

Proyecto Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Estrategias de control para gestión de potencia en
robots móviles

Autor: Álvaro Cano Rodríguez

Tutor: Miguel Ángel Ridaó Carlini



Proyecto Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

Estrategias de control para gestión de potencia en robots móviles

Autor:

Álvaro Cano Rodríguez

Tutor:

Miguel Ángel Ridaó Carlini

Dpto. de Ingeniería de sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Máster: Estrategias de control para gestión de potencia en robots móviles

Autor: Álvaro Cano Rodríguez

Tutor: Miguel Ángel Ridaó Carlini

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A todas las personas que quiero

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas aquellas personas que me han apoyado en todo este tiempo desde que comencé el grado.

Gracias a Elena, por demostrarme que todo se puede conseguir con trabajo y esfuerzo aunque estes lejos de tu país, y enfrentándote a situaciones nuevas todos los días, y por supuesto, por ser mucho mas que un ejemplo a seguir.

Gracias sobre todo a mis padres que me ayudaron con esto y me dieron esta oportunidad, y por supuesto por la educacion que he recibido de su parte, sin ellos nada de esto sería posible.

Agradecer también a los amigos que he hecho durante este tiempo y que serán para siempre.

Por último, agradecer a mi tutor la paciencia que ha tenido, el buen trato que me ha dado, y por haberme dedicado su tiempo y guiado en esta aventura.

Muchisimas gracias a todos.

Álvaro Cano Rodríguez

Sevilla, 2019

Resumen

En este trabajo se han llevado a cabo diferentes estrategias para la gestión de potencia de un robot con dos fuentes de potencia, una batería y una pila de combustible. Estas estrategias se han simulado en Simulink a partir de datos de varias misiones reales.

Las estrategias experimentadas han sido, estrategias pasivas en las que no existen convertidores, el control óptimo ECMS y un control predictivo con y sin restricciones. Finalmente, se han hecho diferentes pruebas con cada una de ellas y se han comparado tanto en consumo como cualitativamente el funcionamiento de todas.

El objetivo de todo esto es minimizar el consumo para una misión cualquiera teniendo en cuenta algunos requisitos técnicos principalmente de las fuentes de potencia.

Índice

Agradecimientos	ixx
Resumen	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xivv
Índice de Figuras	xvii
1 Introducción	1
2 Estrategias de control	5
2.1. <i>Estrategias de control pasivas</i>	5
2.1.1 Sistema inicialmente desacoplado	5
2.1.2 Sistema inicialmente acoplado	7
2.1.3 Sistema parcialmente acoplado	10
2.2. <i>Control ECMS</i>	11
2.3. <i>Control predictivo MPC</i>	16
2.3.1 Espacio de estados	16
2.3.2 Restricciones	19
2.3.3 Función de coste	19
3 Experimentos realizados	21
3.1. <i>Estrategias de control pasivas</i>	21
3.1.1. Inicialmente desacoplado	21
3.1.2. Inicialmente acoplado	23
3.1.3. Parcialmente acoplado	26
3.2. <i>Control ECMS</i>	30
3.3. <i>Control predictivo</i>	33
4 Conclusiones	50
Bibliografía	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características Hardware	2
Tabla 2. Características Pila de combustible	3
Tabla 3. Características batería	3
Tabla 4. Consumos i. desacoplado para todas las misiones	21
Tabla 5. Consumos i. acoplado para todas las misiones	23
Tabla 6. Consumos i. acoplado con histéresis para todas las misiones	23
Tabla 7. Consumos p. acoplado (70) para todas las misiones	26
Tabla 8. Consumos p. acoplado (40) para todas las misiones	26
Tabla 9. Consumos p. acoplado (15) para todas las misiones	27
Tabla 10. Resumen de consumos de todas las estrategias de control	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Summit XL	2
Figura 2. Diagrama de configuración i.desacoplado	6
Figura 3. Diagrama Simulink i. desacoplado	7
Figura 4. Diagrama de configuración i.acoplado	8
Figura 5. Diagrama Simulink i.acoplado	9
Figura 6. Diagrama de configuración p. acoplado	10
Figura 7. Diagrama Simulink p. acoplado	11
Figura 8. Modelo de Simulink para cálculos de los factores equivalentes constantes	14
Figura 9. Curvas que dan los factores equivalentes constantes	14
Figura 10. Evolución del Soc y Loh frente al tiempo en i. desacoplado para misión 1 x larga	22
Figura 11. Evolución del Pfc y Pbat frente al tiempo en i. desacoplado para misión 1 x larga	22
Figura 12. Evolución del Soc y Loh frente al tiempo en i. acoplado para misión 1 x larga	24
Figura 13. Evolución de Pfc y Pbat frente al tiempo en i. acoplado para misión 1 x larga	24
Figura 14. Evolución del Soc y Loh frente al tiempo, i. acoplado con histéresis para misión 1 x larga	25
Figura 15. Evolución de Pfc y Pbat frente al tiempo en i. acoplado con histéresis para misión 1 x larga	25
Figura 16. Evolución del Soc y Loh frente al tiempo en p. acoplado, lim 70, para misión 1 x larga	27
Figura 17. Evolución de Pfc y Pbat frente al tiempo en p. acoplado, lim 70, para misión 1 x larga	28
Figura 18. Evolución del Soc y Loh frente al tiempo en p. acoplado, lim 15, para misión 1 x larga	29
Figura 19. Evolución de Pfc y Pbat frente al tiempo en p. acoplado, lim 15, para misión 1 x larga	29
Figura 20. Evolución de Soc y Loh frente al tiempo en ECMS para misión 1 x larga	30
Figura 21. : Evolución de Pfc y Pbat frente al tiempo en ECMS para misión 1 x larga	31
Figura 22. Pfc cuando se eligen valores de S demasiado grandes	32
Figura 23. Soc cuando se eligen valores de S demasiado pequeños	32
Figura 24. Soc y Loh frente al tiempo para predictivo de mínimo consumo en misión 1 x larga	33
Figura 25. Pfc y Pbat frente al tiempo para predictivo de mínimo consumo en misión 1 x larga	34
Figura 26. Inc de Pbat y Pfc frente al tiempo para predictivo de mínimo consumo en misión 1 x larga	34
Figura 27. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con horizontes a 50 en misión 1 x larga	35
Figura 28. Pfc y Pbat frente al tiempo en predictivo con horizontes a 50 en misión 1 x larga	36
Figura 29. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con horizontes a 100 en misión 1 x larga	36
Figura 30. Pfc y Pbat frente al tiempo en predictivo con horizontes a 100 en misión 1 x larga	37

Figura 31. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con coste de generación $P_{fc}=0$ en misión 1 x larga	38
Figura 32. Pfc y Pbat frente al tiempo en predictivo, coste de generación $P_{fc}=0$ en misión 1 x larga	39
Figura 33. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo coste de generación $P_{bat}=0$ en misión 1 x larga	39
Figura 34. Pfc y Pbat frente al tiempo en predictivo, coste de generación $P_{bat}=0$ en misión 1 x larga	40
Figura 35. Inc de Pbat y Pfc frente al tiempo en misión 1 x larga, predictivo con peso de inc=10	41
Figura 36. Inc de Pbat y Pfc frente al tiempo en misión 1 x larga, predictivo con peso de inc=1000	41
Figura 37. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con restricción de salida de control horizontes =10, misión 1 x larga	42
Figura 38. Pfc y Pbat frente al tiempo en predictivo con restricción de salida de control horizontes =10, misión 1 x larga	43
Figura 39. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con restricción de salida de control horizontes =50, misión 1 x larga	43
Figura 40. Pbat y Pfc frente al tiempo en predictivo con restricción de salida de control horizontes =50, misión 1 x larga	44
Figura 41. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con restricción de carga de Soc, misión 1 x larga	45
Figura 42. Pfc y Pbat frente al tiempo en predictivo con restricción de carga de Soc, misión 1 x larga	45
Figura 43. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con restricción de inc de control, misión 1 x larga	46
Figura 44. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con todas las restricciones, misión 1 x larga	46
Figura 45. Soc y Loh frente al tiempo en predictivo con todas las restricciones, misión 1 x larga	47
Figura 46. Pfc y Pbat frente al tiempo en predictivo con todas las restricciones, misión 1 x larga	47
Figura 47. Incrementos Pbat y Pfc frente al tiempo en predictivo, todas las restricciones, misión 1 x larga	48

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto “Improving efficiency and operational range in low-power unmanned vehicles through the use of hybrid fuel-cell power systems” (IUFCV) tiene como objetivo la evaluación de la viabilidad técnica de sistemas híbridos de potencia, basados en baterías y pilas de combustible, en aplicaciones reales de vehículos no tripulados y plataformas robóticas, comparando las prestaciones de estos sistemas de potencia con los utilizados actualmente, basados exclusivamente en baterías, en términos de disponibilidad de energía y potencia, duración de las misiones y rango operativo, peso y volumen, fiabilidad y vida útil, etc. Para ello se diseñarán e integrarán sistemas de estas características en tres plataformas existentes: un AUV (Autonomous Underwater Vehicle) y dos UGVs (Unmanned Ground Vehicles).

En este proyecto participan el grupo de robótica del organismo de I+D australiano CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization), el Área de Energía del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), a través de su Laboratorio de Energía en El Arenosillo (Huelva) y el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática de la Universidad de Sevilla. INTA es responsable del diseño, desarrollo e integración del sistema de potencia basado en pila de combustible, incluyendo el almacenamiento y suministro de reactivos a estos sistemas, así como de su integración en uno de los vehículos terrestres no tripulados y su evaluación. La Universidad de Sevilla participará en el diseño e implementará el sistema de monitorización, control y gestión de energía a bordo de las plataformas, junto con INTA; en tanto que CSIRO es responsable del desarrollo de dos plataformas robóticas, una para un vehículo terrestre y otra para un vehículo submarino, de la integración final de todos los sistemas, incluyendo nuevos sensores y cargas útiles, y de la evaluación de estos vehículos no tripulados en condiciones reales de operación, de acuerdo a misiones diseñadas conjuntamente con diversos usuarios finales interesados en la propuesta.

Este proyecto está cofinanciado por el programa Science for Peace and Security (SPS) de la OTAN, enfocado a fomentar la cooperación científica y la investigación entre países pertenecientes a la Alianza y terceros países.

Los robots autónomos son máquinas inteligentes capaces de realizar tareas en su entorno, sin un control explícito de los humanos. Dichos robots tienen que ser capaces de desenvolverse en entornos completamente desconocidos. Para ello deben coordinar todos sus sensores de forma que puedan orientarse, moverse (si tienen capacidad para ello) y poder interactuar con su entorno para realizar la tarea que tienen asignada.” (2002-09 Unidad de Desarrollo Tecnológico en Inteligencia Artificial, IIIA-CSIC).

Para que un robot se considere autónomo debe cumplir:

- Captar información del medio.
- Realizar su tarea sin ayuda humana.
- Capacidad de moverse de forma total o parcial sin ayuda de un humano.
- No dañar a personas o seres vivos a no ser que su diseño lo exija expresamente.
- Posibilidad de aprendizaje.

En este trabajo de fin de master en concreto se tratarán diferentes estrategias de control de potencia para un modelo Summit XL, en las cuales, se intentará disminuir lo máximo posible los consumos para una misión dada. El sistema será híbrido basado en pila de combustible con una potencia nominal de 200 W, equipado además, con unas baterías que hacen que el sistema sea híbrido. La plataforma móvil Summit XL es un robot móvil autónomo diseñado y distribuido por la compañía Robotnik. Es el dispositivo elegido por el INTA y la US para la instalación de la pila de combustible de hidrógeno y sobre el que se basará este trabajo. El robot tiene un peso de unos 45 kilos pudiendo cargar con unos 20 mas a una velocidad máxima de 3 m/. Goza actualmente de una autonomía de 5 horas y tiene un rango de temperaturas de funcionamiento de entre 0 y 50 grados.

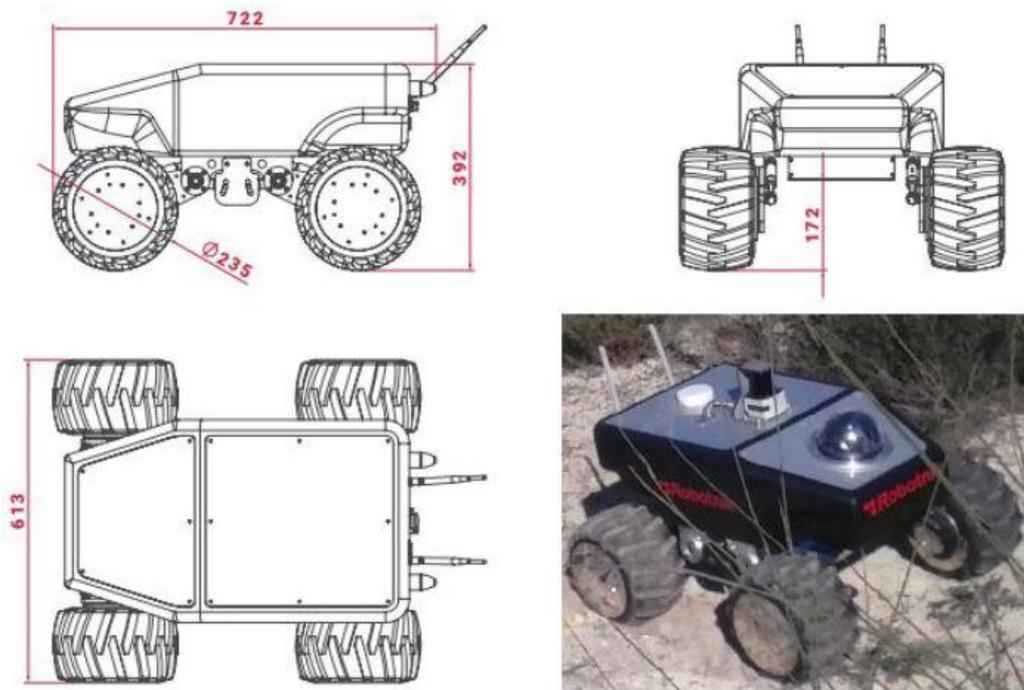


Figura 1: Summit XL

Las características de hardware se exponen en la siguiente tabla:

Motores	brushless 4x250W 8 polos
Driver motor	DZCANTE 020L080 y placa MC1DZC
Tamaño	722x613x392 mm
Peso	45 Kg
Velocidad	3 m/s
Cámara	Axis Camara (AXIS p5514 PTZ Dome Network Camera)
Sensor	Stick laser range finder, amplitud 270°, rango 10m
Placa base	Mitac PD10B1 MT con Quad core Intel Bay Trail J1900
Autopiloto	Pixhawk FPU PX4 (giroscopio y acelerómetro)
Controlador	Ps3 Bluetooth remote controller
Batería	8x3.2V LiFePO₄ Kokam batteries
Router	Router Belkin N300 Wi-Fi N

Tabla 1: Características Hardware

Las características de la pila de combustible y baterías con las que se van a trabajar y que lleva el Summit se exponen a continuación:

• Marca:	BCH
• Modelo:	TH-200
• Potencia nominal:	200 W a 24 V
• Peso:	0,66 kg (pila con ventilador)

Tabla 2: Características pila de combustible

• Marca:	Kokam
• Modelo:	Ultra High Energy NMC SLPB080085270 cell battery
• Configuración del pack:	6 celdas en serie
• Capacidad (Ah):	27
• Tensión nominal (6S) (V):	21,69
• Peso del pack (6S) (kg):	2,37
• Energía específica (Wh/kg):	247,10

Tabla 3: Características batería

El objetivo fundamental del trabajo será la implementación y comparación de diferentes estrategias de control de potencias, buscando siempre reducir el consumo. Todo esto se realizará en Matlab Simulink, donde se modelarán los diferentes elementos necesarios, algunos a partir de datos proporcionados por el fabricante y otro más teóricos, además de las estrategias de control. Las diferentes estrategias diseñadas e implementadas han sido, tres estrategias pasivas, el control ECMS para dos fuentes de potencia y el control predictivo.

Con todo esto, se extraerán tanto conclusiones cuantitativas como sobre todo cualitativas de los comportamientos del sistema en cada tipo de control, como por ejemplo, como se consigue una mayor eficiencia en consumo, o si realmente esta eficiencia es buena teniendo en cuenta los problemas técnicos que pueda provocar, provocando la necesidad de añadir restricciones

2 ESTRATEGIAS DE CONTROL

En nuestra vida diaria las personas realizan estrategias para resolver los problemas que se plantean y para realizar diversas labores. Así se puede determinar que siguiendo una estructura y unos procedimientos en función de los datos iniciales mediante una distribución se puede llegar a resolver un problema. Este concepto es lo que se conoce como estrategia, y en el mundo de los sistemas de control automático también se puede aplicar esta idea, solo que se denomina estrategia de control. La estrategia de control determina la estructura o pasos que hay que seguir, es decir que sigue la información para resolver el problema que se nos plantea.

En todos los tipos de vehículos híbridos, como en todos los sistemas de control automático existe un algoritmo de control que supervisa y determina la distribución de la potencia para satisfacer la demandada existente de la forma más beneficiosa en cada caso. Normalmente esta forma más beneficiosa es la de optimizar la reducción de la energía total consumida, con algunas restricciones debidas por ejemplo a restricciones técnicas como no descargar la batería o intentar que no haya grandes incrementos en las variables de control.

Las estrategias de control se clasifican según el conocimiento o desconocimiento de futuras situaciones, los controladores no causales requieren del conocimiento total de las condiciones futuras. Este conocimiento solo es posible cuando el vehículo sigue algún perfil repetitivo como ir y venir al trabajo, o por ejemplo para el transporte público. En todos los demás casos las condiciones futuras serán completamente desconocidas lo que provocará la necesidad de un controlador causal obligatoriamente.

Otra forma de clasificar los controladores es si son heurísticos, óptimos o subóptimos. Los heurísticos son el sistema de control que llevan la mayoría de los híbridos que se han construido a gran escala, los óptimos son los controladores no causales, aunque cada vez son menores las cantidades de información requeridas, y los subóptimos son controladores causales.

A continuación, se explican las estrategias de control realizadas en este trabajo. Estrategias pasivas, control ECMS y control predictivo. La diferencia principal de las estrategias pasivas con las activas es la aparición de un convertidor de potencia, teniendo en cuenta que para dos fuentes de potencia como es este caso, se usaría un convertidor para una de ellas, dejando libre la otra para el balance de potencias. Todas ellas serán explicadas y comparadas en los siguientes puntos.

2.1. Estrategias de control pasivas

Las estrategias de control pasivo serán las gestiones de potencia que se harán para satisfacer la demanda cuando no tenemos convertidores entre las diferentes fuentes y la carga. Para este caso, el sistema híbrido pasivo consta de baterías y pilas de combustible.

Se han experimentado tres estrategias diferentes, sistema inicialmente desacoplado, sistema inicialmente acoplado y sistema parcialmente acoplado.

2.1.1 Sistema inicialmente desacoplado

Cuando el sistema funciona de esta forma el peso principal de la generación de energía recae sobre la pila de combustible, mientras que la batería se usará fundamentalmente para suministrar energía cuando se demande una cantidad superior a la potencia que puede alcanzar la pila para el voltaje de operación. Esto quiere decir que la autonomía vendrá dada sobre todo por el sistema de almacenamiento de hidrógeno del que se disponga. El diagrama para esta configuración es:

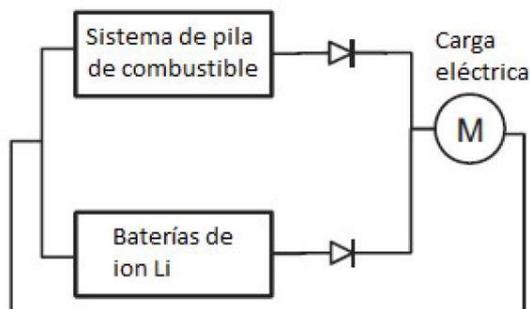


Figura 2: Diagrama de configuración i.desacoplado

El sistema funcionaria de la siguiente forma:

- Cuando la carga demanda una cantidad de energía baja, la pila de combustible proporcionará toda la energía necesaria para satisfacer la demanda, dejando fuera a las baterías. Por lo que inicialmente, existe un total desacople entre la pila de combustible y las baterías, y por tanto, la tensión de la pila de combustible en estas condiciones es mayor que la de las baterías ($V_{fc} > V_{bat}$). Para las intensidades, $I_{load} = I_{fc}$, e $I_{bat} = 0$.
- Cuando va aumentando la potencia demandada por la carga, la tensión de la pila de combustible va disminuyendo poco a poco, hasta llegar a un punto en el que las tensiones de pila y batería se igualan ($V_{fc} = V_{bat}$). Desde entonces, y siempre que la carga demande una potencia superior o igual a la que daría la pila de combustible para esa tensión, las baterías aportan la potencia diferencial que exista entre la demandada y la suministrada por la pila, así, $I_{load} = I_{bat} + I_{fc}$, siendo en todo momento $V_{fc} = V_{bat}$. En este estado de funcionamiento la tensión es fijada por las baterías y la pila suministra la intensidad para este punto de operación. Por tanto, pila y baterías están acopladas, $P_{load} = P_{fc} + P_{bat}$.
- Si nuevamente la potencia demandada disminuya por debajo de la potencia que la pila de combustible puede suministrar para ese punto de operación, la batería se desacopla y deja de suministrar energía ($I_{bat} = 0$, $I_{load} = I_{fc}$, y $V_{fc} > V_{bat}$), como en el punto a.

Se puede observar en esta configuración que pila de combustible y baterías pueden dimensionarse de forma independiente, ya que la batería actúa como respaldo de la pila cuando no es suficiente. Si hay que tener en cuenta como requisito que la tensión de la pila de combustible en el rango de potencia de diseño se ajuste a la tensión típica de operación de las baterías.

Esta estrategia se ha implementado en Simulink mediante un bloque que actúa de control de la distribución de potencias. Este bloque tiene como entrada, la potencia que se demanda, y la tensión anterior de la pila, y tiene como salidas las potencias que ceden pila y batería, y la tensión y la intensidad que tiene la pila de combustible en ese momento. Dentro de este bloque a su vez, tenemos dos bloques más que representan cada uno de los dos modos de funcionamiento que se pueden dar.

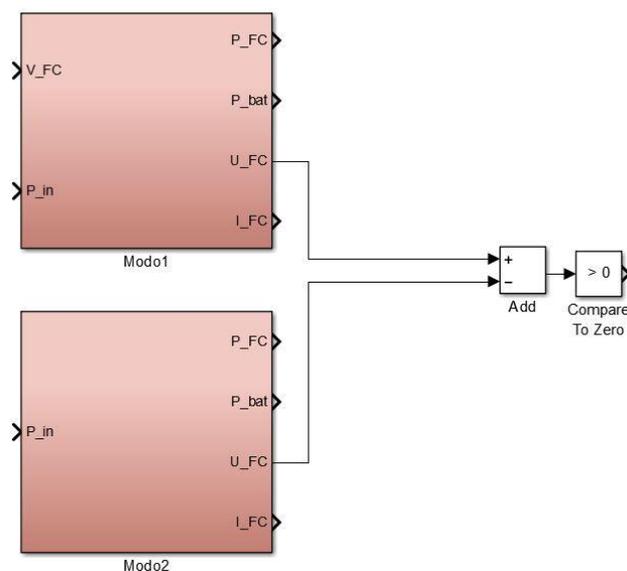


Figura 3: Diagrama Simulink i. desacoplado

El modo 1, sería el caso en el que pila de combustible y batería están acopladas, es decir, se toma la tensión de la batería y se impone que es la que debe tener la pila de combustible, con la curva de la pila para esta tensión, se obtiene que intensidad y por tanto que potencia cede la pila, con una simple resta de potencia demandada y la que cede la pila se calcula que potencia tiene que dar la batería. Como se puede ver en la imagen las entradas para este modo de funcionamiento son tensión que tendrá la pila, es decir la tensión de las baterías, y la potencia demandada.

El modo 2 sería el caso en el que la pila de combustible y baterías están desacopladas y, por tanto, toda la potencia demandada la cede la pila de combustible, es decir $P_{bat}=0$. En este caso se toma la tensión anterior de la pila y dividiendo la potencia entre esta tensión se calcula la intensidad, con esta intensidad y la curva de la pila obtenemos que potencia tiene que ceder la pila.

Estos dos modos se calculan en cada tiempo de muestreo, ahora se ha de decidir cuál de los dos es el correcto según los datos que se tengan. Para ello, se comparan las tensiones de la pila para cada uno de los modos, como se puede observar en la imagen, el modo que tenga una tensión de pila mayor, será el modo elegido para ese instante. Además, dentro del modo 1, se comprueba que la potencia que da la pila siempre sea menor que la demandada ya que, si fuera mayor, se cedería potencia a la batería, cosa que no es posible en esta estrategia de control, así que en caso de que la pila ceda más potencia de la demandada siempre se elegirá como modo de funcionamiento el modo 2.

2.1.2 Sistema inicialmente acoplado

Al contrario que en la anterior, para esta configuración, el mayor peso para el suministro de la energía recae sobre las baterías, operando la pila de combustible como un sistema range extender, que hace que la pila suministre energía cuando la carga y la tensión de las baterías alcanzan un determinado valor. A partir de ese instante, toda la energía generada por la pila de combustible se inyecta en el bus común de continua que conecta el sistema de potencia con la carga, así, hay parte de la energía que va a la carga y parte que va a las baterías, siempre y cuando se posible por la cantidad de energía que se esté demandando. El diagrama es:

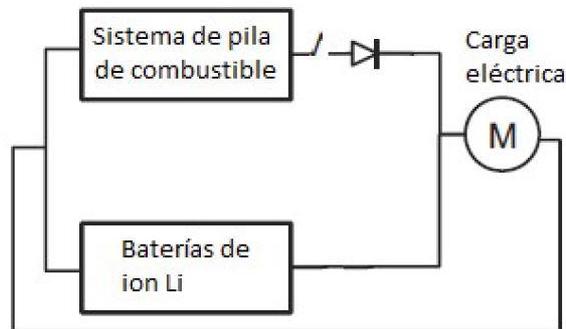


Figura 4: Diagrama de configuración i.acoplado

El funcionamiento del sistema sería el siguiente:

Inicialmente toda la energía empieza siendo suministrada exclusivamente por las baterías suponiendo que el estado de carga es suficientemente elevado, por ejemplo, el 100%. A medida que se va suministrando energía a la carga, el estado de carga de las baterías va disminuyendo hasta alcanzar un valor mínimo que se tomará como valor umbral, junto con un valor de tensión de las baterías, a partir del cual entrará en funcionamiento la pila de combustible. En todo este periodo $I_{lad}=I_{bat}$, $I_{fc}=0$, $V_{fc}=0$ y $P_{load}=P_{bat}$. En el momento que entra en funcionamiento la pila, su tensión cae inmediatamente desde la correspondiente a circuito abierto a la tensión de baterías, y a partir de ese momento $V_{fc}=V_{bat}$, y dependiendo del valor de P_{load} puede suceder, si $P_{load} > P_{fc}$, $I_{load}=I_{fc} + I_{bat}$, momento en el cual las baterías se siguen descargando, o, si $P_{load} < P_{fc}$, $I_{bat}=I_{load}-I_{fc}$, de forma que la energía se suministra con la pila y además el resto se usa para cargar las baterías. Con esta forma de funcionamiento, si P_{load} cambia rápidamente en el tiempo, P_{fc} e I_{fc} se mantendrán más o menos constantes, debido a que dependen en todo momento de $V_{fc}=V_{bat}$, pero I_{load} e I_{bat} variarán en la medida que cambie P_{load} , pudiendo darse picos rápidos que alternen cargas y descargas de las baterías. Al darse estas condiciones hay que asegurarse que la batería tiene capacidad suficiente para absorber esa intensidad. Con esta carga de baterías progresiva, se puede llegar un momento en el que se alcance un valor de SOC superior, y de tensión de las baterías, que se fija como valor umbral superior para la desconexión de la pila de combustible, parándose, hasta que el SOC y la tensión de las baterías alcancen el valor mínimo.

En esta configuración el perfil de potencias para una misión determinada condiciona en gran medida el diseño de la pila de combustible y su potencia nominal en el rango de tensión de las baterías. Este diseño fija los valores máximos de intensidad que pueden ir tanto a las baterías como a la carga, y hay que tenerlos en cuenta a la hora de seleccionar la capacidad de las baterías. Esto es una diferencia importante respecto al caso de inicialmente desacoplados, ya que la carga de las baterías supone una necesidad de monitorización de la temperatura de las mismas.

Esta configuración se ha implementado en Simulink mediante un bloque que representa el control de la distribución de las potencias. Este bloque tiene como entradas la potencia demandada, la tensión de baterías realimentada, y el estado de carga de baterías realimentado. A su vez este bloque tiene en su interior otros dos bloques que son los dos modos de funcionamiento, cuando funciona batería únicamente (modo 1) y cuando funcionan batería y pila de combustible (modo 2).

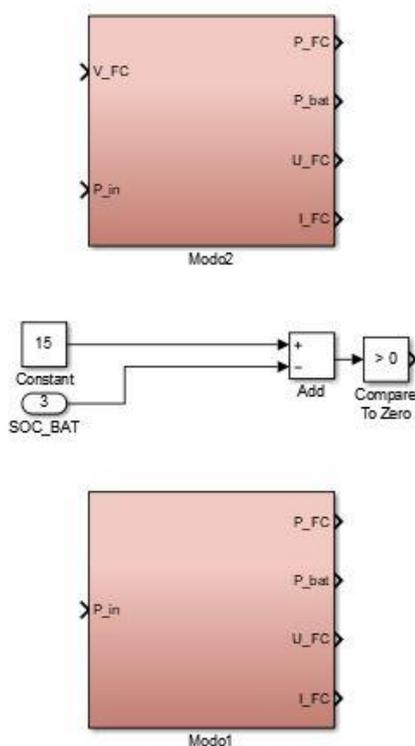


Figura 5: Diagrama Simulink i.acoplado

Como se puede ver, la entrada para el modo 1 de funcionamiento es exclusivamente la potencia demandada, y tiene como salidas, la potencia que se demandará la pila, la potencia que se demandará a la batería, la tensión de la pila y la intensidad de la pila. En este modo de funcionamiento, toda la potencia se demanda directamente sobre la batería, por lo que la salida del resto de variables serán cero.

El modo 2 de funcionamiento tiene como entradas la tensión realimentada de la pila de combustible y la potencia demandada, y como salidas tiene las potencias que se demandarán a pila y batería, la tensión de la pila y la intensidad de la misma. Igualmente que para el inicialmente desacoplado, en este modo se tiene la tensión de la batería que será la misma que la de pila de combustible, con esto calculamos la intensidad de la pila, y con tensión e intensidad se calcula la potencia que cederá la pila de combustible para ese punto de funcionamiento, el resto de potencia, es decir la diferencia entre la potencia que cederá pila de combustible y la demandada será proporcionada por la batería. En caso de que la pila ceda más potencia de la que se demanda, la batería puede ser cargada, a diferencia de lo que se tenía en la configuración inicialmente desacoplado.

Ambos bloques se ejecutan en cada tiempo de muestreo, y por último faltaría decidir cual es el correcto a elegir en cada instante. En este caso la variable de decisión es la carga del SOC que se tenga en la batería, tal y como se puede apreciar en la imagen, si el estado de carga está por debajo de un determinado valor (15% por ejemplo, como en la imagen), se elegirá el modo de funcionamiento 2 que permite la carga de la batería, y en caso de que la batería esté por encima de ese valor, se elegirá el modo de funcionamiento 1 donde exclusivamente funciona la batería.

Moverse de un modo a otro con exclusivamente con un valor umbral provoca constantes cambios del modo 1 al modo 2 y viceversa. Así que para solucionar este problema se ha añadido un valor umbral tanto inferior como superior, esto funcionaría como una histéresis, así cuando el SOC de la batería cae por debajo de un valor inferior, se trabaja con el modo de funcionamiento 2, pero en este caso ya no se volverá al modo 1 en cuanto se supere este mismo valor, sino que se seguirá en este modo, y por tanto se seguirá cargando la batería hasta llegar a un determinado valor marcado pero superior.

2.1.3 Sistema parcialmente acoplado

Esta configuración es un caso que se encuentra entre los dos anteriores. La principal diferencia consiste en incluir la opción de carga de baterías, pero regulando la intensidad de carga destinada a las baterías (I_{lim}). Si este valor es cero estamos en el caso desacoplado, y si tiende a infinito estamos en el caso de acoplado. El diagrama es el siguiente:

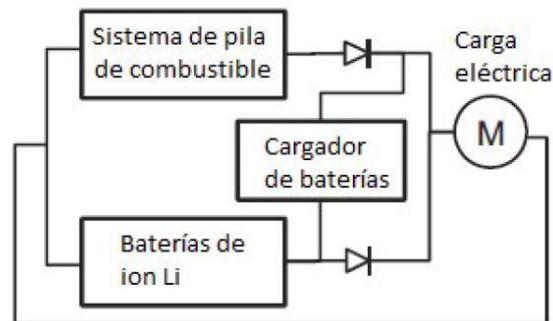


Figura 6: Diagrama de configuración p. acoplado

El modo de operación se explica a continuación:

- Se comienza con la pila de combustible desacoplada de las baterías y suministrando la energía cuando la potencia requerida por la carga es baja, $P_{load} = P_{fc}$ y $V_{fc} > V_{bat}$. A medida que la potencia demandada incrementa, la tensión de la pila de combustible disminuye hasta alcanzar un valor de la tensión igual al de las baterías, a partir de entonces ambos elementos se acoplan, $V_{fc} = V_{bat}$.
- La pila de combustible suministra la potencia correspondiente al punto de operación en el que se encuentra para la tensión de baterías. En este momento tenemos los siguientes casos:
 - Si $P_{load} > P_{fc}$, $P_{load} = P_{fc} + P_{bat}$, con $V_{fc} = V_{bat}$ e $I_{load} = I_{fc} + I_{bat}$
 - $P_{fc} = P_{load}$ se dan dos casos:
 - $P_{fc} = P_{load} + \eta * V_{fc} * I_{bat}$, con $I_{bat} < I_{lim}$ y η rendimiento de la carga
 - $P_{fc} = P_{load}$, si $I_{bat} > I_{lim}$. No hay posibilidad de carga de baterías al superarse el límite impuesto, y el sistema desacopla entonces la pila de combustible y las baterías, volviéndose al modo de operación 'a' hasta que la potencia de la carga se incremente nuevamente.

Se puede ver para esta configuración que la pila de combustible siempre está en operación, suministrando energía a la carga total o parcialmente. Por lo que tiene un papel fundamental en esta configuración, al igual que en el caso 1, aunque la inclusión de un regulador hace que no se tengan los problemas que se tenían anteriormente, por ejemplo, se minimiza la necesidad de monitorizar la temperatura, ya que la intensidad que le llega a las baterías está regulada.

Nuevamente, esta configuración se ha implementado en Simulink a través de un bloque que realiza las funciones de control de potencias en cada instante. Las entradas para este bloque son tensión realimentada de las baterías, potencia demandada y estado de carga de las baterías y las salidas son potencia que se demandará a la pila, potencia que se demandará a la batería, tensión de la pila, e intensidad de la pila.

Dentro de este bloque tenemos dos bloques que representan los dos modos de funcionamiento que tenemos en esta configuración, modo 1, donde pila y batería proporcionan potencia al sistema, y modo 2, donde toda la potencia recae sobre la pila.

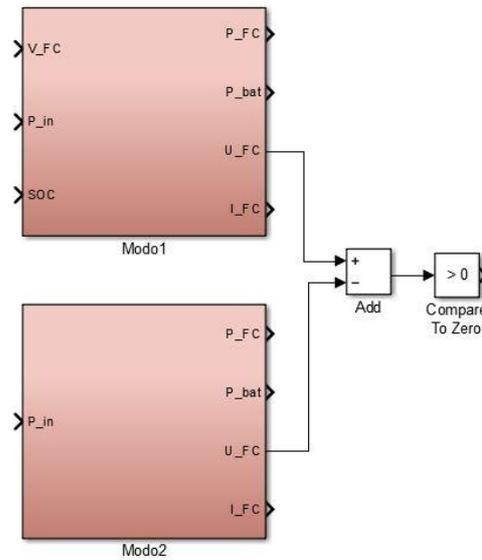


Figura 7: Diagrama Simulink p. acoplado

El modo 1 tiene como entradas, tensión de la pila, que será la realimentada de las baterías, potencia demandada y estado de carga de las baterías, y el modo 2 tiene como entrada la potencia demandada. Para ambos las salidas son, potencia que se demandará a la pila de combustible y a las baterías, tensión de la pila e intensidad de la pila.

Dentro del bloque de funcionamiento para el modo 2, realimentando la tensión de la pila de combustible y con la potencia que se demanda, se obtiene la intensidad necesaria, nuevamente con la curva de la pila calculamos la tensión y con esto se calcula la potencia que dará la pila para satisfacer la demanda, como ya se explicó, en este modo de funcionamiento la potencia que dará la batería será cero.

El modo de funcionamiento 1, funciona como para el caso parcialmente desacoplado, teniendo la tensión de las baterías, se impone que será de la pila de combustible, con esto se calcula la intensidad de la pila y con tensión e intensidad se obtiene la potencia que dará la pila para este modo de funcionamiento. Restando la demandada con la que cede la pila se calculará la potencia que se tiene que demandar a la batería.

En este caso, la variable de decisión de qué modo de funcionamiento es necesario elegir en cada instante será nuevamente la diferencia de las tensiones de pila de combustible de ambos modos, pero con algunas adicciones nuevas respecto al inicialmente desacoplado, en caso de que las baterías estén por debajo de un nivel de SOC, se permitirá la carga de las mismas, obligando a funcionar en el modo 1, pero como diferencia del modo parcialmente acoplado, esta carga se hará con unas limitaciones de intensidad. De ahí que esta configuración sea algo intermedio entre las dos primeras configuraciones expuestas anteriormente.

2.2. Control ECMS

El control ECMS es una estrategia para la distribución de flujos de potencia basada en el concepto de consumo de combustible equivalente.

Para este caso tenemos dos fuentes de potencia, tanto la pila de combustible como la batería contribuyen para abastecer la potencia que se está demandando, por lo que el flujo de potencia viene dado por:

$$P_{DC}(t) = P_{FC}(t) + P_{bat}(t)$$

Donde P_{bat} es la potencia que suministran las baterías y P_{FC} es la potencia que suministra la pila de combustible. Definiendo los flujos positivos cuando provienen de la batería o la pila, y como negativos cuando entran, es decir se considera negativo una carga de la batería.

Como variable de control se tendrá el factor de distribución de la potencia u , que viene definido por $u(t) = P_{bat}(t) / P_{DC}(t)$. Es decir, u es un valor en tanto por uno, de cuanta cantidad le corresponde de la potencia global a la batería. Si $u=1$, quiere decir que toda la potencia está siendo suministrada por la batería en caso de ser positiva, o que toda la potencia va hacia la batería en caso de ser negativa, y si $u=0$, quiere decir que toda la potencia está siendo suministrada por la pila de combustible.

Lo que se quiere hacer realmente con este control, es optimizar el consumo de hidrogeno en una misión. Es decir, se quiere minimizar la potencia que nos da el hidrogeno en un tiempo determinado, y en términos discretos, es el sumatorio de las potencias en cada instante por el incremento de tiempo entre ellas.

Este tipo de minimización crea el problema de minimización global, ya que para realizarlo el ciclo de conducción o la misión debe ser conocida a priori, por lo que no es un método que no se puede implementar en tiempo real.

Este problema que aparece se resuelve utilizando el control ECMS, en él, se propone sustituir el mínimo global por un mínimo local, reduciéndose el problema a minimizar el consumo de combustible equivalente en cada instante de muestreo. Lo que en términos matemáticos sería, minimizar la siguiente función de coste en cada instante de tiempo:

$$\min J(k) = P_{H_2}(k) + s(k) * P_e(k)$$

Ecuación que como se puede apreciar es en términos discretos. Las cantidades $P_e(k)$ y $P_{H_2}(k)$ son el flujo de potencia que suministra o que carga la energía reversible almacenada y la potencia que suministra la pila de combustible en el intervalo de tiempo Δt . El factor $s(t)$, se denomina factor equivalente, y es el factor más importante a calcular dentro de esta estrategia de control, ya que en él se basa todo el algoritmo. Se usa para realizar la conversión del flujo de potencia eléctrica en un flujo de potencia química, teniendo en cuenta los rendimientos de cada uno de los elementos.

Como ya se ha comentado, calcular este factor es la tarea más importante, ya que influye directamente en el comportamiento del sistema, y en la distribución de las potencias. En caso de tomar un valor demasiado grande, se estará penalizando tomar energía de la fuente o fuentes de almacenamiento reversibles, y por tanto el consumo de hidrogeno en este caso se verá penalizado. En caso contrario de elegir un valor muy pequeño, se favorece el tomar la energía de los elementos de almacenamiento reversibles y por tanto podrían llegar a vaciarse. El método que se seguirá para calcular este valor será utilizar lo que se llaman, factores equivalentes constantes, s_{dis} y s_{chg} . El objetivo de los mismos es, evaluar el combustible equivalente de la energía reversible positiva y negativa usada al final del ciclo de conducción o de una misión cualquiera. Con estos dos parámetros, junto con el cálculo de una probabilidad calcularemos el factor equivalente $s(t)$.

El siguiente paso es ahora calcular los dos factores equivalentes constantes, para ello hay que ejecutar la misión que se desee con distintos valores para la variable de control u , para realizar esto se propone aumentar el rango de capacidad de los sistemas de almacenamiento si no son suficientemente grandes. Para cada una de las simulaciones de la misión hay que guardar el valor de energía de combustible usada, que en este caso es la energía de hidrogeno, y la energía reversible. Estos dos valores al final del ciclo, representan las cantidades acumuladas de $E_{H_2}(t)$ y $E_e(t)$.

Una vez se han obtenido los distintos valores, se representan todos unos frente a otros, obteniendo una gráfica que nos dará dos rectas diferenciadas con dos valores de sus pendientes distintos. Cada una de estas pendientes, nos da el valor de los factores equivalentes constantes. Así, s_{chg} se refiere a la cantidad de energía química en julios que se necesita para almacenar un julio de energía eléctrica, y s_{dis} se refiere a la cantidad de energía química en julios que se ahorra cuando un julio de energía eléctrica es gastada.

Con la gráfica obtenida para el cálculo de los factores equivalentes constantes, se explica el concepto de energía de combustible equivalente, que no es más que obtener para una cantidad de energía eléctrica su equivalente en energía química:

$$E_e^{eq} = S_{dis} + E_{fe} \quad \text{si } E_{fe} > 0$$

$$E_e^{eq} = S_{chg} + E_{fe} \quad \text{si } E_{fe} < 0$$

Como se puede apreciar no se tiene en cuenta el frenado regenerativo y por tanto tampoco la cantidad de energía que de él se obtiene. Esto no es necesario ya que al ser una cantidad fija en un ciclo no afectaría al cálculo de los factores equivalentes constantes, simplemente desplazaría la gráfica de los mismos de forma horizontal, es decir, que los valores no se verían afectados.

Es importante aclarar, que los factores son característicos de unas condiciones de conducción y, por tanto, existirán tantos como misiones se quieran realizar.

Una vez se tienen los factores equivalentes constantes, se usarán para calcular $s(t)$, y con éste convertir la cantidad de $E_e(t)$ en energía de combustible equivalente. Como se ha explicado anteriormente, el uso de s_{dis} y s_{chg} dependen del signo de E_{fe} , cuyo valor no sabemos a priori, debido a que es un control en tiempo real y no sabemos los valores futuros de $E_e(t)$. Para solucionar este problema, se introducirá una probabilidad estimada de que $E_e(t)$ será positivo:

$$S(t) = S_{dis} * P(t) + S_{chg} * (1 - P(t))$$

Si $p(t) = 1$ significará que $s(t) = s_{dis}$ y si $p(t) = 0$ significará que $s(t) = s_{chg}$. El problema que tenemos ahora es calcular el valor de esta probabilidad. Para ello se define un tiempo horizonte t_h . Se realizará un balance de energía para ese tiempo horizonte. En este balance se tendrá en cuenta la cantidad de energía reversible, la energía media del ciclo y la energía que es capaz de dar la pila si funcionara a pleno rendimiento durante todo ese tiempo horizonte, quedando:

$$P(t) = \frac{E_e(t) + E_{DC}^h}{E_{FC}^h}$$

Para una pila la potencia máxima que es capaz de suministrar es conocida (P_{FC}^{max}). La potencia media demandada P_{DC}^{avg} se puede calcular fácilmente simulando el ciclo que se pretenda realizar. Teniendo estos valores de potencias, la energía se calculará, $E_{DC}^h = t_h * P_{DC}^{avg}$ y $E_{FC}^h = t_h * P_{FC}^{max}$. Realizando estos cambios, la ecuación anterior puede ser reescrita como sigue:

$$P(t) = \frac{E_e(t) + E_{DC}^h}{t_h * P_{FC}^{max}} + \frac{P_{DC}^{avg}}{P_{FC}^{max}}$$

Donde la variable $E_e(t)$ proporciona una retroalimentación del estado de carga de la batería, es la integral de tiempo de la potencia de la batería y con ello se describe la desviación del estado de carga desde el valor inicial.

La elección del tiempo horizonte dependerá del tipo de control que se pretenda tener sobre el estado de carga de la batería y de la capacidad de la misma. Este tiempo podrá ser más largo, cuanto mayor sean las desviaciones permitidas respecto al estado de carga que se quiera mantener y cuanto mayor tiempo se tenga para corregir esas desviaciones.

Para la implementación de este control en Simulink, se ha utilizado un script de Matlab que resuelve todo este problema en cada tiempo de muestreo.

Este script tendrá como entradas: la potencia demandada, la s de carga y la s de descarga, la velocidad actual del sistema, la masa, la velocidad anterior realimentada, el tiempo de simulación, el E_e acumulado, y la tensión anterior de la pila de combustible. Por otro lado, las salidas serán: La potencia que se demandará a la batería, la potencia que se demandará a la pila, la velocidad actual para realimentarla y el E_e acumulado.

En primer lugar, hay que calcular, de manera previa a la simulación de los diferentes escenarios, algunos datos

que se necesitan para poder ejecutar este control. Entre ellos se tienen, la potencia máxima que es capaz de dar la pila de combustible, dato que se calcula a partir de las curvas dadas por el fabricante y posteriormente se ha de calcular la potencia media de la misión que se quiera realizar.

Este cálculo de la potencia media, lleva a otro problema u otro parámetro que se debe de elegir, que es el tiempo horizonte al que vamos a referir esa potencia media. Como se quiere tener un control sobre la variación del estado de carga de las baterías, el tiempo horizonte no será en ningún caso todo el ciclo, en este caso para las misiones más largas se ha elegido un tiempo horizonte de 1321 segundos. Tras esta elección hay que calcular la potencia media para cada rango dentro de este horizonte.

Como se ha comentado anteriormente, los últimos datos a calcular antes de comenzar las simulaciones son la S de carga y la S de descarga. Para ello, se creará un modelo global del sistema en el que la distribución de las potencias para la pila de combustible y para las baterías será un parámetro u que variará entre menos uno y uno, siendo un porcentaje en tanto por uno de la cantidad de potencia que se demandará a las baterías. Este método nos proporcionará finalmente un valor de energía total de la pila E^f y un valor de energía total de la batería E_c^f para cada uno de los valores de u . El modelo diseñado para este calculo es el siguiente:

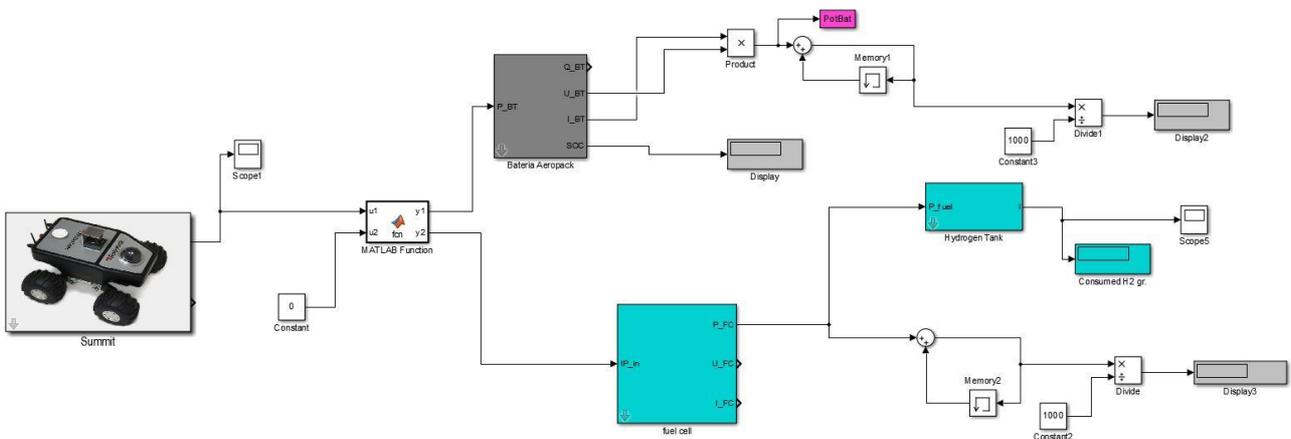


Figura 8: Modelo de Simulink para cálculos de los factores equivalentes constantes

Una vez se simule este modelo para los distintos valores de u , representando los valores de energía de la pila de combustible, frente a los valores de energía de las baterías se obtiene la siguiente gráfica:

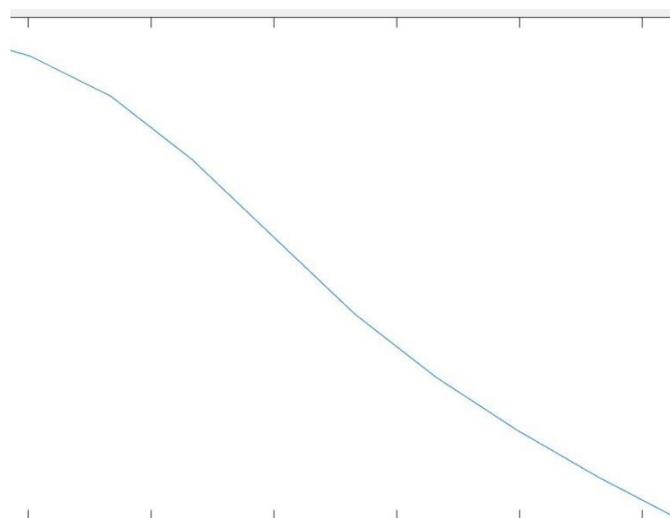


Figura 9: Curvas que dan los factores equivalentes constantes

Se puede ver en la figura, que existen dos rectas diferenciadas que se cortan aproximadamente en la mitad de la imagen. Las pendientes de estas dos rectas nos darán los valores de los factores equivalente constantes de carga y descarga, así la pendiente de la recta que queda a la izquierda de la imagen que es para potencias negativas de las baterías, será el factor equivalente de descarga, y la pendiente de la otra recta será el factor equivalente de carga. Es necesario comentar, que estos valores son diferentes para cada misión, por lo que habría que calcularlos todos de nuevo para nueva misión o ciclo sobre el que se quiera probar esta estrategia de control.

Una vez calculado estos parámetros se va a explicar cómo funciona el código del control.

El primer paso es la división de la misión en los diferentes intervalos correspondientes y la actualización del valor de la potencia media para cada uno de ellos en función del tiempo de simulación.

Tras esto, se ha creado un bucle en el que se va dando distintos valores a la variable u , con un intervalo de 0 a 1 en incrementos de 0.02. En cada iteración del bucle se calculará la potencia que se le demandará tanto a la pila como a la batería, y la variable E_e como la suma de la potencia acumulada que se la ha demandado a la batería, la actual demanda y la variación de la energía cinética debido al cambio de velocidad. El parámetro de la energía cinética es debido a que esta energía es otra forma más de almacenamiento y por tanto es necesario tenerla en cuenta a la hora de calcular E_e . Las velocidades que se demandan en las misiones y la masa del vehículo provocan una cantidad de energía suficientemente grande como para no poder despreciarla así que es necesario tenerla en cuenta cuando se calcula el parámetro de la energía reconvertible.

$$E_e = ac + (P_{bat} + 0.5 * m * (vel_{ant}^2 - vel_{act}^2))$$

Tras este cálculo, se realiza la operación de la probabilidad de que la batería descargue, y con esta probabilidad se obtendrá el factor equivalente:

$$P(t) = \frac{E_e(t) + E_{DC}^h}{t_h * P_{FC}^{max}} + \frac{P_{DC}^{avg}}{P_{FC}^{max}}$$

$$s = s_{dis} * prob + s_{chg} * (1 - prob)$$

Por último, dentro de este mismo bucle, se obtendrá el valor del coste de la función J , que será:

$$J = pp + s * pbat$$

Si el coste es menor que los calculados en los anteriores valores de u , se almacenará ese valor de u como el óptimo que minimiza la función. Cuando el bucle haya terminado se tendrá guardado el valor de u que menos coste tenga y será el que se elija en cada instante de tiempo.

Es decir, lo que hace el control es comprobar para tiempo de muestreo un valor de s para poder comparar las potencias de pila de combustible y baterías, y con ello calcular el valor que costaría para cada valor de u generar toda esa potencia, quedándose con el valor que minimice el coste.

Además de esta función de coste, se han realizado simulaciones cambiando la función J , se ha utilizado un modelo lineal de la pila de combustible para calcular el rendimiento de la misma en cada instante, y así, tenerlo en cuenta a la hora de calcular J además del valor de s . Es decir, dentro del bucle, a través de un modelo lineal de la pila de combustible, se calcula el rendimiento que tendría para esas potencias y este se tienen en cuenta a la hora de calcular J . Quedando así la función de coste como:

$$J = \frac{pp}{rp} + s * pbat$$

Aunque dentro del cálculo de s ya se han tenido en cuenta todos estos rendimientos, se verá en las pruebas

realizadas que este cambio mejora los resultados obtenidos, y por tanto tiene un menor consumo.

2.3. Control predictivo

El control predictivo basado en modelo (MPC, de sus siglas en inglés) es una estrategia de control basada en un modelo matemático interno del proceso que se pretende controlar. A través de este modelo se predicen las salidas futuras de nuestro sistema en un horizonte de tiempo denominado horizonte de predicción, de ahí que al modelo se le denomine, modelo de predicción.

Ya que para predecir las salidas se usa un modelo, la importancia de este es muy elevada y existen varias formas de obtenerlo. Podemos calcular el modelo mediante la respuesta ante impulsos del sistema, mediante la respuesta a diferentes escalones, mediante función de transferencia, por modelos no lineales, o como es en este caso se va a realizar, mediante variables de estado.

Una vez calculadas las predicciones, se calculan las señales de control futuras “u” a partir de un problema de control óptimo para lograr que las salidas del sistema se mantengan lo más cerca posible de las referencias, normalmente tomando una función de coste de forma cuadrática en la que se tienen en cuenta las diferencias de las salidas predichas con las referencias y el esfuerzo de control:

$$J = \sum_{j=Hp1}^{Hp2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|j) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{Hu} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2$$

El resultado de esta optimización en cada instante de tiempo, teniendo en cuenta las restricciones propias de cada sistema, es un conjunto de señales (Hu) de control óptimas, de todas ellas, solo se aplicará la primera de ellas al proceso, y el horizonte de predicción se desplazará un instante de tiempo hacia delante utilizando el concepto de horizonte deslizante.

Una vez explicado cómo funciona el control, es más sencillo entender que $Hp2 - Hp1 = Hp$ es el horizonte de predicción, y es la cantidad de predicciones que vamos a calcular con nuestro modelo, y Hu es el horizonte de control, que es la cantidad de señales de control óptimas que se van a calcular una vez se resuelva el problema de control óptimo. Estos dos valores no tienen por qué ser iguales, el valor del horizonte de control será menor o como máximo igual al horizonte de predicción, $Hp \geq Hu$.

La función de coste expuesta, es una función general para controles en los que se pretende que la salida siga una referencia deseada de la forma más rápida y fiable posible, para este caso concreto, en el que se pretende disminuir los consumos globales a lo largo de un periodo de tiempo, se va a utilizar una estrategia de control conocida como MPC económico o EMPC, en la que el controlador optimiza en tiempo real el consumo económico en lugar de forzar el seguimiento de un valor de consigna.

2.3.1 Espacio de estados

Para modelar el sistema en espacio de estados, en primer lugar, se hará una linealización de los estados de carga de pila y batería como sigue a continuación:

$$SOC(k+1) = SOC(k) - cte1 * Pbat$$

$$LOH(k+1) = LOH(k) - cte2 * Pfc$$

Los valores de las constantes 1 y 2, se obtendrán de forma experimental, a partir de distintas simulaciones con los modelos, y así obtener un valor medio aproximado en los puntos de operación en los que nos vamos a mover. Esto hará que el modelo de muy buenos resultados en estos puntos, pudiendo dar peores resultados en puntos de funcionamiento muy alejados de estos. Por otro lado, teniendo en cuenta la relación de potencias en cada instante de tiempo, donde la potencia que se demanda tiene que ser satisfecha por la suma de la potencia

que cede la batería y la pila, se tiene:

$$P_{demand} = P_{bat} + P_{fc}$$

Despejando y sustituyendo en las ecuaciones anteriores nos queda:

$$SOC(k+1) = SOC(k) - cte1 * (P_{demand} - P_{fc})$$

$$LOH(k+1) = LOH(k) - cte2 * P_{fc}$$

De esta forma solo tenemos una variable de control que será P_{fc} , ya que tanto la potencia que se demandará a la pila como a la batería dependen de ella. El objetivo ahora es poner estas ecuaciones con la forma estándar de un sistema dinámico en espacio de estados, que viene dado por la siguiente forma:

$$x_n(k+1) = A_n x_n(k) + B_m u_m(k) + B_p d_p(k)$$

En este caso quedará:

$$\begin{pmatrix} SOC(k+1) \\ LOH(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} SOC(k) \\ LOH(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.1845 \\ -0.008 \end{pmatrix} * P_{fc} + \begin{pmatrix} -0.1845 \\ 0 \end{pmatrix} * P_{demand}$$

Por lo que los valores de las matrices son:

$$A_n = I(2 \times 2); \quad B_m = \begin{pmatrix} 0.1845 \\ -0.008 \end{pmatrix}; \quad B_p = \begin{pmatrix} -0.1845 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad C = I(2 \times 2);$$

Para este caso en concreto, las variables de estado están representando los estados de carga de los dispositivos de los cuales se puede obtener la energía, la variable de manipulación representa la energía que se le demanda en cada instante de tiempo a la pila de combustible, y las perturbaciones son la demanda de potencia del sistema.

La dinámica de un sistema con n variables de estados y m señales manipuladas queda como sigue:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \vdots \\ x_n(k+1) \end{bmatrix}}_{n \times 1} = A_{n \times n} \underbrace{\begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \vdots \\ x_n(k) \end{bmatrix}}_{n \times 1} + B_{n \times m} \underbrace{\begin{bmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_m(k) \end{bmatrix}}_{m \times 1} + B_{n \times p} \underbrace{\begin{bmatrix} d_1(k) \\ d_2(k) \\ \vdots \\ d_p(k) \end{bmatrix}}_{p \times 1}$$

Simplificando matricialmente para los instantes de tiempo $k+1$ y $k+2$ se obtiene:

$$x_n(k+1) = A_n x_n(k) + B_m u_m(k) + B_p d_p(k)$$

$$x_n(k+2) = A_n x_n(k+1) + B_m u_m(k+1) + B_p d_p(k+1)$$

Se observa que en el instante $k+2$ aparece de nuevo $X_n(k+1)$, sustituyendo el valor de la misma para el instante 2 se tiene:

$$x_n(k+2) = A_n^2 x_n(k) + A_n B_m u_m(k) + A_n B_p d_p(k) + B_m u_m(k+1) + B_p d_p(k+1)$$

Si se sigue haciendo esta misma operación para todo el horizonte de predicción se pueden representar matricialmente todas las ecuaciones de la siguiente forma:

$$\mathbf{X} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_n(k+1) \\ x_n(k+2) \\ \vdots \\ x_n(k+H_u) \\ \vdots \\ x_n(k+H_p) \end{bmatrix}}_{n \cdot H_p \times 1} \quad \sigma = \underbrace{\begin{bmatrix} A_n \\ A_n^2 \\ A_n^3 \\ \vdots \\ A_n^{H_u} \\ \vdots \\ A_n^{H_p} \end{bmatrix}}_{n \cdot H_p \times 1} x_n(k)$$

$$\Lambda = \underbrace{\begin{bmatrix} B_m & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A_n B_m & B_m & 0 & \cdots & 0 \\ A_n^2 B_m & A_n B_m & B_m & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n^{H_u-1} B_m & A_n^{H_u-2} B_m & A_n^{H_u-3} B_m & B_m & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_n^{H_p-1} B_m & A_n^{H_p-2} B_m & A_n^{H_p-3} B_m & \cdots & \sum_i^{H_p-H_u} A_n^i B_m \end{bmatrix}}_{n \cdot H_p \times m \cdot H_u} \quad \mathcal{U} = \underbrace{\begin{bmatrix} u_m(k) \\ u_m(k+1) \\ u_m(k+2) \\ \vdots \\ u_m(k+H_u-1) \end{bmatrix}}_{m \cdot H_u \times 1}$$

Finalmente, la expresión para un horizonte de predicción H_p con n variables de estados y m señales manipuladas viene dada por:

$$X = \sigma + \Lambda * u + \tau * D$$

2.3.2 Restricciones

Como ya se ha comentado anteriormente, el control MPC te permite añadir las restricciones del sistema al problema de optimización, de esta forma se pueden añadir las limitaciones físicas del sistema, o simplemente estados que no es conveniente que el sistema tome.

Para este caso se han tomado tres tipos de restricciones, en la señal de control, ya que hay cantidades de potencia que los elementos no son capaces de dar, no se les puede pedir toda la potencia que se desee en un instante, en los estados, ya que normalmente se intenta que la batería no esté ni muy cargada ni muy descargada, y en el incremento de la señal de control, debido a que grandes picos en las variaciones de las potencias demandadas pueden disminuir la vida útil de los elementos.. Todas estas restricciones se establecen mediante cotas:

$$u_{\min}(k) \leq u(k) \leq u_{\max}(k) \quad \text{para las restricciones de control}$$

$$x_{\min}(k) \leq x(k) \leq x_{\max}(k) \quad \text{para las restricciones de estado}$$

$$\Delta u_{\min}(k) \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{\max}(k) \quad \text{para las restricciones de incremento de control.}$$

Para añadir todas estas restricciones al problema, se han puesto en forma matricial buscando la forma estándar $Ax \leq b$, además hay que poner todas las variables en función de $u(k)$, es decir, $x(k)$ se sustituye por la expresión $\sigma * x + \Lambda * u + \tau * D$ y Δu , se sustituye por $u(k) - u(k-1)$. Con todo esto, finalmente queda:

$$\begin{pmatrix} T \\ -T \end{pmatrix} * u \leq \begin{pmatrix} umax \\ -umin \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \Lambda \\ -\Lambda \end{pmatrix} * u \leq \begin{pmatrix} Xmax \\ -Xmin \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -(\sigma * x + \tau * D) \\ \sigma * x + \tau * D \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} T \\ -T \end{pmatrix} * u \leq \begin{pmatrix} \Delta umax \\ -\Delta umin \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -u(k-1) \\ u(k-1) \end{pmatrix}$$

Donde T es una matriz identidad del tamaño del número de señales de control.

2.3.3 Función de coste

El objetivo de la función de coste a diseñar será aprovechar al máximo la cantidad de energía de la que se dispone al mismo tiempo que satisfacemos la demanda. Los términos a tener en cuenta para minimizar este consumo serán tres, el coste económico de la operación, el mantenimiento de umbrales de los elementos de almacenamiento de energía y la operación suave de las acciones de control. Por tanto, la función de coste toma la siguiente forma

$$\min J = \sum_{k=0}^{Hp-1} f1(k) + \sum_{k=0}^{Hp} f2(k) + \sum_{k=0}^{Hp-1} f3(k)$$

Donde las funciones son:

- El coste económico

$$f1(k) = W\alpha * (u(k)^T * \alpha1 * u(k) + (D(k) - u(k))^T * \alpha2 * (D(k) - u(k)))$$

$\alpha1$ y $\alpha2$ son los valores son los costes asociados a la generación de energía para la pila de combustible y para la

batería respectivamente. $W\alpha$ es el peso que se le da a la función $f1$ dentro de la función de coste total.

- Umbrales de elementos de almacenamiento

$$f2(k) = (X - Xref)^T * Wx * (X - Xref)$$

Wx es un vector con los pesos de las desviaciones de los estados con respecto a una referencia marcada, dentro de la función de coste total.

- Operación nueva de las acciones de control

$$f3(k) = (u(k-1) - u(k))^T * Wu * (u(k-1) - u(k))$$

Donde Wu es el valor del peso para un incremento de control dentro de la función de coste total.

En definitiva, lo que hace el control es, con un modelo del sistema, y una potencia demandada para un instante, hace una estimación de cómo evolucionará el sistema en los instantes futuros de tiempo (H_p), como la potencia demandada solo es para un instante, se hace la aproximación que durante todo el tiempo de predicción se demandará misma. Con esta predicción realizada por el modelo, se puede optimizar para disminuir el coste de la función objetivo, así podemos obtener las mejores salidas de control (H_u) que optimizarán el sistema. Es decir, se mira hacia el futuro para comprobar como cambiará el sistema, y en función de eso el control actúa de la forma más óptima varios instantes de tiempo antes.

Como para el control ECMS, este control se ha realizado en un script de Matlab, en el que se calculan todas estas matrices, funciones de coste y restricciones.

Las entradas para este script son: la potencia demandada, el estado de carga de las baterías, estado de carga de la pila (LOH restante en el tanque), el tiempo de simulación y salida anterior realimentada. Por otro lado, las salidas son potencia que se demandará a la pila de combustible y potencia que se demandará a la batería.

En primer lugar, lo que hace el control es calcular y crear todas las matrices necesarias. Estas matrices son: matriz de ponderación por variaciones del SOC y del LOH con respecto a la referencia marcada (Wx), matriz de ponderación por coste de generar la potencia con pila de combustible, o baterías ($\alpha1$, $\alpha2$), matriz de ponderación por el incremento de control (Wu), matriz de las referencias de las variables de estado SOC y LOH ($Xref$), calculo de la matriz de potencias demandadas (D). Además de éstas, se necesitan las matrices con las que vamos a calcular las predicciones, es decir, tau, alfa, y sigma.

Ahora hay que diferenciar dos casos ya que se han hecho simulaciones tanto para el sistema con restricciones como para el sistema sin restricciones.

Para el caso sin restricciones, se toma la función de coste que se desea y se ponen todos los términos en función de la variable u . Ya que el fin es optimizar esta función, derivando la misma con respecto a u se obtendrá el valor de u que optimiza esa función en cada instante. Tras realizar estos cálculos se obtiene que la expresión de u que optimiza es la siguiente:

$$u = (\Lambda' * Wx * \Lambda + \alpha1 + \alpha2 + Wu)^{-1} * (((Xref - \sigma * x + \tau * D)' * Wx * \Lambda) + (D' * \alpha2) + (uant' * Wu))$$

Donde $uant$ es un vector que se crea con la salida anterior para poder calcular cuanto ha variado la salida y poder ponderar el incremento de control. Con todo esto, el control una vez se tienen calculada las matrices, simplemente resolviendo esta cuenta, se obtiene el valor óptimo de u que minimiza la función.

En el caso en que se añaden las restricciones, ya no es posible hacer esta cuenta, por lo que se ha optado por usar el comando de Matlab llamado `quadprog`. Como se ha comentado anteriormente, para utilizar este comando hay que poner las restricciones de una manera concreta, por lo que hay que crear las matrices y despejar para introducir los datos tal y como se expusieron mas arriba. Al utilizar este comando las simulaciones serán mas lentas, ya que hace una búsqueda del mínimo de la función teniendo además en cuenta todas las restricciones que se quieran añadir.

3 EXPERIMENTOS REALIZADOS

En esta sección se explican todas las pruebas que se han realizado para todos los tipos de control explicados anteriormente. Se dispone de datos para dos misiones reales, “misión 1” y “misión 2”, además de la primera, repitiéndola varias veces se tienen misiones de mayor longevidad llamadas “misión 1 larga” y “misión 1 x larga”. Las duraciones son 2524 segundos, 10064, 40256 y 13210 para misión 1, misión 1 larga, misión 1 x larga y misión 2 respectivamente. Sobre los datos de estas misiones se han aplicado todos los controles y los resultados de todas las pruebas se muestran a continuación.

Los experimentos se han realizado teniendo en cuenta una carga inicial de las baterías de 0.8, que, aunque no influye en el cálculo del consumo si puede provocar que las estrategias tomen unos caminos u otros influyendo en el consumo total a la hora de realizar una misión. Igualmente para las demás características, todas las estrategias se han simulado bajo las mismas condiciones con el objetivo de que los datos obtenidos por las mismas sean totalmente comparables.

Por último, en las gráficas donde se expone la evolución de alguna variable frente al tiempo, las potencias demandadas a pila y batería se expresan en Julios, las cargas de la batería en porcentaje, el hidrogeno en litros y el tiempo siempre en horas. Además las gráficas de barras donde se exponen los consumos totales de las misiones están siempre expresadas en Kilojulios.

3.1 Estrategias de control pasivas

En primer lugar, se expondrán las pruebas realizadas y los resultados para las estrategias pasivas, inicialmente desacoplados, inicialmente acoplados y parcialmente acoplados.

3.1.1 Inicialmente desacoplado

Esta estrategia se ha simulado para todas las misiones que se comentaron más arriba, y los datos de consumos finales (en Kilojulios) para cada una de ellas son los siguientes:



Tabla 4: consumos i. desacoplado para todas las misiones

Para poder ver bien el funcionamiento de esta estrategia y cómo se comporta el sistema durante las simulaciones de las mismas, se van a presentar las evoluciones en el tiempo del SOC, del LOH, de las potencias demandadas a las baterías y de las potencias demandadas a la pila de combustible. De todas las misiones, las gráficas siguientes son las referidas a la misión más larga, ya que es de la que más datos se pueden obtener, la que mejor se puede analizar y por tanto a la que podemos sacar más partido.

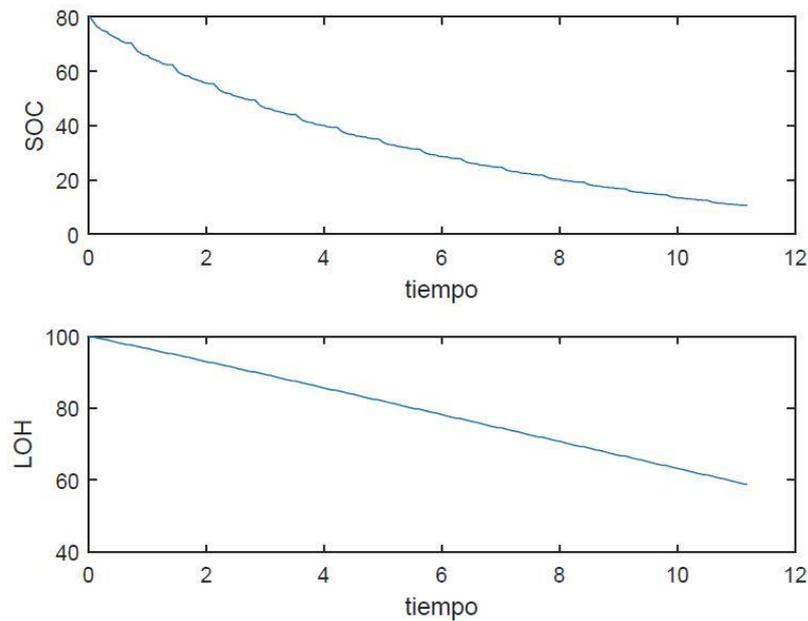


Figura 10: Evolución del Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en i. desacoplado para misión 1 x larga

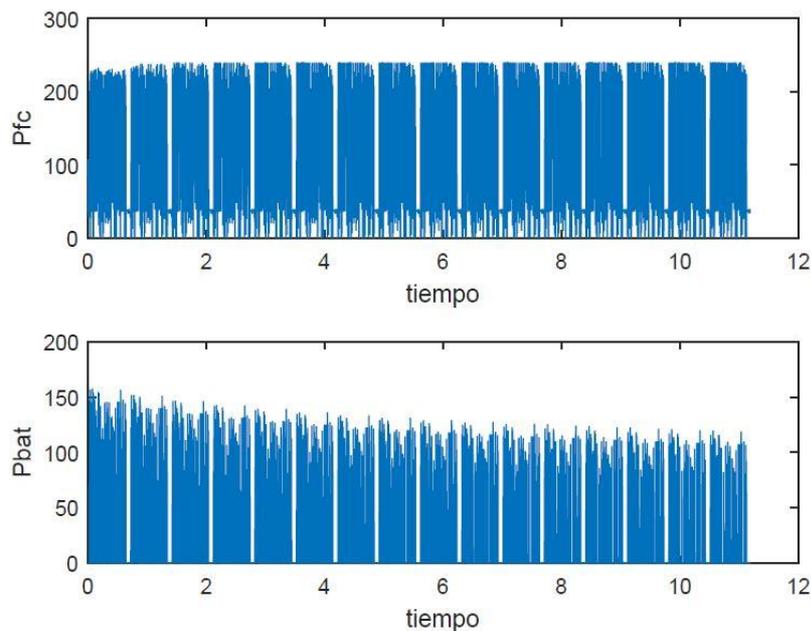


Figura 11: Evolución del Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en i. desacoplado para misión 1 x larga

Se puede apreciar en primer lugar como hay un gran consumo de hidrogeno y una gran descarga de la batería, esto es debido a que la misión es muy larga y necesite de mucha potencia para realizada completamente.

En segundo lugar, es fácilmente apreciable como las potencias que se demandan a la pila son menores que las demandadas a la batería, ya que la pila da toda la potencia para el punto de operación y la batería da el resto hasta la potencia demandada, al no ser las potencias demandada muy elevadas pues se obtienen estos resultados.

Es importante recordar que el modo de funcionamiento de esta estrategia es pila de combustible sola, y se añaden las baterías cuando hay picos de consumo. Esto se puede apreciar en que, aunque la mayoría del tiempo ambas fuentes están dando energía, los momentos en los que la demanda baja, la batería no suministra nada de potencia y la pila de combustible se queda en torno a 40, la potencia necesaria en ese instante.

3.1.2 Inicialmente acoplado

Como ya se explicó en el punto de las estrategias de control, el caso de inicialmente acoplado se ha simulado de dos formas distintas. Una para que cambie de modo con un solo valor umbral, y otra para que cambie entre dos umbrales, uno superior y otro inferior, funcionando como una histéresis. Los datos de consumo para las 4 misiones de ambas formas de esta estrategia son los siguientes:



Tabla 5: Consumos i. acoplado para todas las misiones (Kj)



Tabla 6: Consumos i. acoplado con histéresis para todas las misiones (Kj)

Se puede observar que la adición de la histéresis ha reducido un poco los consumos, poca cantidad para las misiones más cortas, y algo más para las misiones más largas. Para ver nuevamente el comportamiento de esta estrategia en las dos formas en las que se ha simulado se van a representar a continuación las gráficas del SOC, LOH, potencia demandada a la pila de combustible y potencia demandada a las baterías. En primer lugar se representan las gráficas para el inicialmente acoplado.

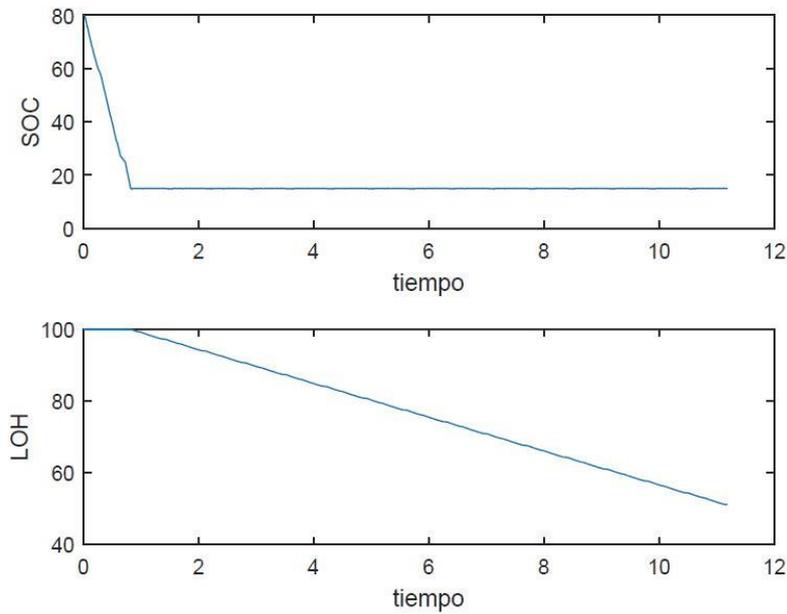


Figura 22: Evolución del Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en i. acoplado para misión 1 x larga

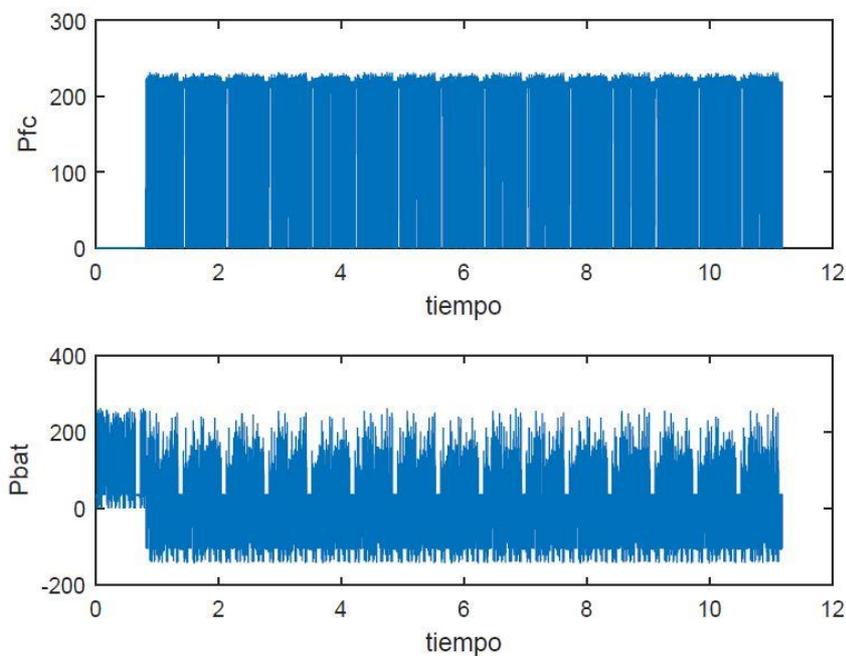


Figura 33: Evolución de Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en i. acoplado para misión 1 x larga

A continuación se exponen las gráficas para el inicialmente acoplado con dos valores umbrales:

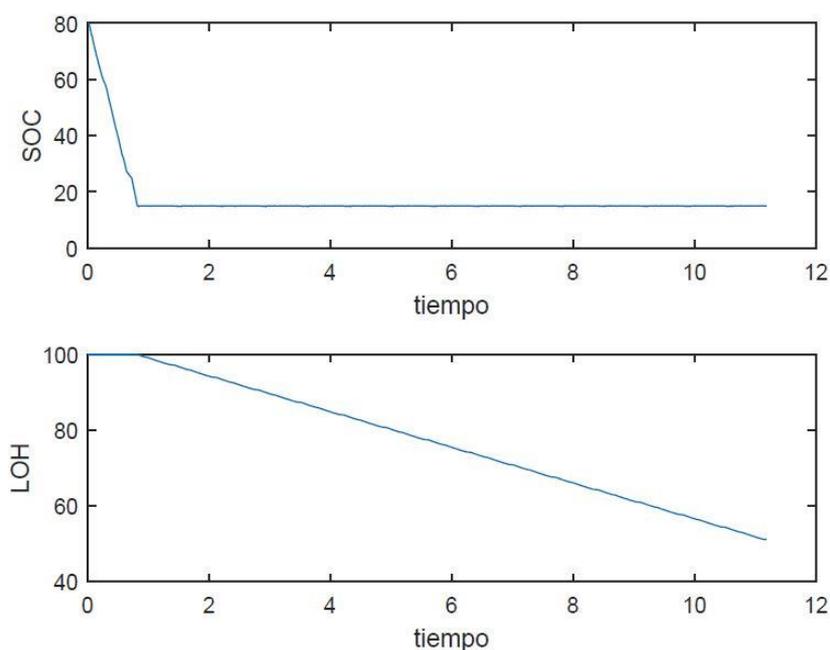


Figura 14: Evolución del Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en i. acoplado con histéresis para misión 1 x larga

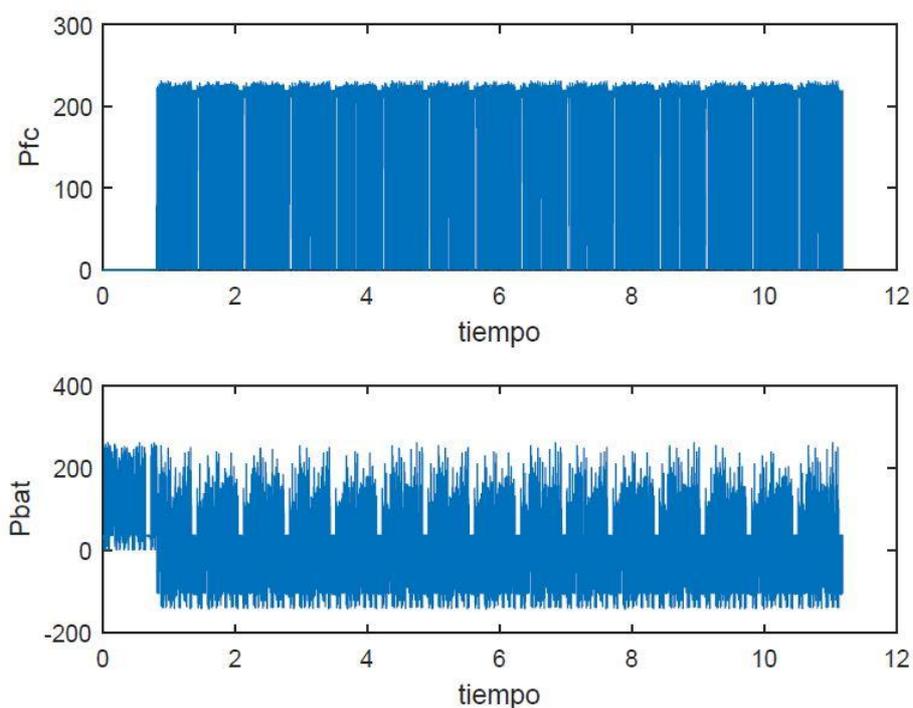


Figura 15: Evolución de Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo en i. acoplado con histéresis en misión 1 x larga

Es importante recordar en este punto, que esta configuración trabaja normalmente usando las baterías hasta llegar a un estado de Soc donde se usa pila de combustible y baterías, se puede ver rápidamente en las cuatro primeras imágenes, como funciona este modo. En los instantes iniciales el Soc decae muy deprisa hasta llegar el valor umbral, durante este periodo se comprueba en las imágenes como toda la potencia está siendo suministrada por la batería, mientras que la potencia cedida por la pila de combustible permanece a cero. Una vez se ha llegado al valor umbral mínimo de Soc, la evolución de este es todo el tiempo subiendo y bajando de forma muy repetida, ya que la estrategia de control está cambiando de forma constante el modo de funcionamiento. Esto hace que la potencia de la batería cambie en picos muy agravados y pase de estar cediendo potencia a estar cargándose de forma repetitiva. Efecto contrario se aprecia en la potencia que cede la

pila de combustible, hay instantes en los que cede mucha potencia, y instantes muy cortos pero muy seguidos en los que cede cero y la pila de queda parada.

Con la adición de la histéresis, mejoramos este fenómeno, y se aprecia de forma sencilla como ahora el Soc varía entre dos rangos, evitando la constante carga y descarga de batería, y evitando el cambiar de modo de funcionamiento un número demasiado elevado de veces. Se aprecia de mejor forma que en el caso también este fenómeno en la evolución del Loh, ya que hay instante de tiempo en los que claramente queda constante. Por supuesto queda reflejado también de forma muy clara en las demandas de potencia, las baterías tienen ciclos de carga y descarga, pero en este caso de mayor duración que anteriormente, y por el contrario, la pila también para y cede potencia en estos mismos rangos.

3.1.3 Parcialmente acoplado

En este caso al haber también carga de batería cuando las baterías bajan por debajo de un umbral inferior, se han hecho simulaciones para varios límites, como son 70%, 40% y 15%. A continuación, se exponen los valores de esta configuración (en kilojulios) para estos tres rangos respectivamente y para las 4 misiones con las que se ha trabajado.

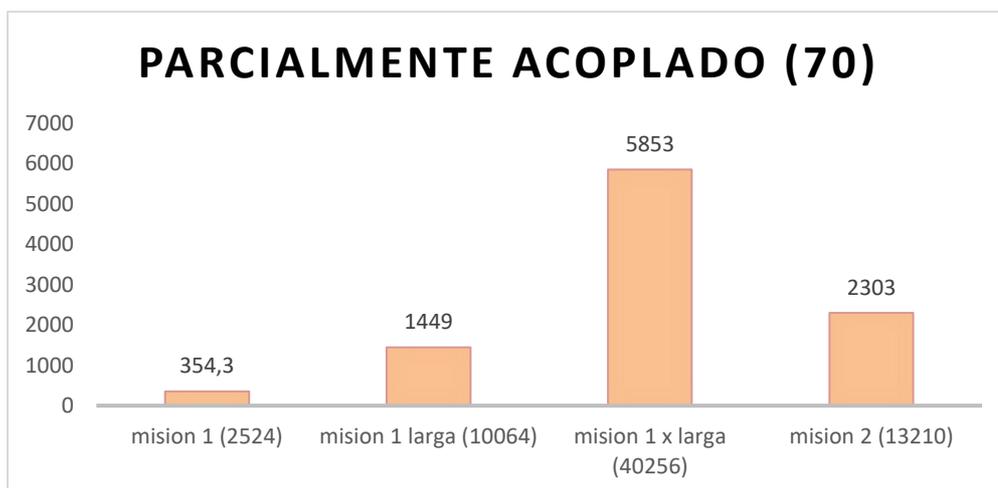


Tabla 7: consumos p. acoplado (70) para todas las misiones (Kj)

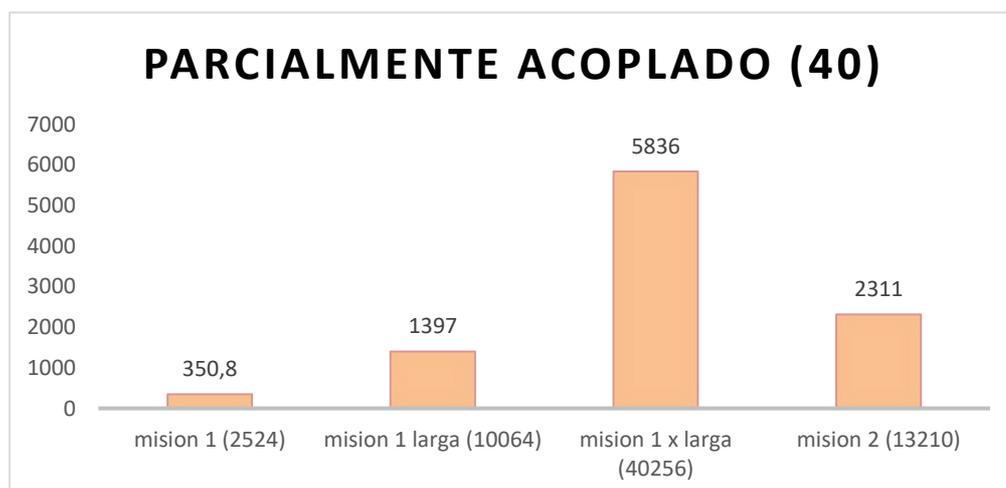


Tabla 8: consumos p. acoplado (40) para todas las misiones (Kj)

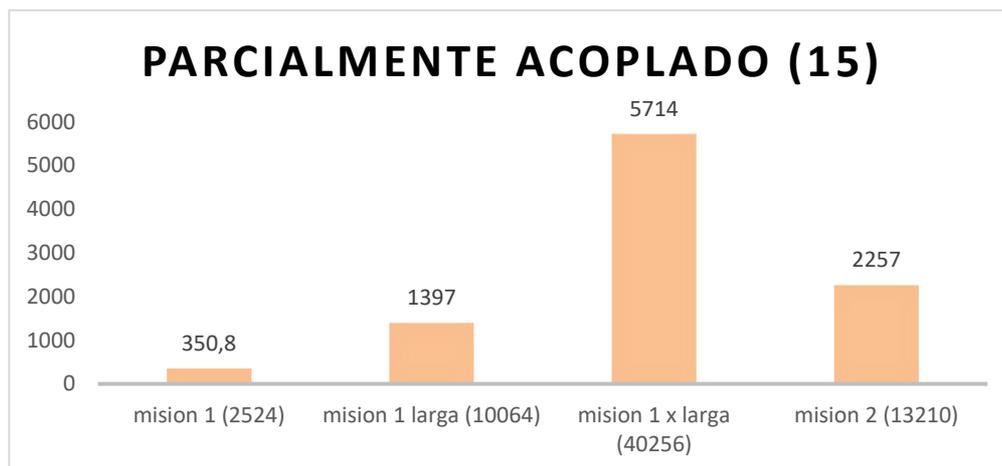


Tabla 9: consumos p. acoplado (15) para todas las misiones (Kj)

Con estas gráficas, se puede ver como cuanto mayor es el umbral que se ponga para cargar la batería más consumo final tienen las misiones, esto es así porque cuando más se penalice el uso de la pila de combustible para cargar en lugar de usar la batería directamente es energía que provoca un aumento del consumo final. Para analizar mejor el funcionamiento de la estrategia de control y la evolución del sistema se representan a continuación frente al tiempo el Soc, Loh, potencia demandada a las baterías y a la pila tanto para el límite en 70% como el límite a 15% para la misión más larga.

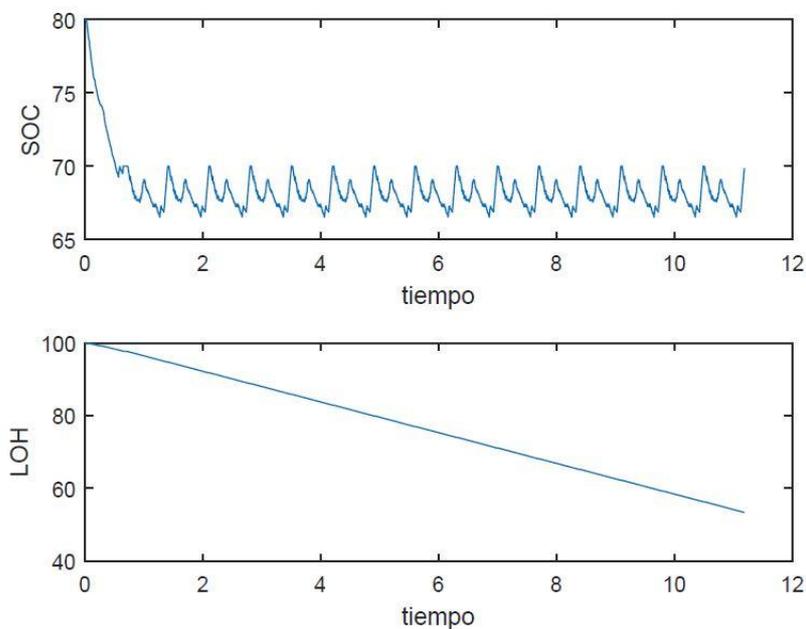


Figura 16: Evolución del Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en p. acoplado, lim 70, para misión 1 x larga

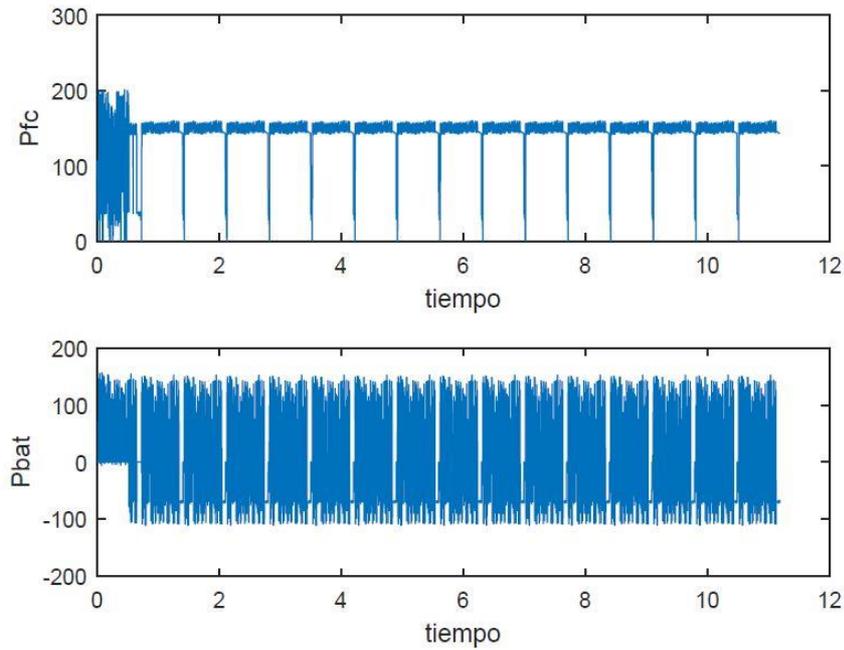


Figura 17: Evolución de P_{fc} (W) y P_{bat} (W) frente al tiempo (h) en p. acoplado, lim 70, para misión 1 x larga

En los primeros segundos de simulación el sistema trabaja con pila y batería exactamente igual que para el caso inicialmente desacoplado, pero con una pequeña diferencia, ya existen pequeñas cargas de batería que antes no existían. Por lo que, en estos segundos iniciales, hasta que el Soc llega al valor marcado, las baterías trabajan cuando es necesario una ayuda para la pila, y cuando no se necesita no cede nada de potencia e incluso alguna pequeña carga. A partir del momento en que las baterías bajan del umbral marcado la estrategia obliga a trabajar tanto a baterías como a pila, por eso el Soc se mantiene en torno 70. Se puede ver como la pila trabaja en un rango más o menos constante excepto en los momentos en que la demanda del sistema es muy pequeña. Por otro lado, en la gráfica de la potencia que ceden las baterías, se alternan ciclos rápidos y repetitivos de carga y descarga, debido a que ya se ha llegado el valor de Soc marcado, problema que se tuvo y se resolvió en la estrategia inicialmente acoplado. Las gráficas cuando el valor umbral se marca en 15 son:

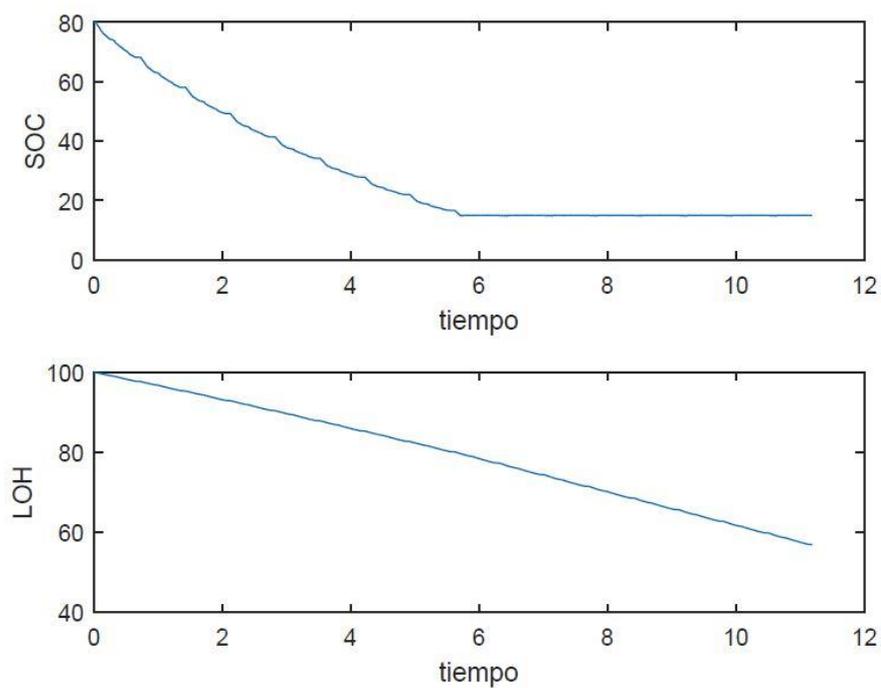


Figura 18: Evolución del Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en p. acoplado, lim 15, para misión 1 x larga

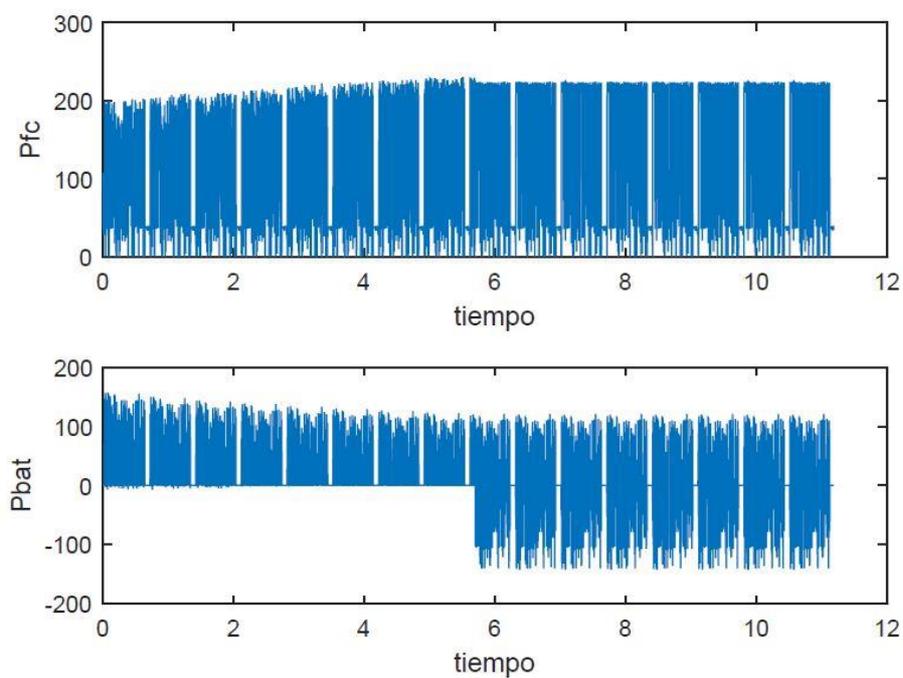


Figura 19: Evolución de Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en p. acoplado, lim 15, para misión 1 x larga

El efecto de la estrategia y evolución del sistema en este caso es muy parecido, pero al ser un valor menor los efectos se retrasan un poco, ya que las baterías tardan más en llegar a ese umbral.

3.2 Control ECMS

El control ECMS se ha simulado de dos formas distintas. Teniendo en cuenta en la función de coste el rendimiento de la pila de combustible, y teniendo en cuenta exclusivamente el factor equivalente. Para ambos se han usado los mismos valores de S_{chg} y S_{dis} , que son 1.5368 y 1.6799 respectivamente. Además, ambos se han simulado para la misión más larga, misión 1 x larga, ya que es en la misión que mejor se puede ver cómo actúa el control.

El consumo final para el caso sin tener en cuenta el rendimiento de la pila es de 5471 Kj, en este caso es importante decir, que el valor de las S_{chg} y S_{dis} es mucho más importante que para el otro caso, ya que al depende exclusivamente de ellos el sistema es muy sensible a los cambios de los mismos. Cuando se añade el rendimiento de la pila, al depender la función de coste de más factores, no es tan sensible al valor que se escoja para los factores equivalentes constantes. Con todo esto el consumo final para el caso en que se tiene en cuenta el rendimiento de la pila es 5337 Kj. A continuación, se muestran las gráficas para el caso con menor consumo, donde se puede ver cómo funciona el control.

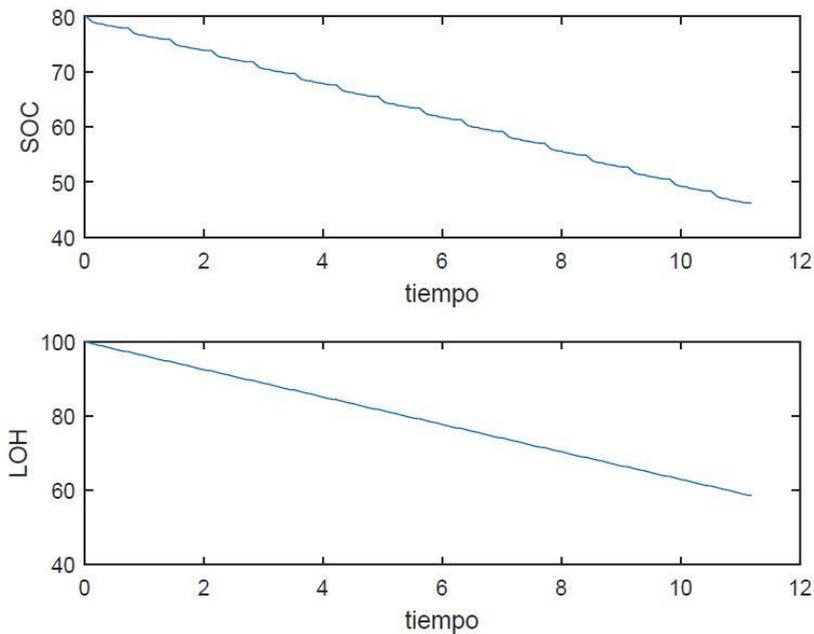


Figura 20: Evolución de Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en ECMS para misión 1 x larga

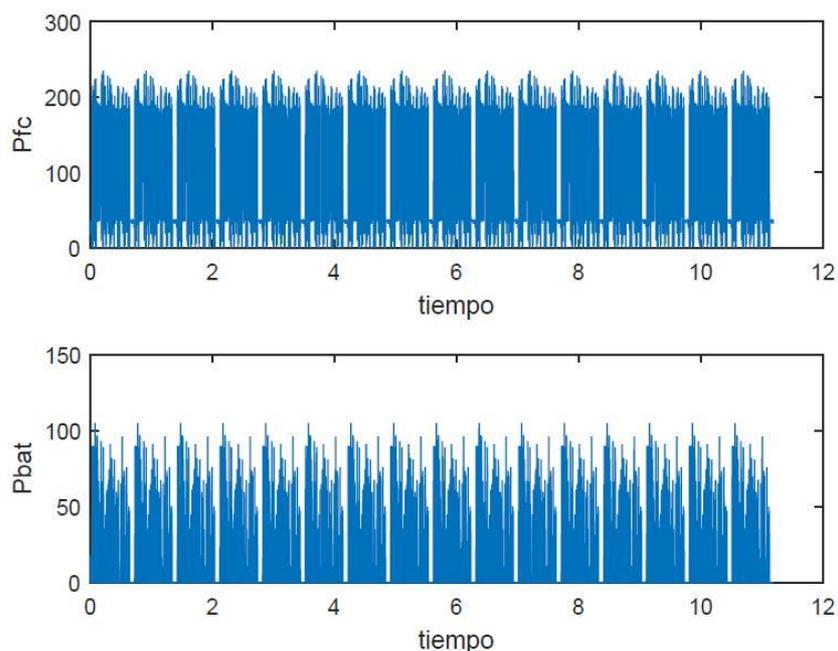


Figura 21: Evolución de Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en ECMS para misión 1 x larga

Se puede apreciar como la pila trabaja prácticamente todo el tiempo en el mismo rango de potencias, rango en el que tiene un gran rendimiento, mientras que la batería es la que se va ajustando y variando para que esto sea posible. Esto era de esperar, ya que cuando se optimiza este tipo de sistema, se suele buscar que esto ocurra, en caso de haber realizado controles heurísticos, se harían de la misma forma, tratar que la pila no varíe mucho su estado, y que además sea en rangos donde tiene muy buen rendimiento, siendo la batería la que varía en mayor medida para conseguir que esto ocurra.

En las partes en las que la pila disminuye su consumo, es debido a que la misión tiene un consumo muy pequeño o nulo, y se aprecia que en esos mismos instantes la batería está cediendo nada o casi nada de energía. Es destacable también que no hay ningunos momentos en los que las baterías se carguen, sin embargo, termina el ciclo con un 46% de carga.

Es necesario destacar nuevamente la importancia de la elección de los factores equivalentes constantes, en caso de elegir un valor muy alto, podemos llegar a darnos el caso que se demanden potencias demasiado altas a la pila de combustible, potencias superiores a la que la pila puede soportar, esto provoca resultados extraños en la potencia que cede la pila y consumos negativos, ya que el sistema no está preparado para esto. En el caso en que se elijan factores equivalente muy pequeños, se favorece el uso de la batería, pudiendo llegar a descargarse de forma muy rápida. Se exponen a continuación un ejemplo de la potencia cedida por la pila de combustible para el primer caso de factores muy grandes, y un ejemplo del estado de carga de las baterías en caso de factores equivalentes demasiado pequeños.

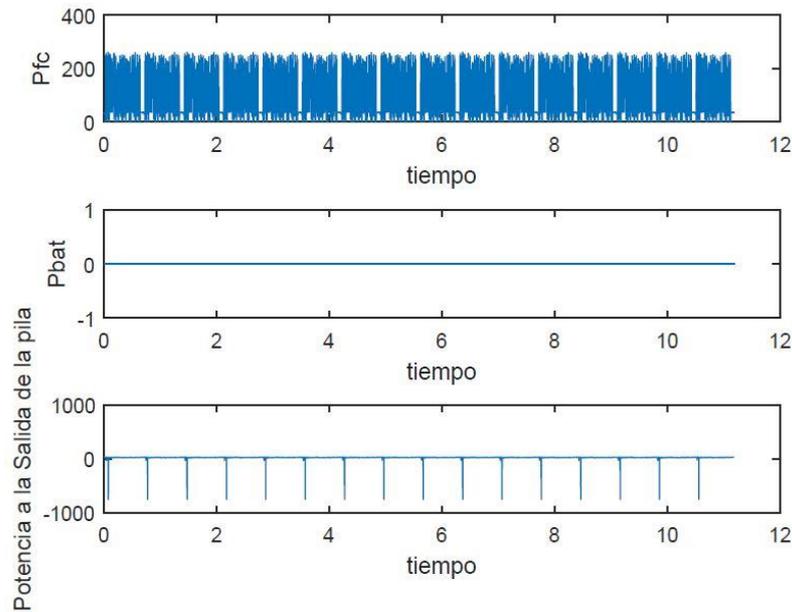


Figura 22: Pfc (W) cuando se eligen valores de S demasiado grandes

Se puede apreciar en la imagen, como al subir demasiado el valor de los factores equivalentes, toda la potencia se demanda a la pila de combustible mientras que la batería se queda toda la misión a cero, estas potencias demasiado altas para las que la pila no está preparada hacen que el modelo no simule correctamente dando una salida falsa que se puede apreciar en la tercera de las gráficas de la imagen.

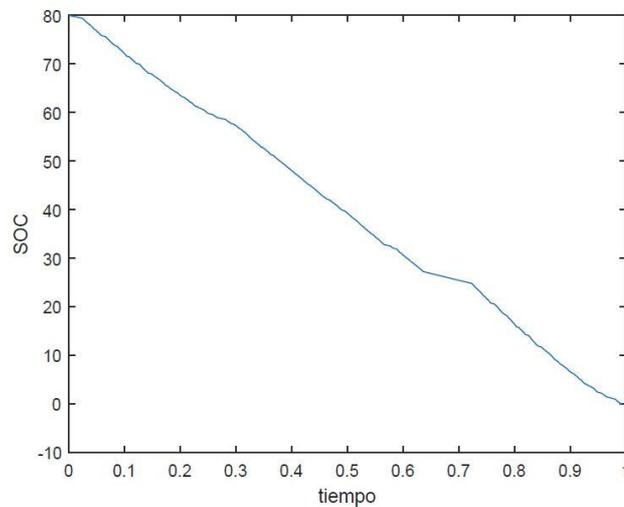


Figura 23: Soc (%) cuando se eligen valores de S demasiado pequeños

Por el contrario, si se elige un valor de los factores equivalentes, ocurre lo que pasa en la imagen, el Soc se baja a cero demasiado rápido y por tanto nos quedamos sin energía en las baterías.

3.3 Control predictivo

Para el control predictivo se han realizado varias pruebas distintas, algunas teniendo en cuenta restricciones y otras sin tenerlas en cuenta, también añadiendo más o menos variables a la función de coste, cambiando los pesos dentro de la misma o cambiando el tiempo de los horizontes de predicción y control.

La primera prueba que se ha realizado para el control predictivo es la de intentar sacar el máximo rendimiento posible al realizar alguna misión, es decir minimizar el consumo al máximo. Para este caso y buscando este objetivo, no se han tenido en cuenta ningún tipo de restricción.

La función objetivo para este caso se ha hecho lo más sencilla posible, y tiene en cuenta, la generación de energía de cada fuente de potencia y, la variación del Soc y Loh respecto a una referencia. Para este caso, con objetivo de minimizar el consumo no se han puesto restricciones a los incrementos de u.

Los datos que se han utilizado son, las referencias utilizadas para el Soc y el Loh son las cargas iniciales de baterías y pila de combustible respectivamente, es decir se penaliza todo lo que se desvíe desde el punto inicial en este caso la referencia es 80% para Soc y 100 para pila de hidrógeno. Los tiempos de predicción y control se han tomado de igual tamaño e iguales a 10. El peso por variación del Soc y del Loh respecto a las referencias son 980 y 670 respectivamente. Por último, el valor de los pesos por generación de energía con pila de combustible es de 1 y el de las baterías 1.55.

Con estos datos se ha obtenido un consumo para la misión más larga de 5164 Kj y las gráficas obtenidas se muestran a continuación.

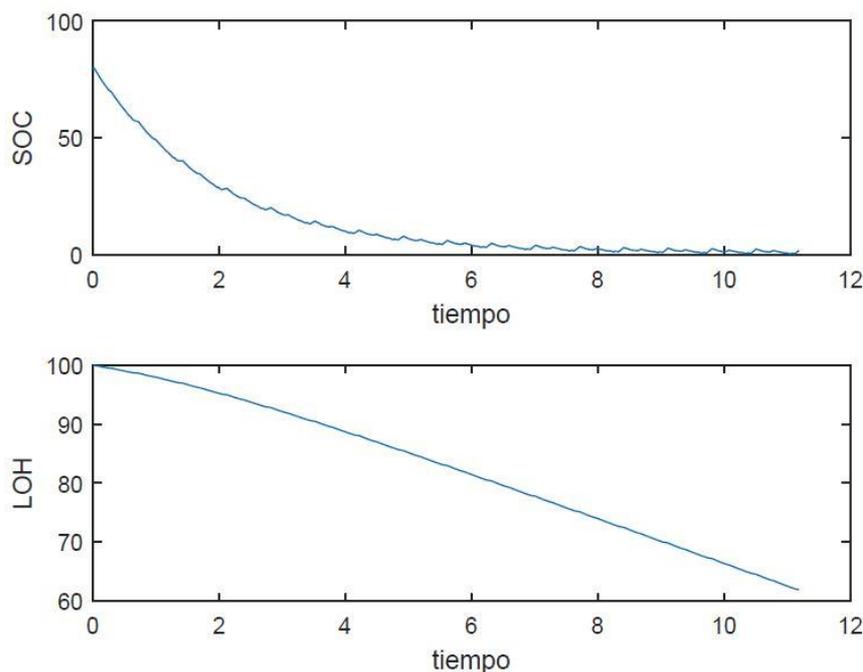


Figura 24: Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) para predictivo de mínimo consumo en misión 1 x larga

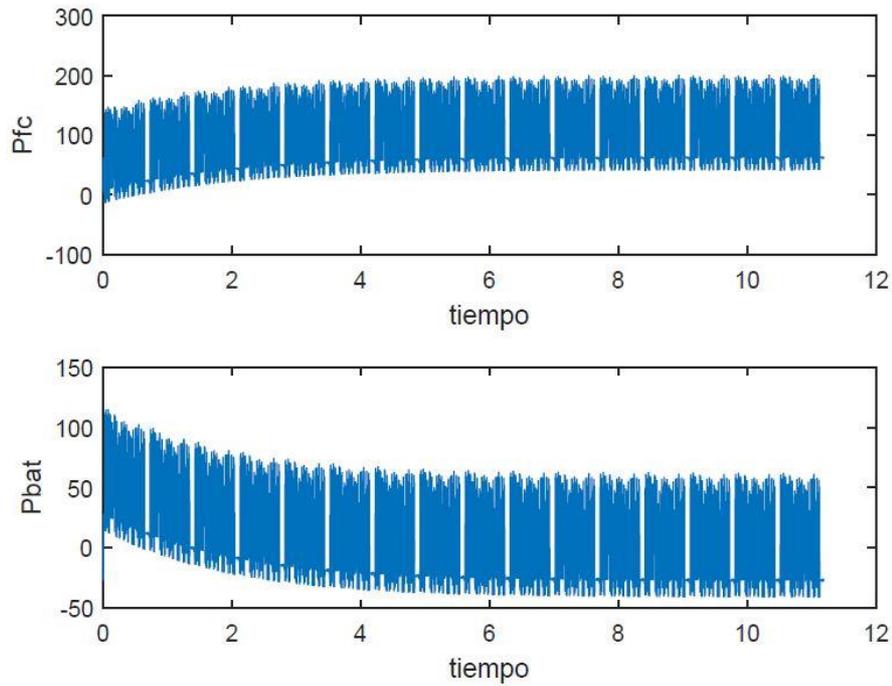


Figura 25: Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) para predictivo de mínimo consumo en misión 1 x larga

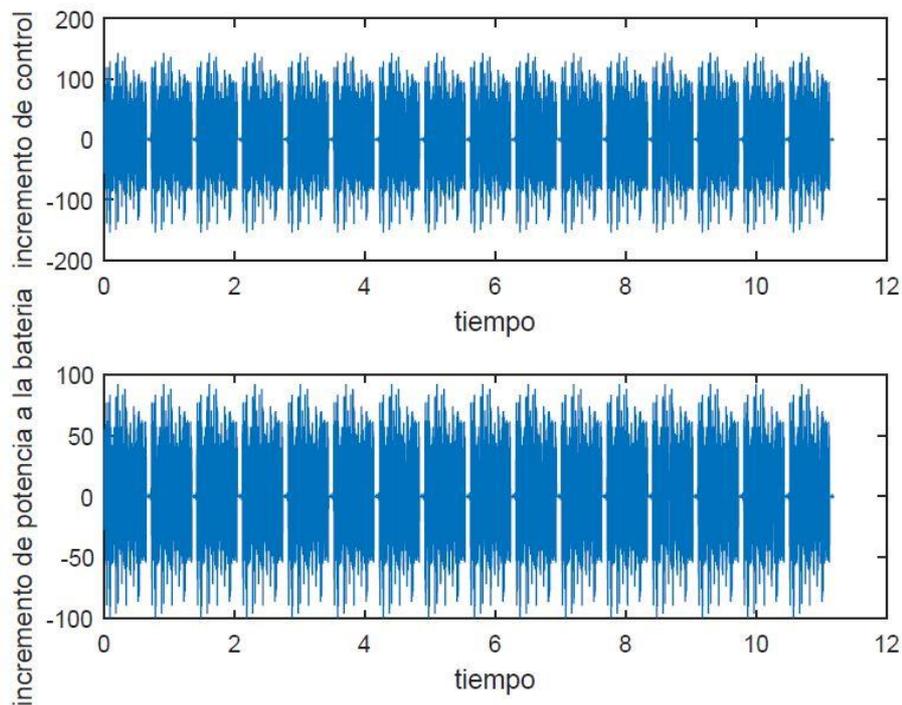


Figura 26: Inc de Pbat (W) y Pfc (W) frente al tiempo (h) para predictivo de mínimo consumo en misión 1 x larga

De la primera imagen de los estados de carga, se aprecia como el control da mucha prioridad al consumo de la batería, como ya se comentó en las demás pruebas, esto provoca una disminución del consumo global, pero además el control hace que no llegue a agotarse del todo, debido al peso en la función de coste de la variación respecto al estado inicial de Soc.

En la segunda imagen podemos ver como conforme ha ido disminuyendo el estado de carga de la batería ha ido subiendo la potencia que cedía la pila de combustible y por el contrario ha ido disminuyendo la se demandaba a la batería.

De momento, en la tercera imagen no se pueden analizar grandes características, pero servirá para poder compararla con los demás controles cuando existan restricciones en los incrementos o se metan dentro de la función de coste. En este caso simplemente se ha de recalcar que los incrementos de la variable de control (es decir la potencia demandada a la pila) casi llega a incrementos de 150 y para la batería incrementos casi de 100.

La siguiente prueba realizada al control predictivo, también sin restricciones, es la del aumento de los horizontes de predicción y control. Para poder comparar como afecta este cambio al control, el resto de parámetros se quedan intactos. Se presentan a continuación las gráficas para tiempo de predicción y control iguales a 50 y después a 100.

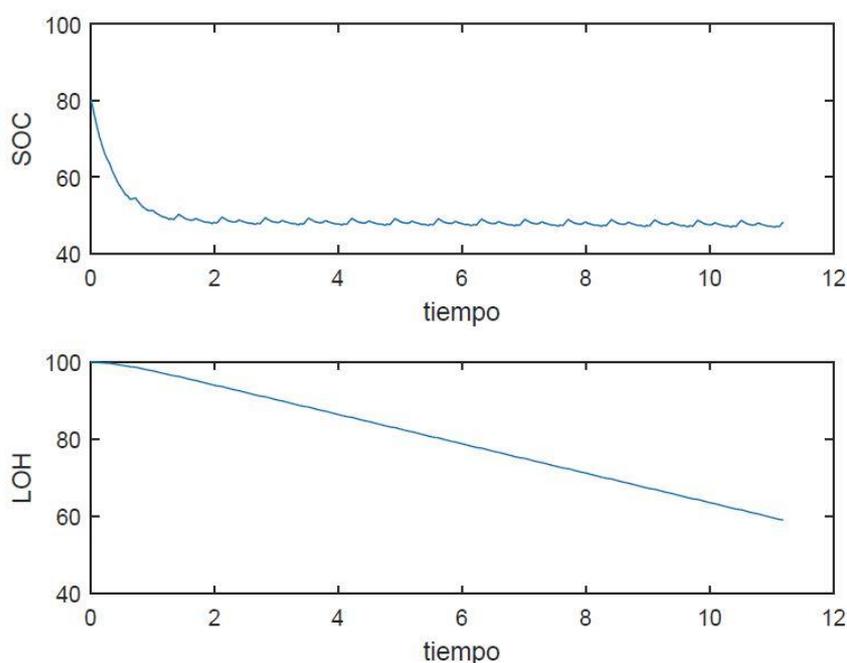


Figura 27: Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con horizontes a 50 en misión 1 x larga

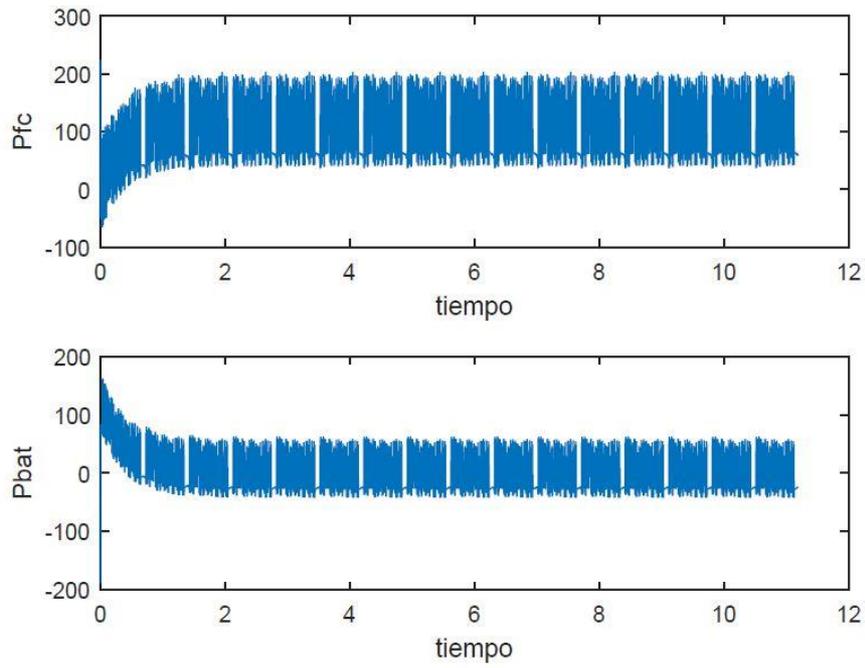


Figura 28: P_{fc} (W) y P_{bat} (W) frente al tiempo (h) en predictivo con horizontes a 50 en misión 1 x larga

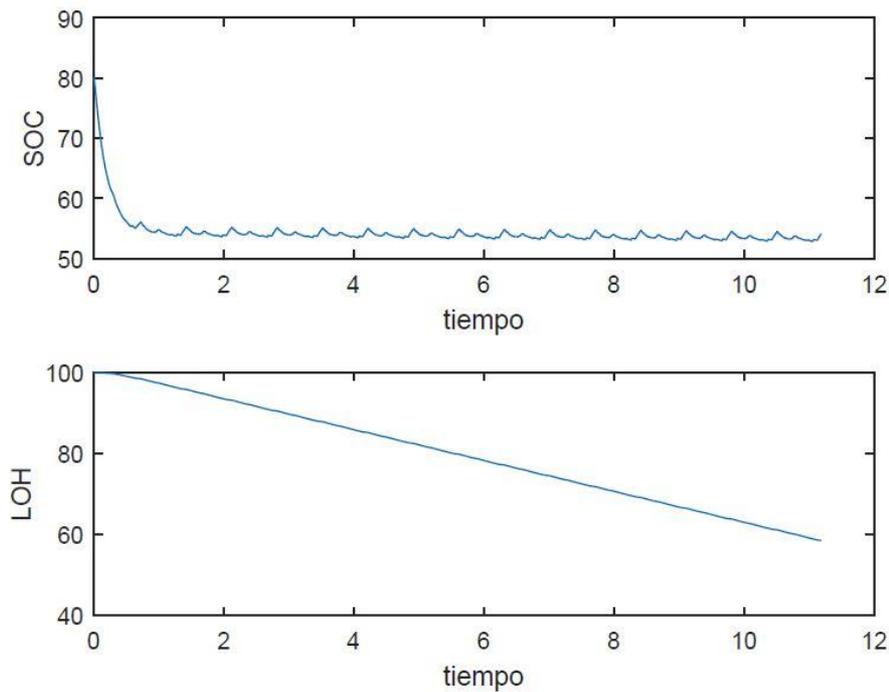


Figura 29 Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con horizontes a 100 en misión 1 x larga

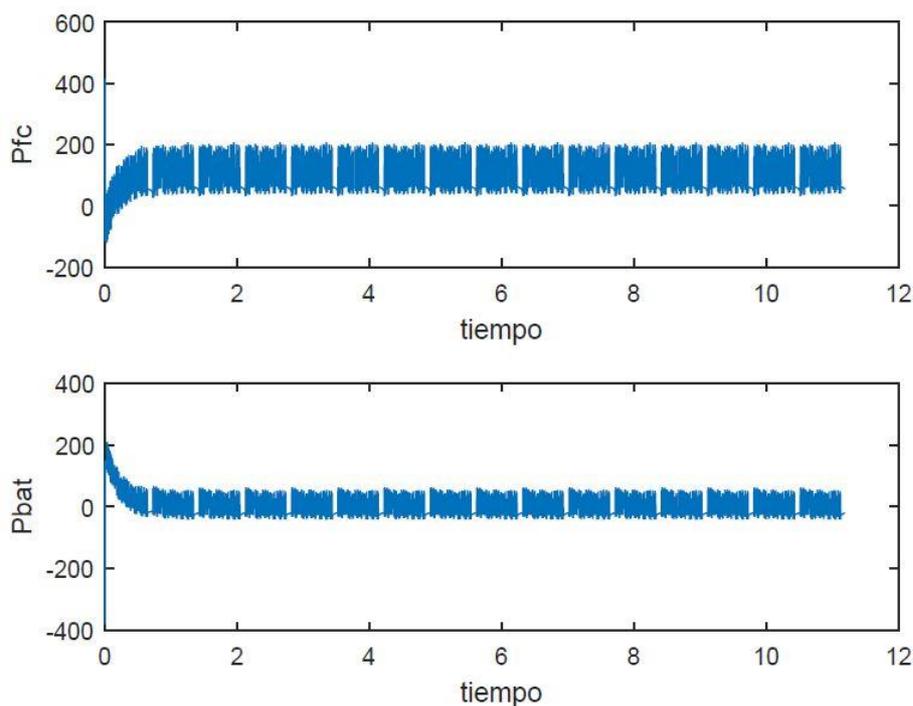


Figura 30: Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en predictivo con horizontes a 100 en misión 1 x larga

En este caso la evolución del sistema es muy parecida para ambos valores, al menos cualitativamente.

Los consumos de estas simulaciones son 5263 cuando los horizontes son 50 y 5304 cuando los horizontes son 100, a priori esto podría no tener sentido, ya que, al aumentar el tiempo de predicción, el control debería de actuar mejor y por tanto tener un menor consumo final.

Si analizamos la función de coste podemos ver que además del coste por generación está el coste por desviación de los estados de carga, este segundo término no está relacionado directamente con el cálculo del consumo, es decir que la función de coste teniendo en cuenta todos sus términos si ha mejorado, y por tanto el control ha actuado mejor, pero no tiene por qué disminuir el consumo final. Es decir, al predecir el control que el estado de carga de las baterías va a bajar mucho, se anticipa mucho tiempo antes en comparación con la primera prueba, y por tanto no deja descender al Soc de las baterías, esto provoca que se use más la pila de combustible y por tanto que se tenga un aumento en el consumo final de la misión.

Si se quisiera mejorar el consumo total, sería muy sencillo simplemente bajando el peso de la desviación del Soc dentro de la función de coste.

Se ve claramente en las gráficas de las cargas, que cuanto mayor es el tiempo de predicción y control, más arriba se queda el Soc, para 50 se queda en torno a 50% y para 100 se queda casi en 60%. En las gráficas de las potencias se aprecia este fenómeno en que las potencias que se demandan a las baterías disminuyen con el tiempo haciendo lo contrario las que se demandan a la pila de combustible. Por este motivo se decía que, para ambos valores de los tiempos de predicción y control, el sistema se comportaba de forma parecida cualitativamente, ya que lo que hace es mantener el estado de carga en un valor alto y desde casi el principio de las simulaciones, lo único que cambia de uno a otro es que esto ocurre más rápido que en el otro, y para un Soc algo más alto.

Otra prueba realizada para el control sin restricciones ha sido la de utilizar las potencias medias de las misiones en ciertos periodos de tiempo.

Cuando se explicó el control predictivo, se hizo referencia a la creación de un vector de tamaño el horizonte de predicción cuyo contenido eran las demandas. Como las demandas futuras a priori eran desconocidas, este problema se solucionaba repitiendo tantas veces como se necesitarán el mismo valor de demanda actual, pero para las demandas futuras.

Evidentemente, esto provoca un error, ya que las demandas futuras tendrán otros valores que no coincidirán

con el actual. Por este motivo se decidió probar a hacer un vector del tamaño necesario pero, cuyo primer término era la demanda actual y el resto era la media dentro de un rango, para este caso se usaba la media en tramos de 1321 segundos para la misión más larga.

Los resultados de estas simulaciones fueron muy parecidos a los obtenidos repitiendo el valor actual de la demanda, por lo que las medias no tenían prácticamente influencia en las acciones de control y por este motivo no se exponen las gráficas de estas simulaciones.

La siguiente prueba realizada es la variación de los pesos de generación de potencia, y aumentar mucho el peso de los incrementos de u . Como resumen, se ha simulado cuando la generación vale igual para todas las fuentes, cuando generar con la pila es muy barato y cuando generar con la pila es muy costoso.

En primer lugar, se ha simulado cuando los pesos de las fuentes son iguales y de valor 0.5, los resultados obtenidos son muy parecidos a los que se dieron en la prueba, y por este motivo no se representan las gráficas de esta simulación. En comparación con la prueba 1, exclusivamente es reseñable que se usa un poco más la batería y por tanto el consumo sube de 5165 de la prueba 1 a 5186, pero en la evolución del sistema y distribución de potencias es prácticamente igual.

La siguiente prueba realizada es poner el coste de generación de la pila a 0. Para esta prueba además, se ha cambiado la referencia de la batería de 80 a 60 para ver cómo funciona el control a este cambio. A continuación se exponen las gráficas obtenidas.

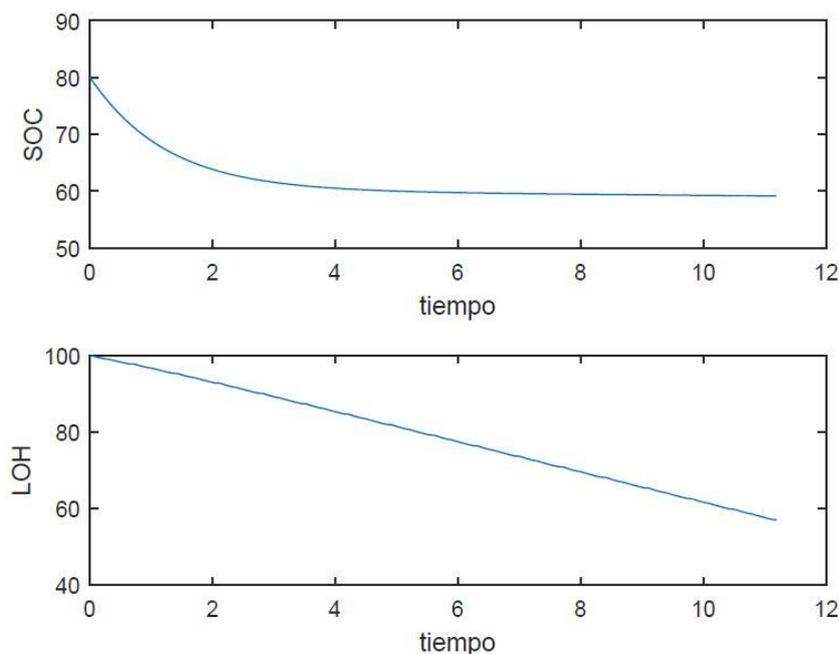


Figura 31 Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con coste de generación $P_{fc}=0$ en misión 1 x larga

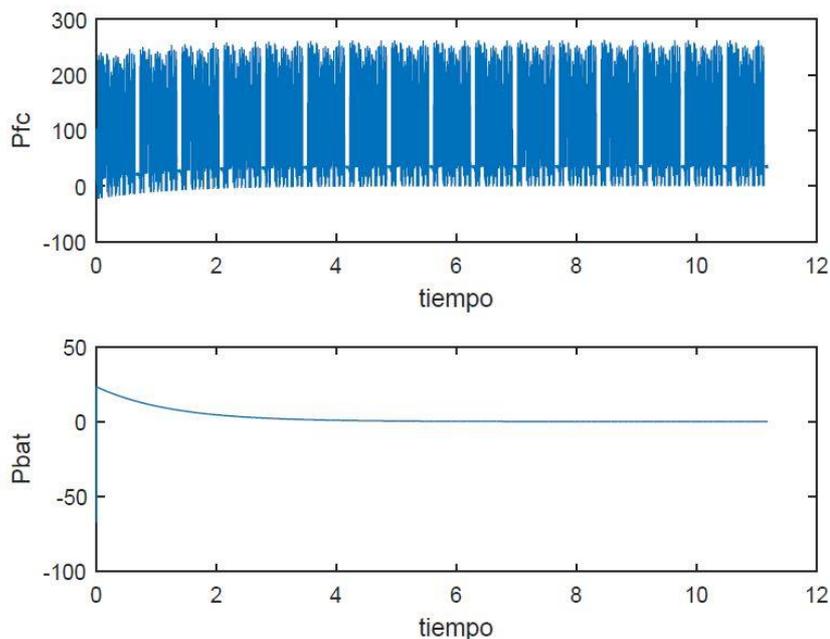


Figura 32: Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en predictivo con coste de generación Pfc=0 en misión 1 x larga

De las gráficas podemos ver como el Soc ha variado desde 80 hasta 60 ya que se ha cambiado la referencia, y por tanto el control actúa correctamente. Una vez se ha alcanzado este valor de Soc, se deja de demandar potencia a las baterías y por tanto el Soc permanece en 60 todo el resto del tiempo. Por otro lado, la potencia demandada a la pila es algo menor al principio, ya que la batería también ayuda, y aumenta en cuanto las baterías se quedan a 60% de carga, ya que asumen el abastecimiento total de la potencia demandada. Con esto el consumo total de esta simulación ha sido 5462 Kj.

Lo siguiente que se ha simulado es cuando la generación con la pila es muy grande y con la batería el coste es muy pequeño. En este caso ocurrirá lo contrario al caso anterior, no se demandará ningún tipo de potencia a la pila de combustible y serán las baterías quienes tengan que suministrar estas potencias. Las gráficas se exponen abajo:

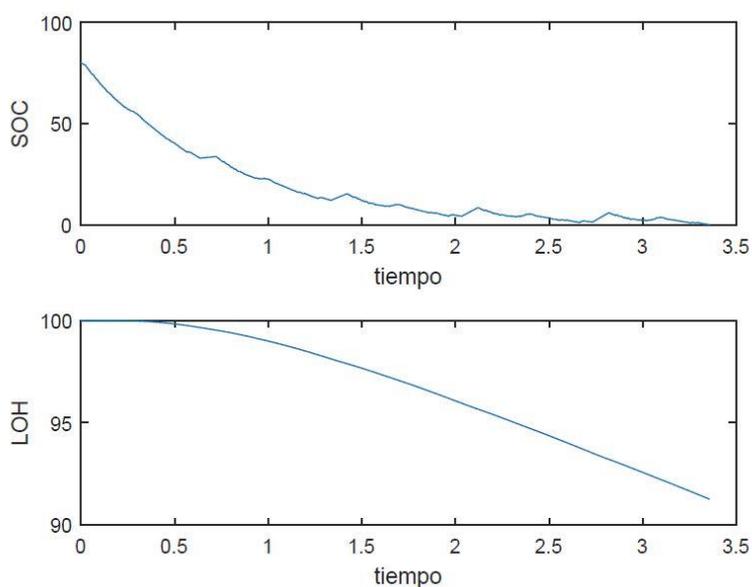


Figura 33: Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con coste de generación Pbat=0 en misión 1 x larga

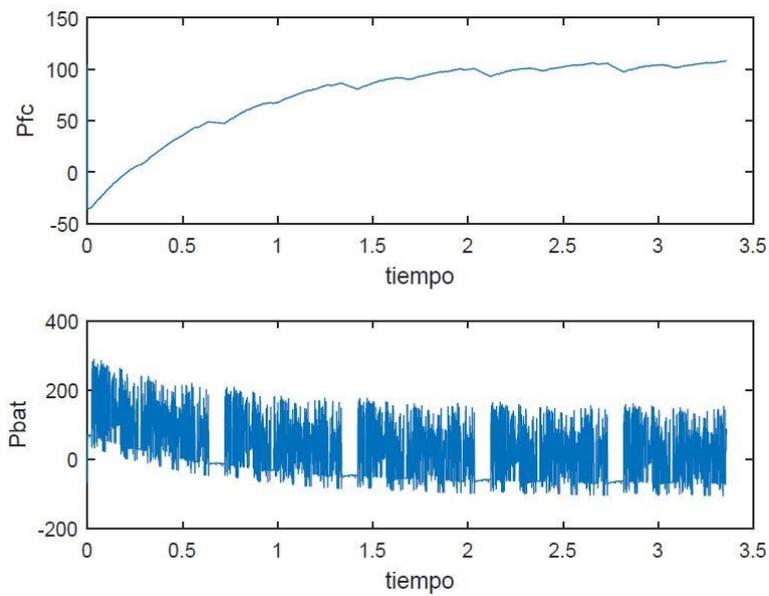


Figura 34: Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en predictivo con coste de generación Pbat=0 en misión 1 x larga

Se ve como al demandar muy poca potencia a la pila, son las baterías las encargadas de suministrar la demanda provocando que se queden sin carga y no terminando la misión. Esto ocurre a pesar de que la potencia de las baterías disminuye en el tiempo y la de la pila aumenta, pero no termina de ser suficiente y las baterías llegan a descargarse.

El siguiente experimento es añadir peso dentro de la función de coste a los incrementos de la variable de control. Se han hecho dos ejemplos, poniéndole un peso de 10 y un peso de 1000. Hay que recordar que la variable de control es exclusivamente la potencia que se demanda a la pila de combustible y que la batería se obtiene como una resta entre la demandada y la variable de control. Para esta prueba se van a representar exclusivamente los valores de los incrementos que es el motivo de la misma:

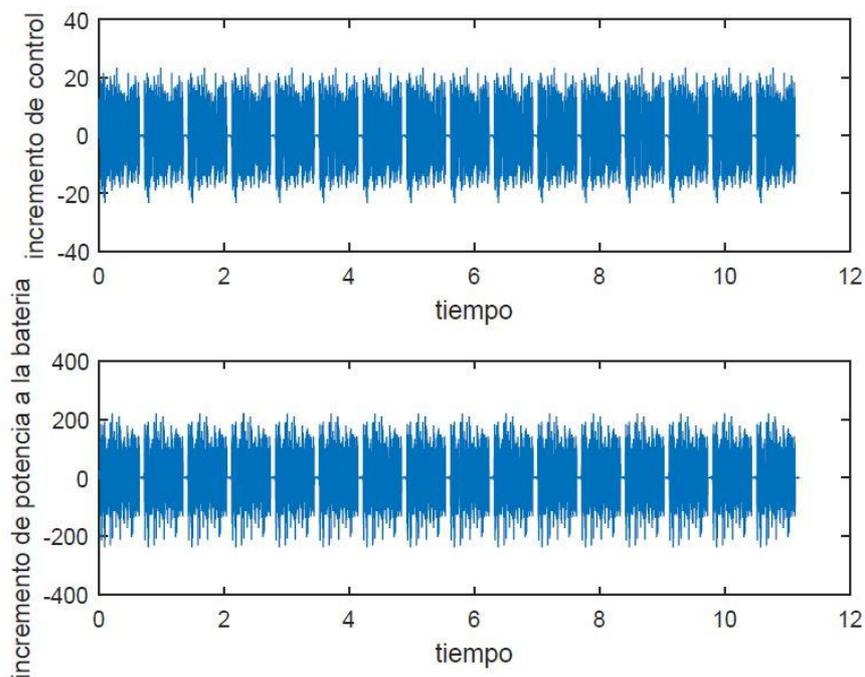


Figura 35: Inc de Pbat (W) y Pfc (W) frente al tiempo (h) en misión 1 x larga, predictivo con peso de $inc=10$.

Cuando se hizo la prueba 1 sin tener en cuenta los incrementos de control, los incrementos para la variable de control eran de casi 150, mientras que los de la batería estaban en torno a 100. Al poner pesos de incremento a la variable de control, éstos han disminuido mucho, se puede ver en la gráfica que rondan los 20, es decir el control ha actuado de forma correcta tal y como se buscaba. Pero, al hacer esto aparece el problema de que la potencia de las baterías no sea una variable de control. Al disminuir los incrementos en la potencia que se demanda a la pila, son las baterías las que soportan estos incrementos, ya que el control está realizado para que siempre se satisfaga la demanda, y por tanto ganaremos en los incrementos de la pila, pero aumentarán mucho los de las baterías. El consumo total para esta prueba ha sido de 5176 Kj.

Si aumentamos el peso hasta 1000:

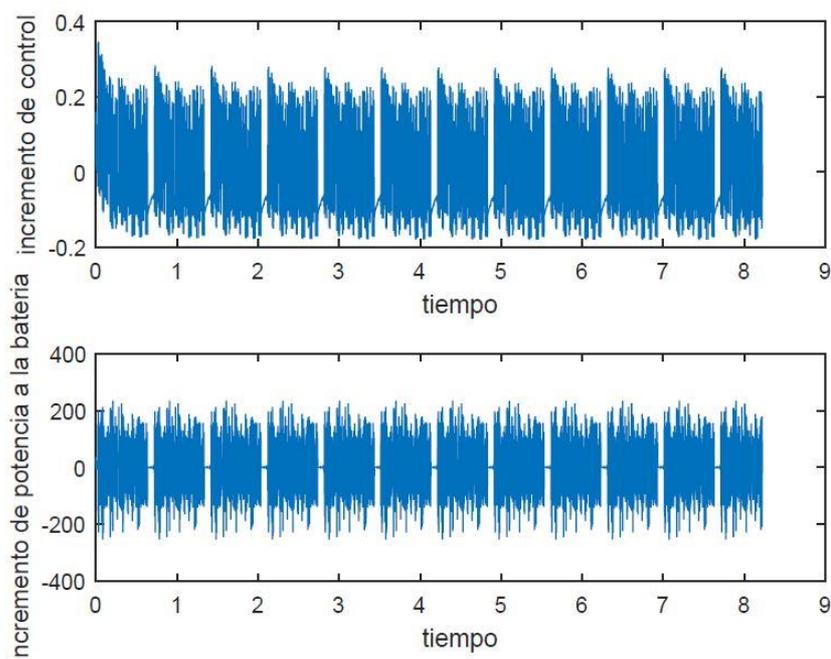


Figura 36: Inc de Pbat (W) y Pfc (W) frente al tiempo (h) en misión 1 x larga, predictivo con peso de

inc=1000.

Los incrementos de la variable de control se hacen muy muy pequeños, tan pequeños que las baterías ceden muchísima potencia para compensarlo. Cuando las potencias demandadas varían, el control evita que la pila de hidrógeno lo haga de forma brusca, por lo que es la batería quien tiene que ceder mucha potencia ya que la pila no llega a suministrar todo lo que se demanda, llegando el punto que se terminan agotando y por tanto no se termina por completo la misión.

Estas son todas las pruebas realizadas para el control predictivo sin restricciones, las siguientes serán realizadas para un control predictivo con restricciones.

Se han realizado 3 pruebas diferentes, cada una de ellas es un tipo de restricción, obviando las otras, es decir se ha simulado con restricciones en la salida, con restricciones en el estado de carga de forma independiente, y con restricciones en el incremento de control también de forma independiente.

El primero que se expone de ellos es restricciones en la salida.

En esta prueba se han limitado tanto con cota superior como con cota inferior la salida de control. El objetivo de esto es que no se demanden a la pila de combustible potencias demasiado grandes o negativas para las que la pila no está preparada, alargando así la vida útil de la misma.

Con esta idea se han realizado dos simulaciones diferentes, ambas se han hecho restringiendo la salida a un mínimo de cero y a un máximo de 150, por lo que en caso de una demanda superior a este valor será la batería quien tenga que aportar la diferencia. La diferencia entre las dos pruebas realizadas es el horizonte de predicción, la primera se ha hecho para un horizonte de 10 segundos y la otra para un horizonte de 50 segundos.

En primer lugar se representan las gráficas para un tiempo de predicción de 10 segundos:

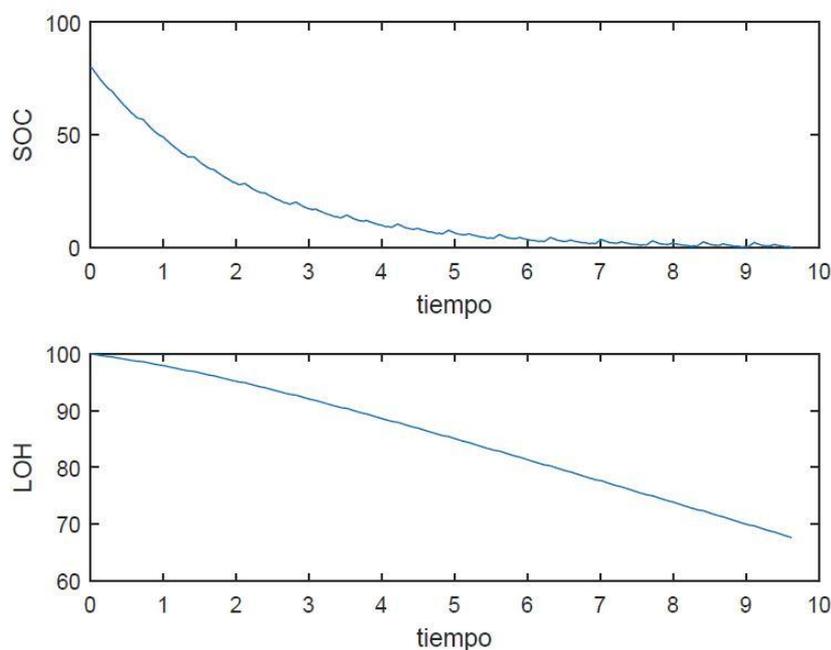


Figura 37: Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con restricción de salida de control horizontes =10, misión 1 x larga

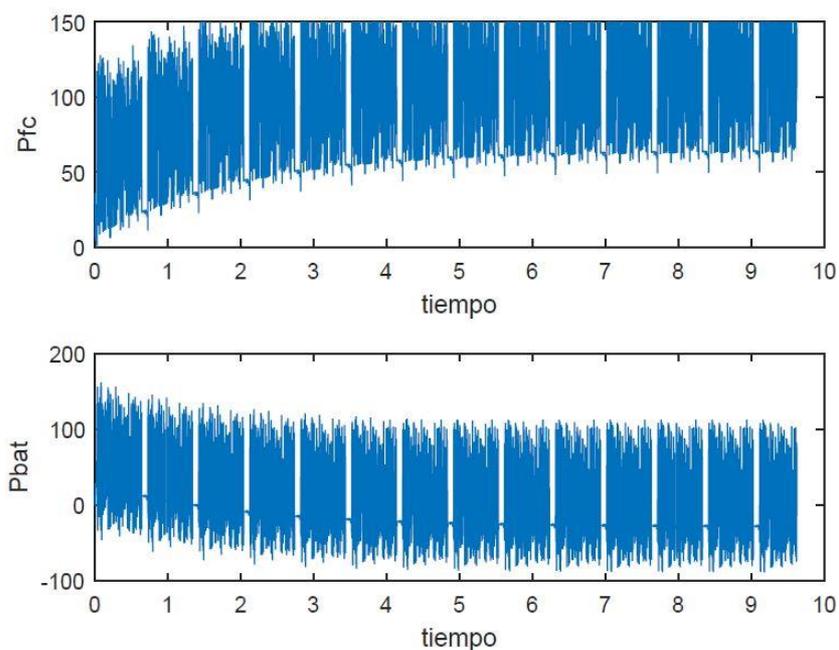


Figura 38: Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en predictivo con restricción de salida de control horizontes =10, misión 1 x larga

Lo primero que se aprecia en las gráficas es como el control ha realizado su cometido y todos los valores de la variable de control están entre los valores marcados.

Si se analiza la gráfica del Soc, se observa como la batería ha llegado a descargarse por completo, y es que el imposibilitar que la pila de combustible pase de un valor obliga a que la batería tenga que suministrar más potencia de la que sería deseable en un principio, y el sistema no es capaz con este tiempo de predicción de prevenir este problema y por tanto se descarga por completo.

A continuación, se representan las gráficas para un tiempo de predicción de 50:

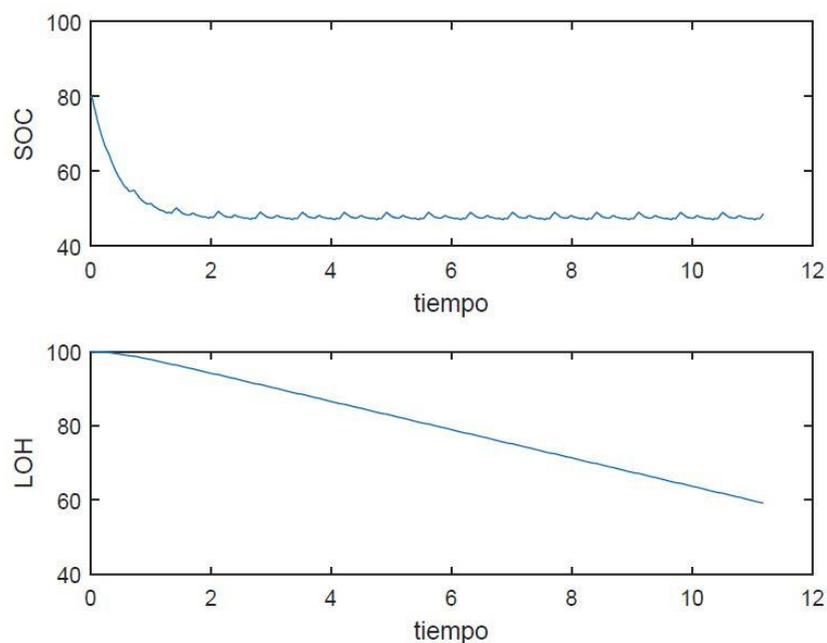


Figura 39: Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con restricción de salida de control horizontes =50, misión 1 x larga

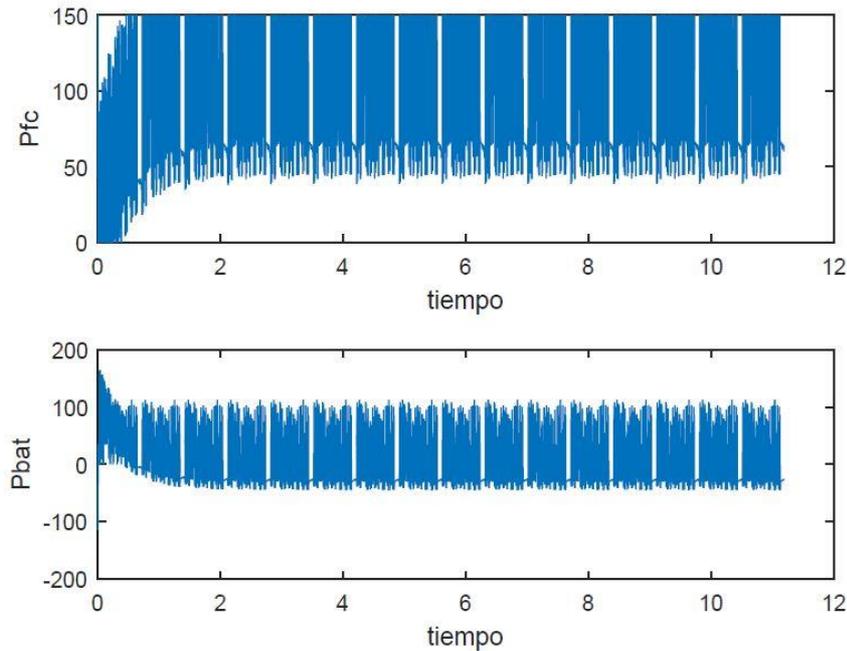


Figura 40: P_{bat} (W) y P_{fc} (W) frente al tiempo (h) en predictivo con restricción de salida de control horizontes $=50$, misión 1 x larga

Se observa como en este caso la batería no llega a descargarse completamente, ya que el sistema ha sido capaz de predecir con mucha más antelación la descarga de la batería y ha actuado en consecuencia. Es decir, ha usado con más prevención la pila de combustible aunque no fuera totalmente necesario llevarla al máximo valor permitido, en este caso 150. Comparando las gráficas de las potencias demandadas a la pila, se puede observar también este suceso se aprecia que hay muchos más momentos que la pila cede 150, momentos en los que anteriormente cedía menos potencia y que ahora debido a la predicción del control, se solicita 150 desde mucho antes. Todo esto provoca que la batería no baje de un 45% de carga. El consumo final para esta prueba es de 5252 Kj.

La siguiente prueba realizada es la de restringir los valores del estado de carga de la batería, el objetivo de este experimento es que la batería siempre este en un régimen de cargas intermedio y nunca llegue a estar sobrecargada ni totalmente vacía. Con esta idea se han limitados los estados de carga entre un 85% como límite máximo y un 15% como límite mínimo. Los resultados obtenidos son los siguientes:

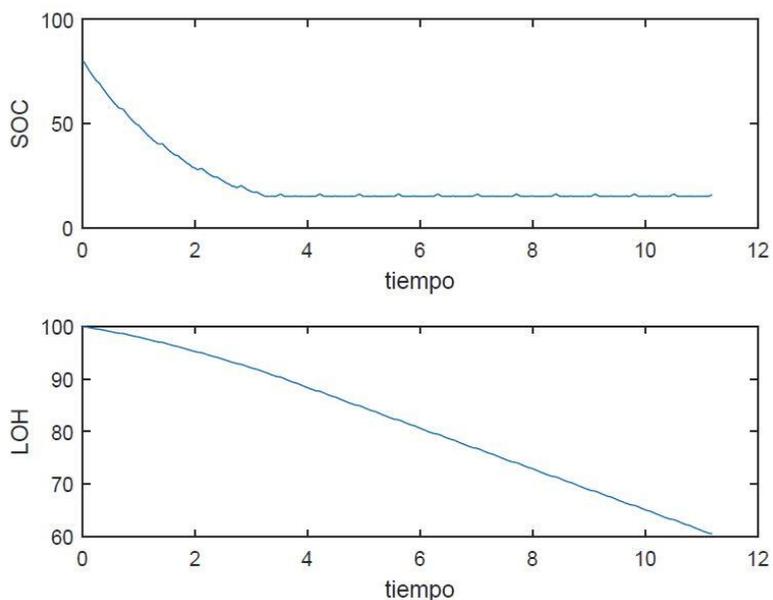


Figura 41: Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con restricción de carga de Soc, misión 1 x larga

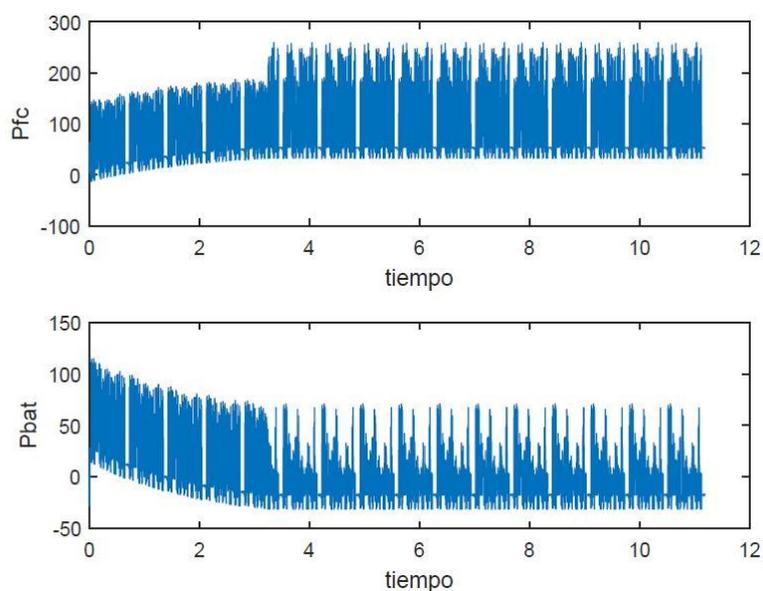


Figura 42: Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en predictivo con restricción de carga de Soc, misión 1 x larga

Se aprecia en las gráficas de las cargas como el Soc no baja de 15 y por supuesto no sube de 85, por lo que el control está actuando como se le ha pedido y está funcionando correctamente.

Para evitar que la batería baje de esta carga se puede ver en la gráfica de las potencias como el momento en que el Soc de la batería se acerca a 15 las potencias demandadas a la batería disminuyen muchísimo incluso haciéndose negativas en muchos instantes, mientras que en el mismo instante las potencias de la batería crecen mucho para poder satisfacer la demanda.

A parte de esto, el sistema se comporta de la manera esperada y el consumo total de la misión es de 5255 Kj.

El siguiente experimento realizado es la de restricción en los incrementos de la variable de control, que tiene como objetivo nuevamente alarga la vida útil de la pila de combustible. La prueba se ha realizado restringiendo el incremento de la variable de control en un máximo de 100 hacia arriba y hacia abajo.

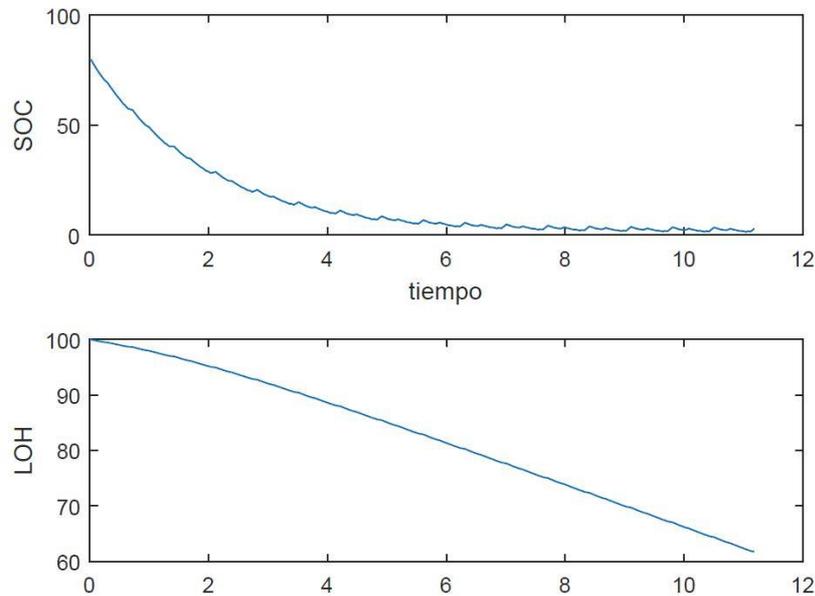


Figura 43: Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con restricción de inc de control, misión 1 x larga

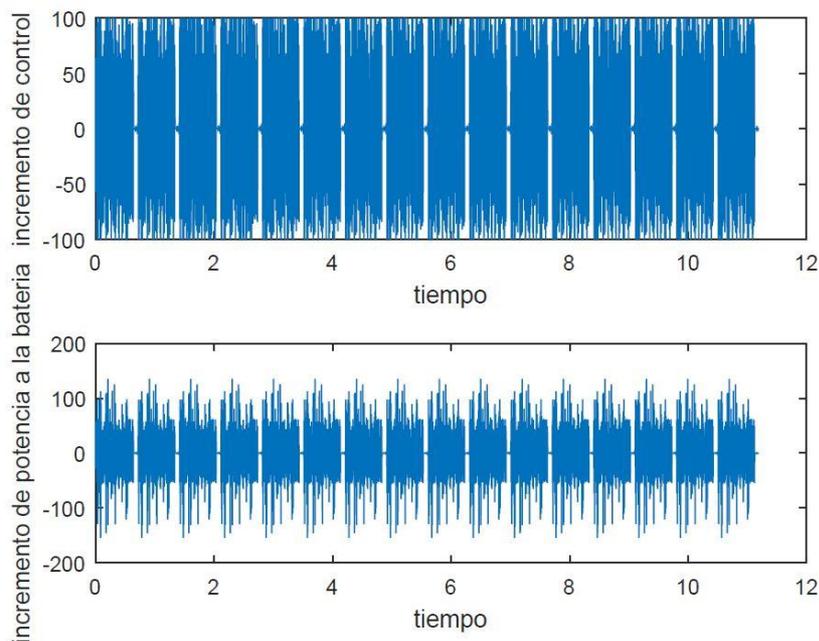


Figura 44: Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en predictivo con restricción de inc de control, misión 1 x larga

En los resultados obtenidos se puede comprobar como el control funciona correctamente y los incrementos de control no superan el valor de 100 tanto hacia arriba como hacia abajo. Esto provoca, como ocurría en el caso en el que se añadía mucho peso a los incrementos en la función de coste, que el estado de carga de la batería caiga muy deprisa. En este caso no llega a descargarse por completo debido al peso que tiene dentro de la función de coste que termina primando y hace mantener a la batería con muy poca carga, pero sin llegar a descargarse por completo. Con todo esto el coste de la realización de la misión es de 5171Kj.

La última prueba realizada es la realización de esta misión, pero de la forma más real posible. Esta última

misión tiene en cuenta los tres tipos de restricciones, con unos horizontes de predicción y control iguales a 10 y con los valores de los pesos lo más ajustado posible para disminuir el consumo, tarea que se ha hecho de forma experimental y además teniendo en cuenta el peso de los incrementos de control en la función de coste. En general los pesos se han suavizado con respecto a las restricciones individuales ya que sino el sistema no es capaz de completar la misión. Con todo esto el consumo total obtenido es de 5207 Kj.

Los resultados obtenidos para esta prueba se muestran a continuación:

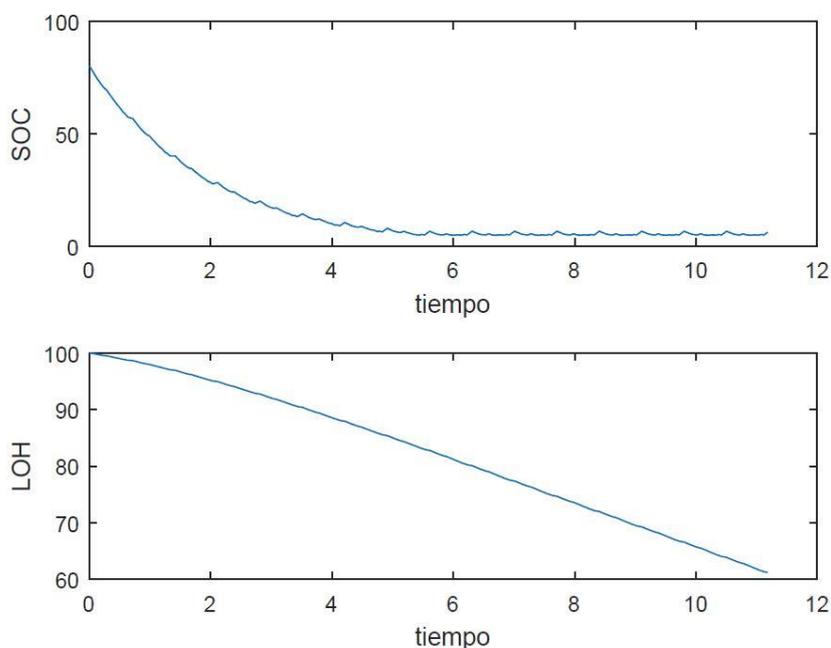


Figura 45: Soc (%) y Loh (litros) frente al tiempo (h) en predictivo con todas las restricciones, misión 1 x larga

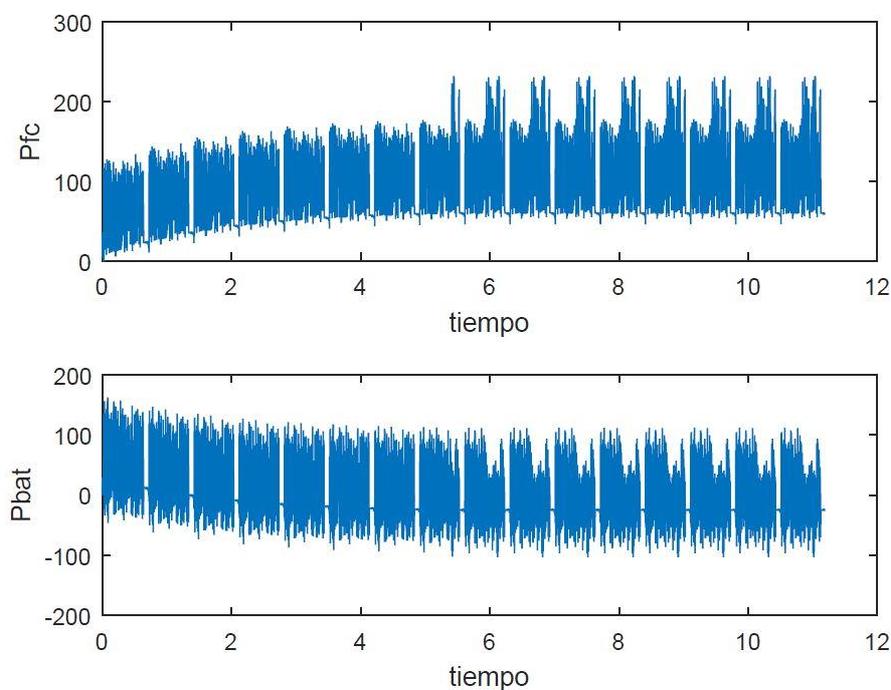


Figura 46: Pfc (W) y Pbat (W) frente al tiempo (h) en predictivo con todas las restricciones, misión 1 x larga

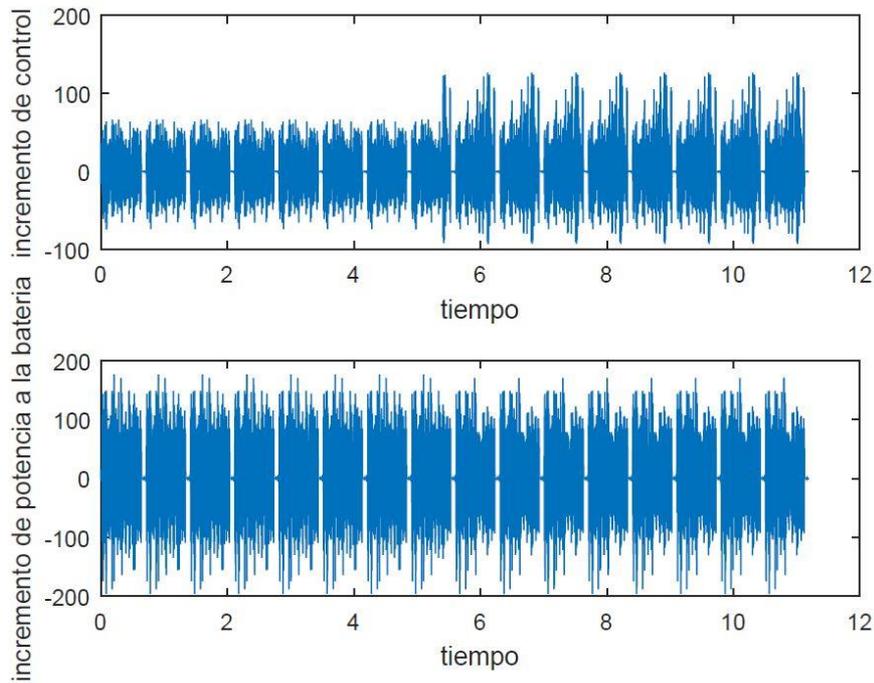


Figura 47: incrementos de Pbat (W) y Pfc (W) frente al tiempo (h) en predictivo con todas las restricciones, misión 1 x larga

Tras el análisis de todas estas pruebas, más abajo se exponen los resultados de consumos de todas las estrategias pasivas, del control ECMS, del predictivo más básico en el que se intentó disminuir el consumo al máximo y el predictivo con todas las restricciones en la misión más larga.

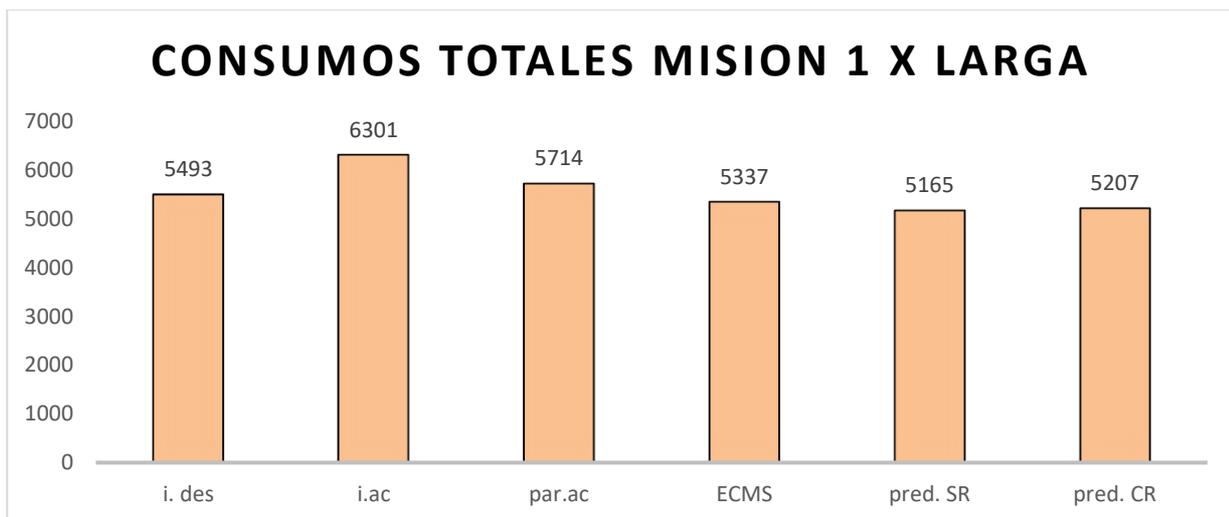


Tabla 10: Resumen de consumos de todas las estrategias de control (Kj)

En esta tabla se resumen los consumos de las principales estrategias y en las pruebas más óptimas de cada una. Como resumen de todas ellas se puede ver que las estrategias pasivas, como era de esperar, son las que mayor consumo tienen, ya que no tienen un control con el objetivo de optimizarlo al máximo. Además, dentro de las

mismas la que mejor resultados ha dado en general para todas las misiones es la de inicialmente desacoplado.

Por otro lado, el control ECMS ha dado buenos resultados, también algo esperado, ya que es una estrategia que busca a optimización de las distribuciones y por tanto debía mejorar los consumos de las estrategias pasivas.

Como mejor optimización se tiene el control predictivo sin restricciones superando en algo más de un 3% el resultado obtenido por el control ECMS y en casi un 6% el consumo obtenido para el inicialmente desacoplado. Hay que tener en cuenta en este punto, que el control ECMS se hizo buscando principalmente la optimización, y que el estado de carga no influye en gran medida en el control, mientras que en el predictivo, además de ser el que menos consumo final ha tenido tiene en cuenta en su función de coste el estado de carga de la batería.

El predictivo con restricciones también ha tenido muy buenos resultados, superando en consumo al resto de estrategias excepto al predictivo sin restricciones.

Como resumen general se puede deducir que el control predictivo es una buena estrategia de control, que da muy buenos resultados finales. Además no necesita de un conocimiento previo de la misión como si es el caso del control ECMS, lo que es una gran ventaja a la hora de hacer una implementación real. Al mismo tiempo es muy sencillo de ampliar y tiene la ventaja de que se le pueden añadir restricciones. Como principal pega habría que poner que es muy dependiente del modelo que se diseñe, y que por tanto hay que tener acceso a los sistemas que se quieran controlar, para poder hacer unos modelos lo más reales posibles para que el control funcione adecuadamente.

4 CONCLUSIONES

Como objetivo del trabajo se propuso realizar diferentes estrategias de control para distribución de potencias en robots. Se han desarrollado diferentes controles como son las estrategias pasivas, el control ECMS y el control predictivo y se han realizado pruebas en distintas misiones para cada uno de ellos.

Tras las comparativas, se puede llegar a la conclusión de que dentro de las estrategias pasivas, la que mejor resultados da desde el punto de vista del consumo es la estrategia de inicialmente acoplado. Que ha mejorado al resto en casi todas las misiones.

El control EMCS tiene menos consumos que las estrategias pasivas, pero una gran dependencia de la elección de los factores equivalentes constantes, teniendo en cuenta también la dificultad del cálculo de los mismos, que tras su cálculo suele ocurrir la necesidad de tener que ajustarlos manualmente.

El control predictivo es el que mejor consumo ha obtenido, y es el que más opciones y más posibilidades admite. Ya que es posible añadir restricciones, cambiar los pesos fácilmente dentro de función de coste, se podrían añadir más variables de control, como la potencia demandada a la batería, de formas más o menos sencilla. Como principales inconvenientes tiene la necesidad de realizar un modelo que se asemeje lo máximo posible a la realidad para que el control funcione adecuadamente, y para el caso con restricciones el aumento de la carga computacional es muy considerable.

Como trabajos futuros se propone añadir otra fuente de potencia como puede ser un supercondensador, y aplicar estas mismas estrategias, teniendo que manejar más variables de control, o realizar el control predictivo para estas dos fuentes pero teniendo como variables de control la potencia de la pila y la de la batería.

BIBLIOGRAFÍA

L. Guzella; A. Sciarretta, vehicle propulsion systems. Introduction to modeling and optimization. second edition.

J.L Sampietro; R.Costa, Control Predictivo Económico de vehículos híbridos basados en pilas de combustible.

E.F. Camacho; C. Bordons, Model predictive Control. Second edition.

B. de Jager; J. Kessels; Optimal Control of hybrid vehicles.

T.J. Bohme; B. Frank; Hybrid systems, optimal control and hybrid vehicles.

C. Bordons; M.A. Ridao; A. Pérez; A. Arce; D. Marcos; Model predictive control for power management in hybrid fuel cell vehicles.

J.L Sampietro; R.Costa; V. Puig; Estrategia de gestión de la energía en vehículos eléctricos con pila de combustible y sistema de almacenamiento híbrido utilizando control predictivo económico.

S.A.Castaño; controlautomaticoeducación.com

J.L. Rosero Estrategia de control de modelo predictivo para el despacho y almacenamiento de energía renovable en sistemas híbridos.