

Trabajo de Fin de Máster

Máster en Ingeniería Industrial

Implementación de un sistema de energía sostenible en una plataforma robótica: diseño de potencia y energía

MEMORIA

Autor: Judit Martí López
Director: Attila Peter Husar
Convocatoria: Junio 2020



Escuela Técnica Superior
de Ingeniería Industrial de Barcelona



Resumen

Este proyecto trata de implementar una celda de combustible basada en una membrana intercambiadora de protones sobre una plataforma robótica ya existente. La idea de este proyecto es hacer un estudio para sustituir la alimentación actual de un robot con una celda de combustible, para así tener las ventajas que proporciona.

Estas ventajas son un sistema más limpio, ya que necesita hidrógeno más el oxígeno del aire mismo para sólo dar como producto agua, también disminuye el tiempo de carga del robot ya que con las baterías este tiempo es mucho más extenso. Una celda de combustible hace que solo se necesite el tiempo de recarga del hidrógeno, que es menor que en baterías, además de poder hacer jornadas más largas sin tener que recargar. Además, se ha querido hacer un sistema modular, para que así se pueda quitar y poner este sistema según las necesidades, como también ser aprovechado para otros proyectos.

En esta memoria se pueden encontrar explicaciones de los componentes básicos de este proyecto, que han sido la celda de combustible, la batería y las bombonas de hidrógeno. Como se ve, el sistema no sólo se basa en la celda de combustible, sino que se ha querido hacer un sistema híbrido con una batería, que se recarga con la propia celda de combustible, así no hay que parar a recargarla. Todo esto se ha calculado para dimensionarlo correctamente y así escoger los componentes con las capacidades correctas.

Se ha hecho un análisis exhaustivo con datos obtenidos de unas pruebas que se hicieron con el robot al principio del proyecto. Se han planteado tres casos distintos con datos modificados para así poder estudiar distintas opciones, ya que por la situación actual no se han podido tener más pruebas con el robot. Dentro de estos tres casos, se han estudiado, además, tres casos de hibridación distintos, en función de cuánto trabajan la celda de combustible y la batería en cada momento.

Así, se ha podido elegir uno de los casos más exigentes, para dimensionar correctamente el sistema. Finalmente, se ha hecho un estudio de los costes de cada caso, para también tenerlo en cuenta en la decisión final.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	2
1. GLOSARIO	4
2. PREFACIO	5
2.1. Origen y motivación del trabajo	5
2.2. Requerimientos previos	5
3. INTRODUCCIÓN	7
3.1. Objetivos del proyecto	7
3.2. Alcance del trabajo	8
4. DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES	9
5. DESCRIPCIÓN DEL ROBOT MÓVIL	11
6. CELDA DE COMBUSTIBLE	13
6.1. Tipos de celdas de combustible y elección de uno.....	15
6.2. Análisis del mercado actual de celdas de combustible.....	16
7. SISTEMA HÍBRIDO DE CELDA DE COMBUSTIBLE Y BATERÍA	17
8. ALMACENAMIENTO DE H₂	18
9. ANÁLISIS DE LOS DATOS Y CÁLCULOS DE CAPACIDADES	20
9.1. Reducción del número de muestras	21
9.2. Ciclos	22
9.3. Celda de combustible en el caso de régimen constante	23
9.4. Celda de combustible en el caso de 30% y 70%.....	26
9.5. Áreas.....	31
9.5.1. Diferencia de áreas.....	31
9.5.2. Área a máxima potencia durante 10 minutos.....	32
9.6. Batería	33
9.7. Consumo de hidrógeno	43
9.7.1. Curvas de las celdas de combustible escogidas.....	43
9.7.2. Cálculo de la capacidad de almacenamiento y autonomía	45
10. ELECCIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE,	

LA BATERÍA Y EL ALMACENAMIENTO DE H₂	47
11. PRESUPUESTO	53
CONCLUSIONES	54
AGRADECIMIENTOS	55
BIBLIOGRAFÍA	56

1. Glosario

Ánodo: el electrodo donde se produce la reacción de oxidación (pérdida de electrones). Es el terminal negativo.

Catalizador: sustancia química que acelera una reacción química sin participar en la reacción. Después de la reacción puede ser recuperada de la mezcla de la reacción y es químicamente inalterada. El catalizador disminuye la energía necesaria de activación de los reactantes, haciendo que la reacción sea más rápida o a una temperatura menor. Normalmente, en celdas de combustible, es de polvo fino de platino. El catalizador es rugoso y poroso, por lo que el área superficial máxima puede exponerse.

Cátodo: es el electrodo en el que se produce la reacción de reducción (ganancia de electrones). Es el terminal positivo.

Electrolito: sustancia por la que se conducen los iones cargados desde un electrodo al otro en una celda de combustible.

Fuel Cell: celda de combustible.

Membrana: la capa en una celda de combustible que separa y actúa como electrolito, así como barrera que separa los gases en el ánodo y el cátodo.

PCB: printed circuit board, placa de circuito impreso.

PEMFC: Proton-exchange membrane fuel cell. Celda de combustible que incorpora una membrana de polímero sólido que se usa como electrolito. Los protones son transportados del ánodo al cátodo a través de la membrana, que a su vez impide el paso de los electrones. La temperatura de operación es de 60 a 100°C.

Reactantes: sustancias químicas que se unen o dividen entre sí para transformarse en nuevas sustancias, llamadas productos. Están presentes antes que se produzca la reacción química.

Stack de celda de combustible: conjunto de celdas de combustible individuales conectadas en serie y agrupadas en un bloque compacto. La conexión en serie hace que el voltaje final del stack sea la suma de los voltajes individuales de cada celda.

2. Prefacio

2.1. Origen y motivación del trabajo

El trabajo surgió de una oferta del Instituto de Robótica e Informática Industrial (instituto de investigación adjunto de la Universidad Politècnica de Catalunya y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas) en el que se buscaba a un estudiante de máster para hacer el diseño del sistema basado en una celda de combustible.

Una de las ideas que promueven este proyecto son aplicaciones similares, como el uso de celdas de combustible en carretillas elevadoras, lo que los convierte en vehículos más ecológicos, productivos y rentables. Utilizan, en su mayoría, PEMFC (proton-exchange membrane fuel cell), que operan a una temperatura baja en comparación con otros tipos de celda de combustible y pueden soportar cambios repentinos en la salida de energía, lo que las hace ideales para alimentar la aceleración en vehículos. Entre los beneficios para los vehículos montacargas están que no se necesita cambiar el propio vehículo, solo sustituir las baterías de plomo que tienen por las celdas de combustible, se ahorra tiempo al eliminar la recarga y cambios de batería, lo que aumenta la productividad, esto es porque las celdas de combustible de hidrógeno se recargan más rápido. Además, estas celdas de combustible solo generan electricidad, exceso de calor y agua, lo que las hace mucho más sostenibles que las baterías.

Otra de las ideas para este proyecto son los robots autónomos para el transporte de materiales en almacenes. La idea es juntar estas dos aplicaciones y tener un robot para transporte alimentado por una celda de combustible.

Así, la idea principal es implementar un sistema de celda de combustible en un robot ya existente. Esto se ha querido hacer para tener un sistema mucho más limpio que basado en baterías, ya que consume hidrógeno y solo tiene agua como producto. También se ha buscado esta implementación para tener jornadas de trabajo del robot más largas, sin tener que recargar cada poco tiempo, para después tener una carga rápida y fácil. Además, también se ha querido hacer el sistema modular, para así, poder ponerlo y quitarlo en función de las necesidades.

2.2. Requerimientos previos

Se escogió este proyecto por la formación y experiencia previas que se habían tenido. Ya se había trabajado en diseño mecánico, tanto en la universidad, en una asignatura basada en ello, como en un trabajo anterior, en el que se hacían proyectos de cero y se diseñaban

completamente. También se pedía en el trabajo experiencia en diseño de PCBs y electrónica en general, lo que también era un punto en el que se tenía experiencia, ya que se había trabajado en un puesto anterior en una empresa. Finalmente, esta parte no se ha realizado como parte de este proyecto, ya que se excedía del tiempo disponible.

Para concluir, es necesario para este proyecto un conocimiento bastante amplio de diseño mecánico, como también de electrónica y del montaje de cero de un proyecto, ya que se han elegido todos los componentes con una razón, se ha dimensionado y especificado los requerimientos.

3. Introducción

3.1. Objetivos del proyecto

Este proyecto se basa en la creación de un sistema de celda de combustible para una aplicación móvil, en un robot existente. Esta celda de combustible será de tipo PEM (Proton-Exchange Membrane).

En cuanto a los objetivos del proyecto, se han centrado en el diseño de potencia y energía. El proyecto en si es extenso, ya que se ha de crear toda la parte física alrededor de la celda de combustible, tanto de manera mecánica como electrónica, con sus componentes necesarios. Finalmente, los objetivos definidos para este proyecto han sido los siguientes:

- Analizar de manera más profunda los datos que se han tenido del robot, para así tomar decisiones sobre los distintos componentes con un razonamiento basado en los requerimientos reales del robot.
- Definir la potencia de la celda de combustible, en base a los datos analizados, un estudio del mercado actual con diferentes opciones y un estudio de lo que se necesita para este proyecto.
- Definir la capacidad de la batería, también gracias al análisis realizado con los datos que se han obtenido de hacer unas pruebas con el robot. Con este análisis se va a estudiar el tipo de hibridación más adecuado para las necesidades del proyecto, definiendo así la capacidad de la batería y la celda de combustible en conjunto.
- Definir al tipo y capacidad de almacenamiento de hidrógeno. También en función de las elecciones anteriores y del tipo de proyecto en el que se está trabajando, ya que tiene unos requerimientos concretos que harán que la elección del tipo de almacenamiento cambie.
- Definir las especificaciones del sistema, es decir, los voltajes, potencias, dimensiones, peso, autonomía, etc.
- Crear la lista de materiales utilizados en esta parte del proyecto, para así facilitar la continuidad de este, ya que el proyecto se basa en una parte de otro más grande.

3.2. Alcance del trabajo

Como se ha indicado previamente este trabajo se enmarca en un proyecto más extenso, el cual se ha dividido en tres etapas principales: diseño de potencia y energía, diseño mecánico y diseño de electrónica y control.

El presente trabajo se ha centrado entonces en la parte de diseño de potencia y energía, es decir, en el análisis y definición de los requerimientos de potencia y autonomía del robot, elección de los componentes, dimensionado y elaboración de una lista de componentes, incluyendo además el factor económico en este análisis.

4. Definición de los requerimientos y especificaciones

Al empezar un proyecto se deben definir algunos apartados para ir guiando las decisiones que se van a tomar. Es la etapa fundamental para empezar un proyecto. Se parte de la idea de lo que se quiere realizar, pero sin concretar lo suficiente. Así se definen las acciones que se van a llevar a cabo para definir el proyecto de manera completa y precisa.

A continuación, se puede ver una tabla con las especificaciones, según si son requerimientos (R, es decir, especificación necesaria) o deseos (D, no es necesaria, pero mejoraría algunos aspectos).

Tabla 1. Especificaciones del proyecto.

CONCEPTO	TIPO	DESCRIPCIÓN
Dimensiones	D	El mínimo volumen posible , que está limitado solo por la base que es el robot, solo se puede crecer de manera ilimitada, dentro de unos límites, en altura
	D	Mínimo peso , aunque el robot tenga un límite de 140 kg, se quiere reducir al máximo para poder mover el módulo cómodamente
Energía	R	El robot será alimentado por la celda de combustible y tendrá una batería en paralelo para cubrir las rampas de aceleración de los motores
	R	Mayor autonomía posible , que se mide según la cantidad de hidrógeno almacenado. Así, según la potencia que utiliza la pila en cada instante se puede saber el consumo de hidrógeno de ésta, en l/min. En función de las horas que se quieren de autonomía, se tiene la cantidad de hidrógeno que se debería implementar al sistema
Materiales	R	Ligeros y resistentes a impactos , al ser un proyecto móvil.
Funciones	D	Modular , es decir, se puede poner y quitar del robot fácilmente, para ser usado de manera externa si se quiere
	R	Facilidad de acceso a los componentes
	R	Facilidad de recarga de hidrógeno
	R	Maximizar la seguridad dentro de lo posible
	D	Standalone system , este tipo de sistema consiste en un sistema independiente del robot, que se pueda quitar y ser un sistema individual que funciona solo. Así, para conseguirlo, la idea es tener la celda de combustible con una batería adicional a la propia del robot

	(de 2 kW), para así alimentar el robot con la celda o la batería en función de las necesidades.
--	---

Como primera idea estos requerimientos son suficientes. A partir de aquí, se pueden empezar a definir algunos apartados, según los datos proporcionados por los responsables del robot. Por eso, en los siguientes apartados, se hace un análisis exhaustivo de estos datos, para así empezar a tomar decisiones. Esto finalmente ha sido una gran parte del proyecto.

5. Descripción del robot móvil

El robot consta de un cuerpo compacto y bajo, por ello se ha decidido hacer el sistema en la parte superior del robot. A continuación, se ve como es el robot.

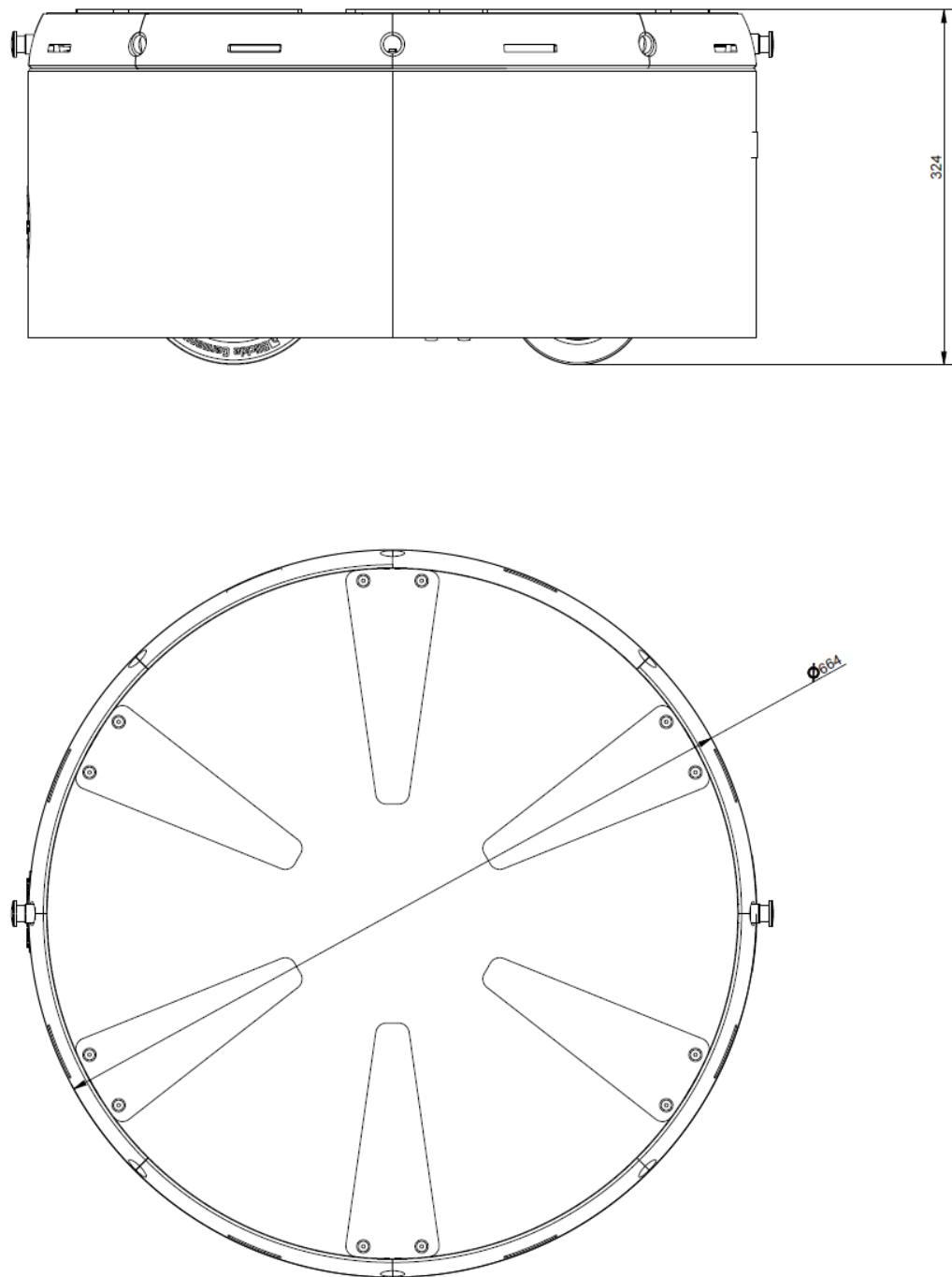


Ilustración 1. Forma del robot para ver el espacio disponible. [Imagen de los responsables del robot]

Como se ve, mide 664 mm de diámetro y 324 mm de alto, incluidas las ruedas. Consta de tres motores, uno para la rueda derecha, uno para la rueda izquierda y uno para el eje central, que funciona haciendo girar el robot. Así, se ha decidido hacer un sistema modular, ya que irá instalado en la parte superior del robot y se quiere que se pueda poner y quitar de manera fácil, que todos los componentes sean accesibles.

6. Celda de combustible

Una celda de combustible convierte la energía química del hidrógeno y oxígeno en corriente eléctrica. Las celdas de combustible son dispositivos que convierten el hidrógeno gas directamente en corriente eléctrica de bajo voltaje. La celda no tiene partes móviles.

El proceso es el contrario del método electrolítico de dividir el agua en hidrógeno y oxígeno. En la celda de combustible, el terminal del cátodo está cargado de manera positiva y el del ánodo, negativa. Estos electrodos están separados por una membrana. El gas hidrógeno se convierte en electrones y protones en el ánodo. Los protones pasan a través de la membrana al cátodo, dejando los electrones, los cuales pasan por un circuito externo, creando así un flujo de corriente continua entre los terminales. Los iones de hidrógeno, los electrones y el oxígeno se combinan en el cátodo y forman agua, el único producto del proceso.

A continuación, se muestran las reacciones con el orden indicado anteriormente, además de unas imágenes que representan el funcionamiento de las celdas de combustible.

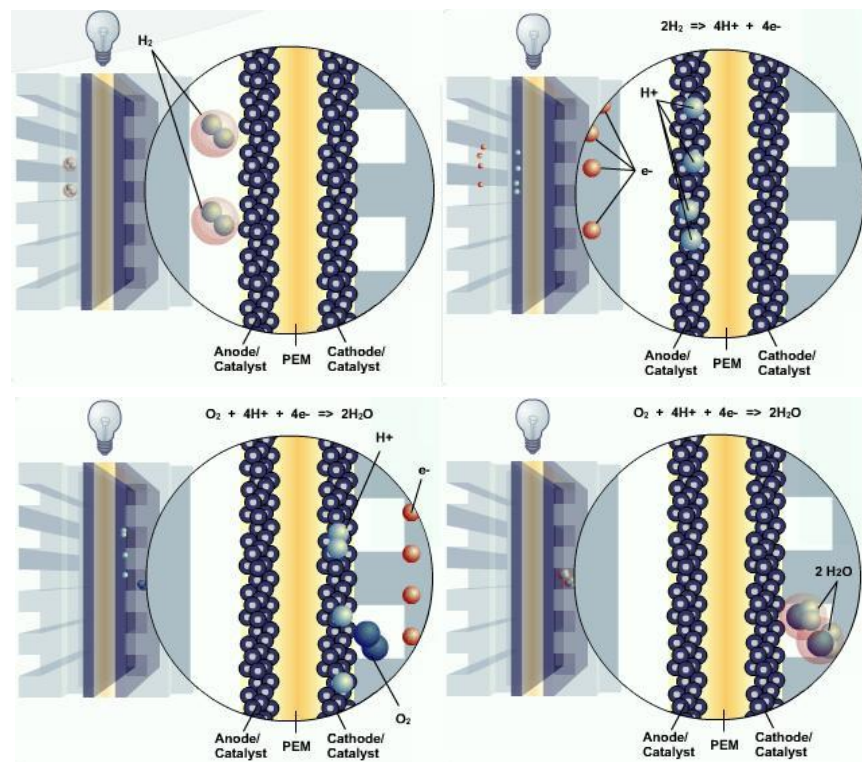
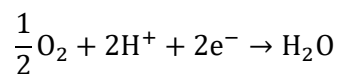
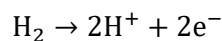


Ilustración 2. Proceso de funcionamiento de una celda de combustible de tipo PEMFC. [1]

La separación del hidrógeno resulta relativamente fácil mediante la utilización de platino. El proceso que causa las pérdidas eléctricas más significativas es el de separación de las moléculas de agua.

El elemento clave en una celda de combustible es la membrana de intercambio iónico. Su propósito es separar el ánodo del cátodo para evitar la mezcla del combustible y el oxidante y proporcionar una vía iónicamente conductora para los protones. Así, sus propiedades requeridas son: alta conductividad iónica, estabilidad química y mecánica a largo plazo a temperaturas elevadas y en entornos oxidantes y reductores.

Las celdas de combustible tienen el potencial de una excelente eficiencia y pueden convertir hasta el 75% de la energía en el combustible. Una celda de combustible puede funcionar con hidrógeno residual industrial, hidrógeno del propano o metano generado en plantas de tratamiento de aguas residuales, como también el hidrógeno obtenido de recursos renovables como la energía solar, eólica o de biomasa.

Todo esto es para las celdas de combustible en general, pero hay muchos tipos y la mayor diferencia entre éstos se basa en el electrolito que utilizan.

Una sola celda produce una cantidad pequeña de electricidad, por ello se suelen apilar estas celdas para aumentar la energía producida. Estas celdas acumuladas se llaman *Stacks*.

En este proyecto se utilizará una celda de combustible de hidrógeno del tipo PEMFC (proton-exchange membrane fuel cell). Las celdas de combustible de hidrógeno, en general, tienen muchas aplicaciones posibles, como por ejemplo suministrar alimentación de emergencia, producir energía en lugares de difícil acceso, plantas de generación de gran capacidad y cogeneración. En este último caso el calor producido en las reacciones es reaprovechado para aumentar la eficiencia global de la planta.

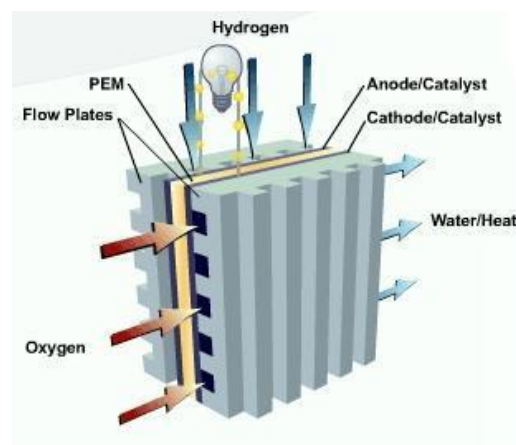


Ilustración 3. Esquema interno simplificado de una PEMFC. Se pueden observar los flujos de hidrógeno, oxígeno, generación de corriente eléctrica y agua. También se ven el ánodo, cátodo y la membrana. [1]

El tipo de celda PEMFC tiene aplicaciones relativas al transporte, mayormente. Algunas de sus características principales son los bajos rangos de presión y temperatura de trabajo, entre 50 y 100°C, así como su membrana polimérica.

Este tipo de celdas de combustible son una clara solución para el vehículo de transporte gracias a su tamaño compacto. Sin embargo, el tratamiento del agua generada se debe tener en cuenta, ya que demasiada agua provoca la inundación de la membrana, y la falta de agua hace que la membrana se seque, lo que tampoco interesa. En ambos casos el resultado es la disminución de la energía producida.

Las celdas de combustible son la mejor opción comparado a generadores convencionales y fuentes de energía renovable. Para ser totalmente aceptadas hay que probar que van a funcionar bien y que tengan un precio competitivo para soluciones convencionales. Como puntos positivos ante las celdas de combustible destacan su alta eficiencia, su bajo mantenimiento y ruido y cero emisiones nocivas.

Las PEMFC necesitan, en su mayoría, cuatro subsistemas de apoyo a la celda: un sistema de entrega de aire para que la celda funcione correctamente y de manera eficiente; un sistema de gestión térmica para garantizar la hidratación y estado de la membrana y catalizador; un sistema de suministro de combustible de hidrógeno que lo entregue a presión y flujo adecuados; y finalmente un sistema de suministro de energía eléctrica para conectar o aislar el sistema de la carga. Todos estos subsistemas, que parecen simples, acaban complicando el sistema culpa de la gestión de agua en ellos. Así, se va a utilizar en este proyecto una manera de implementar el sistema quitando la parte de gestión térmica, por lo que el coste y complejidad se reducen.

6.1. Tipos de celdas de combustible y elección de uno

Una vez se entiende cómo funcionan las celdas de combustible y lo que necesitan para funcionar se puede pasar a analizar los tipos de celdas que hay. En este proyecto se han analizado dos tipos de celdas de combustible, que son de cátodo abierto y cátodo cerrado.

En el caso de cátodo abierto el sistema se basa en la celda de combustible, en la que tanto la refrigeración, como la humidificación, como la entrada de oxígeno, están juntas. Es decir, tiene una entrada de aire directamente hacia la pila de combustible. Este método es mucho más barato ya que no se necesita un circuito de refrigeración de agua con su respectivo tanque, tuberías y válvulas, además de ser más simple. Pero como contrapartida, no se puede controlar la temperatura ni la humedad del aire de entrada.

En cambio, en las celdas de combustible de cátodo cerrado, se necesitan diferentes sistemas alrededor. Estos sistemas son la refrigeración, la humidificación y la entrada de

oxígeno. Al ir por separado permite controlar de manera precisa cada parámetro, aunque es mucho más complejo y caro de construir, algo que no interesa en este proyecto.

Se quiere simplificar al máximo la instalación y que sea lo más fácil y accesible posible. Es por ello por lo que se han escogido las celdas de combustible del tipo cátodo abierto.

6.2. Análisis del mercado actual de celdas de combustible

Se han analizado diferentes marcas de celdas de combustible y a continuación se resumen los datos obtenidos de cada una. No se elige aún una celda de combustible ya que se ha hecho un análisis a fondo de diferentes casos y opciones y al ser un sistema híbrido se escogen los dos componentes de manera conjunta.

Tabla 2. Comparativa de marcas de celdas de combustible con algunas de sus características.

MARCA	TAMAÑO	VOLTAGE SALIDA	CAPACIDADES DISPONIBLES	COMPLEJIDAD
<i>Horizon</i>	118x183x94 - 219x268x123	24V @8,3A – 28,8V @35A	200, 300, 500, 1000 W	- Media, tiene cierta flexibilidad para hacer cambios en las celdas de combustible
<i>HES Energy Systems</i>	194x105x166 – 194x127x193	27 - 47,5 V	500, 1000 W	- Alta, todo incluido, poca flexibilidad, caja en la que no se puede modificar nada
<i>GreenBo x</i>	400x300x200 – 400x600x250	48V DC	300, 500, 1000 W	- Alta, es una caja con todo incluido, poca flexibilidad
<i>Gatechn Team</i>	99x128x167 - 265x166x132	12 – 36 V	300, 600, 1000 W	- Baja, mucha flexibilidad de montaje alrededor

7. Sistema híbrido de celda de combustible y batería

Se ha decidido utilizar una batería en paralelo a la celda de combustible, para que así ésta se encargue de proporcionar energía rápidamente cuando la celda de combustible no puede, por sus especificaciones.

Se han estudiado tres casos en los cuales el porcentaje de hibridación cambia. En los tres casos se ha considerado que la batería empieza y acaba el proceso con el mismo estado de carga, por tanto, se va cargando durante el uso. A continuación, se explican estos tres casos estudiados.

1. *La celda de combustible trabaja a régimen constante.* En este caso la pila de combustible necesitará una potencia mínima, ya que solo trabajará en los momentos en los que no se necesita cambiar de velocidad. La batería asumirá todos los cambios necesarios, por lo que es el caso en el que necesita ser de mayor capacidad.
2. *La celda de combustible absorbe una pequeña parte de los picos.* Se ha considerado que la batería absorbe un 70% de los picos.
3. *La celda de combustible absorbe una gran parte de los picos.* Se ha considerado que la batería absorbe un 30% de los picos.

Un concepto clave para seguir analizando los casos es que, la parte de arriba de la media corresponde a momentos en que la batería se descarga, es decir, aporta potencia al sistema. En cambio, durante los momentos en los que el gráfico está por debajo de la media, la batería se carga desde la pila, la cual estaría trabajando a una potencia menor que la nominal y gracias a que carga la batería, se mantiene constante su potencia.

Se quiere, en un principio, que la batería empiece y acabe un ciclo con el mismo estado de carga, ya que se va cargando y descargando durante el ciclo.

8. Almacenamiento de H₂

El hidrógeno tiene una baja densidad energética, es decir, mientras que la energía por masa del hidrógeno es mayor que la de otros combustibles, su energía por volumen es mucho menor. Por eso, se está investigando la manera de mejorar la densidad energética del hidrógeno y que el coste también sea competitivo.

El hidrógeno se puede almacenar de diferentes formas. Se van a analizar algunas de las opciones que se han tenido al elegir los tanques de hidrógeno que se van a utilizar. En general, existen dos maneras básicas de almacenar el hidrógeno: en tanques o en materiales. De las opciones que hay en cada categoría, se han analizado la de tanques de hidrógeno comprimido, almacenamiento de hidrógeno de manera química y la de almacenamiento en metales de hidrógeno.

Así, el almacenamiento en tanques de hidrógeno comprimido tiene ciertas ventajas, pero también desventajas. Entre sus puntos positivos se tiene que pesa poco por la cantidad de hidrógeno que lleva cada tanque, así que también ocupa menos, al tener el hidrógeno comprimido, otra ventaja es su coste, al ser una tecnología más simple es más barata. Como punto negativo principal se encuentra su peligrosidad. Al ser un gas comprimido a altas presiones, tiene un componente de peligro bastante alto, tanto en la carga, como en el funcionamiento. Se necesita una instalación especial con requisitos de seguridad estrictos para hacer la carga y durante el funcionamiento cualquier error puede producir que una bombona salga disparada. Al tener un proyecto móvil, se valora mucho la seguridad, ya que la plataforma podría llevarse golpes fácilmente y no se quiere que haya peligro al tener estos tanques.

Para seguir, se tiene la opción de almacenar el hidrógeno en metal, lo que tiene las ventajas de, principalmente, la seguridad y trabajar a bajas presiones, haciendo el sistema de carga y funcionamiento mucho más cómodos y con menos requisitos. Pero, en contra partida, por la misma cantidad de hidrógeno que un tanque comprimido, pesa mucho más, ocupa también mucho más y finalmente es una tecnología más cara.

El almacenamiento químico de hidrógeno aporta opciones con alta densidad energética y potencial de uso. Se almacena en metanol, amoníaco, entre otros. Los contenedores se pueden hacer de materiales ligeros y hasta de plástico en algunos casos, lo que los hace muy ligeros. Como principales inconvenientes tiene que el método es irreversible, es decir, los compuestos no se pueden cargar de forma reproducible con hidrógeno, se deben producir en una planta, además que los productos de la reacción se deben reciclar de alguna manera. También existe el hecho que producen compuestos malos para el medio ambiente, como óxidos de nitrógeno en el caso del amoníaco u óxidos de carbono en el

caso de otros compuestos.

Ya que lo que se quiere es un sistema bueno para el medio ambiente y que se pueda recargar, esta última opción, el almacenamiento químico, se descarta directamente. A continuación, se encuentra una tabla comparativa entre los dos primeros métodos, para así realizar una decisión.

Tabla 3. Tipos de almacenamiento de hidrógeno y ventajas e inconvenientes.

TIPO ALMACENAMIENTO	COSTE	COMPLEJIDAD		CARACTERÍSTICAS
		Instalación	Recarga	
<i>Hidrógeno comprimido</i>	Bajo	Normal	Rápida	- Ligero - Altas presiones
<i>Hidruros metálicos</i>	Alto	Rápida	Lenta	- Pesado - Seguro (bajas presiones)

Finalmente, vista la disponibilidad, características y precios, se ha decidido utilizar hidruros metálicos como forma de almacenamiento de hidrógeno. Ya que al ser una aplicación móvil se prioriza la seguridad, ante todo. También es más fácil el trato con este tipo de almacenamiento, tanto para la recarga como en las instalaciones.

9. Análisis de los datos y cálculos de capacidades

Antes de empezar con el desarrollo del proyecto se ha pedido información sobre el robot a los encargados de éste. Se han hecho pruebas con el robot en las que se hacía una trayectoria en forma de 8, así durante dos minutos. Por eso durante esta memoria se verá que no se considera un caso del todo real, al estar en una superficie plana haciendo una trayectoria no real, simplemente haciendo pruebas. Los datos obtenidos de estas pruebas eran el voltaje utilizado, las intensidades de cada uno de los tres motores, el tiempo en el que se toman las muestras, las velocidades en dos ejes y la velocidad de rotación.

Tabla 4. Muestra de los datos obtenidos de estas pruebas, donde V es el voltaje, I es la intensidad. RD es la rueda derecha, RE la rueda izquierda, CO el eje central. Vx y Vy son las velocidades en dos ejes y WP es la velocidad de rotación.

TIEMPO [S]	V [mV]	I RD [A]	I RE [A]	I CO [A]	VX [m/s]	VY [m/s]	WP
0.024	4.400	0.002	0.037	0.008	0.000	0.0000	0.0001
0.028	4.400	-0.361	-0.244	0.016	0.000	0.0000	0.0003
0.032	4.400	-0.449	-0.481	0.006	0.000	0.000	-0.0008
0.036	4.400	-0.384	-0.374	0.024	0.000	0.000	0.001
0.040	4.400	-0.391	-0.372	0.026	0.000	0.001	0.000
0.044	4.400	-0.474	-0.412	0.068	0.000	0.002	0.008

Con estos datos y pruebas se ha hecho un análisis que finalmente ha quedado bastante complejo y ha tomado una gran parte del tiempo del proyecto. Para hacer este análisis se ha creado un programa de Matlab para analizar los datos y hacer una serie de cálculos que se van necesitando a lo largo del proyecto.

El análisis se divide en tres ciclos distintos, uno con los datos originales de las pruebas y otros tres con parámetros cambiados para ver qué es lo que afecta más al sistema y sus variaciones. Estos dos otros casos se basan en modificaciones con diferentes supuestos que se verán en los siguientes apartados.

Además, dentro de cada ciclo se han probado distintos grados de hibridación, es decir, cuánto trabaja la celda de combustible y la batería a la vez. Se han hecho tres casos distintos de hibridación, que estarán desarrollados más adelante, pero como idea general, se tienen: uno en que la celda de combustible trabaja a régimen constante, otro en el que la celda de combustible asume el 30% de los picos y un último caso en que la celda de combustible asume un 70% de los picos del sistema.

En el anexo estará el programa de Matlab completo, pero en este apartado se van a comentar los pasos seguidos y se explicarán las partes del programa y los cálculos realizados. Siempre que se quiera ver la programación y todos los resultados que ha dado,

se necesita ir al anexo.

9.1. Reducción del número de muestras

En la primera parte del programa se importan los datos del archivo, se procesan y se disminuyen el número de muestras que se tenían, ya que eran demasiadas, lo que hacía que casi no variaran los valores entre muestras. Así se puede trabajar mejor con los datos. También se dibujan los gráficos de intensidades y potencias de las ruedas derecha e izquierda y del eje central. Esto permite ver el comportamiento del sistema. Esta parte solo se hace una vez, al principio, y es común para el resto del programa.

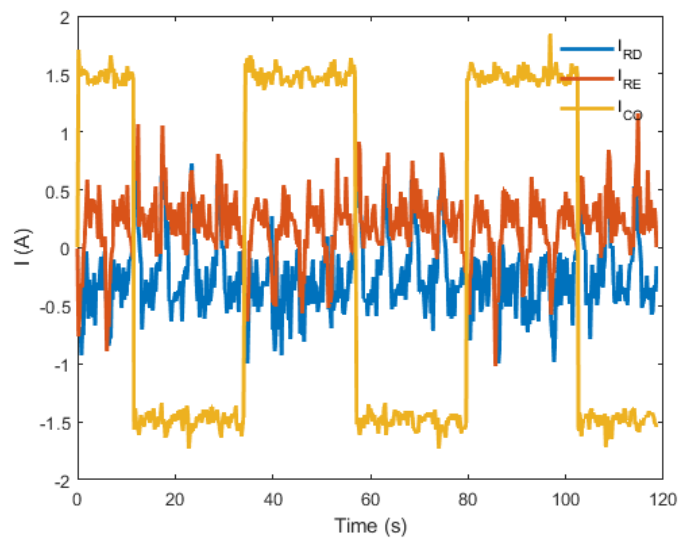


Ilustración 4. Intensidades de las ruedas derecha e izquierda, así como la del eje central.

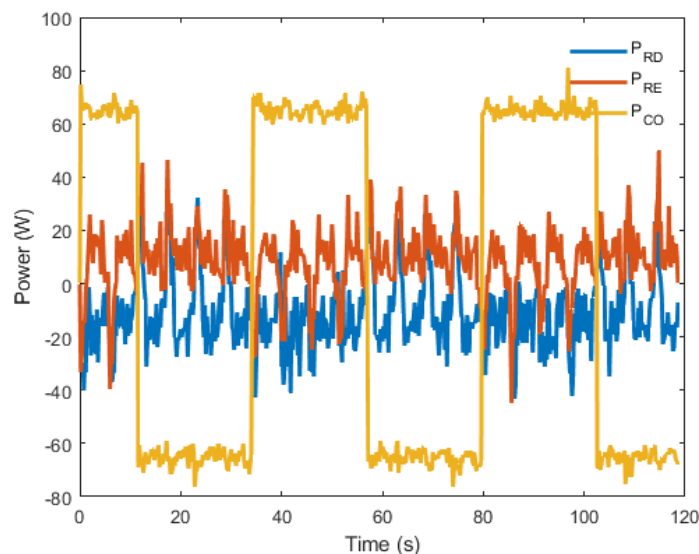


Ilustración 5. Potencias de las ruedas derecha e izquierda, así como la del eje central.

Estos gráficos dan una primera idea del sistema, de las pruebas realizadas, de cómo se comporta el robot ante ellas y de cómo proceder vistos los datos representados.

9.2. Ciclos

El resto del programa se divide en tres partes, como se ha dicho anteriormente, estas partes se las han llamado ciclos.

El primer ciclo se basa en que los cálculos están hechos con los datos reales, que se han obtenido de hacer pruebas con el robot.

El segundo ciclo tiene como base que los datos originales se multiplican por un factor, para que el pico pase a ser 250 W. Esto es según el razonamiento de la intensidad y voltaje que se necesitan en el robot, lo que el sistema creado en este proyecto va a pasar al robot. Estos son, aproximadamente, 5 A y 48 V, para redondear, se ha calculado la potencia como 250 W. Para tener este factor por el que multiplicar todos los valores, simplemente se divide este 250 W por el pico máximo del caso real, 140 W. Así se obtiene el valor por el que multiplicar todos los valores: 1,78.

Finalmente, el tercer y último ciclo se basa en la idea de mantener la misma media que en los datos originales, aunque aumentando las pendientes de los picos. Al ser el caso más complejo de calcular, se va a explicar detalladamente. También se puede leer el programa de Matlab, en el anexo, para comprobar estos cálculos.

$$factor = \frac{250 - media}{potencia\ máxima - media} \quad (1)$$

Con este factor se hace un bucle en el que se calcula la diferencia entre la potencia y la media, para después ser multiplicado por este factor. Esta diferencia se suma a la media y se obtiene la nueva curva de potencias. Así se tienen los valores por encima y por debajo aumentados con la misma proporción.

Estos cálculos se realizan en el inicio de cada ciclo, se mantienen para los casos de hibridación.

Además, dentro de cada ciclo está el análisis de hibridación, es decir, la proporción de potencia que asumen la batería y la celda de combustible va variando en cada caso. Esto está explicado más concretamente en el apartado 7 de la memoria. Para seguir con la explicación del programa y los cálculos realizados, se va a hacer un esquema para entender la numeración escogida:

- **CICLO 1:** datos reales

- **Régimen constante:** la celda de combustible trabaja a régimen constante
- **Caso 30%:** la celda de combustible asume un 30% de los picos
- **Caso 70%:** la celda de combustible asume un 70% de los picos
- **CICLO 2:** datos multiplicados por un factor
 - **Régimen constante**
 - **Caso 30%**
 - **Caso 70%**
- **CICLO 3:** datos que mantienen la misma media y están multiplicados por un factor
 - **Régimen constante**
 - **Caso 30%**
 - **Caso 70%**

9.3. Celda de combustible en el caso de régimen constante

Así, dentro de un ciclo cualquiera y en el caso de régimen constante, primero se calcula la suma de potencias de los tres motores del robot, ya que se tenían por separado. Estos tres motores son los de las dos ruedas, izquierda y derecha, y el del eje central.

Una vez se tiene esta suma, se hace la media de éstas, se calcula el pico máximo y la diferencia entre éste y la media, para cálculos posteriores. Además, se dibuja el gráfico, que se ve en las siguientes ilustraciones para cada ciclo.

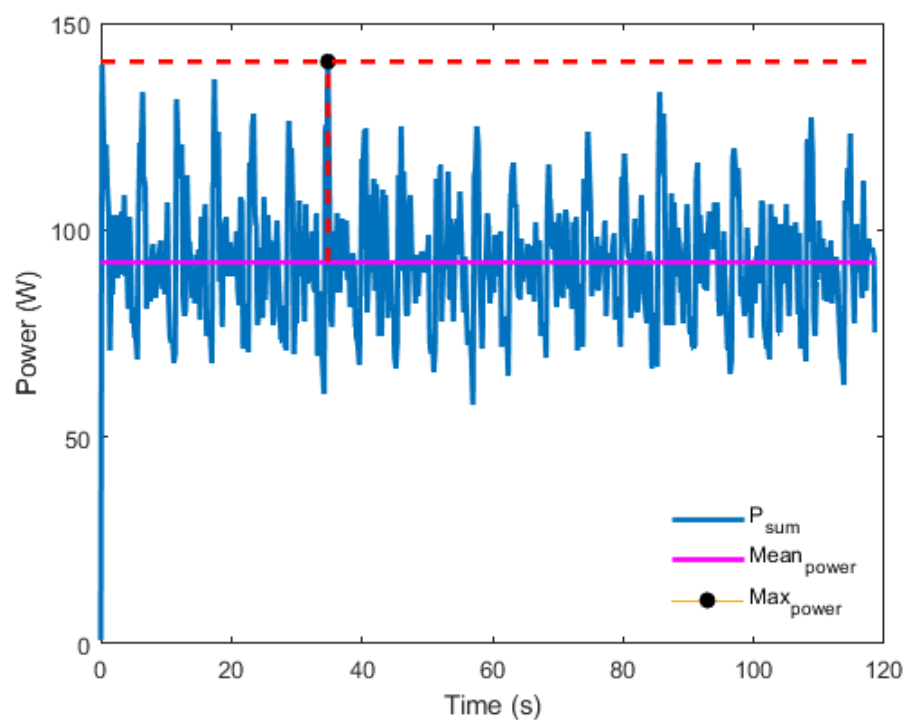


Ilustración 6. Suma de potencias, media de ésta y máximo en el CICLO 1.

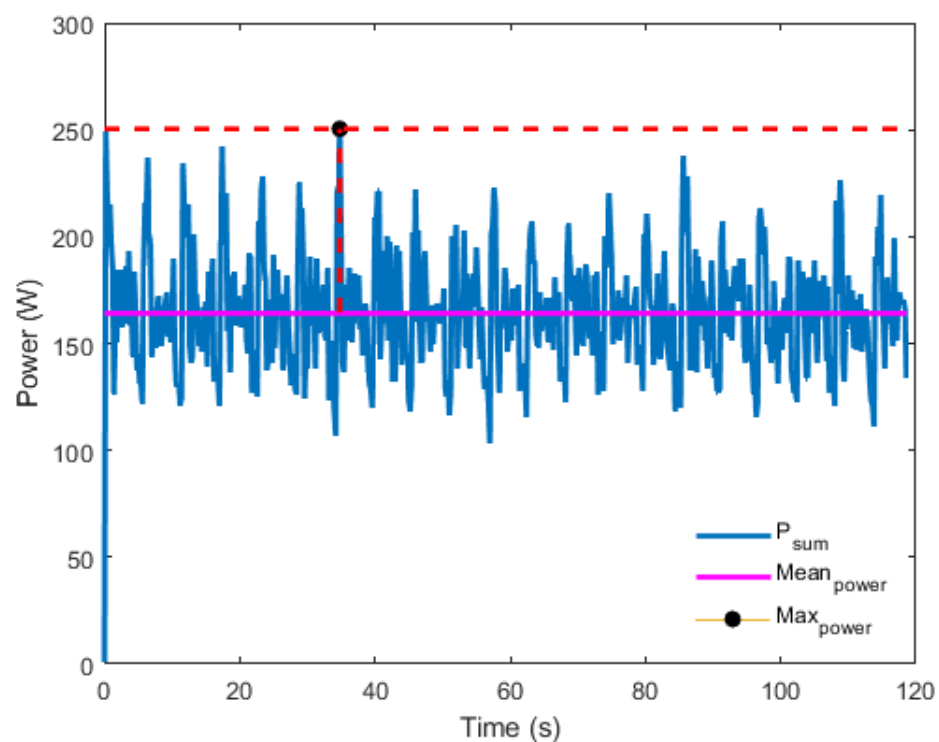


Ilustración 7. Suma de potencias, media de ésta y pico máximo en el CICLO 2.

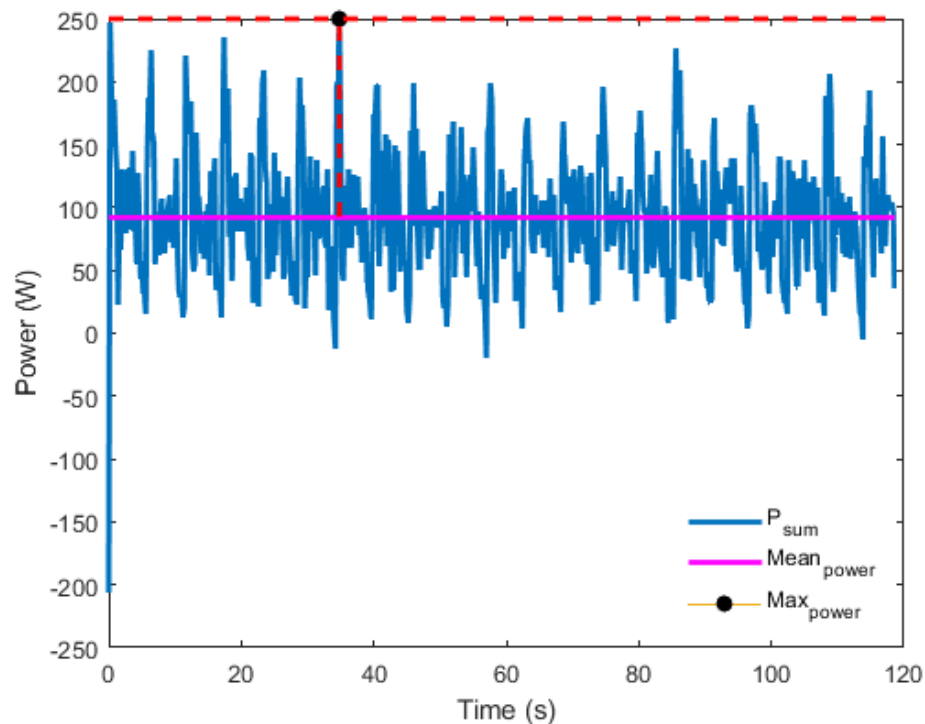


Ilustración 8. Suma de potencias, media de ésta y pico máximo en el CICLO 3.

Con este gráfico se puede entender que la parte por encima de la media (línea rosa) representa los instantes en que la batería se descarga, ya que se está utilizando para absorber la potencia que no puede entregar la celda de combustible. En cambio, en los puntos que están por debajo de la media, la batería se carga, ya que la celda de combustible está entregando menos potencia de la que puede y está cargando la batería.

Con los datos calculados con estos gráficos se puede saber la capacidad necesaria de las celdas de combustible para estos tres casos:

- **CICLO 1:** se necesita una celda de combustible de 92,25 W, por lo que se ha escogido una de 100 W.
- **CICLO 2:** se necesita una celda de combustible de 164,21 W, por lo que se ha escogido una de 200 W.
- **CICLO 3:** se necesita una celda de combustible de 92,25 W, por lo que se ha escogido una de 100 W.

En el apartado 10 de la memoria se pueden ver unas tablas a modo de resumen para que sea fácil entender las elecciones según las necesidades calculadas.

9.4. Celda de combustible en el caso de 30% y 70%

Aún dentro de un ciclo cualquiera, existen dos casos de hibridación, donde el cálculo se hace de la misma manera. Ya que hay dos casos y tres ciclos, se acaban teniendo seis resultados en total, como se ve en los gráficos que vienen a continuación.

En estos casos la celda de combustible ya no trabaja a régimen constante, sino que varía su potencia, asumiendo un 30 o 70 % de los picos de potencia. En las siguientes ilustraciones se puede ver, en la línea roja, el gráfico que seguiría la celda de combustible, comparado al gráfico de la suma de potencias, en cada caso y para cada ciclo.

- **CICLO 1:**

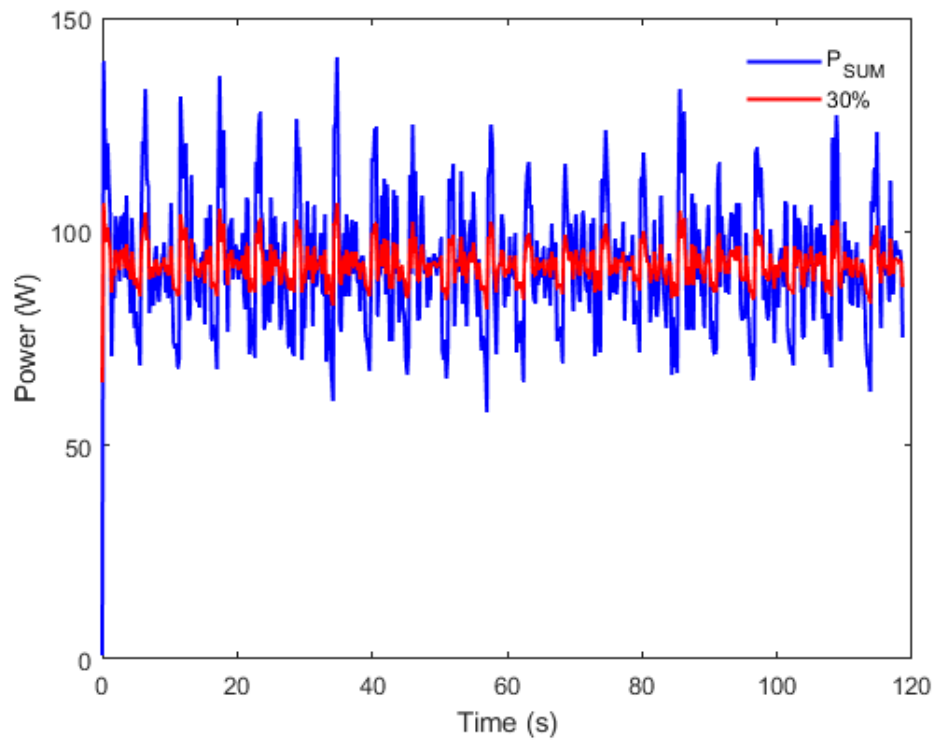


Ilustración 9. Variación de potencia de la celda de combustible, absorbiendo un 30% de los picos, en el CICLO 1.

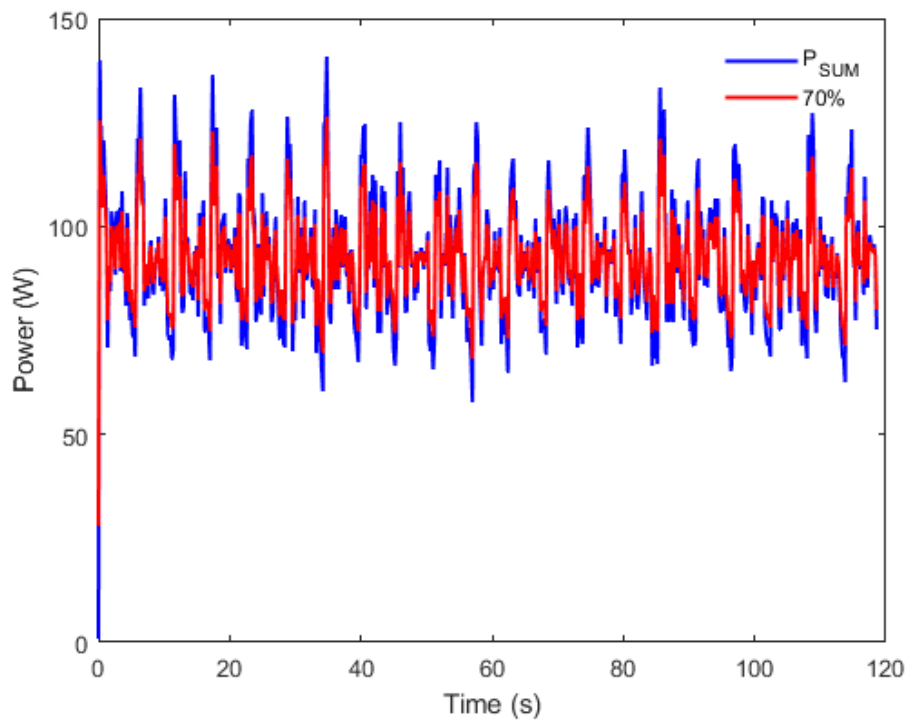


Ilustración 10. Variación de potencia de la celda de combustible, absorbiendo un 70% de los picos, en el CICLO 1.

- **CICLO 2:**

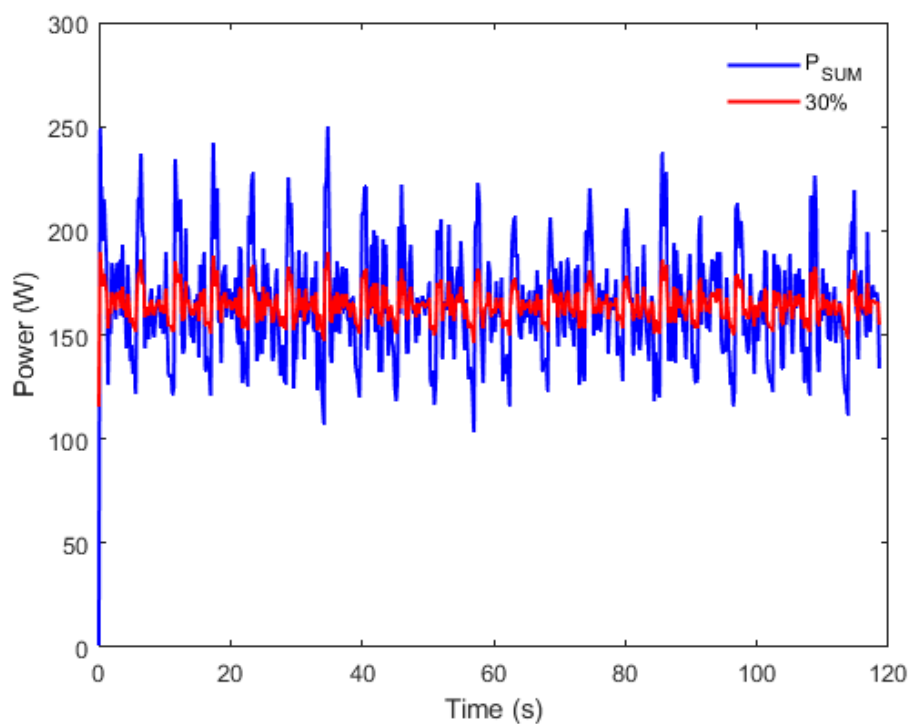


Ilustración 11. Variación de potencia de la celda de combustible, absorbiendo un 30% de los picos, en el CICLO 2.

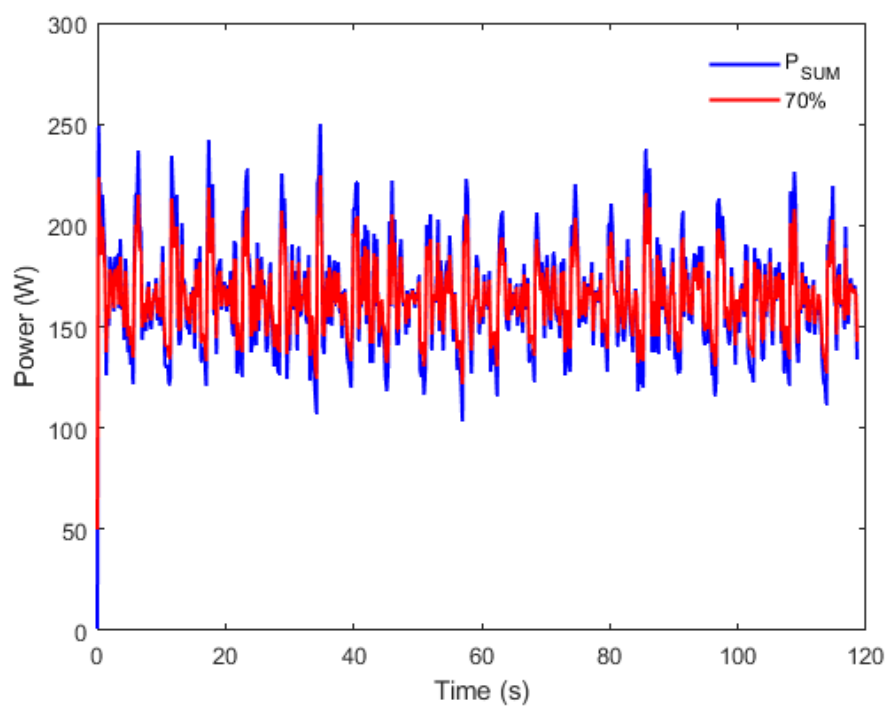


Ilustración 12. Variación de potencia de la celda de combustible, absorbiendo un 70% de los picos, en el CICLO 2.

- **CICLO 3:**

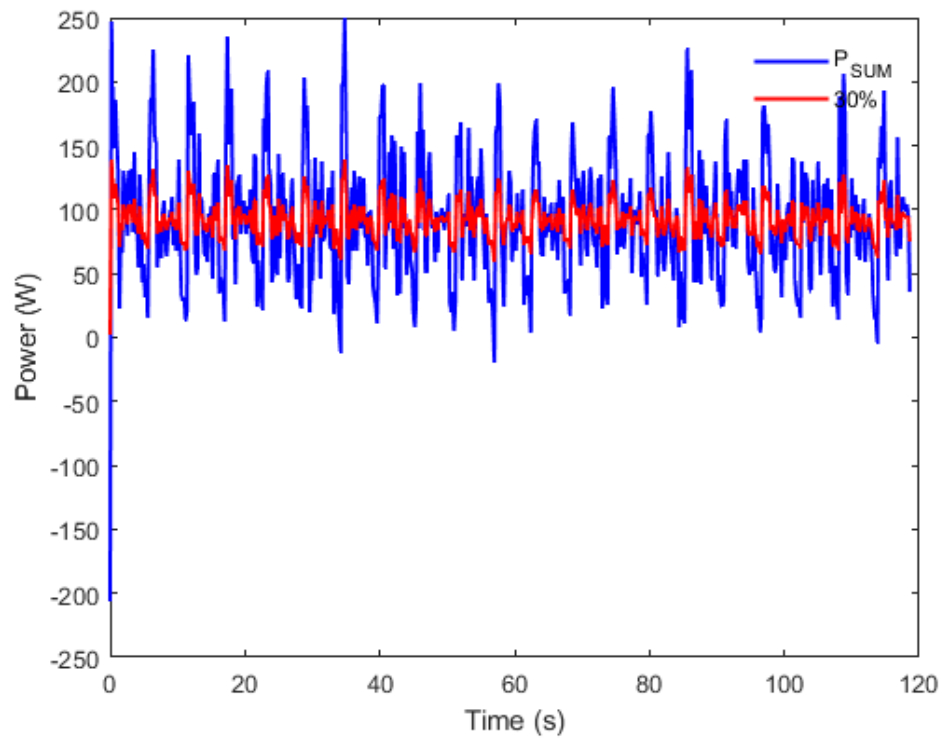


Ilustración 13. Variación de potencia de la celda de combustible, absorbiendo un 30% de los picos, en el CICLO 3.

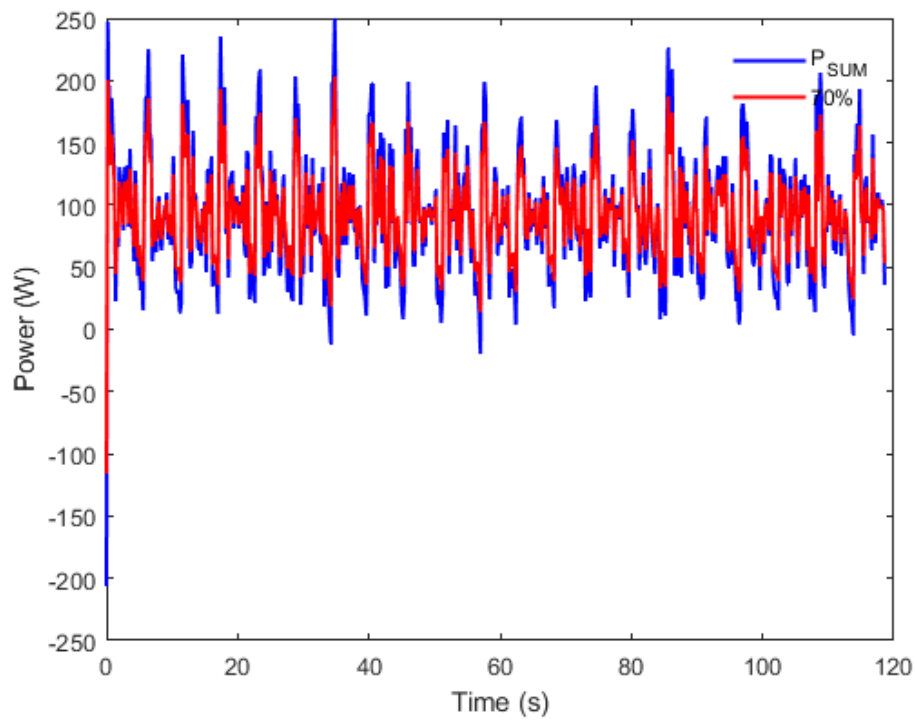


Ilustración 14. Variación de potencia de la celda de combustible, absorbiendo un 70% de los picos, en el CICLO 3.

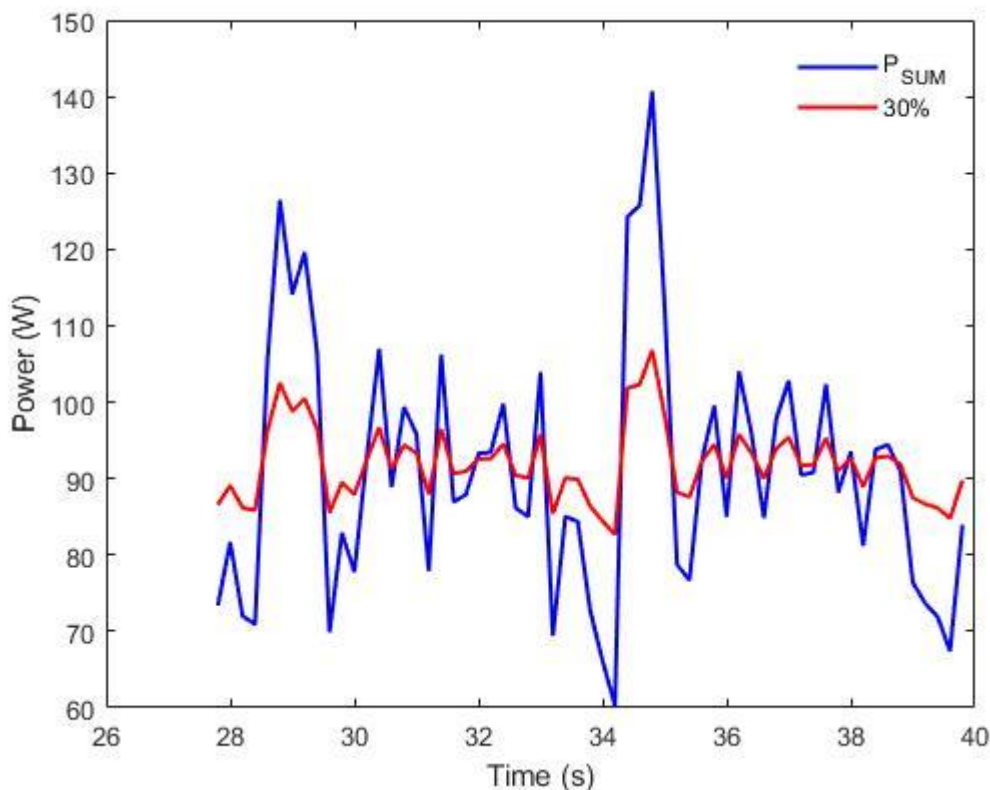


Ilustración 15. Ampliación del gráfico del 30% del ciclo 1, para así ver claramente el perfil que sigue la celda de combustible (rojo) y el que sigue la batería (azul). Aquí se ve el máximo del gráfico.

Una vez visualizado el gráfico, se hacen los cálculos para dimensionar la celda de combustible. Se hace la diferencia entre el máximo y la media y después se calcula el 30 o 70 % de este número. Así, la celda de combustible trabajará a la media, más este 30 o 70 %, lo que da la potencia necesaria. A continuación, se ven los números:

- **CICLO 1:** se tiene una media de 92,25 W, una diferencia entre el pico máximo y la media de 48,45 W.
 - **30%:** el 30% de esto es 14,54 W que, sumado a la media, da 106,79 W.
 - Se escoge una celda de combustible de 200 W.
 - **70%:** el 70% de esto es 33,92 W que, sumado a la media, da 126,17 W.
 - Se escoge una celda de combustible de 200 W.
- **CICLO 2:** se tiene una media de 164,21 W, una diferencia entre el pico máximo y la media de 86,23 W.
 - **30%:** el 30% de esto es 25,87 W que, sumado a la media, da 190,08 W.
 - Se escoge una celda de combustible de 200 W.
 - **70%:** el 70% de esto es 60,36 W que, sumado a la media, da 224,57 W.
 - Se escoge una celda de combustible de 300 W.
- **CICLO 3:** se tiene una media de 92,25 W, una diferencia entre el pico máximo y la

media de 157,75 W.

- **30%:** el 30% de esto es 47,33 W que, sumado a la media, da 139,25 W.
 - Se escoge una celda de combustible de 200 W.
- **70%:** el 70% de esto es 110,43 W que, sumado a la media, da 202,68 W.
 - Se escoge una celda de combustible de 300 W.

Más adelante, en el apartado 10, hay varias tablas con el resumen de las elecciones y capacidades en cada caso, para así facilitar la comparación de necesidades de cada caso.

9.5. Áreas

Esta parte del programa se repite en todos los casos, es decir, en los tres ciclos y para cada caso de hibridación distinto, lo que resulta en nueve cálculos que se realizan de la misma forma, pero con datos base distintos, por lo que los resultados varían.

9.5.1. Diferencia de áreas

Estos cálculos se dividen en dos partes, la primera consta del cálculo de las áreas del gráfico correspondientes al trabajo que realiza la batería. Esto es la curva de suma de potencias menos la curva que sigue la celda de combustible (en el caso de régimen constante es la línea de la media; en los demás casos, la curva del 30 o 70%).

Se calculan las áreas mediante integrales. Las unidades de este cálculo son Ws, es decir Watt por segundo. Estas áreas se han dividido en la parte superior e inferior a la media. Esto es porque se quiere tener la diferencia entre estas dos partes. Como ya se ha explicado anteriormente, la parte por encima de la media representa el tiempo en que la batería está trabajando, es decir, que proporciona su potencia al sistema, sumada a la de la celda de combustible. Esto hace que la batería se descargue. La parte por debajo de la media representa el tiempo en que la batería no trabaja, el sistema pide menos potencia a la celda de combustible de lo que está proporcionando, por lo que el resto se utiliza para cargar la batería.

La idea de hacer la diferencia de áreas, entonces, es saber si la batería acaba el ciclo de trabajo con la misma capacidad con la que lo empezó, ya que se va cargando y descargando según el momento.

Así, a continuación, se ve en una tabla los resultados de la diferencia de áreas.

Tabla 5. Resultado de los cálculos de diferencia de áreas para cada caso.

CICLO	CASO	DIFERENCIA DE ÁREAS
Datos reales	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	10,88 Ws
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	7,62 Ws
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	3,26 Ws
Datos multiplicados por un factor	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	19,37 Ws
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	13,56 Ws
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	5,81 Ws
Datos que mantienen la misma media de los datos reales	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	35,44 Ws
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	24,80 Ws
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	10,63 Ws

Como se ve, da en todos los casos un número positivo. Esto significa que el área por encima de la media es superior a la de por debajo. Como se ha dicho, la parte superior a la media son instantes en que la batería se descarga, ya que está trabajando. Estos números positivos significan que la batería acaba con menos carga que con la que empezó.

También se puede observar que son valores muy pequeños, lo que se supone que no afectará mucho al estado de carga de la batería en realidad. Más adelante, al escoger una batería en concreto para cada caso, se hace el cálculo del porcentaje final de batería con el que acaba cada ciclo, además del gráfico del estado de carga. Esto se puede encontrar en el apartado 9.6.

9.5.2. Área a máxima potencia durante 10 minutos

La segunda parte calcula el área suponiendo que el robot necesita la máxima potencia durante 10 minutos. Esta potencia máxima cambia en cada caso. Está todo calculado en el anexo, con cuadros informativos en cada apartado que los da el propio programa.

En esta parte el programa da dos resultados, esta área en Ws, que se ha calculado con una

integral suponiendo la máxima potencia durante 10 minutos, y la transformación de esta área en Ws a mAh (miliamperios hora). Para ello se escoge un voltaje de batería, que en todos los casos ha sido 3,7 V. Esto condicionará a la hora de escoger una batería, que los mAh sean los correspondientes para este voltaje. Al tener Ws, se divide por 3600 segundos, para así tener Wh. Después se pasa a Ah dividiendo por el voltaje y a mAh multiplicando por 1000.

Tabla 6. Resultado de los cálculos de área a máxima potencia durante 10 minutos.

CICLO	CASO	ÁREA A MAX POTENCIA	BATERÍA NECESARIA
Datos reales	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	29019,62 Ws	2178,58 mAh
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	20313,04 Ws	1525,00 mAh
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	8705,59 Ws	653,57 mAh
Datos multiplicados por un factor	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	51653,15 Ws	3877,86 mAh
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	36157,20 Ws	2714,50 mAh
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	15495,94 Ws	1163,36 mAh
Datos que mantienen la misma media de los datos reales	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	94491,72 Ws	7093,97 mAh
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	66144,20 Ws	4965,78 mAh
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	28347,51 Ws	2128,19 mAh

A partir de estos datos se van a escoger en el siguiente apartado las baterías con las capacidades necesarias en cada caso.

9.6. Batería

Como se ha dicho en el apartado anterior, en esta parte del programa se escogen las baterías necesarias para cada caso, en total nueve baterías. La siguiente tabla indica estas elecciones, junto con las de las celdas de combustible.

Tabla 7. Capacidades necesarias de batería y celda de combustible, así como las elecciones realizadas para cada caso.

CICLO	CASO	CAPACIDADES NECESARIAS		ELECCIÓN
Datos reales	Celda de combustible trabaja a régimen constante	Celda de combustible	92,25 W	100 W
		Batería	2178,58 mAh (8,06 Wh)	2200 mAh
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	Celda de combustible	106,79 W	200 W
		Batería	1525 mAh (5,64 Wh)	2000 mAh
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	Celda de combustible	126,17 W	200 W
		Batería	653,57 mAh (2,42 Wh)	750 mAh
Datos multiplicados por un factor	Celda de combustible trabaja a régimen constante	Celda de combustible	164,21 W	200 W
		Batería	3877,86 mAh (14,34 Wh)	3900 mAh
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	Celda de combustible	190,08 W	200 W
		Batería	2714,5 mAh (10,04 Wh)	3000 mAh
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	Celda de combustible	224,57 W	300 W
		Batería	1163,36 mAh (4,3 Wh)	1400 mAh
Datos que mantienen la misma media de los datos reales	Celda de combustible trabaja a régimen constante	Celda de combustible	92,25 W	100 W
		Batería	7093,97 mAh (26,25 Wh)	7800 mAh
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	Celda de combustible	139,25 W	200 W
		Batería	4965,78 mAh (18,37 Wh)	5000 mAh
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	Celda de combustible	202,68 W	300 W
		Batería	2128,19 mAh (7,87 Wh)	2200 mAh

Con estos datos de las baterías y el voltaje, se puede pasar la capacidad de la batería en mAh a Ws, con el mismo cálculo que se ha hecho anteriormente, en el sentido contrario.

Se supone que la batería comienza el ciclo al 80% de su capacidad. A partir de aquí se calculan las áreas por cada instante del gráfico, mediante integrales, para tener cuánto se carga o descarga, en función de si está por debajo o encima de la media. Esto se suma o

resta al valor actual de carga de la batería y se calcula en porcentaje el estado actual. Así para todos los puntos que se tienen. Esto se ha representado en los siguientes gráficos, así como el porcentaje final de carga de las baterías.

- **CICLO 1**
 - **Régimen constante**

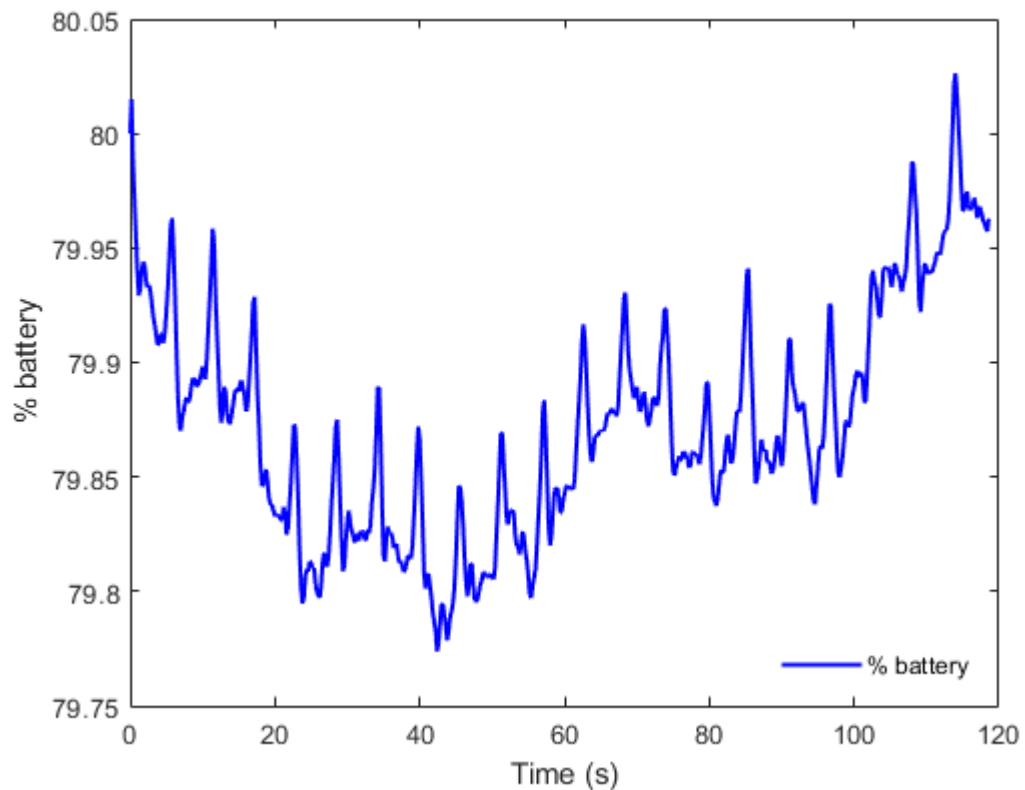


Ilustración 16. Gráfico del estado de carga de la batería.

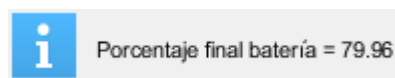


Ilustración 17. Porcentaje final de la batería.

○ **Caso 30%**

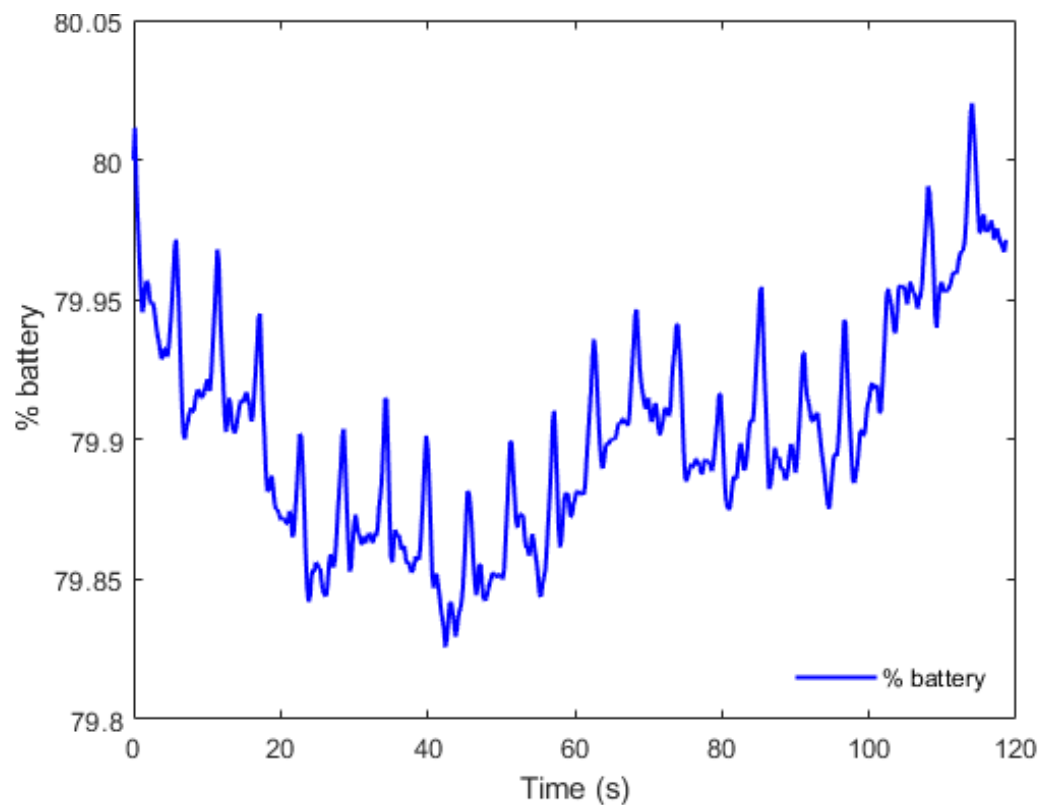


Ilustración 18. Gráfico del estado de carga de la batería.

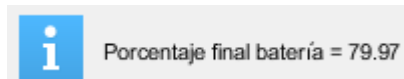


Ilustración 19. Porcentaje final de la batería.

- **Caso 70%**

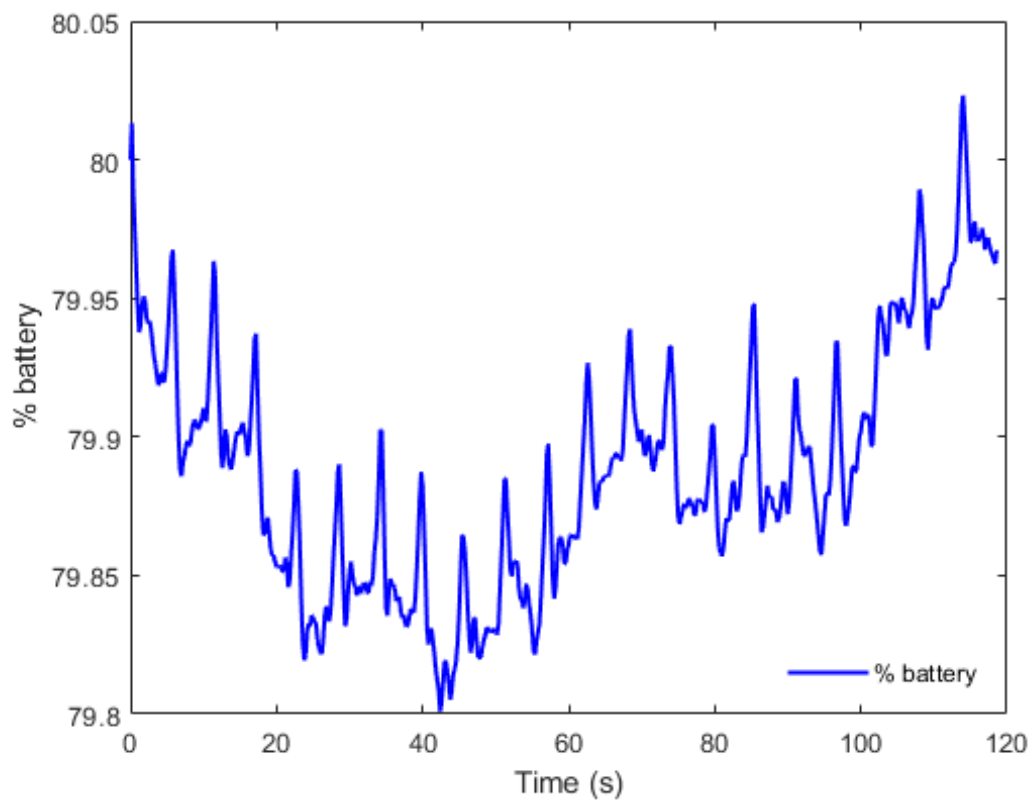


Ilustración 20. Gráfico del estado de carga de la batería.



Porcentaje final batería = 79.97

Ilustración 21. Porcentaje final de la batería.

- **CICLO 2**

- **Régimen constante**

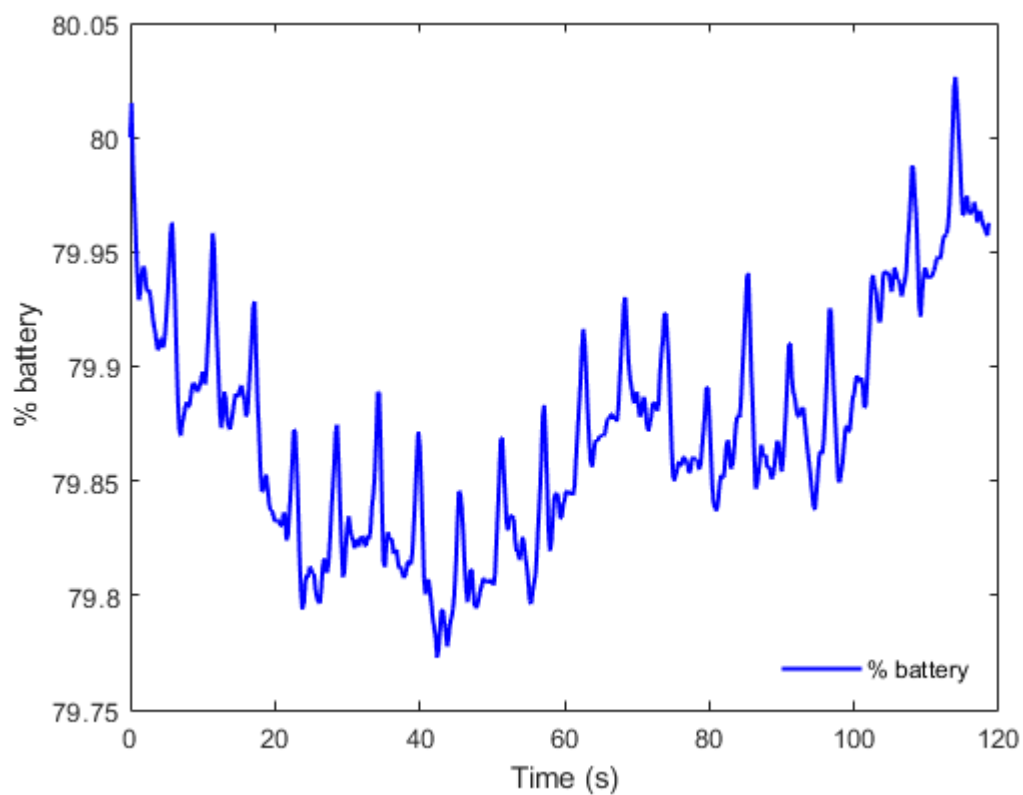


Ilustración 22. Gráfico del estado de carga de la batería.

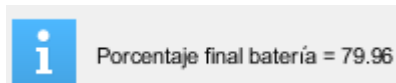


Ilustración 23. Porcentaje final de la batería.

○ **Caso 30%**

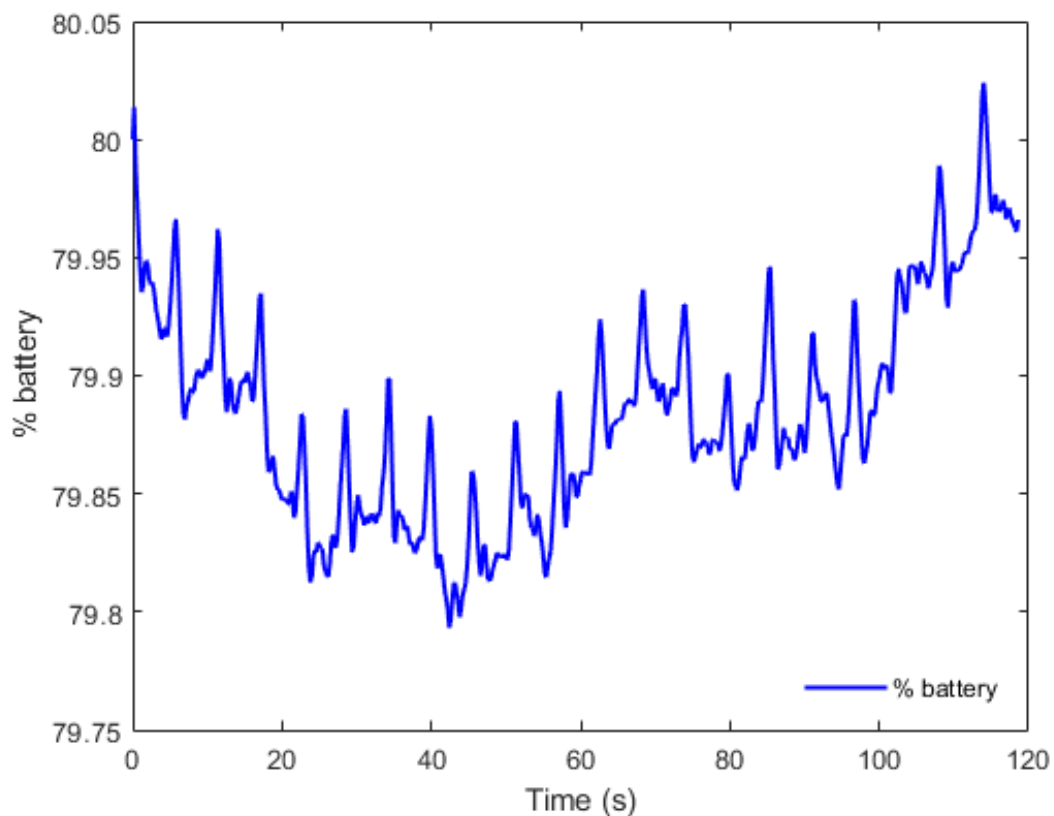


Ilustración 24. Gráfico del estado de carga de la batería.



Porcentaje final batería = 79.97

Ilustración 25. Porcentaje final de la batería.

○ **Caso 70%**

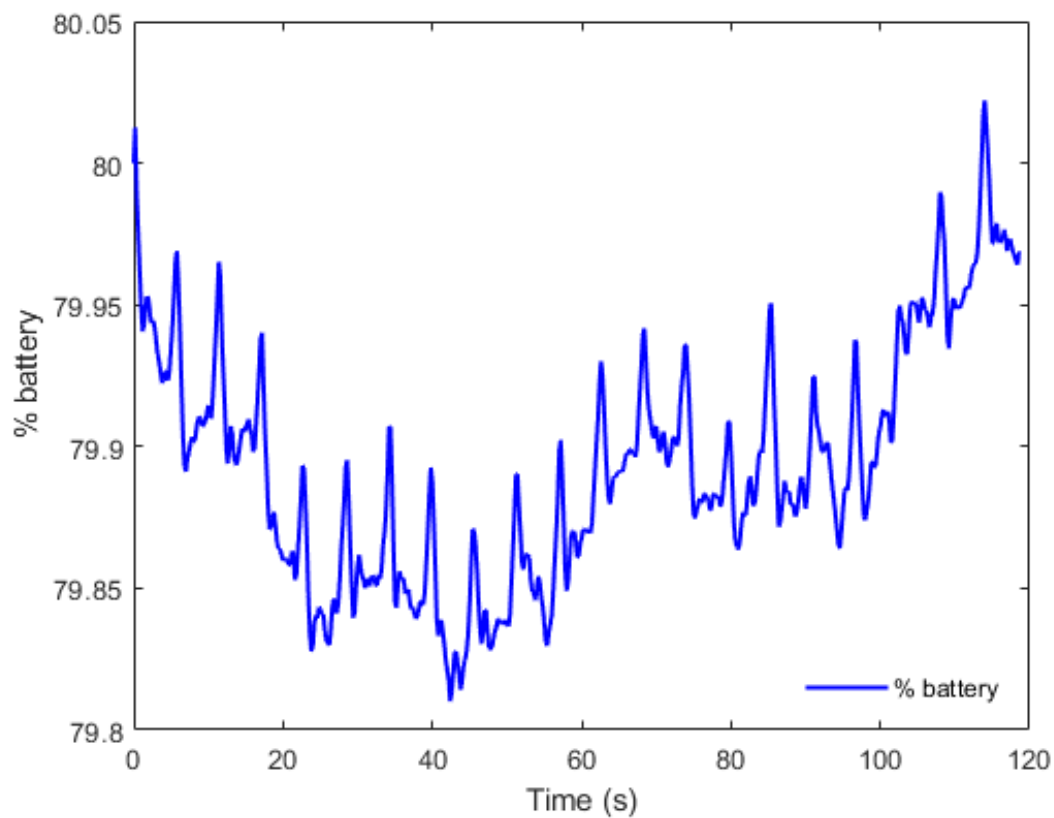


Ilustración 26. Gráfico del estado de carga de la batería.



Porcentaje final batería = 79.97

Ilustración 27. Porcentaje final de la batería.

- **CICLO 3**

- **Régimen constante**

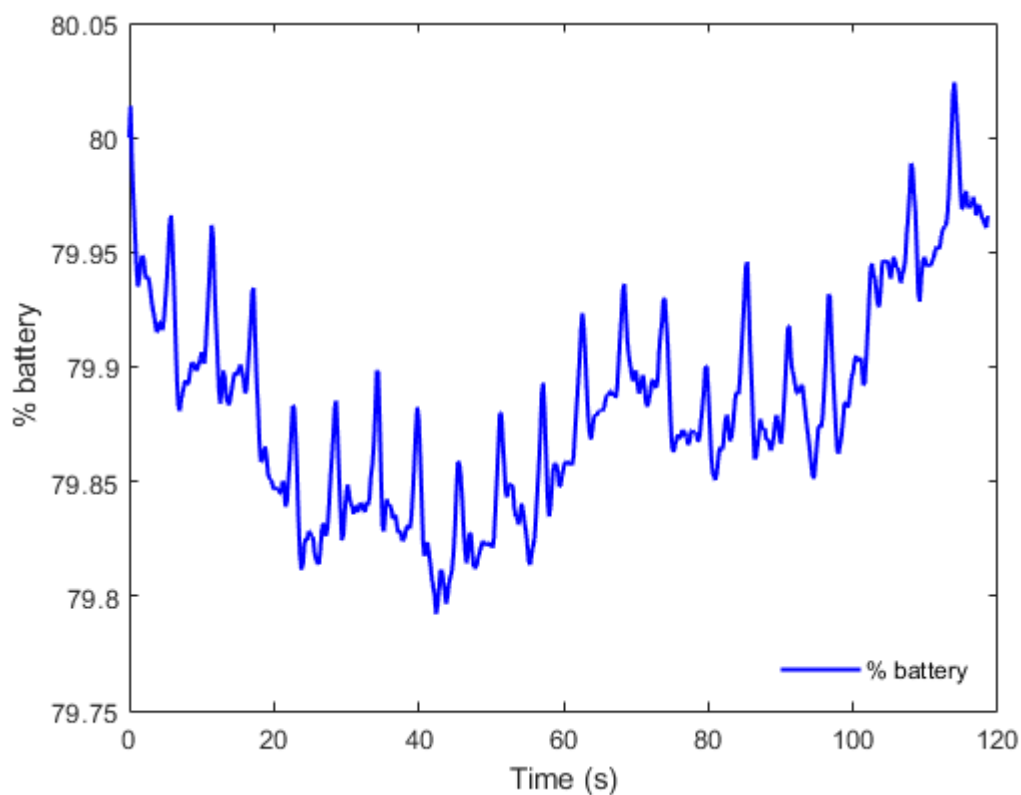


Ilustración 28. Gráfico del estado de carga de la batería.

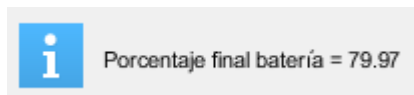


Ilustración 29. Porcentaje final de la batería.

○ **Caso 30%**

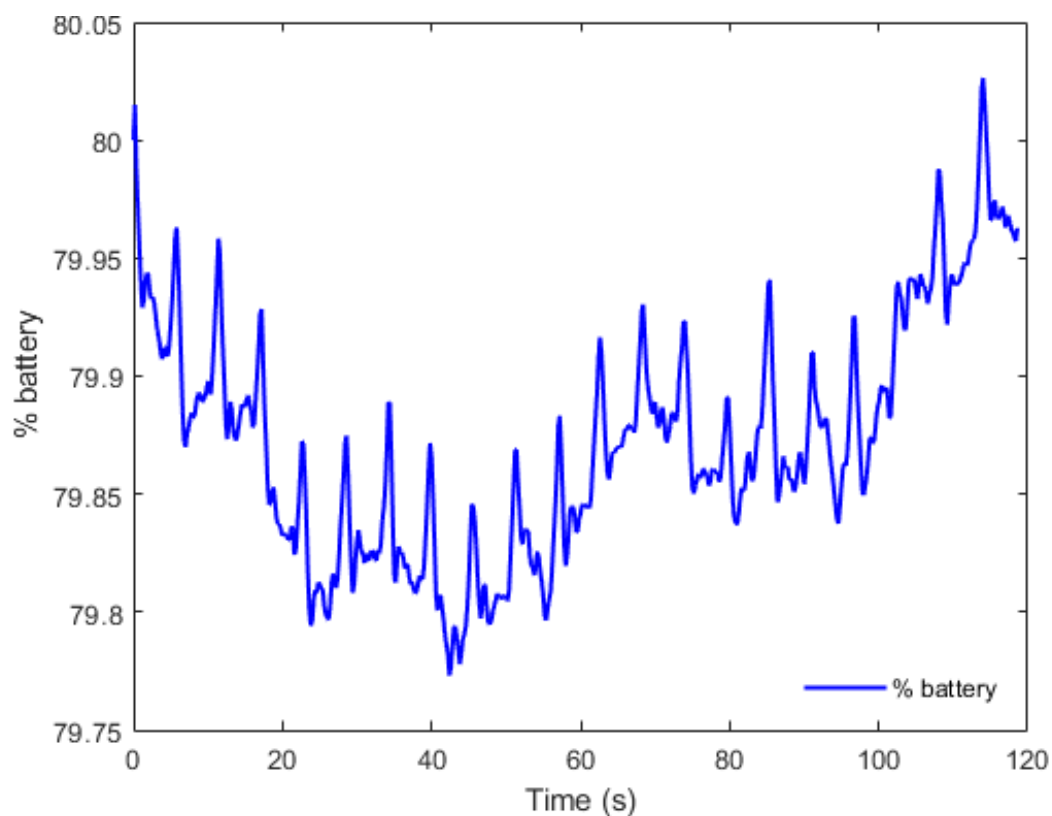


Ilustración 30. Gráfico del estado de carga de la batería.

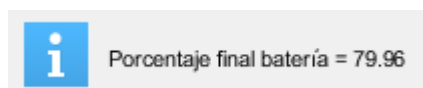


Ilustración 31. Porcentaje final de la batería.

○ **Caso 70%**

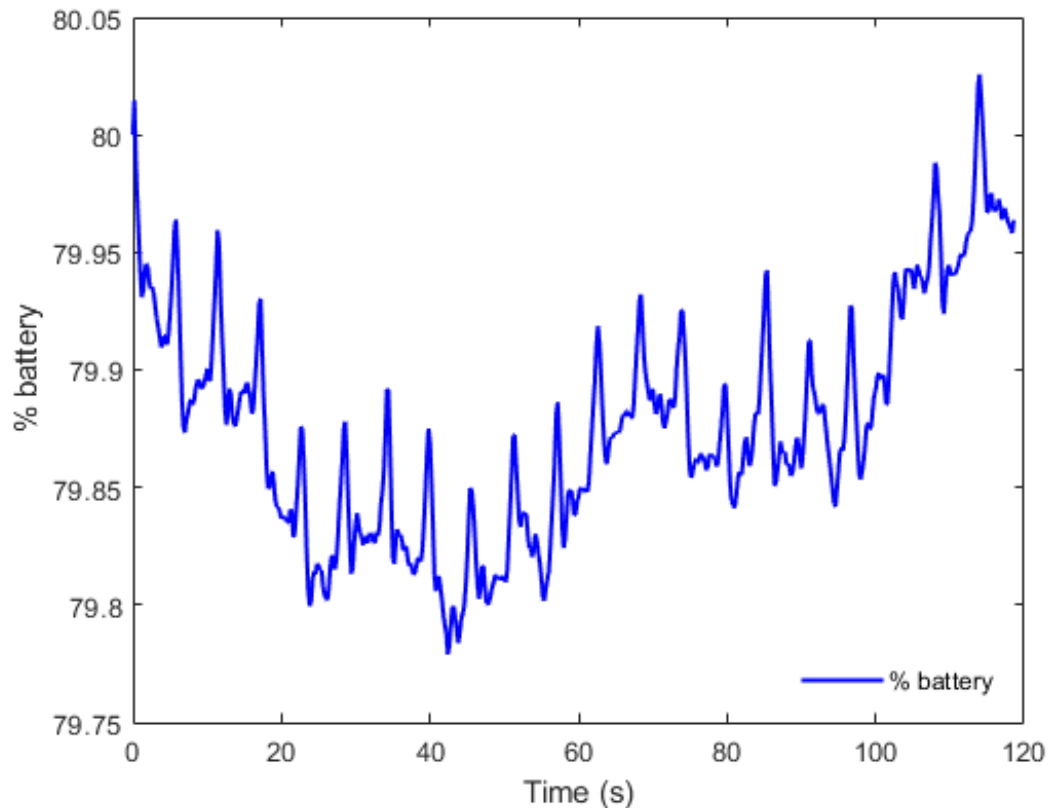


Ilustración 32. Gráfico del estado de carga de la batería.

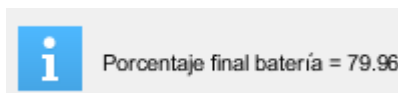


Ilustración 33. Porcentaje final de la batería.

Como se ve, las baterías están sobredimensionadas para el análisis de los datos, que son datos tomados en una situación de laboratorio, simplemente haciendo pruebas. Se quiere esto para que en la realidad pueda aguantar ciertos esfuerzos no considerados en el análisis.

9.7. Consumo de hidrógeno

En este apartado se ha calculado el consumo de hidrógeno una vez escogida la celda de combustible en cada caso de los estudiados.

9.7.1. Curvas de las celdas de combustible escogidas

Esta primera parte del programa se basa en la representación de las curvas de las celdas de combustible escogidas a partir del gráfico que proporciona el fabricante: la H-100, de 100

W; la H-200, de 200 W; y la H-300, de 300 W, de la marca Horizon.

A partir de estos gráficos Matlab aproxima la curva a un polinomio, que se va a utilizar para hacer los cálculos con la potencia. A continuación, se adjuntan las curvas del fabricante, para así tener más precisión, las aproximadas en Matlab están representadas en el anexo.

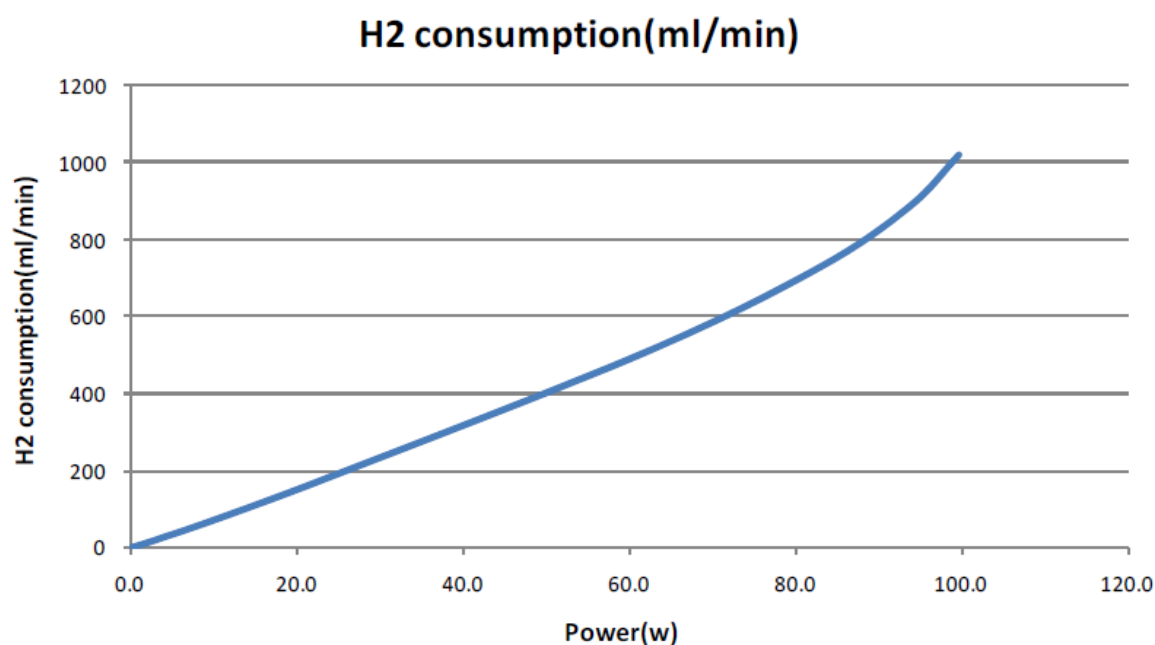


Ilustración 34. Curva del fabricante de la celda de combustible H-100.

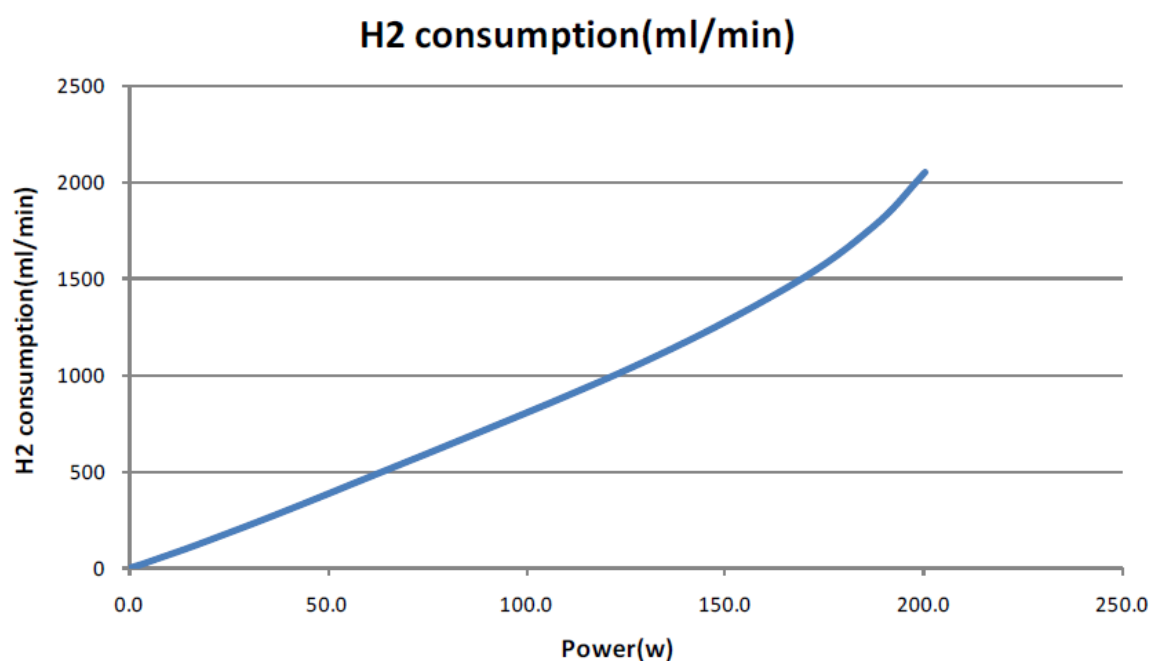


Ilustración 35. Curva del fabricante de la celda de combustible H-200.

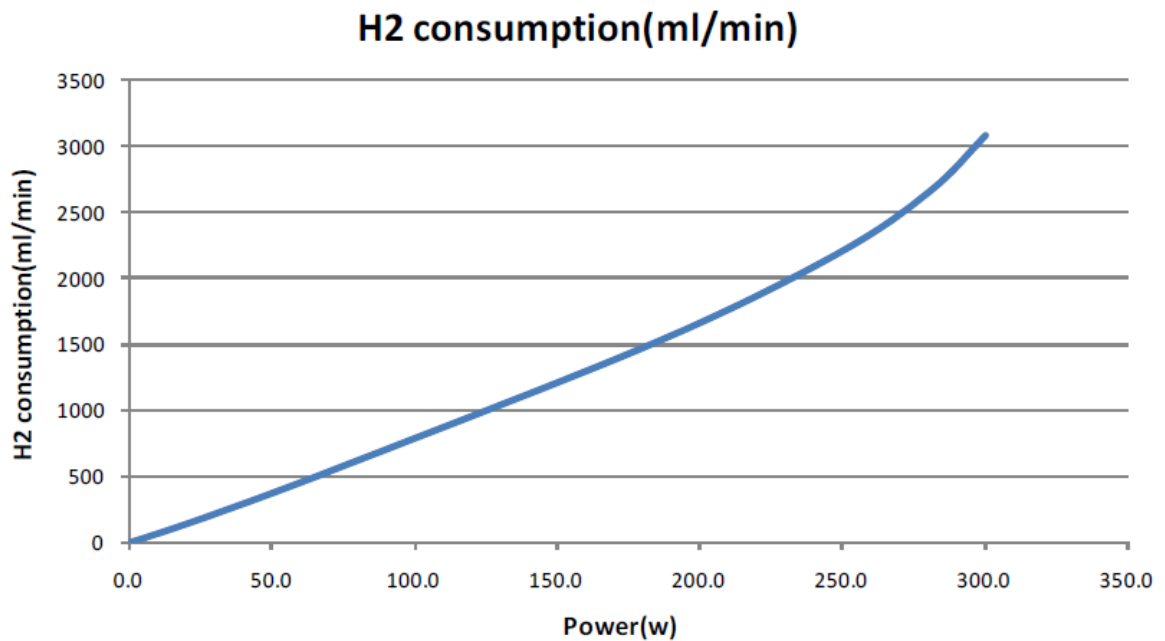


Ilustración 36. Curva del fabricante de la celda de combustible H-300.

9.7.2. Cálculo de la capacidad de almacenamiento y autonomía

La siguiente parte del consumo de hidrógeno es calcular la capacidad necesaria en función de las horas que se quieran tener de autonomía. Para ello se mira por cada punto de potencia que se tiene, su valor correspondiente de consumo de hidrógeno en los gráficos anteriores. Se hace una media de todos los valores de consumo de hidrógeno en cada punto para tener el consumo medio de ese caso concreto.

Así ya se puede calcular, según la autonomía, el consumo en litros de hidrógeno. Esto se consigue multiplicando la media del consumo por 60 minutos (ya que el consumo está en L/min) y por las horas que se quieran. Se han hecho cálculos para 4, 8 y 12 horas, para así ver qué caso es el que interesa más. A continuación, se ve la tabla con las capacidades y autonomías calculadas.

Tabla 8. Almacenamiento necesario para cada autonomía y caso.

CICLO	CASO	HORAS DE AUTONOMÍA	VOLUMEN NECESARIO
Datos reales	Celda de combustible trabaja a régimen constante	4 horas	207,31 L
		8 horas	414,62 L
		12 horas	621,93 L
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	4 horas	186,07 L
		8 horas	372,15 L
		12 horas	558,22 L
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	4 horas	185,84 L
		8 horas	371,69 L
		12 horas	557,53 L
Datos multiplicados por un factor	Celda de combustible trabaja a régimen constante	4 horas	333,10 L
		8 horas	666,20 L
		12 horas	999,30 L
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	4 horas	335,75 L
		8 horas	671,50 L
		12 horas	1007,25 L
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	4 horas	325,77 L
		8 horas	651,55 L
		12 horas	977,32 L
Datos que mantienen la misma media de los datos reales	Celda de combustible trabaja a régimen constante	4 horas	207,31 L
		8 horas	414,62 L
		12 horas	621,93 L
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	4 horas	185,57 L
		8 horas	371,13 L
		12 horas	556,70 L
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	4 horas	173,62 L
		8 horas	347,24 L
		12 horas	520,86 L

10. Elección de la capacidad de la celda de combustible, la batería y el almacenamiento de H₂

Cuando ya se ha hecho todo el estudio y análisis anterior, se puede empezar a estudiar la elección final para el proyecto de los componentes principales, es decir, la celda de combustible, la batería y el almacenamiento de hidrógeno. Se va a hacer un pequeño análisis económico de cada caso para poder realizar la mejor elección. Además de este análisis, se van a tener en cuenta las necesidades que pide cada caso, para elegir los peores y así dimensionar correctamente el sistema.

En la siguiente página se tienen los costes de las baterías y celdas de combustible. Como se ve, el coste representativo es el de las celdas de combustible, las baterías no influyen en el precio o decisión final.

Tabla 9. Elecciones y costes asociados a cada caso para las baterías y celdas de combustible.

CICLO	CASO	CAPACIDADES NECESARIAS		ELECCIÓN	€
Datos reales	Celda de combustible trabaja a régimen constante	Celda de combustible	92,25 W	100 W	1320
		Batería	2178,58 mAh (8,06 Wh)	2200 mAh	35
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	Celda de combustible	106,79 W	200 W	1936
		Batería	1525 mAh (5,64 Wh)	2000 mAh	22
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	Celda de combustible	126,17 W	200 W	1936
		Batería	653,57 mAh (2,42 Wh)	750 mAh	15
Datos multiplicados por un factor	Celda de combustible trabaja a régimen constante	Celda de combustible	164,21 W	200 W	1936
		Batería	3877,86 mAh (14,34 Wh)	3900 mAh	55
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	Celda de combustible	190,08 W	200 W	1936
		Batería	2714,5 mAh (10,04 Wh)	3000 mAh	22
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	Celda de combustible	224,57 W	300 W	2464
		Batería	1163,36 mAh (4,3 Wh)	1400 mAh	22
Datos que mantienen la misma media de los datos reales	Celda de combustible trabaja a régimen constante	Celda de combustible	92,25 W	100 W	1320
		Batería	7093,97 mAh (26,25 Wh)	7800 mAh	52
	Celda de combustible absorbe el 30% de los picos	Celda de combustible	139,25 W	200 W	1936
		Batería	4965,78 mAh (18,37 Wh)	5000 mAh	30
	Celda de combustible absorbe el 70% de los picos	Celda de combustible	202,68 W	300 W	2464
		Batería	2128,19 mAh (7,87 Wh)	2200 mAh	35

Para el caso del almacenamiento de hidrógeno, se han escogido contenedores de aluminio, al ser más baratos. Se han calculado los costes de los hidruros metálicos según la capacidad. Los litros son estándar, es decir, 1 atmosfera de presión absoluta y 0 °C.

Tabla 10. Costes y capacidades de los dos contenedores escogidos de almacenamiento de hidrógeno.

ELECCIÓN	CAPACIDAD (L)	COSTE (€)	€/L
<i>CL-370</i>	370	930	2,51
<i>2 x CL-370</i>	740	1860	2,51
<i>CL-910</i>	910	2134	2,35
<i>3 x CL-370</i>	1110	2790	2,51
<i>2 x CL-910</i>	1820	4268	2,34

A continuación, se presentan las elecciones de almacenamiento para cada caso, con el coste asociado.

Tabla 11. Almacenamiento necesario para cada autonomía y caso, con sus costes asociados.

CICLO	CASO	HORAS DE AUTONOMÍA	VOLUMEN NECESARIO	ELECCIÓN	€
Datos reales	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	4 horas	207,31 L	370 L	930
		8 horas	414,62 L	2 x 370 L	1860
		12 horas	621,93 L	2 x 370 L	1860
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	4 horas	186,07 L	370 L	930
		8 horas	372,15 L	370 L	930
		12 horas	558,22 L	2 x 370 L	1860
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	4 horas	185,84 L	370 L	930
		8 horas	371,69 L	370 L	930
		12 horas	557,53 L	2 x 370 L	1860
Datos multi-plicados por un factor	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	4 horas	333,10 L	370 L	930
		8 horas	666,20 L	2 x 370 L	1860
		12 horas	999,30 L	3 x 370 L	2790
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	4 horas	335,75 L	370 L	930
		8 horas	671,50 L	2 x 370 L	1860
		12 horas	1007,25 L	3 x 370 L	2790
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	4 horas	325,77 L	370 L	930
		8 horas	651,55 L	2 x 370 L	1860
		12 horas	977,32 L	3 x 370 L	2790
Datos que mantienen la misma media de los datos reales	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante</i>	4 horas	207,31 L	370 L	930
		8 horas	414,62 L	2 x 370 L	1860
		12 horas	621,93 L	2 x 370 L	1860
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos</i>	4 horas	185,57 L	370 L	930
		8 horas	371,13 L	370 L	930
		12 horas	556,70 L	2 x 370 L	1860
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos</i>	4 horas	173,62 L	370 L	930
		8 horas	347,24 L	370 L	930
		12 horas	520,86 L	2 x 370 L	1860

Finalmente, en la siguiente tabla se ven los costes totales para cada caso.

Tabla 12. Costes totales de celda de combustible, batería y almacenamiento de hidrógeno para cada caso.

CICLO	CASO	HORAS DE AUTONOMÍA	€
Datos reales	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante (100 W)</i>	4 horas	2285
		8 horas	3215
		12 horas	3215
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos (200 W)</i>	4 horas	2888
		8 horas	2888
		12 horas	3818
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos (200 W)</i>	4 horas	2882
		8 horas	2882
		12 horas	3812
Datos multiplicados por un factor	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante (200 W)</i>	4 horas	2921
		8 horas	3852
		12 horas	4782
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos (200 W)</i>	4 horas	2888
		8 horas	3818
		12 horas	4748
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos (300 W)</i>	4 horas	3416
		8 horas	4346
		12 horas	5276
Datos que mantienen la misma media de los datos reales	<i>Celda de combustible trabaja a régimen constante (100 W)</i>	4 horas	2302
		8 horas	3233
		12 horas	3233
	<i>Celda de combustible absorbe el 30% de los picos (200 W)</i>	4 horas	2897
		8 horas	2897
		12 horas	3827
	<i>Celda de combustible absorbe el 70% de los picos (300 W)</i>	4 horas	3429
		8 horas	3429
		12 horas	4359

Como se ve, hay casos que son peores que otros, pero que tienen el mismo coste final. Esto es por las elecciones tomadas anteriormente. Por ejemplo, el coste es el mismo tanto para 8 como 12 horas en el primer caso (datos reales y régimen constante). Esto se da, en este caso concreto, porque se utiliza la misma celda de combustible y almacenamiento, ya que los cálculos de cada caso hacían que se necesitaran los mismos componentes, aunque el caso de 12 horas sea el más complicado (para la utilización con los números de los cálculos se necesita más potencia y más almacenamiento).

Así, se descartan directamente los casos en los que sólo se necesita una celda de combustible de 100 W, ya que se cree que es demasiada poca potencia comparado a lo que se podría necesitar en una situación real y no de laboratorio como ha sido el caso del análisis. Como se quiere sobredimensionar el sistema, para que pueda aguantar los requerimientos de una situación exigente en la realidad y no en un laboratorio, finalmente se elimina la posibilidad de utilizar finalmente una celda de combustible de 200 W.

Por consiguiente, se escoge la celda de combustible de 300 W, además que el coste asociado de pasar de 200 a 300 W no es muy elevado y vale la pena tener la potencia extra por si fuera necesario en un futuro.

El caso que se había considerado para trabajar de forma normal una vez instalado el sistema en el robot era el de que la celda de combustible asume el 30% de los picos. Esto es porque se piensa que la celda de combustible no respondería bien ante las grandes pendientes de potencia que se pueden pedir en una situación exigente real. Por eso se necesitaría tener una batería con la máxima capacidad posible, ya que asume el 70% de estas pendientes. Ya que el caso escogido finalmente para la elección de los componentes es el del ciclo 3, es decir, el de datos que mantienen la misma media, pero están multiplicados por un factor, se escoge la batería de 2200 mAh, a 3,7 V.

Para acabar, se debe decidir la autonomía. Mirando la fila del caso escogido, se tendría la posibilidad de que tanto para 4 como para 8 horas el coste es el mismo (3429 €). Por eso, se debe decidir entre 8 o 12 horas, que varían por utilizar uno o dos contenedores de 370 L. El coste de utilizar dos en vez de uno pasa de los 3429 € dichos anteriormente, a 4359 €. Es un coste importante, además de utilizar el doble de espacio. Estos contenedores no son muy grandes (concretamente 81 mm de diámetro y 224 mm de altura).

Finalmente se decide apostar por la versión con 12 horas de autonomía, ya que el tamaño de estos contenedores es bastante menor al diámetro del robot, de 664 mm. Por lo que se podrían poner dos fácilmente, además de aumentar bastante la autonomía del sistema, que es lo que se quiere conseguir.

Así, para concluir, se han escogido la celda de combustible de 300 W, la batería de 2200 mAh y la opción de 12 horas de autonomía, con dos contenedores de hidruros metálicos de 370 L.

11. Presupuesto

En este apartado se va a definir el presupuesto necesario para este proyecto, contando tanto materiales como horas de trabajo.

Tabla 13. Costes totales del proyecto.

COSTES DE MATERIALES			
Concepto	Cantidad	Precio unitario (€)	Precio total (€)
Celda de combustible H-300 de Horizon	1	2465	2464
Batería de 2200 mAh	1	35	35
Bombona de hidrógeno CL-370	2	930	1860
Costes totales de materiales			4359
COSTES DE PERSONAL			
Concepto	Precio/hora (€/h)	Horas (h)	Precio total (€)
Trabajo estudiante	20	320	6400
Tutorías	50	10	500
Costes totales de personal			6900
COSTES TOTALES PROYECTO			11259

Conclusiones

Finalmente, se han podido escoger los tres componentes principales, en base al análisis de los datos proporcionados por los responsables del robot. Como se ha visto en el trabajo, este análisis se ha realizado con los datos base y con dos maneras extra modificándolos. Además, en cada análisis se han estudiado tres casos de hibridación distintos. Estos casos dependían de si la celda de combustible trabajaba a régimen constante, es decir, sin cambiar la potencia que proporciona en cada instante, o si asumía una parte de los cambios de potencia del sistema. Así, la potencia restante la subministraba la batería.

Las conclusiones del primer ciclo, con los datos reales, han sido que pedía demasiada poca potencia con lo que se pensaba que iba a pedir el sistema en un caso real y no de laboratorio, por eso finalmente estos casos no se han escogido como sistema final. El segundo ciclo, de datos multiplicados por un factor, se aproximó bastante a lo que se quería, saliendo unas necesidades más exigentes, aunque finalmente se escogió uno de los casos del último ciclo, con la misma media que los datos reales pero multiplicado por un factor. Este caso era el más exigente en general ya que conseguía unas pendientes bastante complicadas para el sistema.

Con todo esto, la celda de combustible escogida ha sido la H-300, de la marca Horizon, de 300 W; una batería de 2200 mAh a 3,7 V; y dos bombonas CL-370, de hidruros metálicos, que proporcionan una autonomía al sistema de 12 horas. Se ha decidido coger uno de los casos más exigentes para así dimensionar el sistema lo más correcto y parecido a la realidad posible. Lo que no se quiere es que en algún momento el sistema necesite hacer alguna acción más exigente y que no pueda responder.

Agradecimientos

Se agradece al Institut de Robòtica i Informàtica Industrial por haberme presentado esta oportunidad de trabajo de fin de máster, ha sido interesante y se ha aprendido mucho sobre temas de los que no se sabía tanto al empezar. También es de agradecer a los dos proyectos que están involucrados en el trabajo: el proyecto europeo Inn Balance y el proyecto nacional Dovelar.

También se agradece mucho el apoyo de la familia y amigos, que siempre son una ayuda para seguir adelante en los momentos difíciles.

Bibliografía

- [1] http://wiki.iri.upc.edu/index.php/PFC_Segway_fuel_cell_propulsion_system#Manifold_MH-20_EVO6
- [2] Step by step development of a real fuel cell system. F. Segura, J.M. Andújar.
- [3] Fuel cell systems explained. Dicks, Andrew; Rand, David; Anthony, James.
- [4] Proton Exchange Membrane Fuel Cells. Zhigang Qi.
- [5] <https://www.innbalance-fch-project.eu>
- [6] <https://www.iri.upc.edu/project/show/225>
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell
- [8] <https://www.linde-mh.com/en/About-us/Innovations-from-Linde/Fuel-Cells.html>
- [9] <http://hydrogencomponents.com/hydride.html>

Celdas de combustible analizadas

- [10] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/greenbox-2-300>
- [11] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/greenhub-2-pro-500>
- [12] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/greenhub-2-1000>
- [13] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/g-hfcs-300w12v-300w-hydrogen-fuel-cell-power-generator>
- [14] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/g-hfcs-600w24v-600w-hydrogen-fuel-cell-power-generator>
- [15] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/g-hfcs-1kw36v-1000w-hydrogen-fuel-cell-power-generator>
- [16] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/aerostak-a-500-ultralight>
- [17] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/aerostak-a-1000-lv-ultralight>
- [18] <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks/medium-power-fuel-cell-stacks/aerostak-a-1000-hv-ultralight>

Baterías escogidas

- [19] <https://www.all-batteries.es/bateria-li-ion-3-7v-2-2ah-acl9003.html>
- [20] <https://www.batteryspace.com/custom-polymer-li-ion-battery-3-7v-2000mah-7-4-wh-4a-rate-with-10k-thermistor.aspx>
- [21] <https://www.batteryspace.com/lg-lithium-21700-battery-3-63v-5000mah-18-15wh-2a-rate-inr21700-m50-with-ntc.aspx>
- [22] <https://www.batteryspace.com/custom-polymer-li-ion-battery-3-7v-750-mah-2-8wh-1a-rate-battery-0-23.aspx>
- [23] <https://www.batteryspace.com/custom-li-ion-rcr123a-battery-pack-3-7v-3900mah-14-43wh-battery.aspx>
- [24] <https://www.batteryspace.com/custom-li-ion-18650-battery-3-6v-3000mah-10-8wh-20a-rate-lg-18650hg2.aspx>
- [25] <https://www.batteryspace.com/Custom-Polymer-Li-Ion-battery-3.7V-1400mAh-5.2Wh-5A-rate-with-Thermisto.aspx>
- [26] <https://www.batteryspace.com/li-ion18650battery37v7800mah2886whbatterymodulewithpcb.aspx>