gráfica 5.2 que muestra la potencia demandada por los motores según los bloques de simulación frente a la estimación del modelo, se puede apreciar cómo se hace una buena estimación de la potencia demandada por los motores, habiéndose únicamente un pequeño error cuando se hace uso del freno regenerativo, lo cual se acentúa cuando se trata de una frenada brusca como en el entorno de los 1200 segundos.

En cuanto a la pila de combustible, al tratarse de un sistema no lineal y dependiente del punto de operación, es lógico que el modelado no es perfecto, como puede observarse en la gráfica 5.1.2. A la hora de determinar la expresión se ha premiado que cometa el menor error posible cuando trabaja a potencias medias (500 W) a lo largo de todo el rango $LOH \in [10\%, 90\%]$. A pesar del error, en la gráfica 5.1.2 puede observarse como la diferencia entre el modelo elaborado y el bloque de simulación no distan más de 0,05 unidades (%) a lo largo de los 20 minutos de simulación, por lo que se podría considerar que es una buena estimación, ya que el error ocasionado en el flujo de hidrógeno se traduce en error acumulativo sobre el nivel del tanque. Lo mismo sucede con la batería de ión-litio. En la gráfica 5.5 se muestra la predicción de cuánto afectará la potencia de entrada a la batería durante el ciclo de control. Dicho de otra manera, el área bajo la curva de 5.5 se traduce en la variación total del estado de carga de la batería que se muestra en 5.6, por lo que un error

acumulativo máximo de 0,04 unidades (%) tras 20 minutos de simulación indica que el modelo es adecuado para como válidas las estimaciones siempre que se trabaje dentro del intervalo de trabajo de diseño.

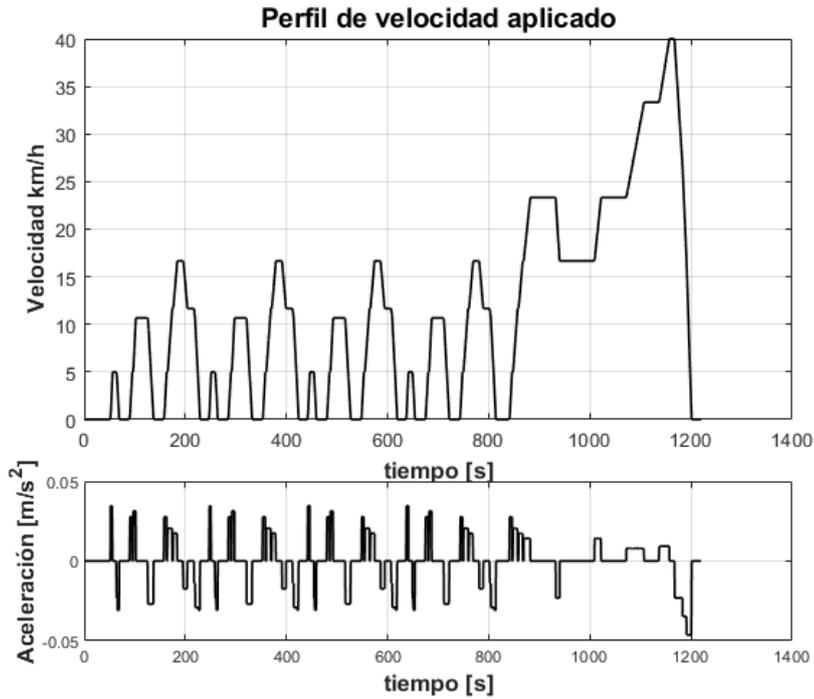


Figura 5.1 Perfil de conducción aplicado para la simulación de validación .

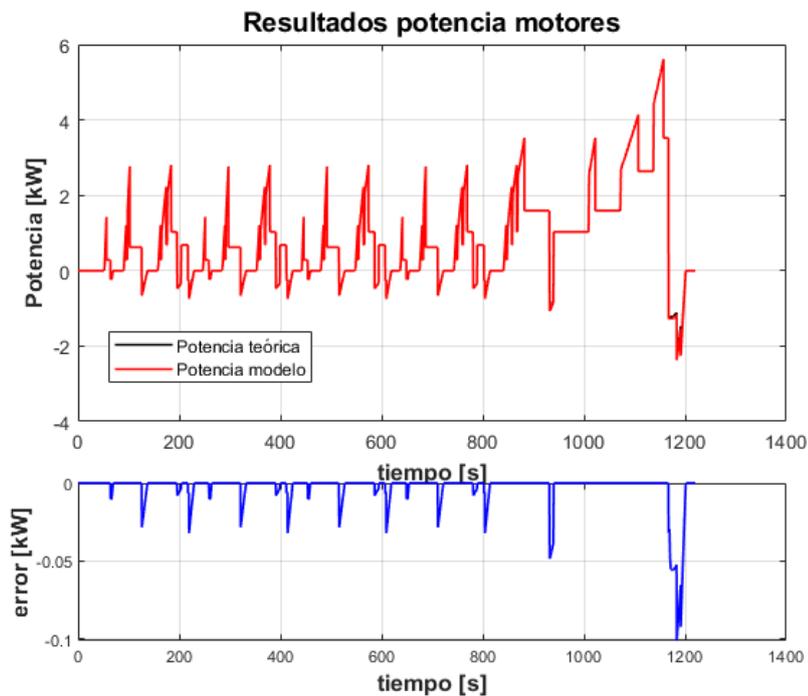


Figura 5.2 Potencia demandada por los motores en la simulación de validación .

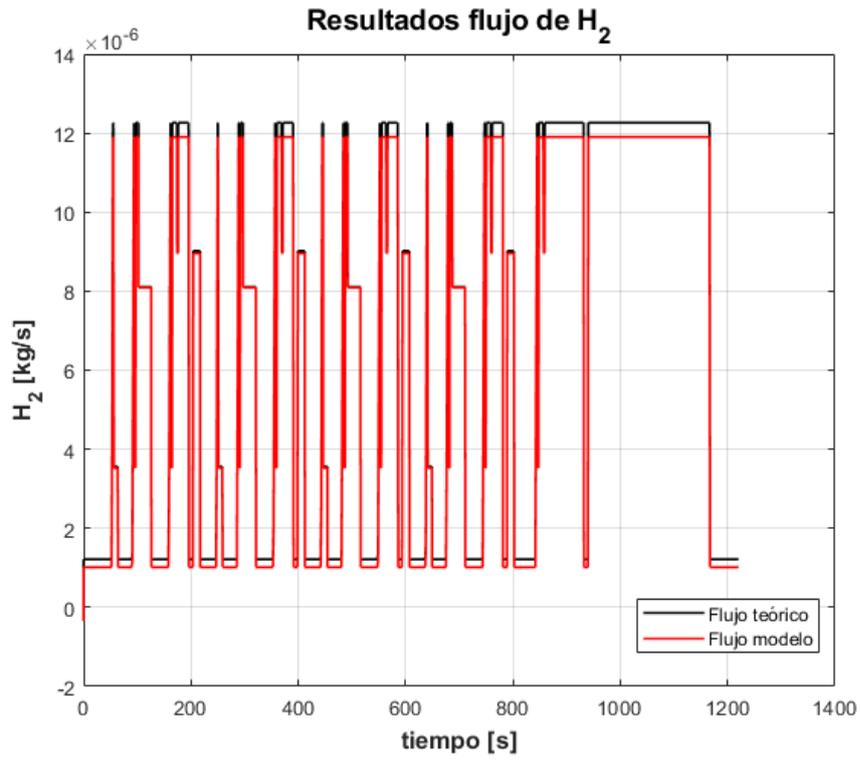


Figura 5.3 Flujo de hidrógeno en la simulación de validación.

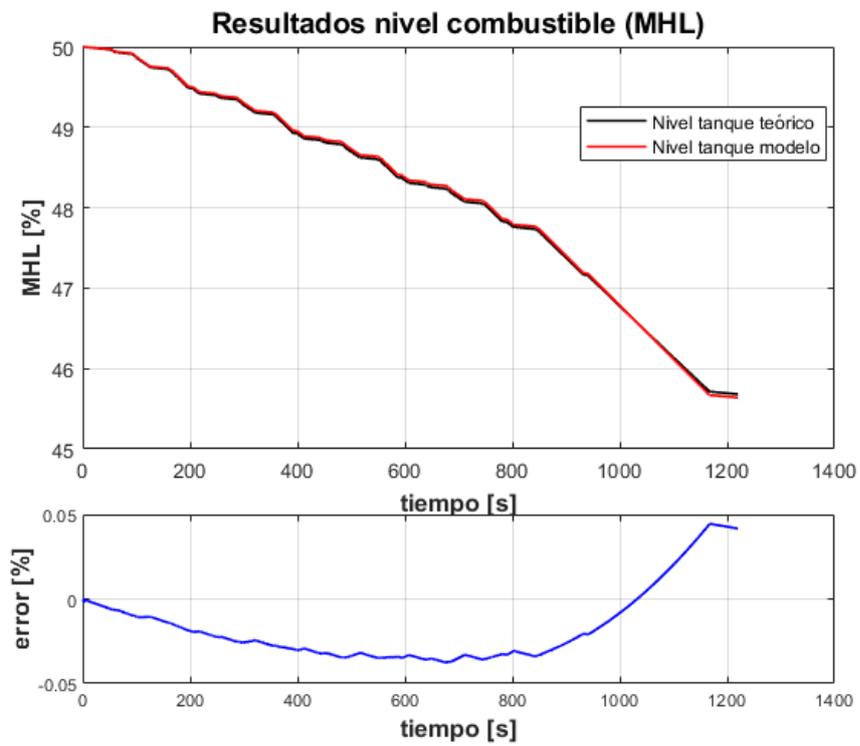


Figura 5.4 Estado de carga del tanque en la simulación de validación.

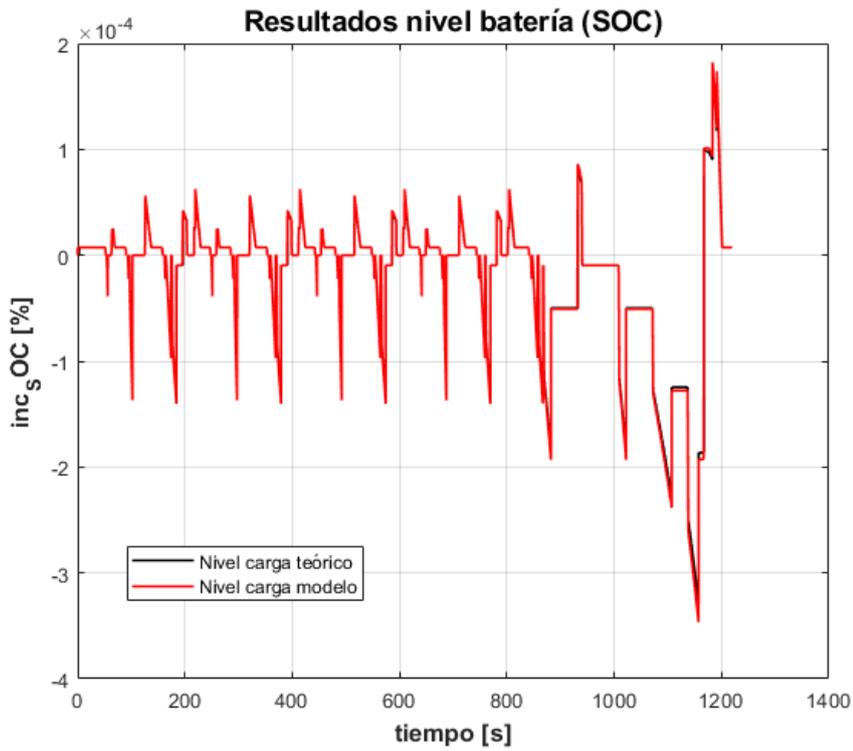


Figura 5.5 Variación de la carga de la batería en la simulación de validación.

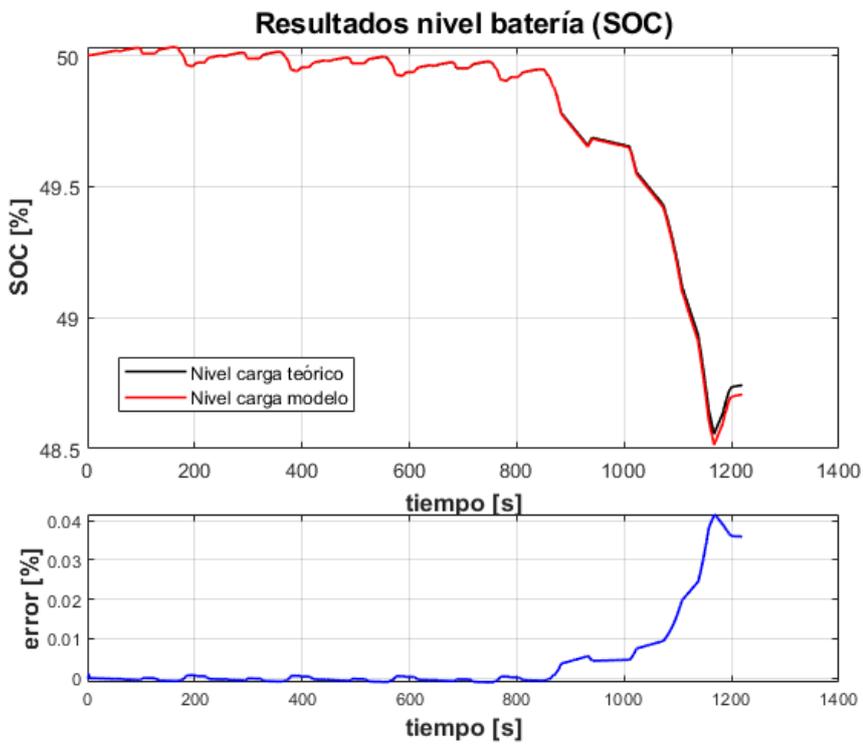


Figura 5.6 Estado de carga de la batería en la simulación de validación.

5.1.3 Segundo ensayo de validación

Una vez comprobado que funciona bien con el ciclo de conducción anteriormente comentado, es interesante repetir la experimentación con un perfil de conducción más brusco como es el caso del perfil *USA : FTP – 75* 5.7, el cual tiene una duración ligeramente superior a media hora. Como se observa en las diferentes gráficas 5.1.3 y 5.9, aunque ahora el error cometido es superior a la primera prueba de validación, puede considerarse que el modelo sigue siendo igualmente válido.

Las condiciones bajo las que se han realizado la experimentación son idénticas a las descritas en la sección anterior.

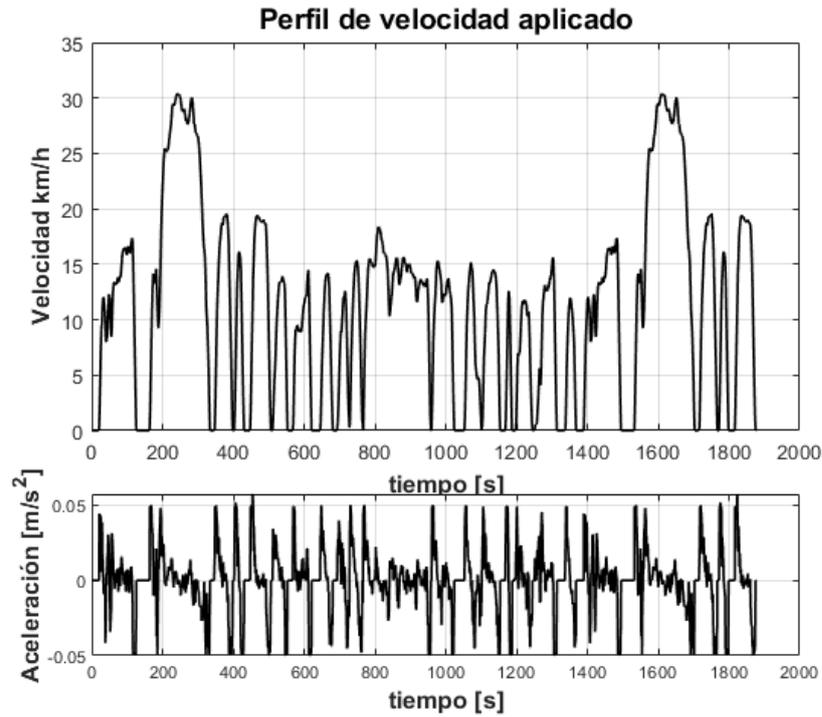


Figura 5.7 Perfil de conducción aplicado para la simulación de validación 2.

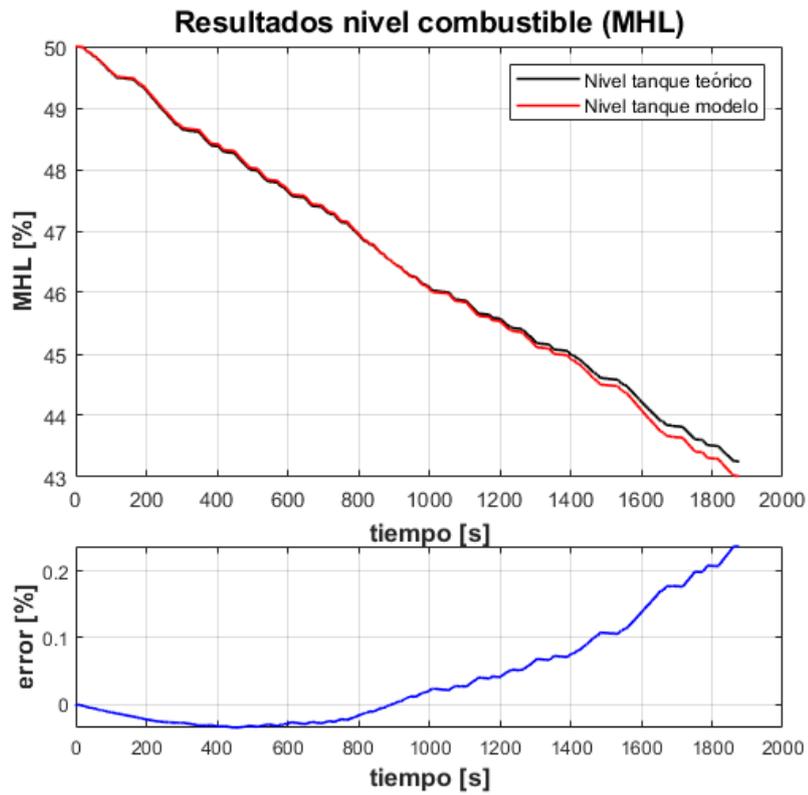


Figura 5.8 Estado de carga del tanque en la simulación de validación 2.

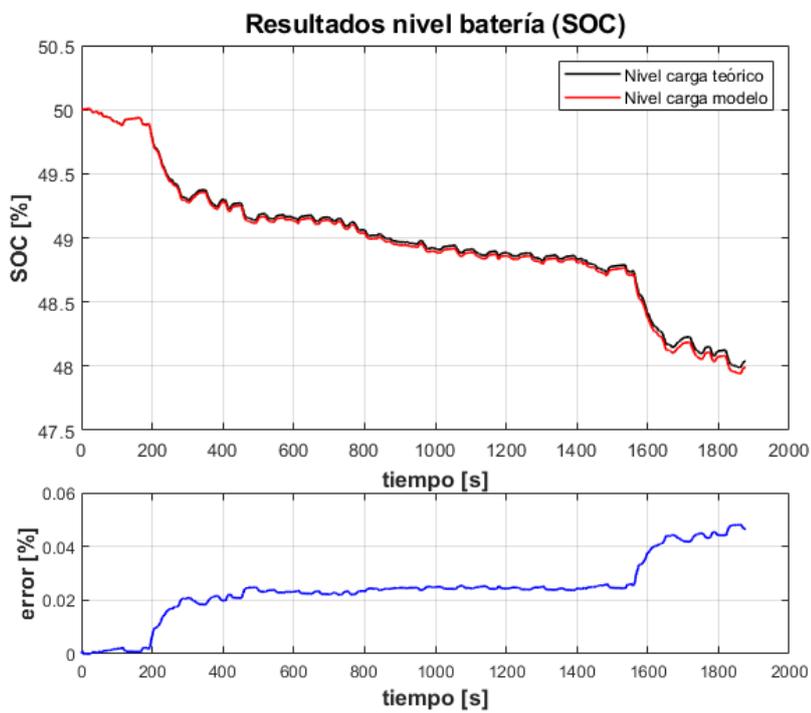


Figura 5.9 Estado de carga de la batería en la simulación de validación 2.

6 Implementación del control PID

En esta sección se muestra el procedimiento seguido para la simulación, implementación y sintonización de controladores de tipo PID así como los resultados y conclusiones obtenidos de éstos. El objetivo de los controladores se centra en hacer una gestión eficiente entre el uso de la batería de ión-litio y la pila de combustible con el objetivo de satisfacer la energía demandada por parte de los motores así como de aprovechar los excedentes de energía.

6.1 Entorno de simulación

Como ya se ha descrito en secciones anteriores, el vehículo híbrido eléctrico FOX cuenta con 4 motores eléctricos independientes alimentados por una batería de ión-litio y una pila de combustible cuyo balance energético se realiza en el BUS que los une. Todo estos elementos han sido considerados a la hora de desarrollar el entorno de simulación.

Los elementos incluidos en el esquema de simulación son los siguientes:

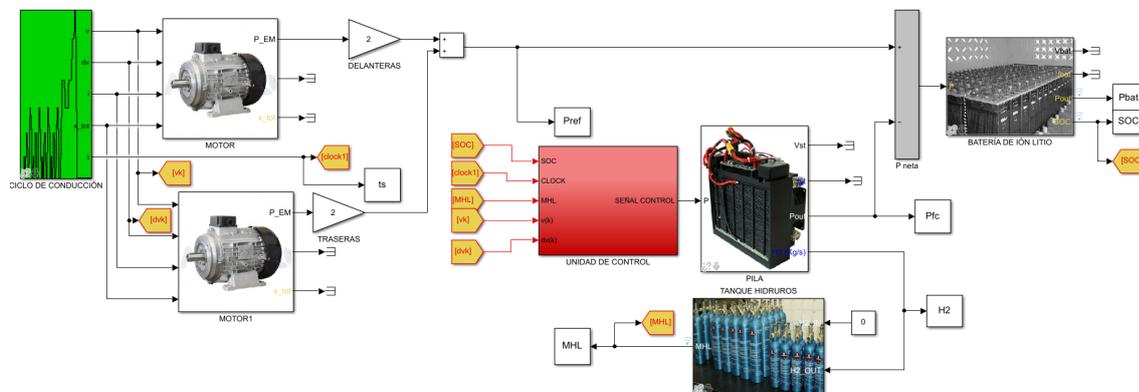


Figura 6.1 Estructura general para el control mediante PID.

- Perfil de conducción: Dicho bloque genera un ciclo de conducción (velocidad, aceleración y distancia recorrida), las cuales son traducidas por los motores en potencia demandada para poder llevar a cabo dicho ciclo.
- Simulador de motor: Aunque el vehículo FOX cuenta con cuatro motores independientes, se ha supuesto que ambas ruedas delanteras tendrán un comportamiento idéntico, igual que lo harán ambas ruedas traseras entre sí.
- Sistema de combustión: Bloques que simulen tanto la pila de combustible como el tanque de hidruros metálicos.
- Batería: Bloque encargado de simular la batería de ión-Litio.

- Lector de salida: Bloque que simula un sistema de medición que aportaría a la unidad de control la potencia aportada por la batería y la pila juntas. Dado que los dispositivos de medida y conversión cuentan con un retardo, la potencia medida no tiene por qué corresponderse necesariamente con la potencia real en el instante de calcular una nueva señal de control aunque, lógicamente, el periodo de muestreo será significativamente menor al periodo de control.
- Sistema de control: Bloque de simulink que recibe la potencia demandada por los motores así como la última medición de la aportada por la batería y la pila. Contiene la implementación de los controles PID desarrollados para esta sección, por lo que su salida se corresponde a la potencia demandada a la pila de combustible.
- Bus de potencia: Se trata de un sumador donde se realiza el balance de potencia. Como entrada recibe la potencia demandada por los cuatro motores y la potencia cedida por la pila de combustible. Como resultado calcula la potencia que la batería debe balancear para poder cumplir los objetivos.

En la figura 6.1 puede observarse las conexiones entre los diferentes elementos en su versión inicial.

6.1.1 Simplificaciones realizadas

Tras consultar con los técnicos de laboratorio y analizar los resultados individuales de cada bloque se han realizado las siguientes simplificaciones:

- La pila de combustible ya incorpora un controlador que gestiona que la potencia aportada equivalga a la que se le demanda. Es por ello que se puede obviar la salida del bloque de simulación y suponer que la potencia demandada será igual a la aportada siempre que la cantidad de combustibles y la potencia demandada se encuentren dentro de los valores contemplados.
- La batería es un sistema sub-controlado, es decir, no se puede ejercer control directo sobre ella. La energía que cede o absorbe es el resultado del balance energético entre los motores y la pila de combustible.
- Los cuatro motores con distintos diámetros de rueda pueden ser sustituidos por un único bloque con diámetro medio 0,52m. El error máximo cometido no sobrepasará los 10W en las simulaciones del entorno. Dicha simplificación reducirá los tiempos de simulación notablemente. Además, como el estimador tiene un error poco significativo, para la simulación se ha optado por medir directamente del bloque motor reduciendo aún más el número de cálculos por iteración.
- Debido a las especificaciones de la pila de combustible y de la batería de ión-litio, se ha optado por hacer uso de perfiles de conducción más suaves a los preestablecidos en la librería *QSS* de donde se ha obtenido el bloque de ciclos de conducción. Para ello se ha aplicado un factor de escala que reduzca la velocidad (y aceleración) a las que se somete el coche. Esto también permitirá ver el comportamiento del controlador ante diferentes situaciones, perfiles adecuados para el vehículo frente a perfiles demasiado exigentes para el controlador o el vehículo en sí.

El esquema de simulación simplificado con el que se ha trabajado en las simulaciones es el representado en la figura 6.2.

6.2 Diseño del controlador

De cara a afrontar la gestión de las diferentes fuentes de energía, dado que la batería es un sistema subcontrolado y la pila cuenta con un sistema de control integrado, el objetivo será la realización de un control que marque la actuación de la pila de combustible (variando la referencia del controlador integrado) con el fin de alterar el nivel de carga de la batería en base a un criterio justo.

Para ello se analiza ciclo a ciclo el estado de la batería y el nivel del tanque de hidruros metálicos, con ello se establece el estado de la batería deseado y el controlador gestionará la potencia demandada a la pila de combustible para poder alcanzar dicho estado de carga.

6.2.1 Establecimiento de la referencia

El criterio que se ha empleado es bastante simple y puede entenderse mediante la tabla 6.1. El objetivo que se pretende alcanzar con los valores establecidos en la tabla se centran en las siguientes premisas:

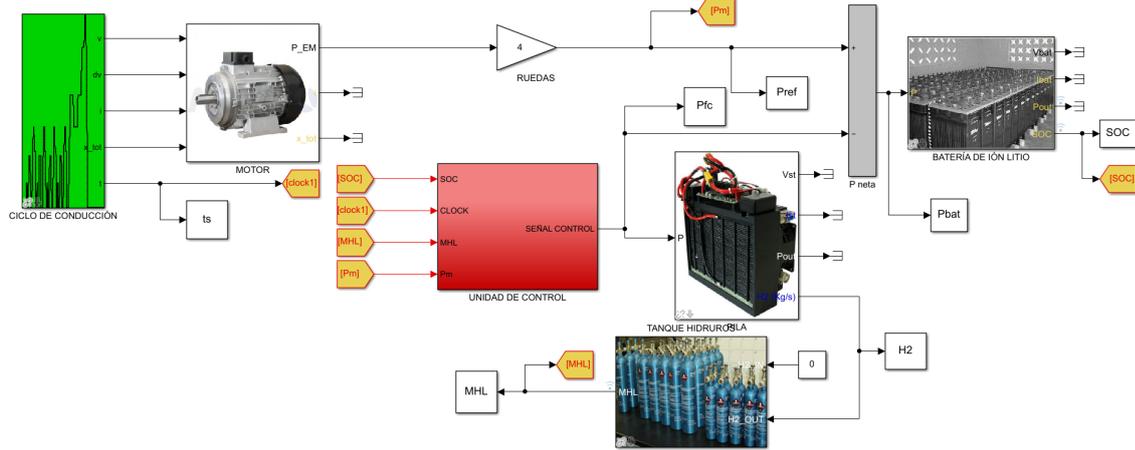


Figura 6.2 Estructura simplificada para el control mediante PID.

- Priorizar el uso de la pila de combustible si el nivel del tanque es demasiado elevado, salvo que la carga de la batería también lo sea.
- No utilizar la pila de combustible si el nivel del tanque es demasiado reducido.
- Si el nivel del tanque es notablemente superior al estado de carga de la batería, emplear al máximo para cargar la batería, mientras que no emplearla si se da el caso opuesto.
- Mantener un compromiso entre batería y pila, evitar que uno se encuentre totalmente cargado y el otro descargado.
- Notificar que ni la batería ni el tanque están en condiciones adecuadas para circular.

Tabla 6.1 Referencias según el estado de las fuentes de energía.

Estado	LOH < 10 %	LOH ∈ [10 %,50 %]	LOH ∈ [50 %,90 %]	LOH > 90 %
SOC < 20 %	X	$SOC_{ref} = 25 \%$	$SOC_{ref} = 25 \%$	$SOC_{ref} = 25 \%$
$SOC \in [20 \%, 50 \%$]	0	$SOC_{ref} = 25 \%$	$SOC_{ref} = 50 \%$	$SOC_{ref} = 75 \%$
$SOC \in [50 \%, 80 \%$]	0	$SOC_{ref} = 50 \%$	$SOC_{ref} = 75 \%$	$SOC_{ref} = 80 \%$
$SOC > 80 \%$	0	$SOC_{ref} = 75 \%$	$SOC_{ref} = 80 \%$	$SOC_{ref} = 80 \%$

6.2.2 Modelo del sistema y especificaciones de control

El modelo empleado para diseñar los controladores se basa en los expuestos en el capítulo de modelado, siendo el sistema teórico a controlar el siguiente:

$$G_1(s) = \frac{-\Delta SOC(s)}{P_{bat}(s)} = \frac{7,619 \cdot 10^{-6}}{s} \tag{6.1}$$

Analizando las limitaciones físicas del sistema y las potencias máximas que pueden aportar los motores junto con la batería, se observa como en el mejor de los casos el bloque de simulación tarda en torno a los 30 segundos en incrementar o decrementar en un 1 % el estado de carga de la batería. Es por ello por lo que se ha elegido dicha magnitud para el tiempo de subida esperado, de lo contrario, la potencia que sugeriría el controlador distaría demasiado de las aplicables en el entorno real, la señal permanecería continuamente saturada, y el tiempo de subida total seguiría rondando los 30 segundos en el mejor de los casos.

6.2.3 Discretización del control PID

Dado que el sistema de control está implementado sobre un controlador y se alimenta de mediciones discretizadas, es imprescindible discretizar el controlador acorde al periodo de control T_c . Para ello existen diversas aproximaciones que relacionan el diseño en tiempos continuos con el diseño en tiempos discretos. La opción empleada es el método de aproximación Euler II, también conocido como método de Euler hacia atrás. Se ha optado por esta metodología porque garantiza que un sistema estable en tiempos continuos mantenga todos sus polos no sólo dentro del círculo unidad (garantizando la estabilidad en discreto) sino dentro del semiplano derecho, lo cual se traduce en una señal menos oscilatoria [11].

La formulación del PID discretizado puede expresarse de la siguiente manera:

$$u(k+1) = K \left[e(k) + T_d \cdot \frac{e(k) - e(k-1)}{T_c} + \frac{T_c}{T_i} \sum_{l=1}^k e_l \right] \quad (6.2)$$

Entre las principales ventajas de la formulación 6.2.3 se encuentra la facilidad para implementar saturaciones tanto en la señal de control como en la velocidad de ésta y la posibilidad de implementar técnicas que corrijan el efecto Wind-UP.

6.2.4 Sintonización de parámetros

Para la sintonización de parámetros se ha utilizado la herramienta *Control Designer Toolbox* de MatLab solicitando crear 3 controladores para el sistema anteriormente mencionado 6.2.2, buscando el compromiso entre unos criterios de robustez-agresividad y un tiempo de subida ideal de 30 segundos.

Adaptado a análisis frecuencial, el ancho de banda que se ha solicitado es de 0,06667 rad/s, mientras que el criterio de robustez-agresividad se corresponde a mayor o menor margen de fase. En base a esto se han diseñado tres controladores. Un primer controlador Proporcional (único sin sobreoscilación), un control Proporcional-Integral con margen de fase muy reducido (control muy agresivo), eliminando el error en régimen permanente y con comportamiento agresivo (margen de fase muy reducido), y un control Proporcional-Integral-Derivativo que aporte robustez a la respuesta (margen de fase más amplio). Los parámetros de los 3 controladores se pueden ver más claramente en la tabla 6.2.

Analizando los diagrama de Bode de los distintos controladores aplicados sobre el modelo (teórico) 6.3

Tabla 6.2 Parámetros de los controladores.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	8749,5	0	0
PI	8526,5	68	0
PID	9022,4	151,5	1,4851

es visible como la respuesta del control con efecto derivativo será más rápida y agresiva, mientras que la del controlador proporcional será la menos oscilante pero tardará más tiempo en estabilizarse. Además, en los diagramas de Bode del sistema controlado completo 6.4 puede observarse como el sistema controlado por un PI y por un PID tendrán un comportamiento similar, observándose las grandes diferencias en el comportamiento a altas frecuencias, por lo que se hace necesario incluir en el medidor del estado de carga un filtro que elimine el ruido de las altas frecuencias.

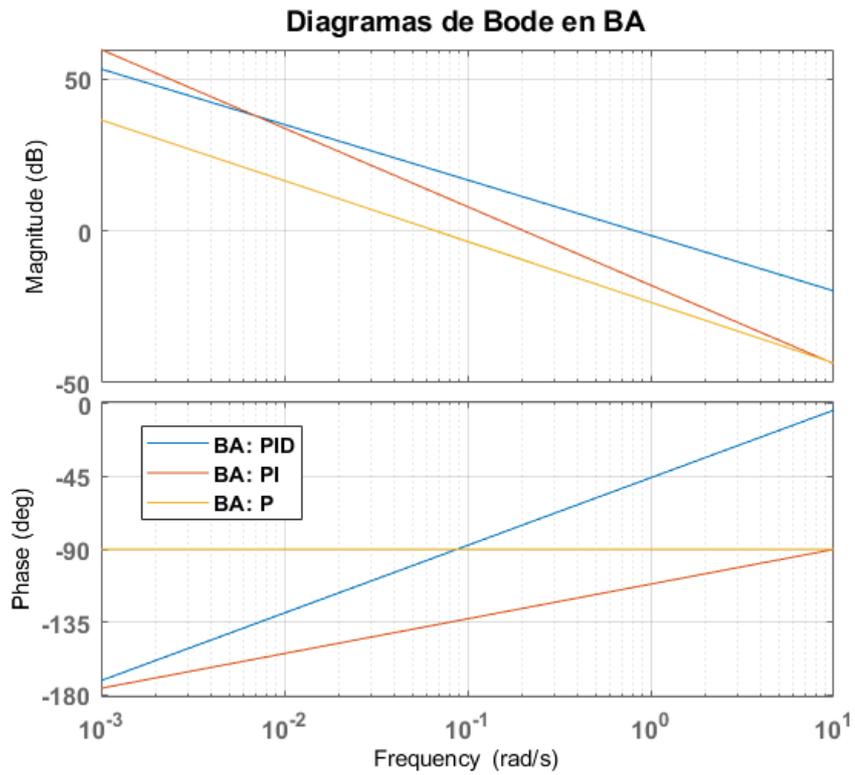


Figura 6.3 Diagramas de Bode del bucle de control en lazo abierto.

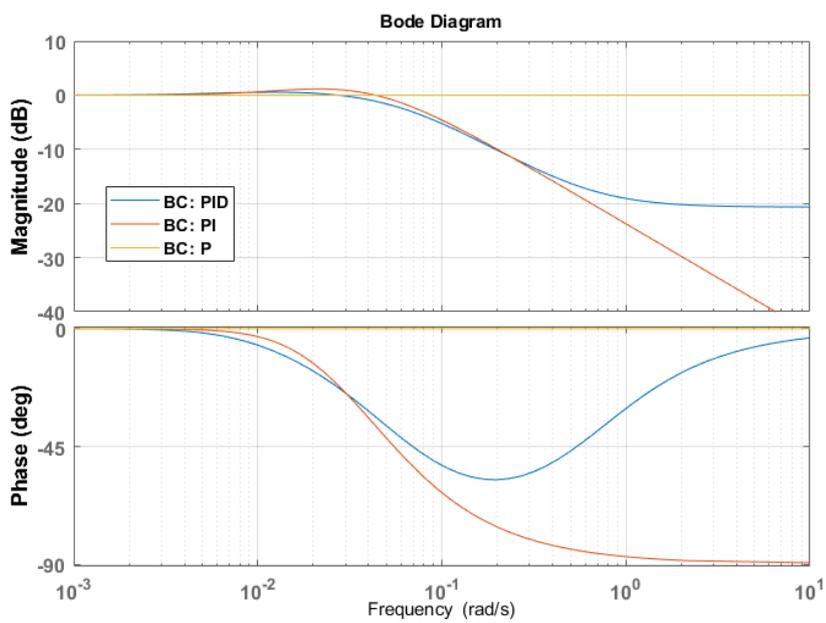


Figura 6.4 Diagramas de Bode del bucle de control en lazo cerrado.

6.3 Resultados obtenidos

En esta sección se va a mostrar una comparativa entre los diferentes controladores diseñados así como distintas modificaciones que se han realizado sobre ellos para acercarlos a la realidad y mejorar su comportamiento. Para poder realizar un análisis exhaustivo y una comparativa justa, inicialmente se va a trabajar únicamente con la pila de combustible, ya que es el único elemento sobre el que se tiene control directo.

El código desarrollado completo puede consultarse en el anexo A.1.

6.3.1 Caso ideal

Como caso ideal se considera una hipotética situación en la que el coche se encontraría estacionado (no intervienen los motores) y la pila tuviera la capacidad de aportar o almacenar cualquier cantidad de energía, algo no realista.

Como se puede observar en la gráfica 6.5, Para este caso ideal, lógicamente los controladores PI y PID consiguen alcanzar la referencia antes que el controlador proporcional, y tras una vez se estabilizan, eliminan el error en régimen permanente, algo que el control proporcional no tiene la capacidad de hacer.

Es destacable la magnitud de las señales de control, muy superiores a la que puede aportar la pila de combustible. De igual manera, tanto el PID como el PI incluyen señales de control negativas, algo que no está al alcance de la pila, por lo que en un caso realista, jamás volvería a la referencia y mantendría un error en régimen permanente superior al del control proporcional.

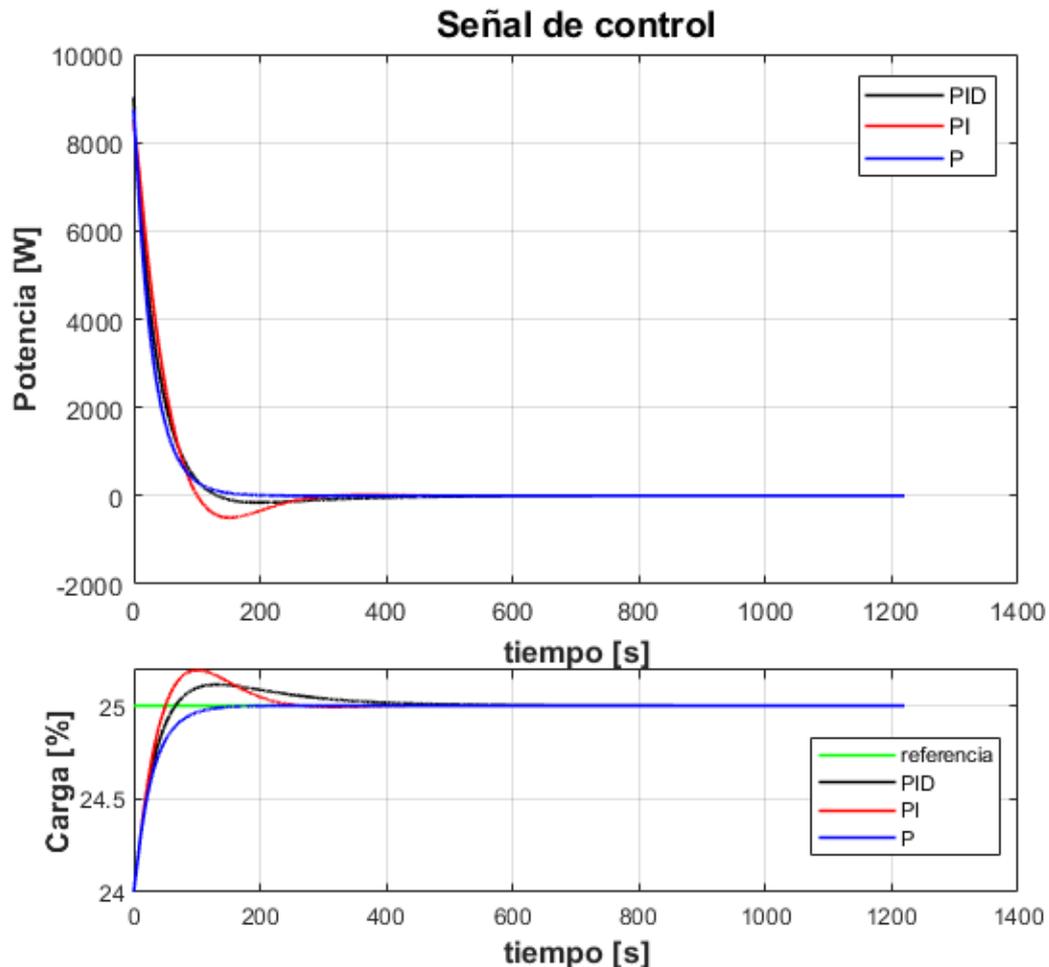


Figura 6.5 Señal de control y SOC para PID en caso ideal.

6.3.2 Saturación de la señal de control

El siguiente paso hacia un control más realista es incluir las saturaciones de la señal de control. En este caso, se ha optado por saturar en 0W y 1200W, ya que es la potencia que la pila es capaz de aportar. Sin embargo, como ya se comentó, sería deseable trabajar siempre en el intervalo 100W-900W.

Como resultado de la saturación de las señales, el tiempo que transcurre hasta alcanzar la referencia es mucho mayor al caso ideal, ya que la magnitud de la señal de control es menor. Como segunda y principal observación, cabe destacar que la saturación de las señales provoca el efecto conocido como windup. La integral del error toma un valor tan elevado que la saturación se prolonga en el tiempo, además, aun habiendo alcanzado la referencia, el efecto integral sigue manteniendo la señal de control a un nivel elevado provocando un error acumulativo cada vez mayor porque al ser una simulación más realista, la pila no tiene capacidad de descargar la batería.

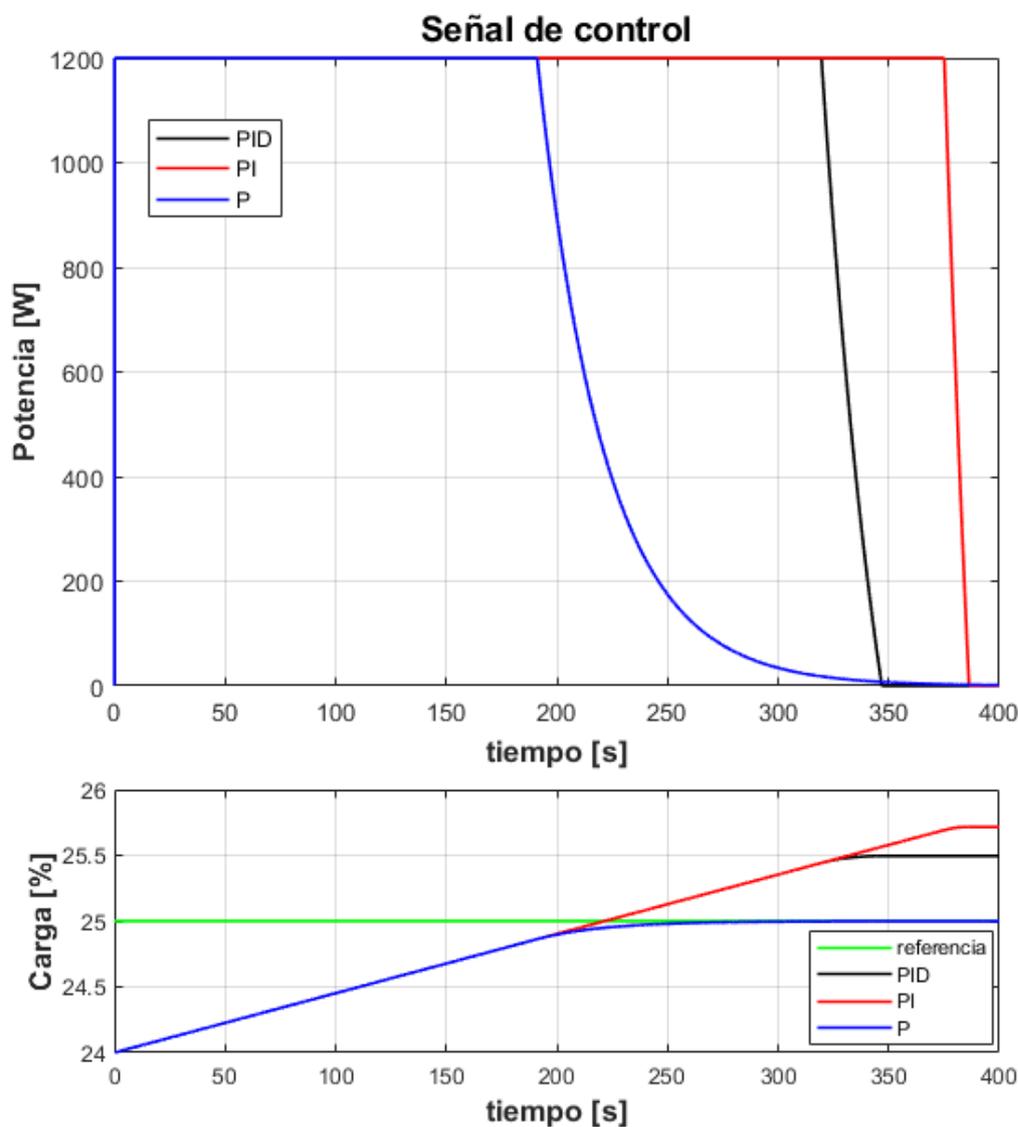


Figura 6.6 Señal de control y SOC para PID: Efecto WindUp.

Como solución a este problema, se ha incluido un mecanismo antiwindup que detecte cuándo va a suceder dicho efecto y actúe en consecuencia. Específicamente, el mecanismo anti-windup escogido consiste en dejar de actualizar la integral del error siempre que la señal de control se encuentre saturada. De esta manera, una vez se den las circunstancias para dejar de estar saturada, la integral del error tendrá el mismo valor que antes de la saturación. En la gráfica 6.7 se puede observar el comportamiento mejorado gracias al mecanismo descrito. Además, cabe destacar que el control PID tiene un mejor comportamiento que el PI gracias al efecto derivativo y consigue, mediante una señal más suave, alcanzar la referencia en un periodo similar pero no excederla en exceso.

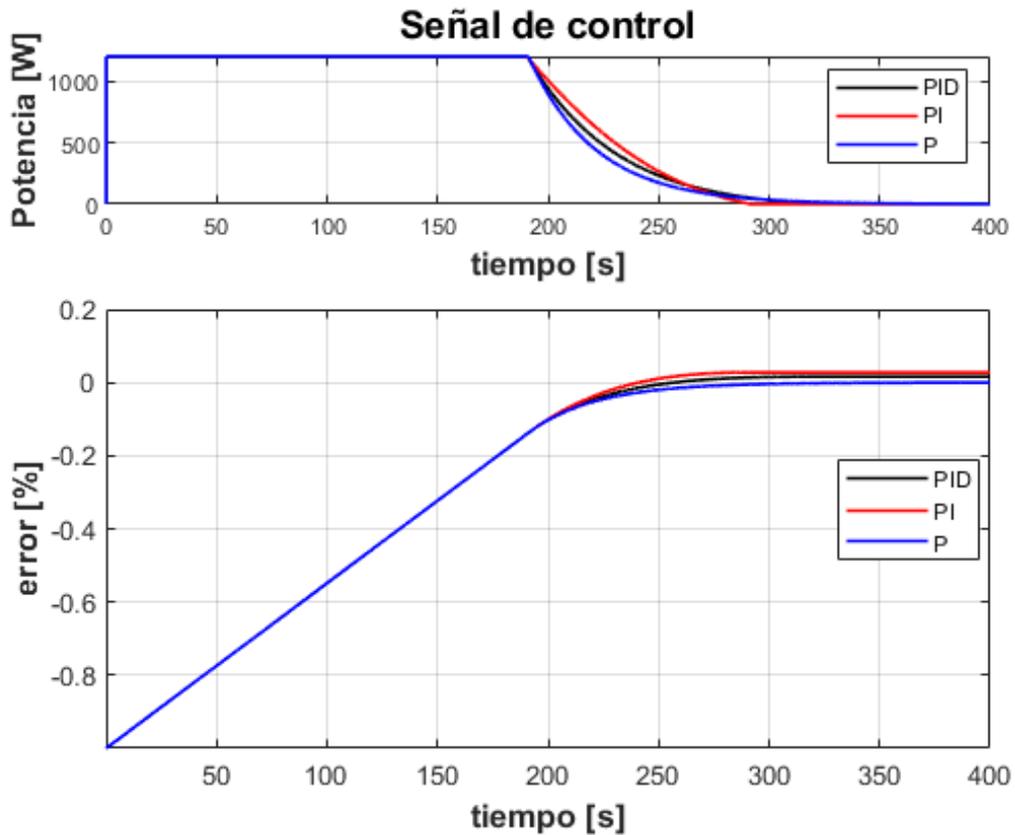


Figura 6.7 Señal de control y SOC para PID con mecanismo anti-WindUp.

6.3.3 Inclusión de los motores

Como último paso en el estudio, se hace lógico incluir los motores en funcionamiento. En una primera vez se han incorporado como si de una perturbación se tratase. De esta manera, el controlador tiene la funcionalidad de seguimiento pero también de rechazos de perturbaciones, aunque el inconveniente es evidente. Por lo general, la magnitud de la potencia demandada por los motores (perturbación) será mucho mayor que la potencia que pueda aportar la pila, provocando que el sistema se aleje de la referencia estando saturada la señal de control. Por ello se propuso la tabla 6.1, la cual debería contemplar intervalos más reducidos para tener una señal de control más suave.

En la gráfica 6.8 puede observarse el comportamiento de los diferentes controladores rechazando el efecto de los motores a la par que pretenden seguir la referencia. En los últimos minutos de la simulación se evidencia lo recientemente comentado. Cuando los motores demandan demasiada energía, la señal de control se satura.

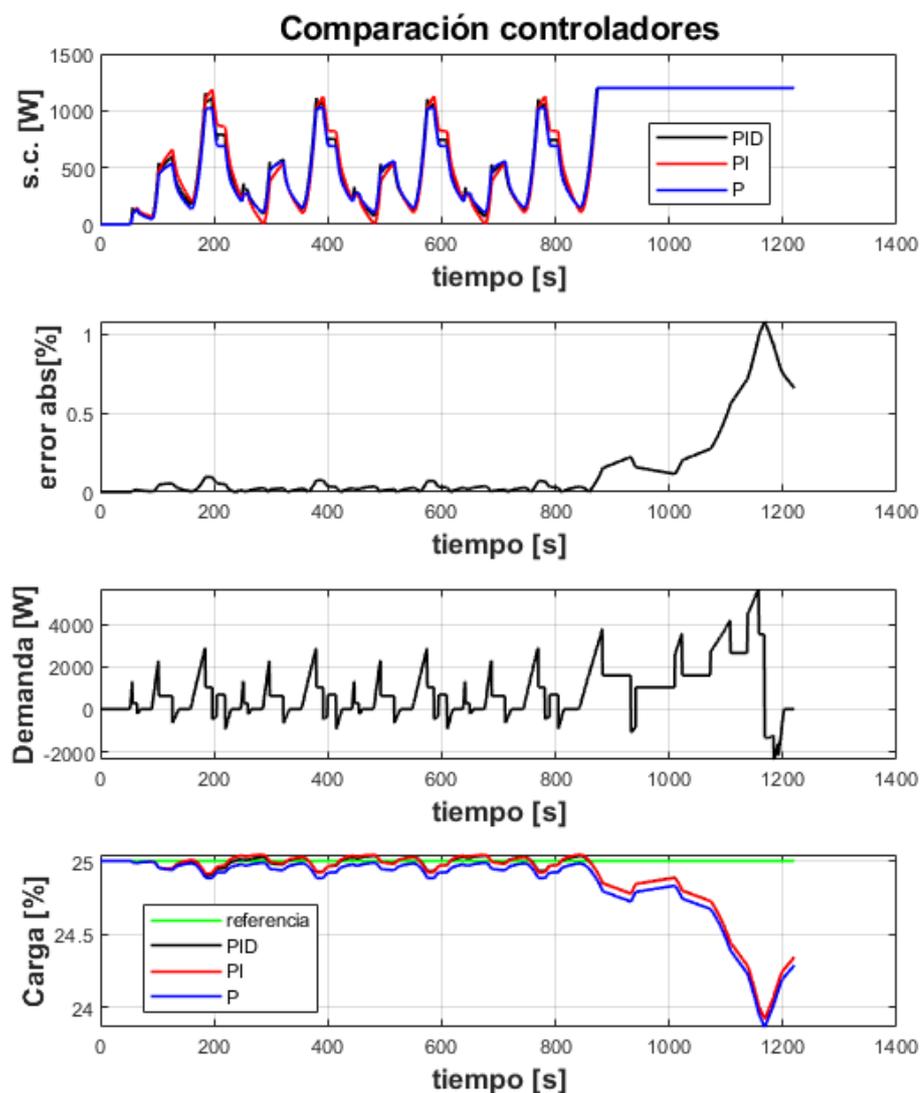


Figura 6.8 PID: Inclusión de los motores como perturbación.

Por otro lado, en la gráfica 6.9 se ha procedido a incluir la potencia demandada por los motores como parte de la señal de control. Es decir, como es estimable la potencia que demandarán los motores en función del

perfil de conducción, es viable considerar que la señal de control no hace referencia a la pila de combustible sino al balance energético entre los motores y la pila. Esto implica que el controlador deja de gestionar la referencia del controlador interno de la pila de combustible controlando ahora la potencia neta que se desea en bornes de la batería. Por lo que una vez calculada ésta, se procede a calcular la potencia de la pila en base a la potencia que se espera que demandarán los motores.

A efectos prácticos podría considerarse que se trata del mismo sistema de control pero con una etapa de precompensación de perturbaciones.

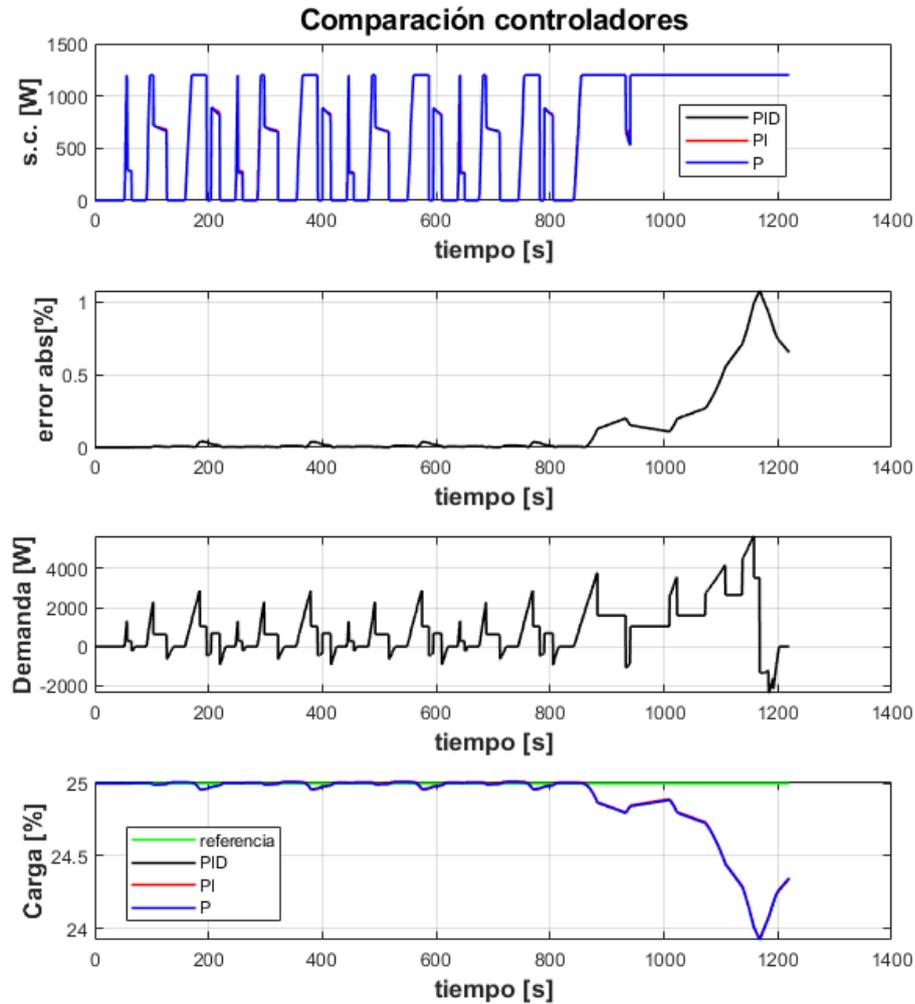


Figura 6.9 PID: Inclusión de precompensación de la P_{em} .

6.4 Conclusiones

Como conclusión de las gráficas anteriores puede deducirse que el controlador PID y el controlador PI tienen un comportamiento similar e indudablemente mejor que el controlador proporcional simple. Además, el uso del controlador también es bueno para el rechazo a perturbaciones, aunque, como se puede observar en la gráfica 6.10, la gran diferencia no aparece entre controlador PI o controlador PID, sino en si se actúa o no de manera anticipativa a la demanda de los motores. La magnitud del error es notablemente inferior al considerarlos como parte de la señal de control siempre y cuando se encuentre en intervalos controlables que no lleven a la señal de control a una saturación permanente.

Por último, cabe destacar que estas simulaciones contemplan únicamente la potencia demandada por los motores pero el coche cuenta con diferentes elementos que también requieren energía. Por tanto, si la estimación de la potencia demandada por los motores no fuera correcta o la relevancia de los dispositivos auxiliares llegase a ser significativa, la inclusión de la precompensación de la demanda de los motores puede conllevar errores mayores a los cometidos en el PID básico.

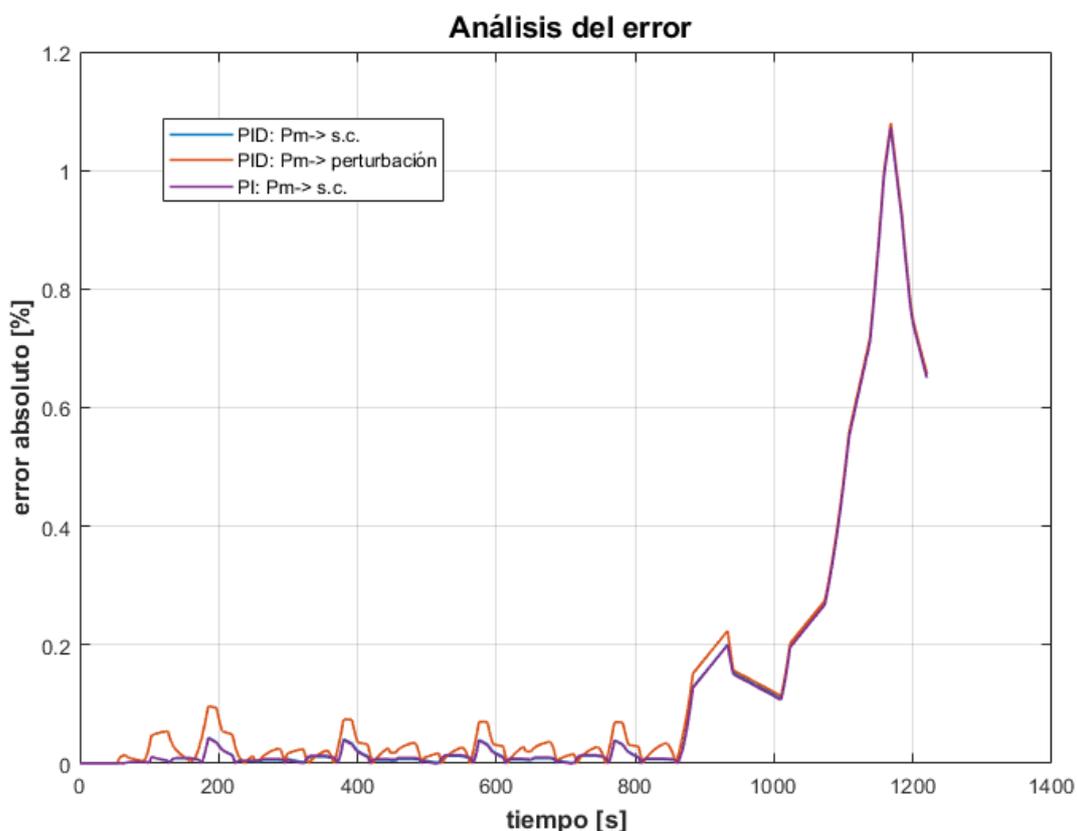


Figura 6.10 Comparativa PI-PID con y sin precompensación de P_{em} .

Igual sucede si el controlador tiene un tiempo de muestreo inadecuado. Es importante que el tiempo de muestreo esté acorde a la dinámica del sistema de manera que no se produzcan enormes cambios entre muestra y muestra que desestabilicen el sistema, pero también es esencial que el tiempo de control vaya acorde a la dinámica de los demás factores que influyen en la salida. Como se puede observar en la gráfica 6.11, reducir el tiempo de muestreo significativamente no reduce en gran medida el error ya que $T_c = 0,1$ segundos ya era una magnitud aceptable. Sin embargo, un aumento del tiempo de muestreo a $T_c = 1$ s implica no captar adecuadamente la influencia de los motores sobre el estado de carga provocando mayores oscilaciones sobre la referencia.

Como conclusión final a esta sección, se entiende que la utilización de técnicas clásicas de control aparenta dar un resultado válido, en especial si se compara con lo que habría dado otras técnicas más simples como

controladores todo-nada. Sin embargo, es evidente que un control válido no implica necesariamente que sea el deseado. Claramente se observa como la gestión de la energía mediante un PID en base a una tabla preconfigurada no es eficiente y que únicamente se actúa sobre uno de los elementos, la batería. Es por ello por lo que se hace interesante el estudio de otras técnicas de control modernas que aprovechen el conocimiento tan completo que se tiene del sistema y se tomen decisiones más complejas multicriterio más allá de una tabla prediseñada de referencias.

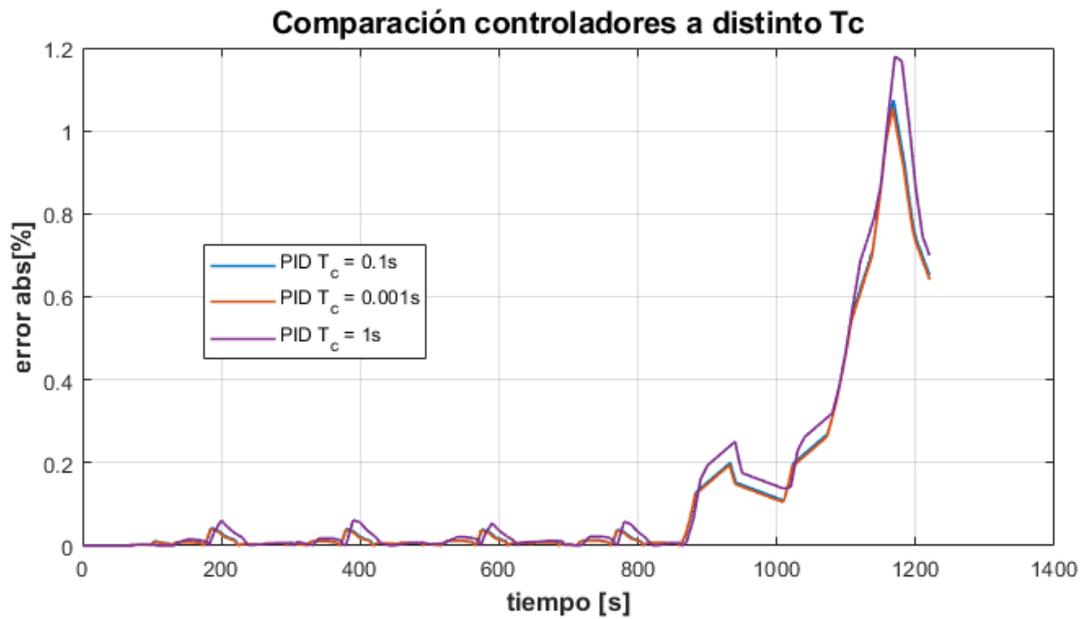


Figura 6.11 Comparativa PID con precompensación a diferentes tiempos de muestreo.

7 Implementación del control MPC

En esta sección se muestra el procedimiento seguido para la simulación, implementación y sintonización de un controlador predictivo basado en modelo (MPC) así como los resultados y conclusiones obtenidos de éstos. El objetivo de los controladores se centra en hacer una gestión eficiente entre el uso de la batería de ión-litio y la pila de combustible con el objetivo de satisfacer la energía demandada por parte de los motores así como de aprovechar los excedentes de energía.

7.1 Entorno de simulación

En este caso, el entorno de simulación ya parte de las premisas comentadas con el controlador PID, con la principal diferencia de que ahora la unidad de control recibe como parámetros el estado de carga (SOC), el nivel del tanque de hidruros (LOH) y el perfil de conducción para estimar la potencia que demandan los motores. Además, en su interior cuenta con 3 bloques: Un bloque primer bloque encargado de la estimación de la potencia de los motores, un bloque principal de la herramienta *Model Predictive Control Toolbox* en el cual se ha implementado el modelo del sistema y es el encargado del proceso de optimización, y un tercer bloque llamado detector de fallos que se encarga de comprobar el correcto funcionamiento del vehículo y establecer la parametrización del problema de optimización en función de la circunstancia en la que se encuentre. Los parámetros en cuestión son la referencia del SOC y LOH así como en el intervalo en el que se desea trabajar, los valores máximos y mínimos que se considerarán adecuados para P_{fc} y las ponderaciones del optimizador (error cuadrático de SOC, LOH, valor de P_{fc} y velocidad de P_{fc}).

En la figura 7.1 puede observarse la estructura del entorno completo.

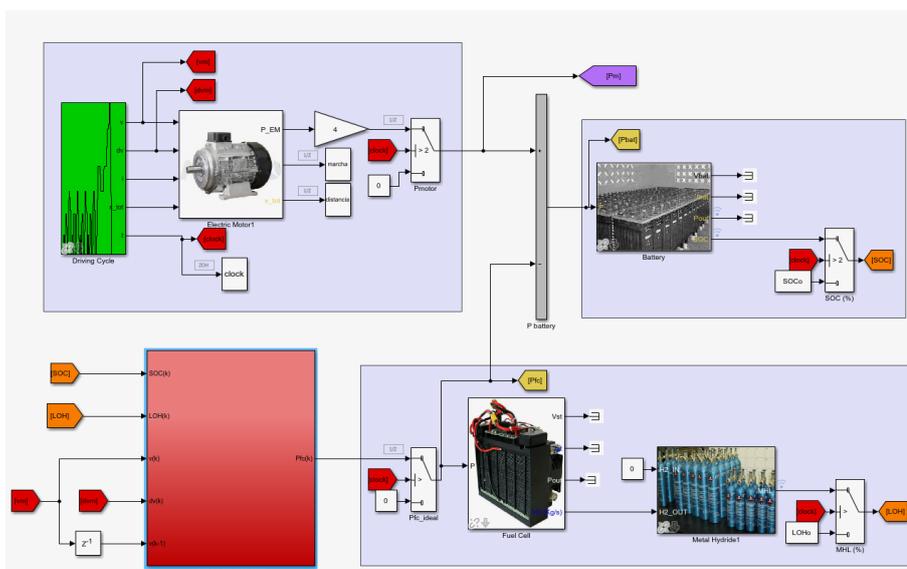


Figura 7.1 Estructura general para el control mediante MPC.

7.2 Diseño del controlador

A la hora del diseño del controlador predictivo basado en modelo es necesario enfocar la resolución desde otro punto de vista. Mientras que en el diseño del PID se buscaba controlar la pila de combustible para un problema de seguimiento y regulación del estado de carga de la batería, el MPC permite resolver el problema mediante un planteamiento multicriterio de manera que la señal de control sea generada contemplando diferentes objetivos y limitaciones. De esta manera, el modelo sobre el cual se diseña el control deja de ser una función de transferencia simple sino el modelo completo del vehículo expresado en el espacio de estados desarrollado en capítulos anteriores.

7.2.1 Definición de la función de coste

Como ya se comentó previamente, el funcionamiento del controlador MPC se centra en el análisis del estado del sistema (actual, ideal y estimaciones futuras) mediante un función de costes buscando la secuencia de señales de control que reduzca al mínimo el impacto de las discrepancias estado actual-ideal.

Llevado a la gestión de la energía, dicha función de costes puede quedar determinada por la expresión 7.1.

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} [\delta_{SOC} \cdot (SOC_{k+i} - SOC_{ref})^2 + \delta_{LOH} \cdot (LOH_{k+i} - LOH_{ref})^2] + \sum_{n=0}^{N_u-1} [\alpha \cdot P_{fc}^2 + \lambda \cdot \Delta P_{fc}^2] \quad (7.1)$$

En esta expresión ya no solo se contempla el estado de carga SOC como en el controlador PID, sino que también se contempla el nivel del tanque de hidruros metálicos LOH . La consideración de la importancia entre ambas viene marcada por las ponderaciones δ_i .

Además, la función también contempla un parámetro λ que penalice variaciones bruscas en la señal de control y otro parámetro α que penalice un excesivo uso de la señal de control, lo que implica en un flujo elevado de H_2 .

El objetivo de esta sección se centra en establecer las referencias y ponderaciones que se traduzcan en un comportamiento adecuado del vehículo.

7.2.2 Establecimiento de las restricciones

Una de las principales ventajas de esta metodología es que pueden plantearse restricciones en la señal de control y en los estados del sistema, siendo considerados a la hora de calcular la señal de control óptima. Por ello, tras consultar con los técnicos del laboratorio, se han establecido las siguientes restricciones:

- Intervalos de trabajo de las fuentes de energía que garanticen un correcto funcionamiento del sistema, no acorten la vida útil de los dispositivos y garanticen una fiabilidad elevada del modelo. Para ello los intervalos de trabajo que se han establecido han sido los siguientes: $SOC \in [20\%, 80\%]$ así como también $LOH \in [10\%, 90\%]$.
- Intervalo de trabajo de la pila de combustible evitando dañarlo por continua conmutación o trabajar a valores elevados. Los límites establecidos han sido los siguientes: $P_{fc} \in [100W, 900W]$.
- Limitación de la velocidad de la señal de control: En relación al punto anterior, también se ha limitado la variación máxima permitida a $\Delta P_{fc}/T = \pm 20W/s$.

7.2.3 Sintonización de parámetros

Para la sintonización de los diferentes parámetros es necesario establecer un caso simplificado donde se observe con claridad el impacto de cada uno de los parámetros de ponderación y la fuerza de cada una de las magnitudes manejadas. Para ello se ha diseñado un escenario en el que los motores demandan una potencia continua de 500W y el estado inicial del LOH y SOC varía de prueba en prueba. Inicialmente se ha partido de una función de costes con α y λ anuladas y un horizonte de control y predicción lo suficientemente amplio como para considerar que el MPC es capaz de estimar la evolución durante toda la simulación ($T_c = 1$ segundo, $N_u = N_2 = 100$ y duración de la simulación 100 segundos). El ajuste de estos últimos parámetros se abordará más adelante.

Criterio empleado

Para poder sintonizar correctamente los parámetros es necesario definir cuál es el objetivo que debe cumplir el controlador. Los criterios serán similares a los propuestos en el PID pero más completos al tener la posibilidad de incorporar múltiples enfoques a la función objetivo.

- Evitar que el nivel del tanque de hidruros se mantenga durante demasiado tiempo sobre el umbral máximo admisible (90%).
- No utilizar la pila de combustible si el nivel del tanque es inferior al umbral mínimo admisible (10%).
- Mantener un comportamiento estable y progresivo evitando una señal de control perjudicial para el sistema.
- Tener en consideración las magnitudes de trabajo de ambos dispositivos. Encontrar un compromiso entre ambas fuentes de energía para evitar un sistema altamente cargado frente a uno en circunstancias indeseadas.

El último punto es esencial; La potencia demandada por los motores ante determinados perfiles de conducción es ampliamente superior a la potencia máxima que puede aportar la pila de combustible, además de que la batería cuenta con una dinámica mucho más rápida. Por ello, es preferible que el *LOH* alcance valores mínimos contando la batería con un *SOC* bajo, frente a descargar la batería sin haber utilizado todo el combustible y no poder seguir la trayectoria adecuadamente.

Esta primera idea es la que lleva a situar los valores de referencia y las ponderaciones δ_i . Dado que en ciclos de conducción habituales la batería se descarga a mayor ritmo que la pila a potencia máxima, se hace lógico establecer el nivel de referencia del *SOC* al 55% mientras que la pila de combustible a 35%. La penalización por baja batería comienza cuando ésta es inferior a la mitad, mientras que la pila a niveles inferiores.

Sintonización de los parámetros δ_i

Bajo el mismo objetivo con el que se han situado las referencias, los parámetros de ponderación se han situado como $\delta_{SOC} = 2$ y $\delta_{LOH} = 1$.

El objetivo se centra en comparar las velocidades de descarga de manera que si el *LOH* es muy reducido y el *SOC* no, la pila trabaje a valores mínimos, si el *LOH* es muy elevado y el *SOC* no, la pila trabaje a valores mínimos, si ambos se encuentran con un alto nivel de carga, se encuentre un equilibrio priorizando una reducción más rápida de la pila, y si ambos se encuentran en un estado cercano al de referencia, se encuentre una situación de compromiso adecuada para ambos.

En la gráfica 7.2 se observa la señal de control generada por el sistema para diferentes estados de *SOC* y *LOH*. Efectivamente el comportamiento es el esperado.

Sintonización de los parámetros α y λ

Observando la gráfica 7.2, es apreciable como los valores de la potencia son relativamente elevados y oscilantes cuando el error en *SOC* y *MHL*. Para corregir este hecho, se sitúa $\alpha = 5 \cdot 10^{-5}$ y $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ de manera que se evite picos elevados en la señal de control a la vez que se evitarían cambios bruscos frente a cambios bruscos en la potencia demandada por los motores. El resultado de esta parametrización se puede observar en la gráfica 7.3, donde el comportamiento es idéntico en todos los casos a excepción de la simulación en la que se partía del punto de referencia, que ahora cuenta con una señal más suave y adecuada.

A modo de resumen, en la tabla 7.1 pueden verse los parámetros finalmente utilizados.

Tabla 7.1 Parámetros de la función de costes.

Parámetro	LOH_{ref}	SOC_{ref}	δ_{SOC}	δ_{LOH}	α	λ
Valor	35%	55%	2	1	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$

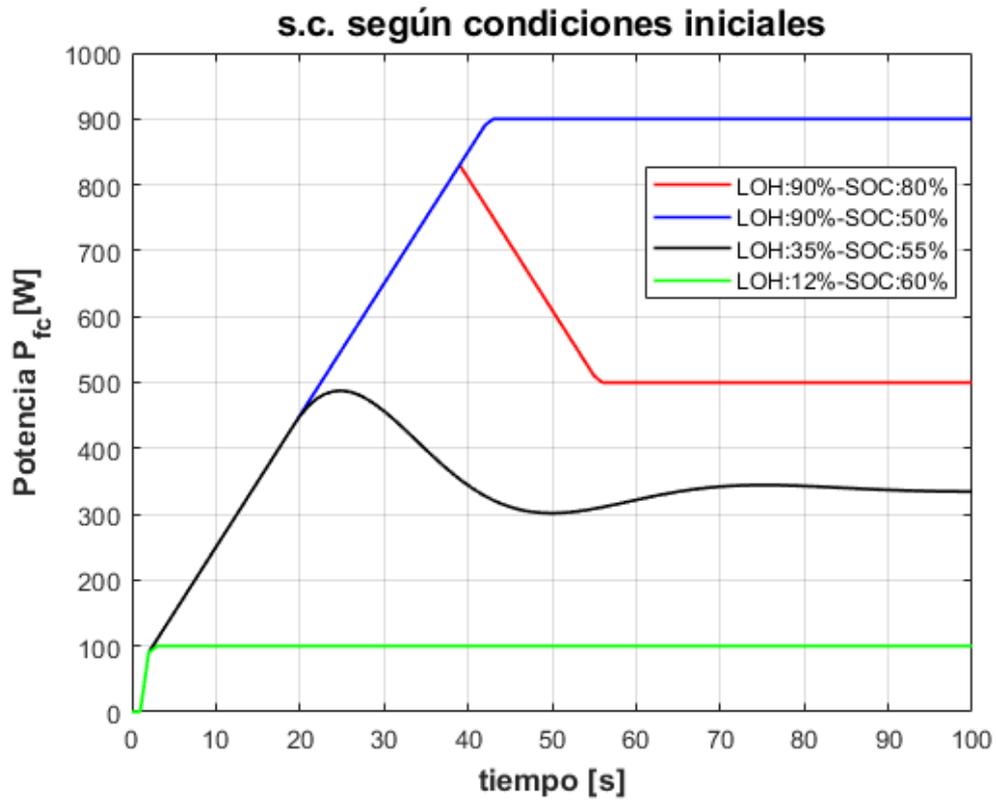


Figura 7.2 Prueba 1: Sintonización de los parámetros δ_i .

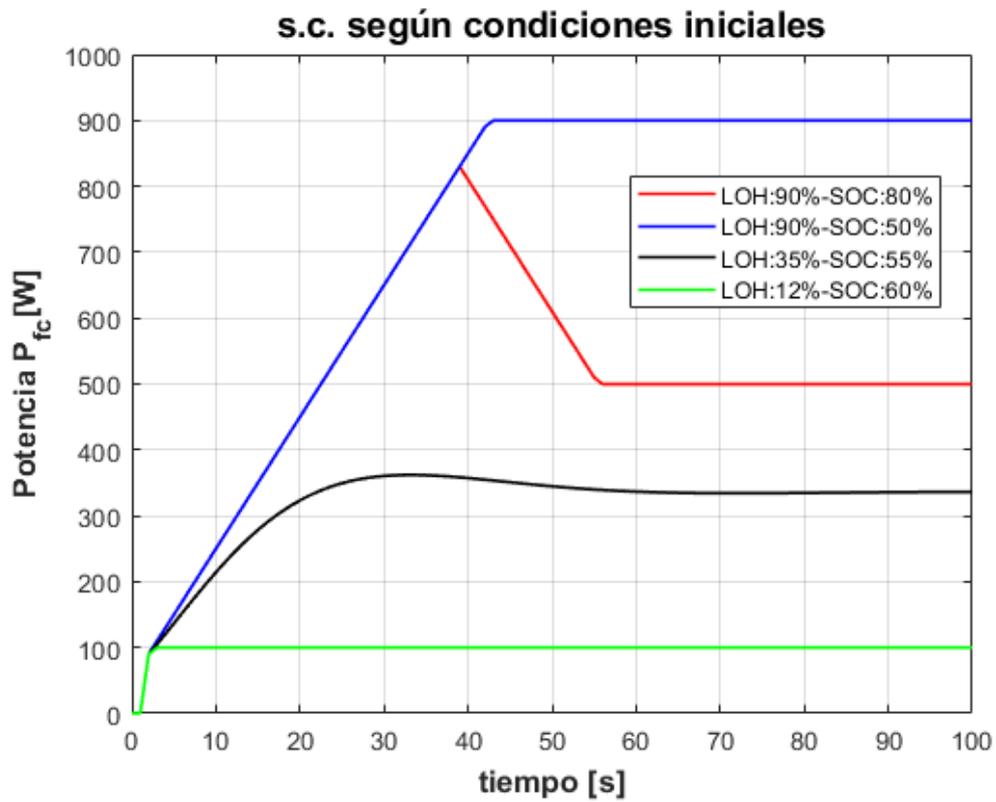


Figura 7.3 Prueba 2: Sintonización de los parámetros α y λ .

Ajuste de los parámetros T_c , N_u y N_c

Como ya se vió con el control PID, dada la rapidez a la que cambia todo, el tiempo de muestreo de 1 segundo es demasiado elevado, por ello también se retoma el valor de $T_c = 0,1$ segundos como en el controlador PID. De igual modo, debido a lo rápido que puede variar la demanda de los motores, un horizonte de predicción muy elevado no tiene sentido ya que las condiciones externas e internas cambian con gran velocidad, por lo que el horizonte de predicción se ha reducido a 10 unidades, equivalente a 1 segundo, coincidiendo con el periodo con el que se actualiza la información de la potencia demandada por los motores.

LLegados a este punto, se ha experimentado bajo diferentes perfiles de conducción variando manualmente el horizonte de predicción y analizando cómo evoluciona el coste óptimo en función de N_2 y N_u . En la gráfica 7.4 puede verse cómo evolucionan la carga y el nivel de hidrógeno al simular un ciclo *Europe : City manual* partiendo de las referencias. Como se puede observar, las curvas azules y celestes son las que tienen un coste final menor, encontrando el mejor equilibrio entre reducción de carga y de nivel de hidrógeno. Además, la diferencia entre la curva celeste y la azul oscura es muy reducida, por lo que puede asumirse que el parámetro $N_u = 10$ es el más adecuado y que un $N_2 = 2$ no supone un empeoramiento significativo mientras que reduce el coste computacional.

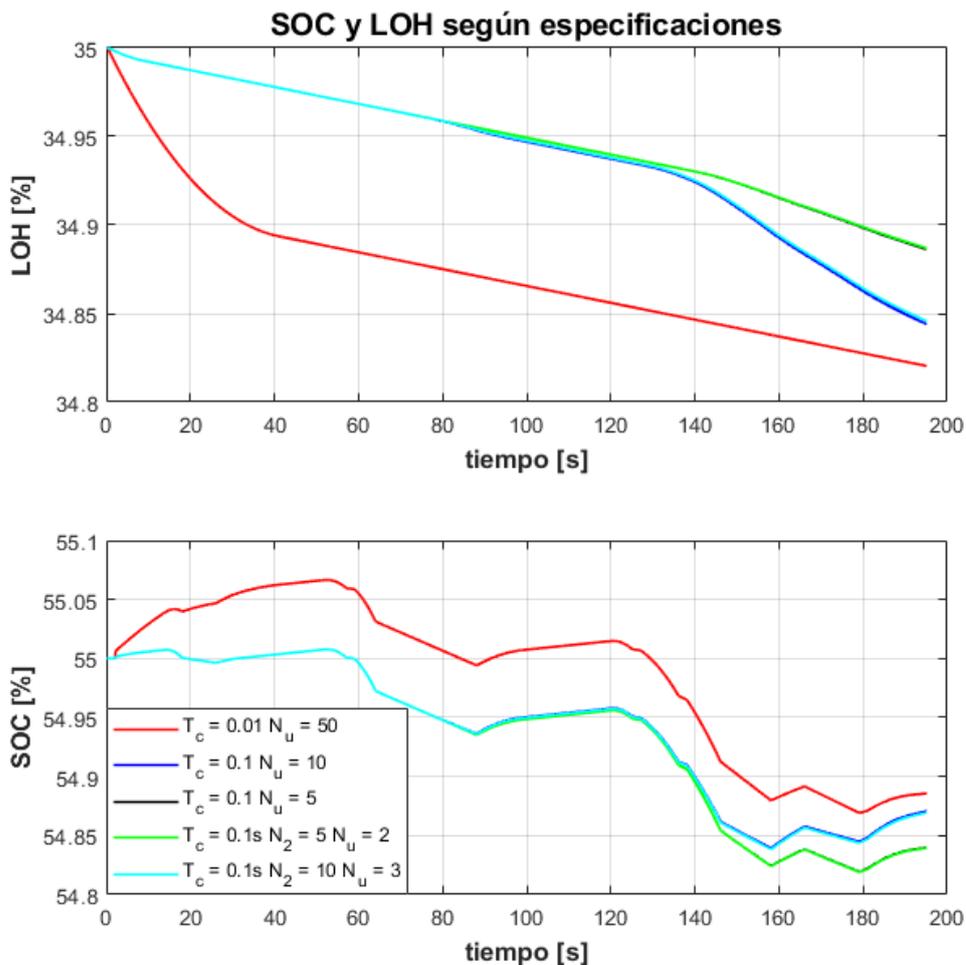


Figura 7.4 Prueba 3: Sintonización de los parámetros N_u y N_2 . Europe City Manual .

7.3 Resultados obtenidos

En esta última sección se van a exponer resultados de diferentes perfiles de conducción partiendo de diferentes estados de carga donde se pueda analizar el comportamiento. En las siguientes gráficas se observa la potencia aportada por la pila (azul) y la potencia aportada por la batería (rojo).

Como se puede observar en las gráficas 7.5 y 7.6, cuando el nivel de la batería es alto y de la pila bajo, su trabajo se reduce a mínimos, al igual que si el tanque está lleno, trabajará al máximo para evitar que la batería se descargue.

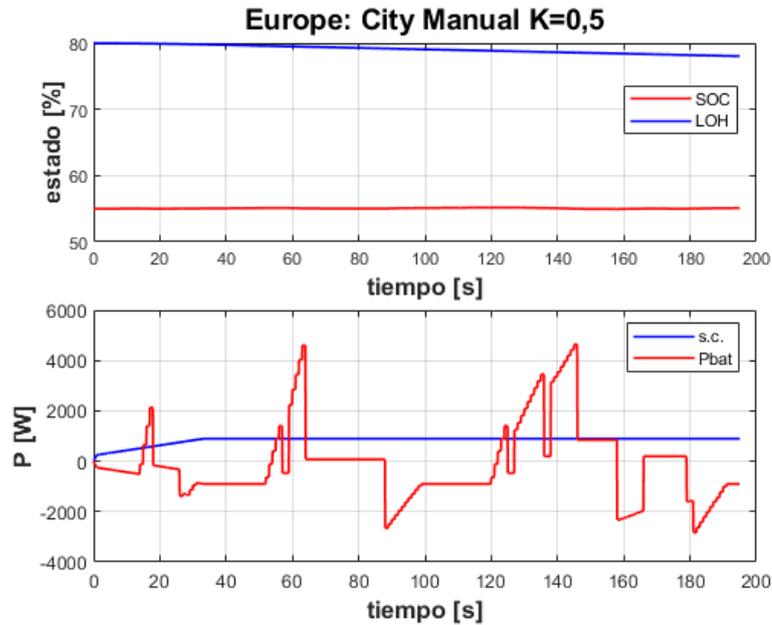


Figura 7.5 Prueba 4: MPC propicia la descarga de la pila de combustible .

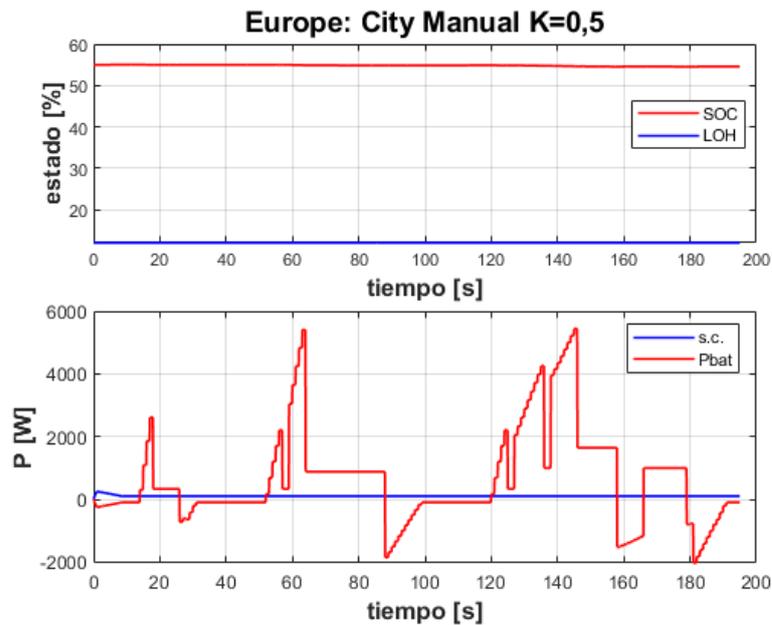


Figura 7.6 Prueba 5: MPC propicia no utilizar la pila de combustible .

Por otro lado, en los ciclos de conducción 7.7, 7.8 y 7.9 se observa cómo la pila actúa de regulador con una señal de control bastante relajada, aumentando su potencia cuando la batería está aportando demasiada potencia, y reduciendo notablemente su valor cuando entre en juego el freno regenerativo, y llegando a un compromiso de descarga tanque-batería cuando los motores solicitan valores intermedios de potencia.

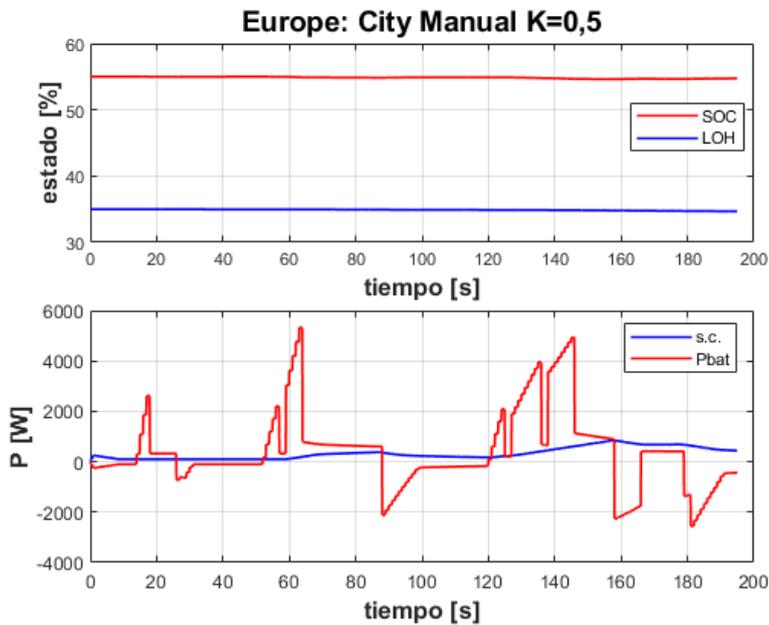


Figura 7.7 Prueba 6: MPC encuentra compromiso pila-batería .

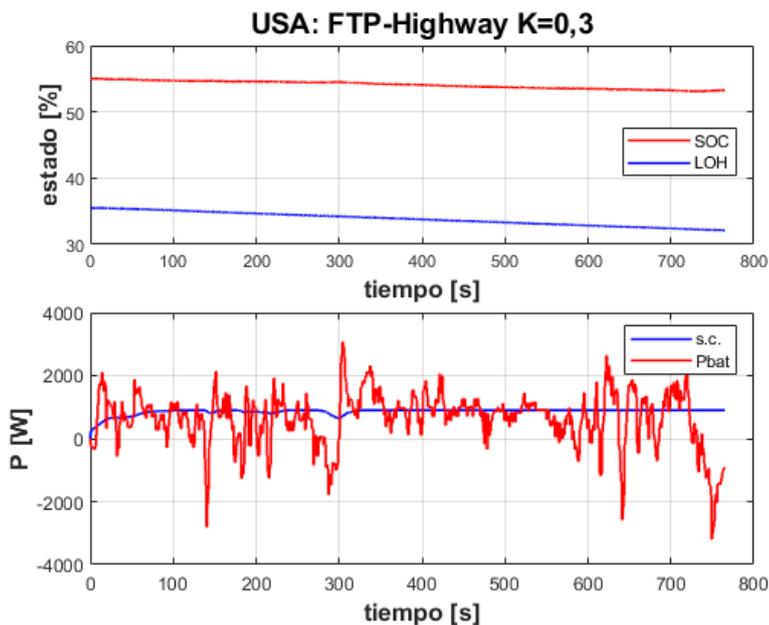


Figura 7.8 Prueba 7: MPC encuentra compromiso pila-batería .

7.4 Comparativa funcionamiento MPC - PID

Por último, se ha procedido a realizar una simulación bajo las mismas condiciones haciendo uso del controlador PID y del controlador MPC. Como se puede observar en las gráficas 7.10 y 7.11, la limitación de la velocidad

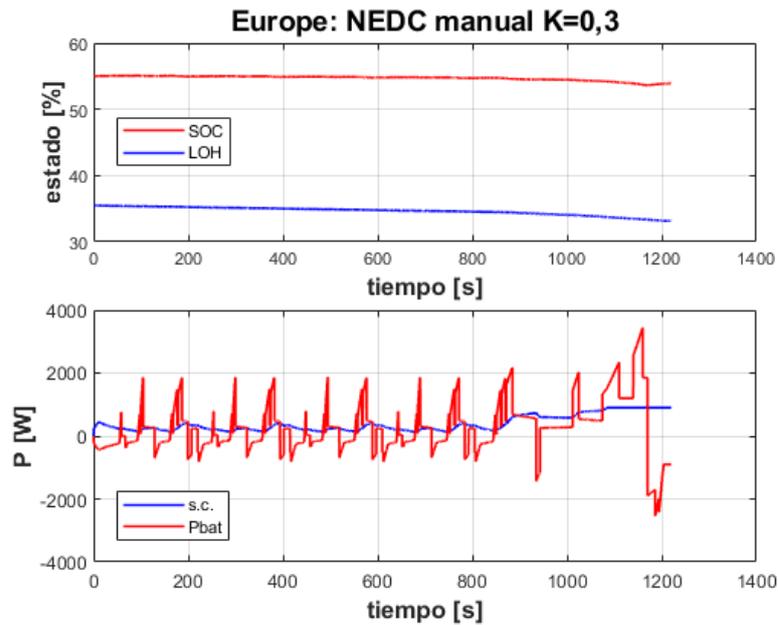


Figura 7.9 Prueba 8: MPC encuentra compromiso pila-batería .

y la parametrización escogida permiten un control mucho más suave y menos tiempo en puntos de saturación, lo que implica un uso más adecuado de la pila de combustible, de lo contrario, su vida útil podría verse reducida.

Además, a pesar de que la pila se mantenga en continuo funcionamiento, consigue una menor descarga a lo largo de la simulación, ya que el objetivo del MPC se centra en conseguir una gestión eficiente en lugar de en calcular la señal de control para el seguimiento de una referencia independientemente de las restricciones como sucede en el PID.

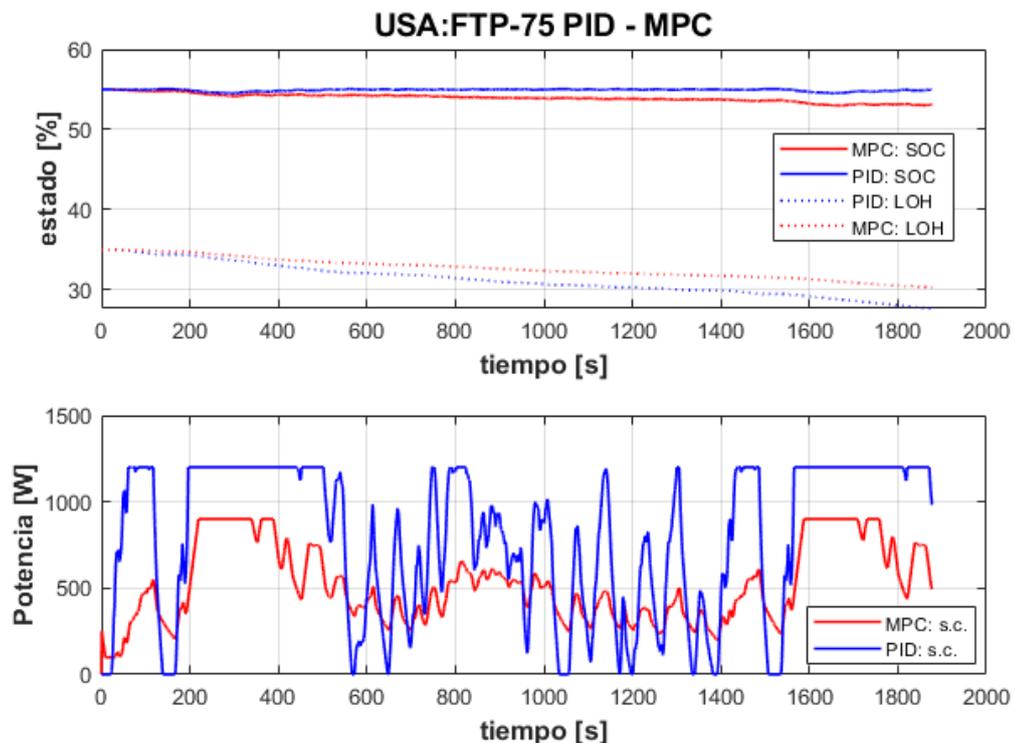


Figura 7.10 Comparativa de uso de un PID frente a un MPC ante USA: FTP-75 .

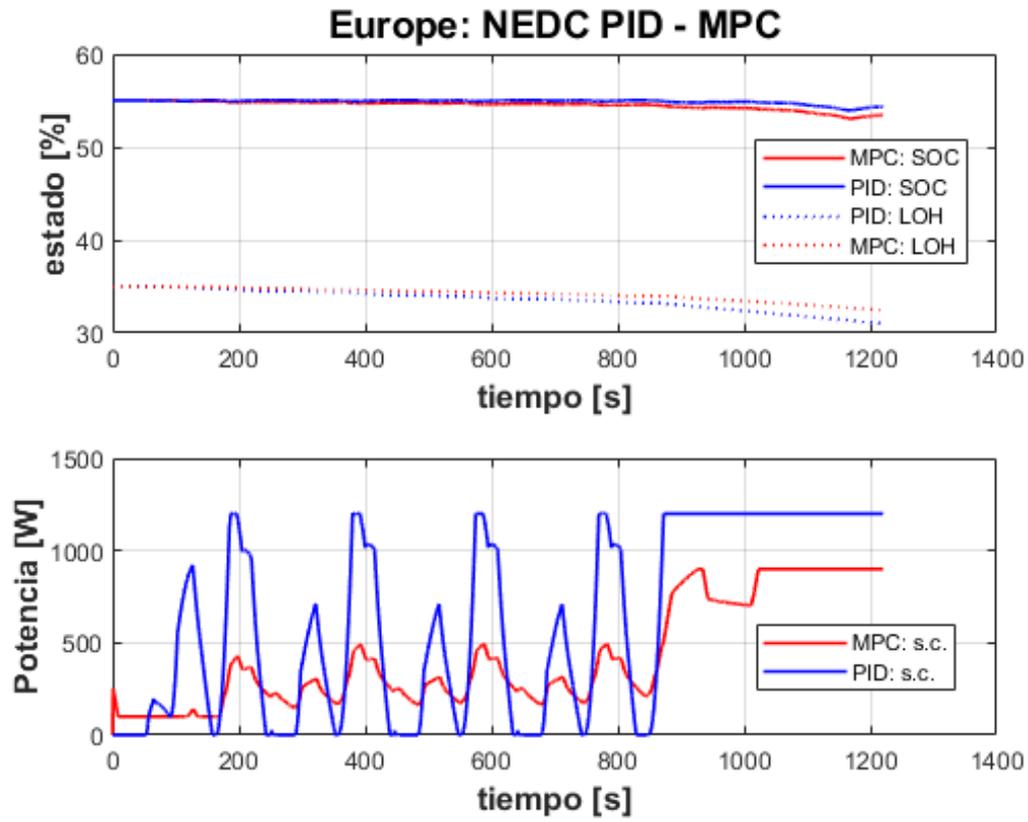


Figura 7.11 Comparativa de uso de un PID frente a un MPC ante Europe: NEDC .

8 Incorporación de rutina de detección de fallos

En esta sección se expone la rutina de detección de fallos elaborada y su incorporación al sistema.

8.1 Planteamiento

Entre las grandes ventajas del control MPC se encuentra el conocimiento completo del sistema, tanto de estados medibles, como no medibles mediante estimaciones. Esto permite incorporar una rutina de detección de fallos que varíe el funcionamiento del controlador cuando se detecta alguna anomalía en el comportamiento de sus componentes.

Para ello se analiza continuamente la información del estado de carga *SOC* y el nivel del tanque *LOH* al igual que la señal *GPS* del vehículo y son comparadas con las medidas esperadas. En caso de que el error acumulado en las 10 últimas muestras (1 segundo) supere cierto umbral, el controlador MPC modifica sus puntos de trabajo para evitar complicaciones, al igual que una variable externa comunica al conductor lo sucedido. De igual modo, si el funcionamiento es correcto pero el estado de la batería o del tanque de combustible no es deseoso, también existe una actuación acorde para llevar la situación a un estado seguro. En la tabla 8.1 se detallan las especificaciones y en B.1 puede consultarse el código con más detenimiento.

Tabla 8.1 Estados de funcionamiento.

estado	problema	Actuación
0	correcto	Umbrales de trabajo y referencias estándar.
1	$LOH > 90\%$	El nivel del tanque debe ser reducido.
2	$LOH < 10\%$	Se procede a la desconexión de la pila.
3	$LOH < 10\%, SOC < 20\%$	Conducción no recomendada.
4	$SOC > 80\%$	Se debe priorizar el uso de la batería.
5	$LOH > 90\%, SOC > 75\%$	Se procede a funcionamiento habitual.
6	$SOC < 22\%$	Se procede a cargar la batería.
7	Pila: Descarga menor	Se procede a la desconexión de la pila.
8	Anomalía en la batería	Funcionamiento habitual. Conducción no recomendada.
9	Pila: Descarga mayor	$P_{fc} = 0W$. Conducción no recomendada, (posible fuga H_2).
10	Anomalía en <i>GPS</i>	Funcionamiento habitual. Conducción no recomendada.

8.2 Resultados obtenidos

Por último, se exponen resultados gráficos de determinadas simulaciones con diferentes fallos o circunstancias que modifican el estado de funcionamiento.

8.2.1 Estudio de los niveles de carga

En la prueba 1 y la prueba 2 se analiza el protocolo de actuación establecido cuando se sobrepasan los umbrales de *SOC* y *LOH* definidos como seguros. Dichas pruebas han sido realizadas con el perfil de conducción *USA : FTP – 75*.

Prueba 1

En la gráfica de la prueba 1 8.1 se muestran diferentes circunstancias:

Inicialmente el nivel del tanque es excesivamente alto por lo que se procede a descargarla hasta que alcance el valor de 90%, para ello se ha planteado que la potencia de la pila sea constante y superior a los 900W habituales.

Una vez el nivel se encuentra dentro de los límites, se procede a actuar en el modo de funcionamiento habitual, el cual implica descargarse a 900W para compensar el mal estado de la batería.

Por último, una vez el estado de carga de la batería alcanza valores inferiores al 22%, se vuelve a proceder a solicitar a la pila la máxima potencia, esta vez no con el objetivo de reducir el nivel del tanque, sino evitar que el nivel de la batería alcance el 20%, su valor mínimo deseado.

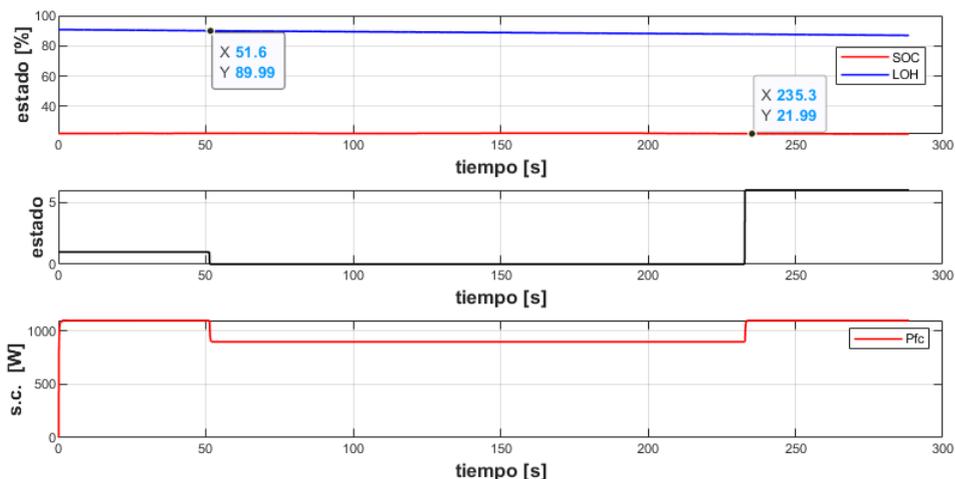


Figura 8.1 Estudio de niveles de carga: Estados 0, 1 y 6 .

Prueba 2

Por otro lado, en la gráfica de la prueba 2 8.2 se muestran otras circunstancias:

Inicialmente el nivel del tanque es excesivamente alto por lo que se procedería a su descarga. Sin embargo, la batería se encuentra también en valor indeseables, por lo que se mantiene su funcionamiento habitual hasta que uno de los dos dispositivos normalice su situación. Observando los valores, la pila toma diferentes valores pero todos dentro de un rango reducido.

Una vez la pila reduce su valor a niveles deseables, como la batería sigue teniendo un estado de carga superior al 80%, se procede a la desconexión de la batería, la cual se reactivaría una vez la batería alcance valores seguros.

En cuanto al estado 2 (Tanque bajo el 10%) y el estado 3 (tanque bajo y batería descargada), el funcionamiento sería análogo a los estados anteriormente simulados. En el estado 2 se procedería a desconectar la pila de combustible (como en el estado 4), mientras que en el estado 3 se procedería a mantener el modo de funcionamiento habitual (como en el estado 5), aunque se desaconseja la conducción notificando al usuario

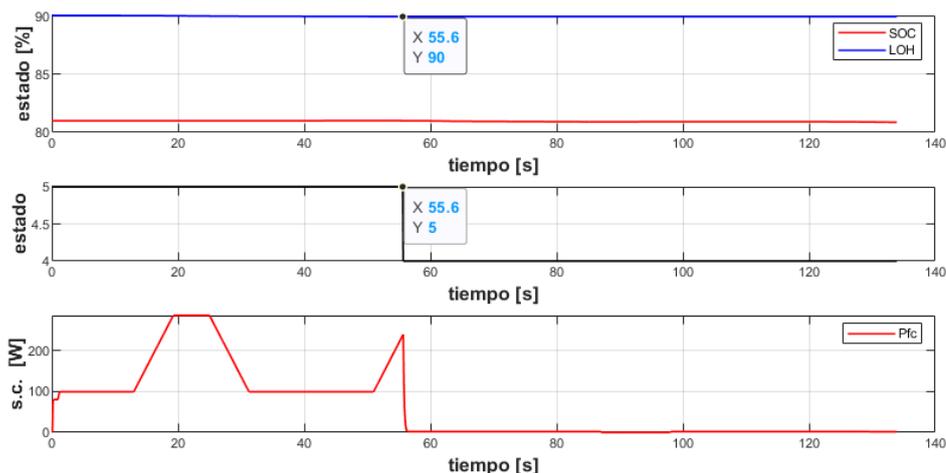


Figura 8.2 Prueba 2: Estudio de niveles de carga: Estados 4 y 5 .

que debe cargar la batería y repostar combustible.

De estas dos simulaciones es resaltable cómo la actuación es inmediata, por lo que se hace necesario un sistema de histéresis que evite cambios bruscos en el funcionamiento debido a oscilaciones entre estados. Este fenómeno sucedería cuando la batería se encuentre oscilando en torno a su nivel máximo o su nivel mínimo, provocando que la pila alterne entre desconexión y estado normal, o máxima descarga y estado normal, lo cual no es deseable.

8.2.2 Estudio de errores en los dispositivos

Como se muestra en la tabla 8.1, más allá del estado de funcionamiento habitual y los 6 estados de alerta en relación al nivel de carga y combustible, se han desarrollado 4 estados adicionales (7, 8, 9 y 10) asociados a detección de fallos en los dispositivos asociados a la energía del vehículo. Como es lógico, el protocolo de actuación debido a la detección de fallos es de máxima prioridad frente a los estados anteriores.

En los siguientes apartados se exponen los diferentes fallos contemplados analizando la respuesta del detector bajo un perfil de conducción *Europe : City*.

Detección de fuga de H_2

La gráfica 8.3 hace referencia a la actuación ante fugas de H_2 . En cuanto el sistema detecta que el nivel del tanque es notablemente inferior a lo predicho por el modelo, el sistema considera que podría haber una fuga de hidrógeno, por lo que se procede a inhabilitar la pila con la mayor brevedad posible y notificarlo al conductor, ya que la seguridad de éste y del vehículo no está garantizada.

Funcionamiento anómalo de la pila de combustible

Similar a lo contemplado en el apartado anterior, las gráficas 8.4 muestra otra casuística que puede darse en la pila de combustible: El nivel de combustible no disminuye a la velocidad adecuada. Esto puede suceder por diversas situaciones, como por ejemplo que el comportamiento de la pila haya variado y diste en exceso del modelo o que el controlador integrado que tiene no está funcionando correctamente. Aun así, lo aconsejable es proceder a su desconexión y hacer uso únicamente de la batería.

Para esta simulación se ha interrumpido la conexión entre la pila y el tanque a partir del segundo 30.

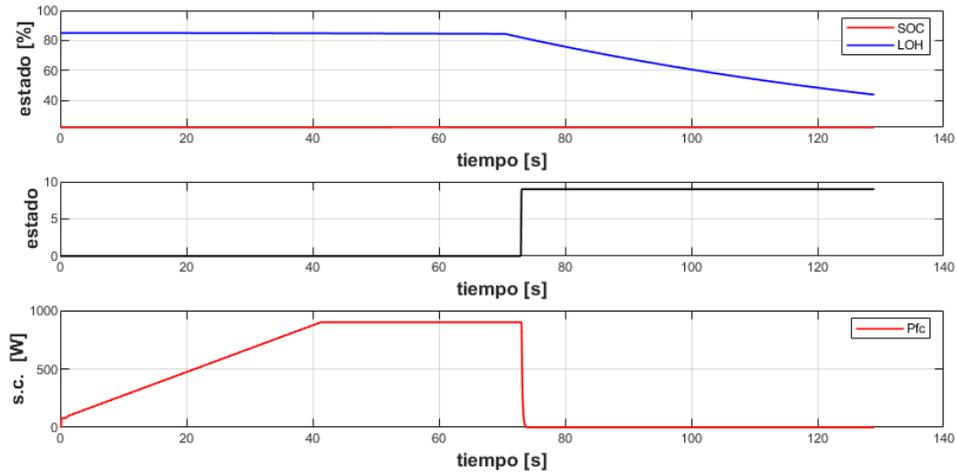


Figura 8.3 Prueba 1: Detección de fuga de hidrógeno .

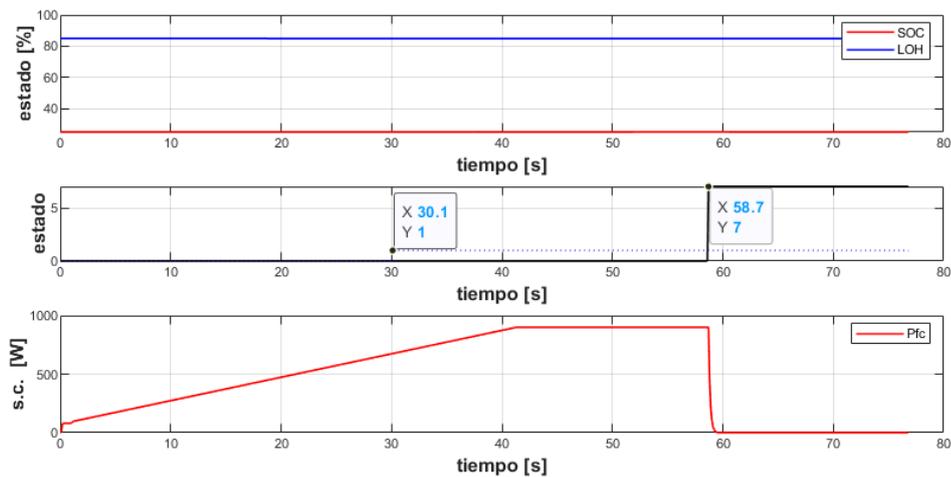


Figura 8.4 Prueba 2: Detección comportamiento anómalo de la pila .

Funcionamiento anómalo de la batería

El funcionamiento anómalo de la batería viene dado por una discrepancia significativa entre el estado de carga esperado y el medido. Esto puede deberse a múltiples circunstancias, desde un funcionamiento incorrecto de la pila no detectado por el sistema anterior, pérdidas entre los componentes, un funcionamiento de los motores fuera de lo contemplado o una demanda excesiva de energía por parte de los dispositivos auxiliares. Dado que el vehículo precisa de la batería para funcionar, no se produce ninguna modificación en la procedencia de la energía, sin embargo, no es recomendado la conducción y se sugiere la revisión mediante el sistema gestor de la batería *BMS*.

En ambas gráficas, el fallo sucede en el segundo 30 (se interrumpe la conexión batería-bus), sin embargo, en la gráfica 8.5, el umbral de error es tan elevado que el detector de fallos tarda un largo periodo en notificarlo. De igual modo, con un umbral inferior se consigue detectar antes, pero en cuanto entra en juego el freno regenerativo, deja de detectarse.

De estas dos simulaciones se evidencia la necesidad de una buena configuración de los parámetros para una detección precoz así como el establecimiento de un sistema que mantenga la alarma una vez la haya detectado.

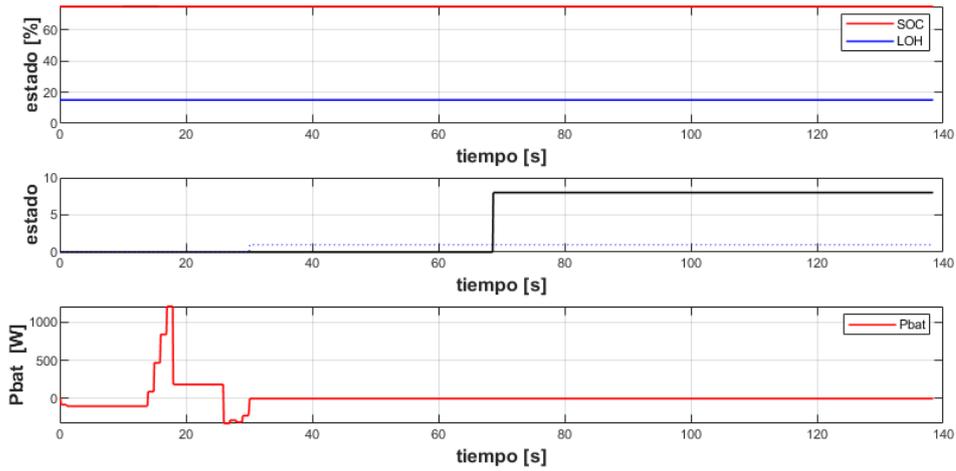


Figura 8.5 Prueba 3: Detección comportamiento anómalo de la batería .

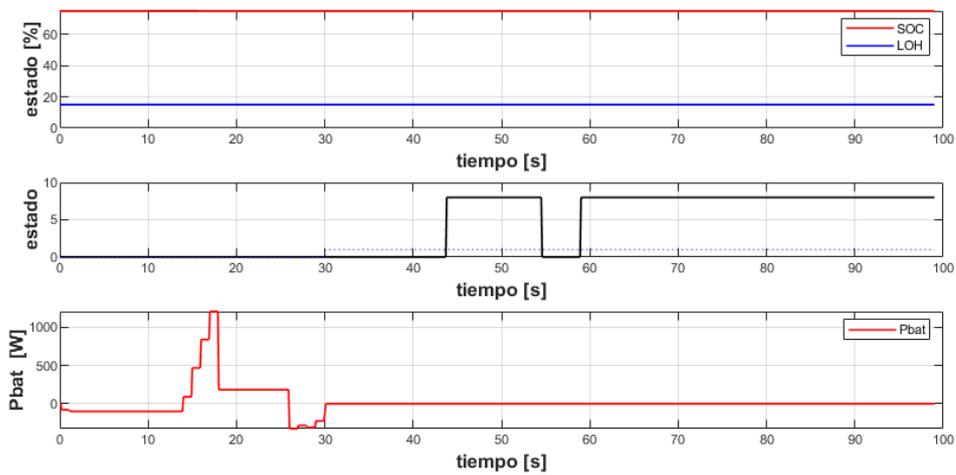


Figura 8.6 Prueba 4: Detección comportamiento anómalo de la batería .

Detección de discrepancias en la posición

Por último, en la gráfica 8.7 se analiza la detección de fallos mediante señal *GPS*. Conocer el perfil de conducción permite conocer la distancia teórica recogida, o, si también se contemplara la información del volante, es fácil determinar una posición aproximada en el plano.

La detección de discrepancias en la señal *GPS* puede ser sinónimo de múltiples fallos como pr ejemplo defecto en los motores, pérdidas excesivas en el bus donde se realiza el balance de potencia, o unas discrepancias inadmisibles en el modelado de los motores.

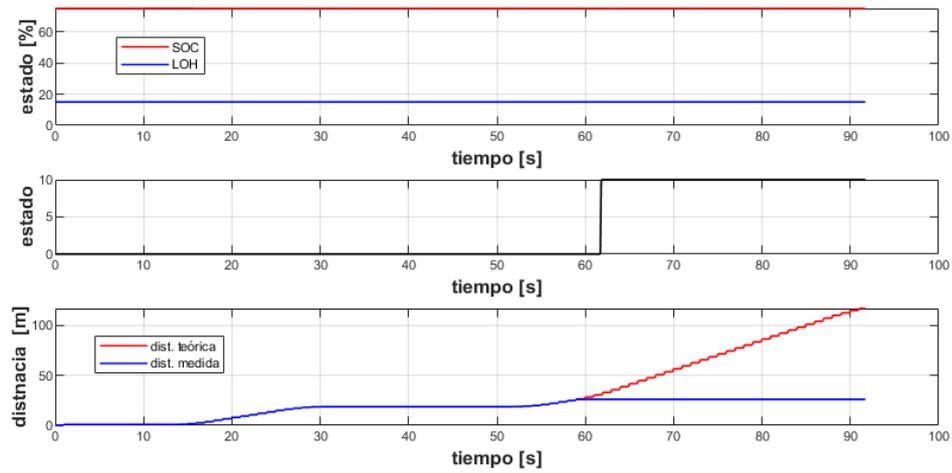


Figura 8.7 Prueba 5: Detección comportamiento anómalo mediante *GPS*.

8.3 Conclusiones

En base a los resultados, se ve necesario desarrollar un protocolo más exhaustivo que perfeccione la alternancia entre estados, por ejemplo, incluyendo un sistema de histéresis o de aviso mantenido.

Cabe destacar la importancia de una buena calibración de los umbrales de fallo, pues al alternar entre diferentes perfiles de conducción, es posible que determinados fallos dejen de detectarse, o detecten un falso positivo, lo cual no es deseable.

Por último, también es necesario recalcar que todas estas gráficas proceden de simulaciones. La realidad incluiría mayor ruido y error en la medida por lo que sería necesario realizar un filtro adecuado.

Una buena alternativa sería el filtrado mediante filtro de Kalman, de esta manera, la detección de fallos podría analizarse en función del error, pero también de la incertidumbre.

9 Conclusiones y líneas futuras de trabajo

9.1 Conclusión final

A lo largo de este proyecto se ha podido comprobar como la implementación de controladores MPC han ofrecido un resultado notablemente mejor que los diferentes controladores clásicos implementados. Esto se debe a que no sólo se centran en una referencia y cumplir un objetivo, sino que incluyen diferentes objetivos y se establece un control basado en la ponderación de todos ellos. Además, permiten establecer restricciones en las señales y sus velocidades, lo que evita los problemas derivados de las saturaciones y señales indebidamente bruscas.

En segundo lugar, es destacable que el control MPC cuenta con conocimiento del sistema que controla, lo cual supone una gran mejoría siempre que el modelo sea adecuado, permitiendo un control óptimo en circunstancias estacionarias, y un buen resultado ante circunstancias dinámicas. Otra de las ventajas de tener conocimiento del sistema es que también permite obtener nuevas magnitudes que los sensores no son capaces de medir o contemplan una señal ruidosa. Esto lleva a la posibilidad de incorporar técnicas de detección de fallos basadas en modelo, las cuales se han visto que tienen un futuro prometedor sobre el vehículo FOX, y aportan seguridad al pasajero y al estado del vehículo.

Por último, evidente que este Trabajo Fin de Grado es un análisis preliminar basado en modelos y simulaciones por computador. Para llevar a cabo el proyecto al sistema real sería adecuado realizar una validación de los modelos y un posible reajuste de parámetros acercando las predicciones al vehículo físico, también incluir un filtrado adecuado que mitigue la influencia de los ruidos en las mediciones, pues en la simulación se contemplan procesos ideales con magnitudes perfectas. De igual modo, es necesario el estudio de los umbrales de detección de fallos, acercándolo a magnitudes realistas que eviten falsos positivos o detecciones tardías.

9.2 Líneas futuras de trabajo

En cuanto a la continuidad de este proyecto, sería interesante experimentar con otras técnicas de control predictivo cercanas al desarrollado, como por ejemplo la inclusión de un modelo adaptativo en función de los puntos de trabajo y las mediciones, al igual que sistemas de control basados en modelos no lineales, reduciendo así la incertidumbre entre el vehículo real y el modelado actual. También sería de interés incluir un selector de modos de conducción: En la actualidad, se prioriza sacrificar el nivel del tanque frente a mantener la batería en un estado superior, lo cual puede ser adecuado para largos periodos de conducción en los cuales ni la batería ni el combustible van a ser recargados y por tanto lo idóneo será acabar tanto con el combustible como con la batería en ese orden. Sin embargo, si el vehículo fuera utilizado para tramos cortos de conducción y la batería va a poder ser recargada externamente, las referencias deberían establecerse priorizando la descarga de la batería y hacer uso del combustible únicamente cuando ésta se encuentre en niveles reducidos.

Por último, también se hace interesante inclusión de nuevos modelos en el vehículo que contemplen los dispositivos auxiliares que hacen uso de la energía y contemplar la incorporación de los supercondensadores que posibilitan la descarga y almacenamiento rápido de picos de energía.

Apéndice A

Código para la implementación del PID

En el siguiente código se muestra la función con la que se ha implementado los controladores P, PI y PID. Comentando y descomentando las líneas se permite alternar entre todos ellos así como eliminar el efecto anti-windup y considerar o no la potencia estimada que demandarán los motores.

Código A.1 Implementación de control PID en MatLab.

```
function out = PID(in)
SOC = in(1); %nivel actual de la batería
LOH = in(2); %nivel actual del tanque
t = in(3); %tiempo
Pem = in(4); %Estimación de la potencia demandada

emergency = 0; %Valdrá 1 si trabajamos fuera del estado habitual
persistent e_k1; %Error en el T anterior
persistent Ik; % Integral del error
emergency = 0; % Valdrá 1 cuando las condiciones no sean favorables
Ti = 151.5; Td = 1.4851; Kp = 9022.4; %PID
%Kp = 8526.5; Ti = 68; Td = 0; %PI
%Kp = 8750.1; Ti = 0; Td = 0; % P

Tc = 0.1;
Umax = 1200;
Umin = 0;

%% REFERENCIA SEGÚN NIVEL DE LOH Y DE SOC
%C1: LOH<10% (Avisa si SOC<20%)
if(LOH < 10)
    SOCref = 0; %No funcionará Pfc
    if(SOC < 20)
        emergency = 1; %Avisa de emergencia
    end
elseif (LOH < 50) %Nivel medio-bajo
    if(SOC < 20)
        SOCref = 25; %Cargar batería
    elseif (SOC < 50)
        SOCref = 25; %mantener
    elseif (SOC < 80)
        SOCref = 50; %mantener
    else
        SOCref = 75; %Descargar
    end
elseif (LOH < 90) %Tanque medio-alto
```

```

if(SOC < 20)
    SOCref = 25; %Cargar batería
elseif (SOC < 50)
    SOCref = 50; %mantener
elseif (SOC < 80)
    SOCref = 75; %mantener
else
    SOCref = 80; %Descargar
end
else % Tanque muy alto
    if(SOC < 20)
        SOCref = 25; %Cargar batería
    elseif (SOC < 50)
        SOCref = 75; %cargar batería
    elseif (SOC < 80)
        SOCref = 75; %cargar batería
    else
        SOCref = 80; %Descargar
    end
end

%% SALIDA
ek = SOCref - SOC; %cálculo del error
if(t < 10*Tc)
    e_k1 = ek;
    Ik = 0;
end
if(Ti > 0)
    Ik = Ik + Tc*ek/Ti; %Cálculo de la integral del error
else
    Ik = 0;
end

%% Cálculo de la señal de control
% Uk = Kp*(ek + Td*(ek-e_k1)/Tc + Ik); %Pm como perturbación
Uk = Pem + Kp*(ek + Td*(ek-e_k1)/Tc + Ik); %Pm como parte del a s.c.

%% Saturación de las señales y Antiwindup
if(Uk > Umax)
    Uksat = Umax;
    if(Ti > 0)
        Ik = Ik - Tc*ek/Ti; %Mecanismo Antiwindup
    end
elseif(Uk < Umin)
    Uksat = Umin;
    if(Ti > 0)
        Ik = Ik - Tc*ek/Ti;
    end
else
    Uksat = Uk;
end

%% Actualización de las variables y aplicación de la señal de control
e_k1 = ek;
out = [Uksat;Uk;SOCref;emergency]; %Señal saturada, sin saturar, referencia,
    aviso si las condiciones no son adecuadas

```

Apéndice B

Código para la implementación de la rutina de detección de fallos

En el siguiente código se muestra la función con la que se ha implementado la rutina de interrupción de fallos en MatLab, además, es el código encargado de generar las especificaciones del control MPC.

Código B.1 Implementación de la rutina de detección de fallos en MatLab.

```
function out = deteccion_fallos(in)
LOHm = in(1);
SOCm = in(2);
xm = in(3);
t = in(4);
x2 = in(5);
x4 = in(6);
xp = in(7);
LOHo = in(8);
SOCo = in(9);
persistent x_1;
persistent LOH_1;
persistent SOC_1;

SOCp = x4 + SOCo;LOHp = (1-x2)*LOHo;
SOCerror = 0.5;LOHerror = 2;xerror = 10;
ref_LOH = 35;ref_SOC = 55;LOH_min = 10;LOH_max = 90;SOC_min = 20;
SOC_max = 80;wLOH = 1;wSOC = 2;wPfc = 5e-5;wDPfc = 0.0005;Tc = 0.1;

% Estado de carga
if(LOHm < 10)
    if(SOCm < 20)
        estado = 3; %PILA Y BATERÍA VACÍA
    else
        estado = 2; %PILA VACÍA
    end
elseif(LOHm > 90)
    if(SOCm < 75)
        estado = 1; %PILA LLENA
    else
        estado = 5; %PILA Y BAT LLENAS
    end
end
```

```

else
    if(SOCm > 80)
        estado = 4; % BATERÍA LLENA
    elseif(SOCm < 22)
        estado = 6; % BATERÍA VACÍA
    else
        estado = 0; % TODO CORRECTO
    end
end
end
% Estado 7 = Fallo en la pila, no utilizar.
% Estado 8 = Fallo en la batería, detener vehículo
% Estado 9 = Fuga de H2 o mal funcionamiento pila, detener vehículo
% Estado 10 = Error GPS
if (t < 1)
    x_1 = zeros(1,10);
    SOC_1 = zeros(1,10);
    LOH_1 = zeros(1,10);
else
    for i=0:1:8
        x_1(10-i) = x_1(9-i);
        SOC_1(10-i) = SOC_1(9-i);
        LOH_1(10-i) = LOH_1(9-i);
    end
    x_1(1) = Tc*(xm - xp);
    SOC_1(1) = Tc*(SOCm - SOCp);
    LOH_1(1) = Tc*(LOHm - LOHp);
    if (sum(LOH_1) > LOHerror)
        estado = 7;
    elseif(sum(LOH_1) < -LOHerror)
        estado = 9;
    elseif(abs(sum(SOC_1)) > SOCerror)
        estado = 8;
    elseif(abs(sum(x_1)) > xerror)
        estado = 10;
    end
end
end

if((estado == 1) || (estado == 6))
    Pfc_min = 1100;
    Pfc_max = 1100;
elseif((estado==7) || (estado==3) || (estado==9) || (estado==2) || (estado==4))
    Pfc_min = 0;
    Pfc_max = 0;
else %((estado == 0) || (estado == 5) || (estado == 8) || (estado == 10))
    Pfc_min = 100;
    Pfc_max = 900;
end

out = [ref_LOH;ref_SOC;Pfc_min;Pfc_max;LOH_min;SOC_min;...
    LOH_max;SOC_max;wLOH;wSOC;wPfc;wDPfc;estado];

```

Índice de Figuras

2.1	Vehículo FOX	5
2.2	Batería de Ión-Litio acompañada de un convertidor de potencia	6
2.3	Funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM. Fuente: Wikipedia [9]	6
2.4	Esquema de los sensores en el FOX. Fuente: [3]	8
3.1	Esquema de control mediante PID. Fuente de la imagen: [12]	9
3.2	Esquema de funcionamiento de un MPC	11
4.1	Topología del vehículo híbrido eléctrico FOX	15
4.2	Componente de la tensión proporcional al estado de carga	18
4.3	Componente de la tensión proporcional a la corriente	18
4.4	Modelo teórico de la batería vs. aproximación	19
4.5	Linealización relación puntos de trabajo $I_{fc} - V_{fc}$	22
4.6	Linealización relación puntos de trabajo $P_{fc} - V_{fc}$	22
4.7	Linealización relación puntos de trabajo $P_{fc} - I_{fc}$	23
4.8	Estructura de bloques empleada para el calculo de P_{em}	25
4.9	Estudio del error cometido por modelo simplificado EUROPE CITY MANUAL	27
4.10	Estudio del error cometido por modelo simplificado USA FTP-75	27
5.1	Perfil de conducción aplicado para la simulación de validación	31
5.2	Potencia demandada por los motores en la simulación de validación	31
5.3	Flujo de hidrógeno en la simulación de validación	32
5.4	Estado de carga del tanque en la simulación de validación	32
5.5	Variación de la carga de la batería en la simulación de validación	33
5.6	Estado de carga de la batería en la simulación de validación	33
5.7	Perfil de conducción aplicado para la simulación de validación 2	34
5.8	Estado de carga del tanque en la simulación de validación 2	35
5.9	Estado de carga de la batería en la simulación de validación 2	35
6.1	Estructura general para el control mediante PID	37
6.2	Estructura simplificada para el control mediante PID	39
6.3	Diagramas de Bode del bucle de control en lazo abierto	41
6.4	Diagramas de Bode del bucle de control en lazo cerrado	41
6.5	Señal de control y SOC para PID en caso ideal	42
6.6	Señal de control y SOC para PID: Efecto WindUp	43
6.7	Señal de control y SOC para PID con mecanismo anti-WindUp	44
6.8	PID: Inclusión de los motores como perturbación	45
6.9	PID: Inclusión de precompensación de la P_{em}	46
6.10	Comparativa PI-PID con y sin precompensación de P_{em}	47
6.11	Comparativa PID con precompensación a diferentes tiempos de muestreo	48
7.1	Estructura general para el control mediante MPC	49

7.2	Prueba 1: Sintonización de los parámetros δ_i	52
7.3	Prueba 2: Sintonización de los parámetros α y λ	52
7.4	Prueba 3: Sintonización de los parámetros N_u y N_2 . Europe City Manual	53
7.5	Prueba 4: MPC propicia la descarga de la pila de combustible	54
7.6	Prueba 5: MPC propicia no utilizar la pila de combustible	54
7.7	Prueba 6: MPC encuentra compromiso pila-batería	55
7.8	Prueba 7: MPC encuentra compromiso pila-batería	55
7.9	Prueba 8: MPC encuentra compromiso pila-batería	56
7.10	Comparativa de uso de un PID frente a un MPC ante USA: FTP-75	56
7.11	Comparativa de uso de un PID frente a un MPC ante Europe: NEDC	57
8.1	Estudio de niveles de carga: Estados 0, 1 y 6	60
8.2	Prueba 2: Estudio de niveles de carga: Estados 4 y 5	61
8.3	Prueba 1: Detección de fuga de hidrógeno	62
8.4	Prueba 2: Detección comportamiento anómalo de la pila	62
8.5	Prueba 3: Detección comportamiento anómalo de la batería	63
8.6	Prueba 4: Detección comportamiento anómalo de la batería	63
8.7	Prueba 5: Detección comportamiento anómalo mediante <i>GPS</i>	64

Índice de Tablas

2.1	Tipos de vehículos con motor eléctrico	4
4.1	Parámetros de la batería de ión-litio	17
4.2	Constantes experimentales de la pila de combustible	21
4.3	Parámetros físicos de la pila de combustible	21
4.4	Parámetros del tanque de combustible	24
4.5	Parámetros de los motores	26
6.1	Referencias según el estado de las fuentes de energía	39
6.2	Parámetros de los controladores	40
7.1	Parámetros de la función de costes	51
8.1	Estados de funcionamiento	59

Índice de Códigos

A.1	Implementación de control PID en MatLab	67
B.1	Implementación de la rutina de detección de fallos en MatLab	69

Bibliografía

- [1] Eduardo F. Camacho ; Carlos Bordons Alba, *Model predictive control (2nd ed.)*, Springer London, 2007.
- [2] Miguel Navas Alcántara, *Diseño de controladores para vehículo eléctrico con cuatro motores en rueda*, Trabajo fin de grado, Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2017.
- [3] Pablo Marín Cortés, *Esquema de los sensores en el fox*, 2017.
- [4] Pablo Marin Cortés, *Estudio preliminar del diseño de una nueva unidad de control del motor para el vehículo fox*, Trabajo fin de grado, Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2017.
- [5] Parlamento Europeo, *Declaración por escrito sobre el establecimiento de una economía verde basada en el hidrógeno y una tercera revolución industrial en europa, mediante una asociación con las regiones, las ciudades, las pyme y las organizaciones de la sociedad civil interesadas*, 0016/2007, Febrero 2007.
- [6] Pedro Antonio Fernández Gómez, *Automatización de una microrred con doble banco de baterías*, Trabajo fin de master, Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2018.
- [7] Onder C.H. Guzzella L., *Introduction to modeling and control of internal combustion engine systems*, Springer Verlag, Berlin, 2004.
- [8] Ángel Luis Téllez Guzmán, *Modelado energético de vehículo eléctrico híbrido*, Trabajo fin de grado, Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2019.
- [9] Harry Handige, *Fuell cell es*, Wikipedia, Apr 2008.
- [10] Luis Velarde Isorna, *Gestión de energía en sistemas con fuentes renovables y almacenamiento de energía basado en hidrógeno mediante control predictivo*, Tesis doctoral, Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2013.
- [11] Manuel Gil Ortega Linares, *Diapositivas de la asignatura control por computador gierm*, Universidad de Sevilla, 2018.
- [12] Luis Llamas, *Esquema de sistema controlado por un pid*, 2019.
- [13] Francisco Martín Moreno, *Vehículos eléctricos. historia, estado actual y retos futuros*, European Scientific Journal (2016).
- [14] Fernando Juan Tadeo Rico, *Introducción al control predictivo*.
- [15] Jeremy Rifkin, *The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world*, Macmillan, 2011.
- [16] David Marcos Rodríguez, *Estrategias de control para vehículos híbridos con pilas de combustible*, Trabajo de máster, Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2010.
- [17] Melissa García Ruíz, *Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos*, Ph.D. thesis, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología, 2015.