



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el  
análisis y evaluación de pilas de combustible de  
intercambio protónico de cátodo abierto

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Química

AUTOR/A: Rubio Diaz, Pascual

Tutor/a: García Bernabé, Abel

Cotutor/a: Montero Reguera, Álvaro Enrique

Cotutor/a: Sánchez Díaz, Carlos

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

## **AGRADECIMIENTOS**

Antes de poner fin, mediante este trabajo de fin de grado, a una etapa como mi carrera que ha sido un gran aprendizaje tanto a nivel académico como a nivel personal me gustaría agradecer a todas las personas que de alguna manera han estado ahí y han hecho posible que las cosas se hayan dado de esta manera.

En primer lugar, me gustaría mencionar a mis tutores, Abel, Álvaro y Carlos, ellos han sido muy pacientes conmigo y siempre se han mostrado dispuestos a ayudarme con cualquier cuestión que haya surgido. Su experiencia y conocimiento han tenido un importante valor en la realización de este trabajo.

Además, también me gustaría agradecer a todos mis profesores durante el grado ya que gracias a las herramientas adquiridas a lo largo de estos años en la universidad y los conocimientos transmitidos durante las clases actualmente estoy a un paso de terminar el grado universitario.

Por otro lado, quiero agradecer a mi familia: A mis padres, hermanos, cuñados y a mi sobrina. Siempre han estado para mí en cualquier faceta de la vida y siempre han servido de inspiración y como modelo a seguir a la hora de enfrentar la vida y sus retos. Siempre han sabido como transmitirme los valores correctos y me han ayudado a crecer y convertirme en la persona que soy y quiero ser ofreciéndome un gran respaldo y los mejores consejos.

Finalmente, voy a agradecer a mis amigos y compañeros, que siempre que ha sido necesario han tenido una palabra de tranquilidad y una sonrisa para mí. A aquellos con los que además he convivido de cerca y a diario, quiero también agradecerles su compañía y consejos en el plano más personal.

## **RESUMEN**

El uso de combustibles fósiles implica la generación de gases de efecto invernadero cuya liberación a la atmósfera es una conocida y alertada contribución al cambio climático y a las fatales consecuencias que este puede llegar a acarrear. Esto ha llevado al ser humano al planteamiento de alternativas a este tipo de combustibles, una de ellas es el uso del hidrógeno ya que solo genera agua como residuo.

El uso del hidrógeno como vector energético se ve estrechamente relacionado con el uso de pilas de combustible, pues esta es la principal herramienta que permite la transformación de la energía química del hidrógeno en energía eléctrica por medio de reacciones de oxidación y reducción.

En el presente trabajo de fin de grado se va a analizar y evaluar la puesta en marcha de un banco de pruebas para la determinación del comportamiento de una pila de hidrógeno desde una perspectiva experimental y enmarcándolo en un contexto acerca de los diferentes usos que pueden tener este tipo de sistemas para vehículos pequeños y medianos; bien terrestres (patines, motos ligeras, sistemas para personas con movilidad reducida...) o aéreos (drones).

La pila de hidrógeno de la que se va a hacer uso es una PEMFC (pila de combustible de membrana de intercambio protónico) cuya potencia es de 100 W. También se hará uso de un depósito para el almacenamiento del hidrógeno (obtenido de un sistema de electrólisis) que alimente la pila con una capacidad de 6.8L.

Por tanto, la primera parte del trabajo se basará en la contextualización de este para posteriormente entrar en el grueso de contenido del mismo, es decir, la descripción de la parte experimental donde se trabajará con la pila de combustible, se presentarán los resultados y, finalmente, se expondrán las conclusiones de este

**Palabras Clave:** Hidrógeno, hidrógeno verde, pila de combustible, energía, sostenibilidad, vector energético, banco de pruebas.

## RESUM

L'ús de combustibles fòssils implica la generació de gasos d'efecte hivernacle, la lliberació dels quals a l'atmosfera és una coneguda i alertada contribució al canvi climàtic i a les fatals conseqüències que aquest pot arribar a comportar. Això ha portat l'ésser humà a plantejar alternatives a aquest tipus de combustibles, una d'elles és l'ús de l'hidrogen ja que només genera aigua com a residu.

L'ús de l'hidrogen com a vector energètic està estretament relacionat amb l'ús de piles de combustible, ja que aquesta és la principal eina que permet la transformació de l'energia química de l'hidrogen en energia elèctrica mitjançant reaccions d'oxidació i reducció.

En el present treball de final de grau s'analitzarà i avaluarà la posada en marxa d'un banc de proves per a la determinació del comportament d'una pila d'hidrogen des d'una perspectiva experimental i enmarcant-lo en un context sobre els diferents usos que poden tenir aquest tipus de sistemes per a vehicles petits i mitjans; ja siguin terrestres (patins, motos lleugeres, sistemes per a persones amb mobilitat reduïda...) o aeris (drones).

La pila d'hidrogen que es farà servir és una PEMFC (pila de combustible de membrana d'intercanvi protònic) amb una potència de 100 W. També es farà servir un dipòsit per a l'emmagatzematge de l'hidrogen (obtingut d'un sistema d'electròlisi) que alimenti la pila amb una capacitat de 6,8L.

Per tant, la primera part del treball es basarà en la contextualització d'això per a posteriorment entrar en el gruix de contingut del treball, és a dir, la descripció de la part experimental on es treballarà amb la pila de combustible, es presentaran els resultats i, finalment, s'exposaran les conclusions d'aquest.

**Paraules clau:** Hidrogen, hidrogen verd, pila de combustible, energia, sostenibilitat, vector energètic, banc de proves.

## **ABSTRACT**

The use of fossil fuels involves the generation of greenhouse gases whose release into the atmosphere is a well-known and warned contribution to climate change and the potentially catastrophic consequences it can entail. This has led humanity to consider alternatives to such fuels, and one of them is the use of hydrogen since it only generates water as a residue.

The use of hydrogen as an energy carrier is closely related to the use of fuel cells because this is the primary tool that allows the transformation of the hydrogen's chemical energy into electrical energy through oxidation and reduction reactions.

In this undergraduate thesis, the implementation of a test bench to determine the behavior of a hydrogen fuel cell from an experimental perspective will be analyzed and evaluated. We will frame it in a context regarding the various uses that such systems can have for small and medium-sized vehicles, whether they are land-based (scooters, light motorcycles, systems for people with reduced mobility, etc.) or aerial (drones).

The hydrogen fuel cell to be used is a PEMFC (proton exchange membrane fuel cell) with a power output of 100 W. We will also use a storage tank for hydrogen (obtained from an electrolysis system) to supply the fuel cell with a capacity of 6.8 liters.

Therefore, the first part of the work will be based on contextualization, followed by the main content of the work, which includes the description of the experimental part where we will work with the fuel cell. We will then present the results and, finally, discuss the conclusions of this research.

**Keywords:** Hydrogen, green hydrogen, fuel cell, energy, sustainability, energy vector, test bench.

# ÍNDICE

## DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

- Memoria
- Presupuesto

## ÍNDICE DE LA MEMORIA

CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN .....	1
1.1. OBJETIVOS .....	1
1.1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	1
1.1.2 OBJETIVOS ACADEMICOS .....	1
1.2 MOTIVACIÓN .....	1
CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN .....	3
2.1. ENERGÍA, FUENTES DE ENERGÍA Y CONSUMO .....	4
2.2 EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO .....	11
2.3 PILAS DE COMBUSTIBLE. FUNDAMENTOS, TIPOS Y APLICACIONES.....	14
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....	33
3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS.....	33
3.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA .....	44
CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	46
4.2 MONITOREO DE LA EXPERIMENTACIÓN .....	47
CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	49
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....	54
CAPÍTULO 7. RELACIÓN DEL TFG CON LOS ODS.....	57
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA.....	61

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

## ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

PRESUPUESTO .....	63
PRESUPUESTO .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Venn para los fundamentos de la sostenibilidad.....	6
Figura 2: Consumo energético mundial por fuentes de energía en 1973. Fuente IEA. <a href="https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&amp;utm_source=SendGrid&amp;utm_medium=Email">https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&amp;utm_source=SendGrid&amp;utm_medium=Email</a> .....	9
Figura 3: Consumo energético mundial por fuentes de energía en 2018. Fuente IEA. <a href="https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&amp;utm_source=SendGrid&amp;utm_medium=Email">https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&amp;utm_source=SendGrid&amp;utm_medium=Email</a> .....	10
Figura 4: Comparativa temporal de las toneladas de petróleo equivalentes por fuente de energía. Fuente IEA. <a href="https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&amp;utm_source=SendGrid&amp;utm_medium=Email">https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&amp;utm_source=SendGrid&amp;utm_medium=Email</a> .....	10
Figura 5: Gráfico de población mundial. Fuente: Google .....	11
Figura 6: Diferentes tipos de hidrógeno según su color asociado. Fuente: Sitio Web dell Hidrógeno. <a href="https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html">https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html</a> .....	13
Figura 7: Densidades de energía volumétrica y másica bruta de algunos combustibles. Fuente: Wikipedia. <a href="https://es.m.wikipedia.org/wiki/Densidad_de_energ%C3%ADa">https://es.m.wikipedia.org/wiki/Densidad_de_energ%C3%ADa</a> .....	14
Figura 8: Esquema de una pila monocelda de hidrógeno. Fuente: Google imágenes.....	16
Figura 9: Estructura de una pila de combustible con más de una celda. Fuente: Google imágenes. ....	17
Figura 10: Ejemplos de curvas de densidad de potencia y curvas i-V de una pila de combustible. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals. 18	
Figura 11: Energía de activación. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals .....	23
Figura 12: Valor de la energía libre frente a la distancia a la interfaz electrodo-electrolito. La curva 1 representa la energía del estado Metal-H en función de separación entre H y la superficie del metal. La curva 2 muestra la energía libre de los productos. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals .....	25
Figura 13: Gráficas de energía frente a distancia de la interfaz. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals.....	26
Figura 14: Grafica de potencial-distancia. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals .....	27

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Figura 15: Mapa de las hidrogeneras actuales en la península ibérica.....	32
Figura 16: Imágenes de la pila Horizon H100 de 100W. ....	33
Figura 17: Subsistema controlador de la pila Horizon H100 de 100W. ....	34
Figura 18: Configuración del software PuTTY. ....	36
Figura 19: Interfaz del software PuTTY. ....	37
Figura 20: Carga y resistencias. ....	37
Figura 21: Proceso de adaptación de las señales de temperatura. ....	38
Figura 22: Rectas tensión-temperatura para los sensores de temperatura. ....	38
Figura 23: Recta calibrado sensor de tensión. ....	39
Figura 24: Circuito del sensor de corriente. ....	39
Figura 25: Placa de sensores de corriente y tensión.....	40
Figura 26: Esquema de la placa de sensores.....	40
Figura 27: Vista de la placa de sensores.....	41
Figura 28: Parte del programa de lectura de señales en LabView modificada.....	42
Figura 29: Sistema de adquisición de datos. ....	42
Figura 30: Montaje completo en el laboratorio LABDER del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPV. ....	43
Figura 31: Canales del sistema de adquisición de datos. ....	44
Figura 32: Detector de hidrógeno.....	47
Figura 33: Vista del front panel.....	48
Figura 34: Curva de Intensidad-Voltaje del primer experimento con la pila de combustible H100. ....	49
Figura 35: Curva de Intensidad-Potencia experimental del primer experimento de la pila de combustible H100. ....	50
Figura 36: Curva de intensidad-voltaje del segundo experimento para la pila de combustible H100. ....	50
Figura 37: Curva de intensidad-potencia del segundo experimento para la pila de combustible H100. ....	51
Figura 38: Gráfica de la temperatura de la celda.....	52
Figura 39: Gráfica de la temperatura ambiental.....	53
Figura 40: Gráficas características aportadas por el fabricante.....	54
Figura 41: Objetivos de desarrollo sostenible.....	57
Figura 42: ODS relacionados con el TFG.....	58

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Tabla 1: Características de las fuentes de energía en materia de sostenibilidad. Fuente: Propia. .....	6
Tabla 2: Parámetros de la curva Intensidad-Voltaje. ....	52
Tabla 3: Grado de relación con cada ODS. ....	59
Tabla 4: Presupuesto recursos humanos. ....	65
Tabla 5: Presupuesto materiales. ....	66
Tabla 6: Presupuesto de instalaciones. ....	66
Tabla 7: Presupuesto total. ....	66

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

***Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto***

Autor: Pascual Rubio Díaz

Tutores: Álvaro Enrique Montero Reguera

Carlos Sánchez Díaz

Abel García Bernabé

# **CAPÍTULO 1. OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN**

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El principal objetivo que tiene este Trabajo Fin de Grado es la puesta en marcha de un banco de pruebas para el control de una pila de combustible y el ensayo de caracterización de la misma.

Además, se consideran los siguientes objetivos secundarios:

- Puesta en marcha una pila de combustible comercial de 100 W.
- Conexión del hidrogeno del laboratorio LabDer a la pila de combustible.
- Caracterización experimental mediante curvas I-V de la pila de combustible.
- Adaptación del programa de adquisición de datos a las necesidades de la pila en Labview.
- Adaptación de conexiones de hardware a la pila de combustible y otros dispositivos.
- Control y regulación de la temperatura de trabajo.

### **1.1.2 OBJETIVOS ACADEMICOS**

El objetivo académico general para este proyecto es la consecución de los 12 créditos ECTS así como una preparación para la continuación del aprendizaje en esta disciplina de cara al futuro en un máster.

- Toma de contacto y ampliación de conocimiento acerca del paradigma energético actual.
- Aprendizaje y concienciación acerca de las circunstancias medioambientales actuales.
- Conocimiento sobre el funcionamiento de las pilas de combustible, los diferentes tipos existentes y sus aplicaciones.
- Toma de datos empíricos en laboratorio.

## **1.2 MOTIVACIÓN.**

Desde un punto de vista personal y como futuro graduado en ingeniero técnico industrial especializado en química, el cuidado del medio ambiente a través de las herramientas adquiridas en el grado universitario y del aprendizaje autónomo es un hecho realmente motivante. Esto permite relacionar bastante bien tanto las implicaciones del uso de fuentes de energía convencionales como la necesidad de buscar alternativas a estas, en este caso, la del hidrógeno.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Por otra parte, para cualquier estudiante de un grado de la rama técnica el uso de dispositivos no tan utilizados o estudiados tanto a nivel teórico como práctico en los cursos del grado siempre supone un aliciente extra en tal de alcanzar nuevos conocimientos y mejorar de alguna manera como profesional en el futuro. En este caso se trata del uso de las pilas de combustible de hidrógeno.

Tomando en cuenta estas dos razones la motivación para este trabajo de fin de grado podría resumirse como la combinación entre un interés por la mejora de las condiciones climáticas y la aplicación de conocimientos e instrumentación técnica.

## **CAPÍTULO 2. INTRODUCCIÓN**

La preocupación por la amenaza de crisis climática sumada a la posibilidad de la escasez y posterior agotamiento de las actuales fuentes de energía más comunes, los combustibles fósiles, ha puesto de manifiesto la necesidad de alternativas a estas. Primando tres cuestiones: la sostenibilidad de estas en términos climáticos, el agotamiento de cara al futuro y el coste a nivel económico. En el año 2021, posterior a la pandemia por el SARS-CoV-2019, las toneladas métricas de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera ascendían a 37.12 millones (1) respecto a años anteriores (sin contar el 2020 debido a los meses de cuarentena casi global por la pandemia de Covid-19). Se ha observado una tendencia creciente de la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera.

Estas emisiones de gases de efecto invernadero generadas de origen humano suponen una perturbación del equilibrio energético del planeta, lo cual implica el cambio climático (2). Esto lleva a una situación de aumento de la temperatura global del planeta, en los últimos 100 años este aumento sería, a nivel global, de en torno a 0.76 grados centígrados. En España, se hablaría de un aumento de un grado y medio, mientras que, en zonas más comprometidas por la gran acumulación de hielo, los polos, de 5 grados (3). Este aumento de la temperatura es una gran amenaza por las implicaciones directas que este podría tener en el planeta Tierra tal y como lo conocemos. Algunas de sus consecuencias mencionables serían el derretimiento de las masas de hielo polares y el consecuente aumento del nivel del mar, cambios en los patrones de precipitación, impacto en la biodiversidad y un largo etcétera.

La situación actual en lo referente a dicha amenaza ha llevado a la comunidad científica a la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles en tal de amainar el avance del cambio climático. De hecho, la Unión Europea y sus estados miembros destinarán en 2023, 550000 millones de euros del presupuesto plurianual para la acción climática (4).

Entre las diferentes alternativas energéticas que actualmente se postulan como sustitutivos de los combustibles fósiles se encuentra el hidrógeno. Este permite, mediante el uso de pilas de combustible la obtención de energía eléctrica sin emisiones de gases de efecto invernadero y dotando a los vehículos que pudieran utilizar dichos sistemas de una mayor autonomía que con el uso de baterías para motores eléctricos. El principal inconveniente de este gas sería la volatilidad de este, que combinada con la inflamabilidad que este posee puede llevar a la generación de atmosferas explosivas en los entornos destinados bien a la producción, el almacenamiento o repostaje. Es por ello por lo que los requerimientos de seguridad en dichos entornos deberían de ser altamente estrictos.

## **2.1. ENERGÍA, FUENTES DE ENERGÍA Y CONSUMO**

### **ENERGÍA**

La energía es un concepto que, desde los albores de la revolución industrial, ha llevado al ser humano a una tendencia general hacia el ahorro y el cuidado en el consumo de esta, bien por motivos económicos en un principio o debido a causas medioambientales, una razón mucho más de actualidad. Una definición sencilla de esta magnitud podría ser la moneda de cambio por la producción de trabajo o calor (5), la energía no es una magnitud tangible, evidentemente, pero su variación está presente desde tareas cotidianas como encender una bombilla o un televisor hasta procesos industriales donde el gasto energético es masivo.

A nivel científico las disciplinas que generalmente tratan temas referentes a la energía son la física y la química. El punto de unión entre estas para tratarlos es la termodinámica. El conocimiento acerca de esta a la hora de hablar de procesos donde la variación de energía es una de las principales razones de ser del propio proceso es algo básico.

Un principio básico sobre la energía es el principio de conservación de la misma, este dice que la creación o destrucción de energía es un hecho imposible, es decir, que la cantidad total de energía existente es constante y a medida que se consume una forma concreta de energía esta aparece a su vez en una forma distinta, o lo que es lo mismo, se transforma.

En general, para los procesos industriales se requiere un aporte energético, por ejemplo, un dron que se mueve por mediación de una pila de combustible de hidrógeno necesitará ese propio aporte de hidrógeno que alimente la pila para poder funcionar, el caso del hidrógeno es particularmente interesante debido a que no genera residuos contaminantes en su propio proceso de combustión u oxidación, no así con otros tipos de combustibles, que generan gases de efecto invernadero.

### **FUENTES DE ENERGÍA**

Se les llama fuentes de energía a aquellos recursos o fenómenos que posee el ser humano para la obtención de energía mediante procesos físicos o químicos.

A nivel industrial, las fuentes de energía representan uno de los mayores gastos a nivel económico, es por ello por lo que desde el último cuarto del siglo XX en adelante se han ido buscando alternativas a las habituales. Además, las actuales fuentes de energía convencionales se hallan en un contexto de escasez, es decir, que estas reservas naturales de las que dispone el ser humano se están agotando. Estos dos hechos están estrechamente relacionados, pues debido a la ley de la oferta y la demanda, una disminución de la cantidad de combustible disponible hará crecer el precio de este, de hecho, en los 70 el precio del petróleo (principal fuente de energía actual) ya comenzaba a fluctuar (los llamados *shocks*) debido a las investigaciones que ponían de manifiesto dicho agotamiento. Posteriormente, el precio volvería a disminuir hasta finales de los noventa y principio de los 2000, cuando volvería a esa tendencia al alza salvo en la crisis de 2008, precisamente por ese contexto de depresión económica [6].

Por otra parte, otro de los motivos, más que argumentados sobre el problema de las fuentes de energía convencionales es la cuestión climática. Como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones en la presente memoria, la gran mayoría de estas fuentes convencionales se utilizan

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

mediante la combustión, que implica una gran producción de CO<sub>2</sub>, pues estos combustibles son hidrocarburos, lo que favorece el efecto invernadero.

Para hablar de las fuentes de energía es interesante hacer hincapié en las clasificaciones en las que estas pueden encasillarse:

En primer lugar, se fija una diferenciación entre aquellas primarias y secundarias, estas son distintas entre sí por razones de origen, es decir, si la energía es proveniente de un fenómeno natural y su energía no ha sido transformada será primaria (el sol, el viento, los materiales radioactivos, corrientes de agua, el petróleo...). Si por el contrario se ha realizado un proceso para obtener dicha energía que ha transformado la fuente se le denomina secundaria. Por ejemplo, un coche cuenta con un depósito de gasolina, que sería una fuente secundaria pues esta proviene del petróleo que se debe destilar para poder obtener sus fracciones usadas como combustible. [7]

Por otro lado, el concepto de renovabilidad es otra cuestión que, de cara a la consideración que se tiene sobre una fuente de energía, tiene gran importancia. Se dice que una fuente de energía es renovable si a medida que el tiempo pasa y el consumo de esta no cesa esta no se va agotando. Por ejemplo, como ya se conoce el carbón o el petróleo no serían renovables, pues estas se agotan al ser utilizadas, sin embargo, la energía eólica, la energía solar o la hidroeléctrica sí lo serían.

Independientemente de los dos criterios anteriores se debe evaluar también si la fuente de energía es limpia desde un punto de vista medioambiental, es decir, que no sean contaminantes, no favorezcan el efecto invernadero, y, por ende, el cambio climático. Existe una tendencia que aquellas que son renovables se asocian a energías más limpias a nivel ecológico, sin embargo, existen evidencias con, por ejemplo, la energía nuclear, que si el almacenamiento de los residuos que esta genera son almacenados de forma correcta y hermética no debería de ser una fuente de energía sucia, ya que, aparte de los residuos anteriormente mencionados, únicamente genera agua en forma de vapor fruto del uso de esta para procesos de refrigeración. Cierto es, por otro lado, que toda fuente de energía conlleva un impacto en el medio ambiente, pero no son iguales en intensidad en todos los casos, por ello la necesidad de encontrar fuentes de energía con menor impacto.

Otra manera de enfocar el uso de una u otra fuente de energía es la sostenibilidad. La sostenibilidad es más crítica que las anteriormente mencionadas en el sentido que combina aspectos económicos, sociales y ecológicos para determinar si es o no sostenible. De algún modo, la sostenibilidad vendría a representar la viabilidad real del uso de una fuente de energía desde una perspectiva global.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto



*Figura 1: Diagrama de Venn para los fundamentos de la sostenibilidad*

Por tanto, las diferentes fuentes de energía deben ser analizadas y contempladas según los anteriores términos para determinar su validez como fuente de energía sostenible:

Tabla de características de fuentes de energía					
FUENTE	PRIMARIA	SECUNDARIA	LIMPIA	RENOVABLE	SOSTENIBLE
<b>Petróleo</b>	Sí	No	No	No	No
<b>Gas Natural</b>	Sí	No	No	No	No
<b>Carbón</b>	Sí	No	No	No	No
<b>Fracciones del petróleo</b>	No	Sí	No	No	No
<b>Solar</b>	Sí	No	Sí	Sí	Sí
<b>Eólica</b>	Sí	No	Sí	Sí	Sí
<b>Corrientes de agua</b>	Sí	No	Sí	Sí	Sí
<b>Biomasa</b>	Sí	No	No	Sí	Considerable
<b>Mareomotriz</b>	Sí	No	Sí	Sí	Sí
<b>biogás</b>	No	Sí	No	Sí	Considerable
<b>Nuclear</b>	Sí	No	Considerable	No	Considerable
<b>Geotérmica</b>	Sí	No	Sí	Sí	Sí
<b>Hidrógeno</b>	No	Sí	Sí	Sí	Sí

*Tabla 1: Características de las fuentes de energía en materia de sostenibilidad. Fuente: Propia.*

En la tabla anterior se han considerado 13 de las fuentes de energía más utilizadas hoy en día para compararlas en cuestiones relacionadas con la sostenibilidad. Aquellas en las que aparece la palabra ‘considerable’ es debido a que para dicha característica mejora la actualidad, pero no

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

lo termina de cumplir. Por ejemplo, la energía nuclear no termina de ser limpia, pues precisa de sistemas muy desarrollados para la retención de los residuos que genera, por motivos de costes tampoco cumple del todo con cuestiones de sostenibilidad, sin embargo, podría representar una mejora respecto a la realidad actual. El biogás y la biomasa no se consideran limpias pues implican la quema de hidrocarburos, lo cual genera CO<sub>2</sub>, pero en menor medida que las fuentes de energía habituales. En la tabla se prima las cuestiones ecológicas a las sociales y económicas por una cuestión de prioridad en cuanto al problema climático actual, pero en estos casos, al ser también proclives a la duda como fuente limpia, se decide darle esa condición a medio camino entre la sostenibilidad y la no sostenibilidad.

Descartadas aquellas que no son sostenibles, ya que no se ajustan al interés de este trabajo y puesto que se ha hablado ya de los problemas que estas presentan, se va a realizar una lista de posibles ventajas y desventajas en términos de impacto medioambiental de las fuentes de energía consideradas sostenibles o considerablemente sostenibles.

### **· Biomasa y biogás:**

La principal desventaja que presenta es el uso de comestibles para la quema, la propia quema ya es en sí una cuestión problemática, si se le suma el hecho de quemar productos vegetales que pueden usarse como alimento lleva al planteamiento sobre un menor grado de sostenibilidad. Si bien es muy barata, hay que tener que utilizar campos que podrían usarse para alimentar ganado o para usarlo a modo de huerta no es muy sostenible pues el incremento de demanda para dichos terrenos al existir un nuevo mercado basado en la producción de estas fuentes de energía encarecería la inversión en las actividades agrícolas. Además, precisa de filtros para no contaminar con sustancias tóxicas y necesita temperaturas muy elevadas para poder combustionar de manera correcta, lo cual lo encarece.

### **· Nuclear:**

Desde un punto de vista ecológico, el uso de combustibles radioactivos que generan residuos peligrosos que deben ser almacenados supone un problema, una fuga en ese almacenamiento llevaría a problemas como la contaminación de suelo y acuíferos. Socialmente también está muy mal conceptuada, desastres naturales a causa de la energía nuclear en el pasado (Fukushima, Chernóbil...) implica que la sociedad no esté dispuesta a tener una central o un cementerio nuclear cerca de su hogar, existen registros ya de poblaciones que se han manifestado en contra de este tipo de instalaciones. A nivel económico el combustible nuclear es francamente caro, este sería otro de los problemas que presentaría dicha fuente de energía.

### **· Solar y eólica:**

La energía solar y la eólica son, a priori, de las más limpias, esto es debido a que mediante placas fotovoltaicas o placas térmicas que aprovechan el calor del sol para usarlo como fuente de energía y los molinos de viento que se utilizan para mover los aerogeneradores eléctricos no generan impacto atmosférico. Sin embargo, estos equipos necesitan un mantenimiento y llegados a cierto punto necesitan ser reemplazadas, esto genera, evidentemente residuos que hay que revalorizar o tratar de la manera correspondiente. Por otra parte, cabe destacar el impacto que se genera en el medio a nivel visual y paisajístico, así como los relacionados con la biodiversidad. En el caso de las placas solares quizás tan solo se trate de una ocupación del

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

hábitat natural de diversos animales, pero en el de los molinos, las aspas de estos pueden acabar con la vida de especies como aves que chocan con estas.

### **• Mareomotriz y de las corrientes marinas:**

En estos casos se da una situación similar a la anterior, para instalar este tipo de sistemas se necesita un entorno natural en el que habita una flora y una fauna que se puede ver comprometida por la presencia de estos equipos.

### **• Geotérmica:**

Las principales inconveniencias de este tipo de fuente de energía es la limitación geográfica de esta, pues no está disponible en todas las zonas del planeta por igual y no se puede transportar con facilidad, así como las emisiones de ácido sulfhídrico a la atmósfera que puede producir en según qué casos. Aparte puede contaminar acuíferos y hacer crecer la temperatura de la zona donde se realizan estas operaciones. Se debe tener en cuenta también que el paisaje se puede ver afectado precisamente por la obtención de energía geotérmica.

### **• Hidrógeno:**

La cuestión con el hidrógeno está estrechamente relacionada con la obtención de este, en función de donde venga la energía eléctrica que alimente los sistemas electrolizadores se podrán considerar limpia o no. Actualmente los sistemas para el uso de la energía química del hidrógeno son bastante caros, pero con una industria potente alrededor de este elemento podría bajar considerablemente hasta hacerlo una realidad energética.

Otros problemas del uso de hidrógeno es la cuestión del almacenamiento, el hidrógeno es muy volátil y aparte es muy inflamable, una fuga de este en según qué entornos podría dar lugar a una explosión o accidentes similares.

Además, existe una problemática con el uso de catalizadores, puesto que el uso de estas sustancias es necesario tanto en la obtención de hidrógeno como en las pilas, esto puede llevar al agotamiento de este tipo de sustancias en el futuro, de hecho, parte del encarecimiento del hidrógeno viene por el uso de metales como el platino que hacen de catalizador en las reacciones de intercambio de electrones que permiten la transformación de la energía química en energía eléctrica.

## **CONSUMO**

En 1973, la Organización de Países Árabes Exportadores de Petróleo, tomaría la decisión de no exportar más petróleo a aquellos países que hubieran apoyado al estado de Israel en el conflicto árabe-israelí de dicho año. Esto llevó a una situación en la que el precio del crudo se dispararía debido a que la oferta, para tres grandes potencias (Estados Unidos, Reino Unido y Francia) y otros países como Países Bajos que dejarían de recibir barcos petroleros de oriente próximo. Esto llevaría a una situación de verdadera rescisión económica y a una crisis debido al aumento de la inflación que duraría hasta principios de los años 80.

Entre tanta problemática la parte positiva sería el despertar de pensamientos acerca de la dependencia de occidente del petróleo y de la necesidad o no de una mayor restricción monetaria ante la inflación. [8]

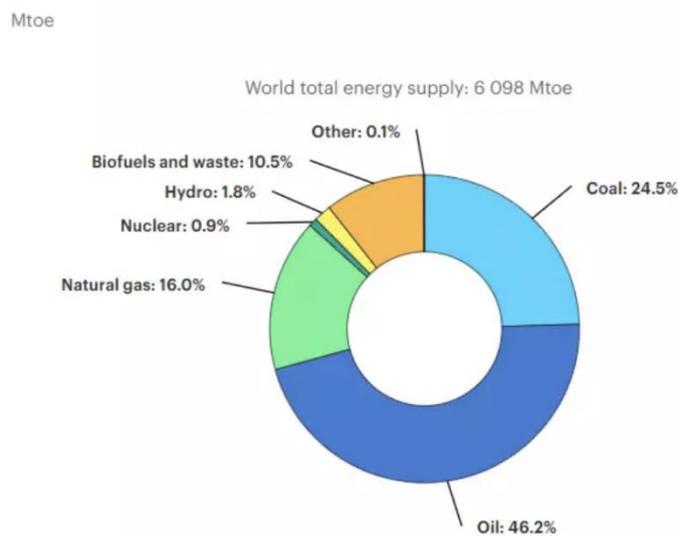
## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

El panorama en 1973 ya invitaba a la reflexión acerca del problema energético que se sufría en Europa, Estados Unidos y Japón, que eran los principales damnificados de la crisis. Quizá no desde una perspectiva con un cariz ecologista sino más bien económico pero que sentaría las bases de una serie de ideas proclives a un cambio a nivel energético que a día de hoy no termina de llegar.

De hecho, si se comparan los consumos porcentuales por fuente de energía actuales y en aquel año la variación no es tanta, si bien se ha dejado de consumir levemente el petróleo, la crecida de otras fuentes como el gas natural o, en menor medida el carbón, no son un buen augurio de cara a la transición ecológica que precisa el planeta, pues no representa la descarbonización necesaria.

Global share of total energy supply by source, 1973

Open 



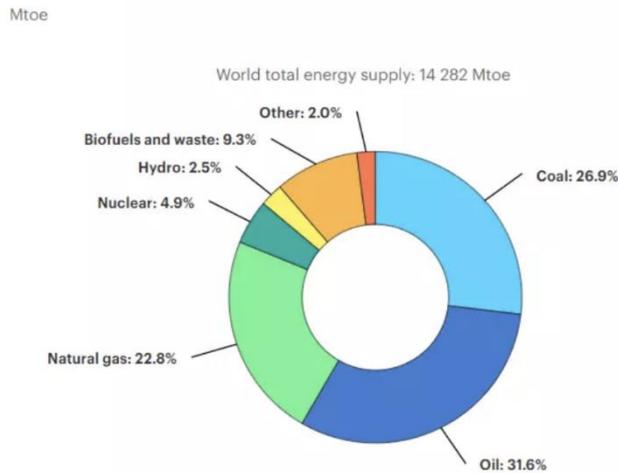
IEA. All Rights Reserved

*Figura 2: Consumo energético mundial por fuentes de energía en 1973. Fuente IEA.  
[https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm\\_campaign=IEA%20newsletters&utm\\_source=SendGrid&utm\\_medium=Email](https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&utm_source=SendGrid&utm_medium=Email)*

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Global share of total energy supply by source, 2018

Open 

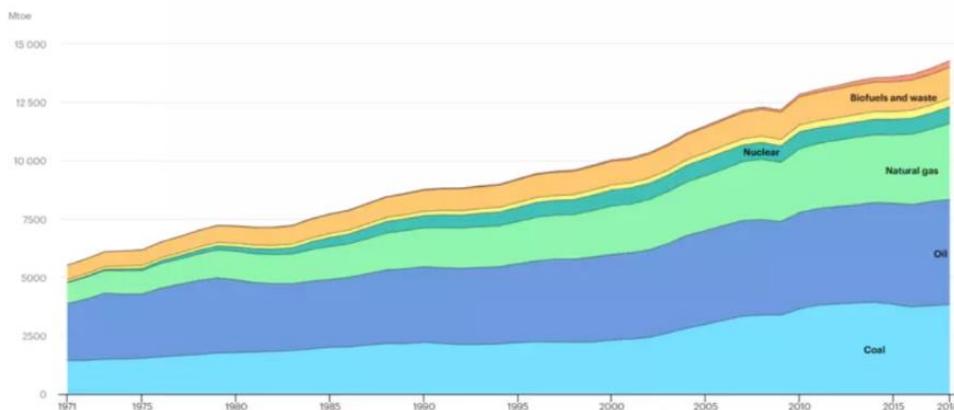


IEA. All Rights Reserved

Figura 3: Consumo energético mundial por fuentes de energía en 2018. Fuente IEA. [https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm\\_campaign=IEA%20newsletters&utm\\_source=SendGrid&utm\\_medium=Email](https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&utm_source=SendGrid&utm_medium=Email)

A la vista de estos dos gráficos, el uso de combustibles que contienen carbono y cuya quema implica la generación de CO<sub>2</sub> se sitúa entorno al 80% en ambos. Esto es ciertamente preocupante, más si cabe que, teniendo en cuenta que el número de toneladas equivalentes de petróleo ha ido aumentando con el paso del tiempo, da como resultado un mayor número de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas a la atmósfera.

World total energy supply by source, 1971-2018



Suministro total de energía en el mundo por fuente. Image: AIE

Figura 4: Comparativa temporal de las toneladas de petróleo equivalentes por fuente de energía. Fuente IEA. [https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm\\_campaign=IEA%20newsletters&utm\\_source=SendGrid&utm\\_medium=Email](https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020?utm_campaign=IEA%20newsletters&utm_source=SendGrid&utm_medium=Email)

# 7,888 miles de millones (2021)

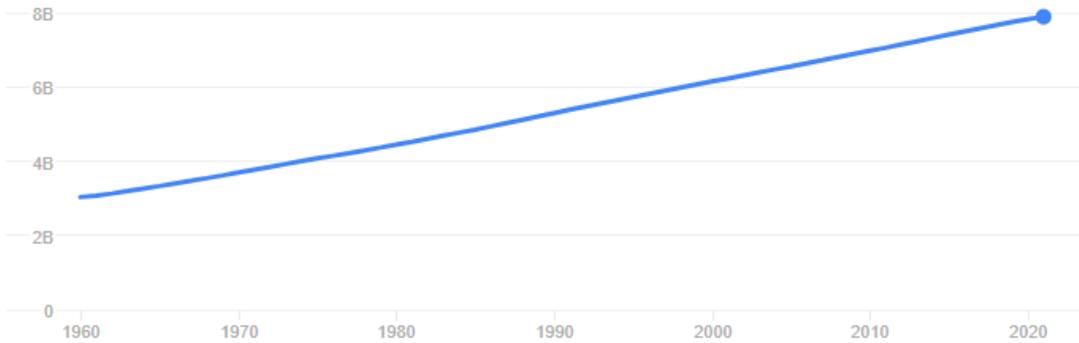


Figura 5: Gráfico de población mundial. Fuente: Google

La tendencia general de todas las fuentes de energía es creciente, es decir, que el correspondiente aumento paulatino de la población a lo largo de los años (se ha doblado aproximadamente el número de humanos vivos entre 1970 y la actualidad) requiere, evidentemente, un mayor gasto energético.

## 2.2 EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

El hidrógeno es el primer elemento de la tabla periódica, su masa atómica es prácticamente la unidad, tiene tres principales isótopos: el protio (con solo un protón en el núcleo), el deuterio (con un protón y un neutrón en el núcleo) y el tritio (con un protón y dos neutrones). En su capa de valencia solo hay un electrón, esto hace que habitualmente los átomos de hidrógeno suelen unirse por pares formando la molécula de hidrógeno (dihidrógeno). Este también se presenta como una potencial alternativa a los combustibles fósiles y ha llevado a las principales potencias económicas mundiales a realizar grandes inversiones de dinero en este sentido.

Los países miembros de la Unión Europea actualmente mantienen un propósito de descarbonización principalmente del transporte e industria mediante la implementación de un sistema neutro que permita la sustitución de las fuentes de energía sucias y no renovables por otras limpias y renovables. [9]

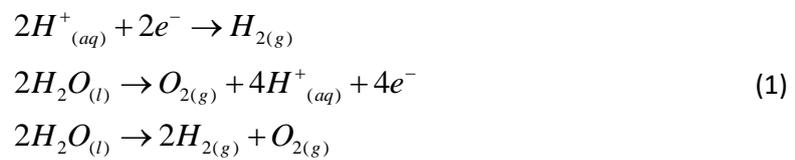
La implicación del hidrógeno en todo este proceso de descarbonización está relacionada con la imposibilidad de la electrificación de manera directa en algunas partes de estos dos amplios sectores. Por ejemplo, si se piensa en un coche con un motor eléctrico se encontrarán dos situaciones: la primera, el uso de una batería (lo que conlleva problemas de autonomía y obliga a gestionar el residuo que es la propia batería una vez ya no es útil) y la segunda, sería utilizar un sistema que permitiese permanentemente el uso de energías renovables (placas solares o molinos en el coche, que conlleva la impracticabilidad del vehículo cuando no se dan esos fenómenos atmosféricos). El hidrogeno, entonces, no funcionaría tanto como una fuente de energía al uso sino como un vector energético.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Se les llama vectores energéticos a las sustancias que son capaces de almacenar energía y liberarla controladamente. Son productos fruto de otros procesos, lo que diferencia de las fuentes de energía primarias. El punto de esta diferenciación también se trata de una cuestión temporal, por ejemplo, las fracciones de petróleo podrían considerarse vectores energéticos pero la diferencia con el hidrógeno vendría en el momento en que esos vectores fueron generados o dotados de energía.

Las formas de obtención de hidrógeno son varias, las más destacables son: mediante electrolisis del agua y mediante reformado de hidrocarburos.

La electrolisis de agua precisa de un aporte energético en forma de corriente eléctrica para descomponer ésta en oxígeno e hidrógeno, lo que ocurre es básicamente una reacción de intercambio de electrones:

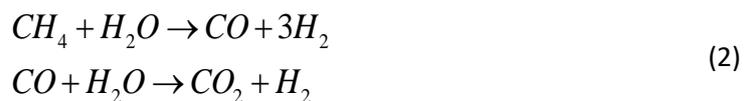


En primer lugar, se ve la reacción de reducción que se da en el cátodo, la segunda sería la oxidación que se da en el ánodo y por último la reacción global.

La ventaja que presenta la hidrólisis de agua es que, mediante el uso de fuentes de energías limpias haría del hidrógeno un vector energético limpio y sin emisiones de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, en 2008, el porcentaje de hidrogeno producido de manera limpia era de solo el 5% del hidrógeno total producido [10].

El uso de hidrocarburos para la obtención de hidrógeno permite una mayor eficiencia en el proceso a cambio de no ser todo lo verde que puede llegar a ser el caso anteriormente comentado de la hidrólisis de agua. En este tipo de procesos se ve muy implicado los gases de cadenas cortas como el metano, pues estos tienen un mayor porcentaje de hidrógeno que otros de cadenas más largas de carbonos y por ende generan una menor cantidad de CO<sub>2</sub>.

La obtención se basa principalmente en el reformado con vapor, es decir, a temperaturas altas se produce una reacción entre el vapor de agua y el metano o cualquier otro hidrocarburo para dar hidrógeno y monóxido de carbono (también llamado gas natural sintético o syngas). Este monóxido de carbono puede ser útil si se agrega más vapor, ya que al reaccionar dará CO<sub>2</sub> e hidrógeno.



Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Existen también el proceso Kvaerner, este consiste en la pirolisis de metano para producir negro de carbón e hidrógeno o procesos para la producción de hidrógeno mediante la fermentación, por ejemplo, la de ácidos grasos pequeños.

En función de la fuente de energía a partir de la cual se obtiene el hidrógeno se le asocia a este un color, esta codificación permite identificar de manera sencilla el impacto medioambiental que hay detrás del uso del mismo hidrógeno.

**Hidrógeno verde:** Es el hidrógeno que se obtiene fruto de la hidrólisis de agua y que aparte no genera emisiones de CO<sub>2</sub>. De alguna manera, es el objetivo al que se pretende llegar desde un punto de vista ecológico ya que el impacto ambiental de este sería muy reducido.

**Hidrógeno amarillo:** Se refiere a aquel que se obtiene mediante la electrólisis del agua pero que el potencial eléctrico empleado es el de la red primaria, entonces se combinan diferentes fuentes de energía para la generación de este.

**Hidrógeno gris:** Es aquel que se obtiene mediante hidrocarburos ligeros (metano, GLP...) mediante reformado, en el caso de España la inmensa mayoría del hidrógeno total empleado está asociado a este color. Si el hidrocarburo es biometano se le conoce como **hidrógeno dorado**.

**Hidrógeno azul:** Término asociado a aquel hidrógeno obtenido mediante procesos similares al hidrógeno gris pero que utiliza técnicas CCUS (captura, uso y almacenamiento de carbono) en este caso la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmosfera se reducen hasta en un 95%.

**Hidrógeno rosa:** Es el resultante de procesos de electrólisis de agua alimentados por energía eléctrica nuclear.

**Hidrógeno turquesa:** Es el producido a partir de la pirolisis de metano del proceso Kvaerner, la ventaja que presenta este proceso es que el residuo obtenido es carbono sólido.



Figura 6: Diferentes tipos de hidrógeno según su color asociado. Fuente: Sitio Web del Hidrógeno. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/hidrogeno.html>

### 2.3 PILAS DE COMBUSTIBLE. FUNDAMENTOS, TIPOS Y APLICACIONES.

En cuanto a los inconvenientes que tiene el uso de hidrógeno o aquellos aspectos en los que hay que prestar una especial atención encontramos los siguientes factores:

- **Almacenamiento:** El hidrógeno tiene una baja densidad energética en su forma gaseosa. Esto conlleva que, para guardar una cantidad considerable de energía se debe o aumentar la presión del hidrógeno en los recipientes que lo contienen o, licuarlo, esto requiere un gasto extra a nivel de equipos. También se puede optar por utilizar depósitos más grandes, pero esto a nivel técnico también supone una gran complicación. Por tanto, es algo que afecta tanto al almacenamiento propiamente como al transporte.

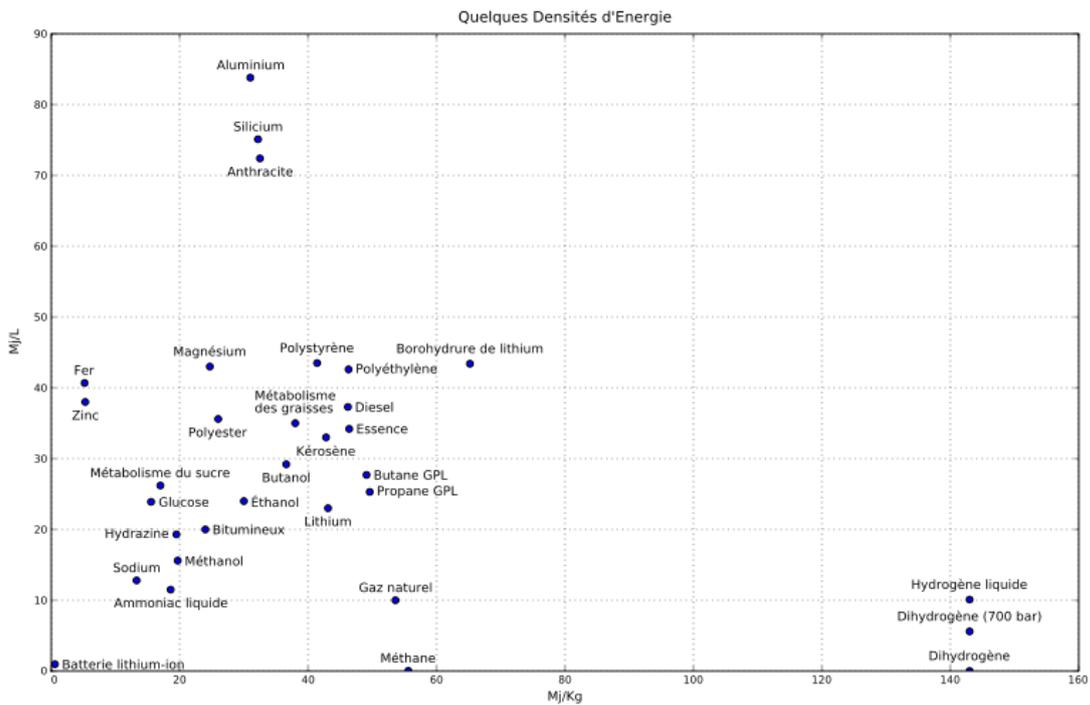


Figura 7: Densidades de energía volumétrica y másica bruta de algunos combustibles. Fuente: Wikipedia. [https://es.m.wikipedia.org/wiki/Densidad\\_de\\_energ%C3%ADa](https://es.m.wikipedia.org/wiki/Densidad_de_energ%C3%ADa)

- **Perdida de energía:** Al igual que cualquier sistema que transforma energía (por ejemplo un motor de combustión interna que transforma la energía de la gasolina en movimiento) el hidrógeno también tiene fallos en cuanto a eficiencia, en el paso de energía a hidrógeno y de este nuevamente a energía existen rendimientos a nivel químico y a posteriori al alimentar cualquier otro dispositivo (por ejemplo una celda de combustible de hidrógeno) a posteriori también existen grados de eficiencia que suponen un problema de cara al aprovechamiento total de la energía.

- **Seguridad:** El hidrógeno cuenta con dos características que juntas resultan una verdadera complicación de cara a la seguridad. Estas son el pequeño tamaño de molécula y la volatilidad del elemento sumado a la cuestión de la alta inflamabilidad de este. Esto implica que los estándares de seguridad a la hora de trabajar con el hidrógeno deben ser muy altos ya que la posibilidad de deflagraciones o explosiones, así como el riesgo de ATEX en general es bastante alto cuando se trabaja con hidrógeno sin las medidas de seguridad pertinentes.

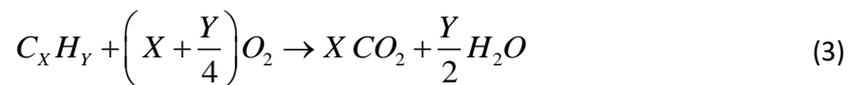
Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

- **Costes:** Desde el punto de vista de la producción puede ser costoso ya que la cantidad de energía a aportar para hacerlo de forma limpia es demasiada y eso implica un gasto en infraestructura bastante grande. Además, la competitividad con otras fuentes de energía y la particularidad de que la acumulación de poder económico de las empresas de otros sectores energéticos como el petróleo sea tan grande podría llegar a complicar la incorporación de este al mercado energético.
- **En desarrollo:** Que el uso del hidrógeno actualmente esté en desarrollo es, evidentemente, un problema de cara a la incorporación actual de este al panorama energético, pues el resto de las energías convencionales están mucho más normalizadas en todos los ámbitos.

**FUNDAMENTOS**

Las pilas de combustible se pueden entender como un dispositivo que recibe como entrada combustible, y da como salida una corriente eléctrica, los productos de la reacción y calor. Estas se diferencian de las baterías en que funcionarán mientras el alimento sea aportado, cosa que en las baterías no es necesario el aporte eléctrico para el funcionamiento de un dispositivo, puesto que la propia batería almacena la energía eléctrica para abastecer a aquellos aparatos que se le conecten.

Respecto de un motor de combustión la principal diferencia es en el principio de funcionamiento de ambos, el motor de combustión transformará la energía química del combustible en energía mecánica que puede o no ser transformada en energía eléctrica mediante, como su nombre indica, una reacción de combustión. Estas reacciones de combustión tienen la particularidad de ser extremadamente rápidas, es decir, en unas pocas fracciones de segundo los enlaces atómicos se recombinan para pasar del combustible (normalmente un hidrocarburo) y el comburente (oxígeno) a dióxido de carbono y agua aprovechando la liberación de energía para el propósito final.



Aparte de lo representado en la reacción general de la combustión también se da una liberación de calor.

La pila de combustible en lugar de llevar a cabo una combustión realiza dos semirreacciones de electroquímicas, es decir, semirreacciones donde hay una transferencia de electrones, para el caso del hidrógeno serían las expresadas en la Ec 4.



Por hacer una aclaración a nivel electroquímico, se llaman semirreacciones de oxidación a aquellas en las que los electrones son liberados desde las especies mediante la reacción, mientras que la reducción implica el consumo de electrones del medio añadiéndolos a las especies.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Cada una de estas se da en una parte distinta de la pila, la reacción de oxidación (la primera) se da en el ánodo, que es la parte de la pila que, por convenio, se asocia al polo positivo de la misma. La de reducción (la segunda) se da en el cátodo, que es el polo negativo de la pila. Esta separación espacial de los sitios donde se dan las semirreacciones dentro de la pila y, entendiendo la pila como un conjunto en sí misma, es lo que hace que exista una corriente de electrones desde una zona donante de electrones (ánodo) a otra receptora (cátodo). Esta corriente fluirá por un circuito externo

La construcción de una pila de combustible sencilla se basa en los siguientes elementos:

**Electrolito:** Es una sustancia o material que deja pasar por su seno iones, pero no electrones.

**Electrodos:** Son varillas metálicas por las que pasa el flujo de electrones.

En el caso de una celda simple se puede suponer un ácido como electrolito, pues este sería un acumulador de protones y los electrodos (si hablásemos del caso del hidrógeno) podrían ser de platino y deberían estar sumergidos en este. La entrada de hidrógeno y oxígeno estaría forzada en el electrolito y dirigida hacia cada uno de los electrodos, los protones pueden fluir por el electrolito, no así los electrones que formarán una corriente eléctrica a través de un material conductor y de la cual se podrán alimentar los dispositivos que se desee. [12]

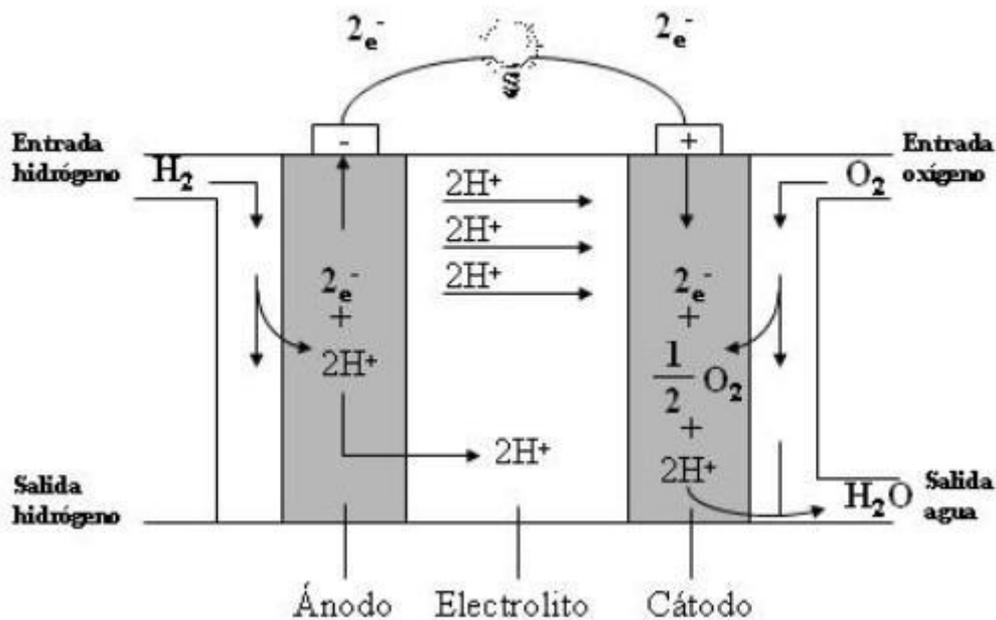


Figura 8: Esquema de una pila monocelda de hidrógeno. Fuente: Google imágenes.

En la práctica esto no sucede del todo así, es decir, las pilas no tienen esta arquitectura, sino que precisan de superficies de contacto lo suficientemente grandes para que se dé la transferencia de energía del alimento de la pila a los electrones y estos puedan formar la corriente eléctrica con una velocidad rápida (la velocidad de esta es finita, pero a mayor sea la superficie donde ocurre más rápido ocurrirá).

De hecho, se suelen utilizar electrodos porosos, pues de esta manera se consiguen dos cosas: por un lado, más área y por otro facilitar la entrada de gas. En cuanto a la forma de estos suelen ser placas planas pues el objetivo es la maximización del cociente entre área de contacto y volumen.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

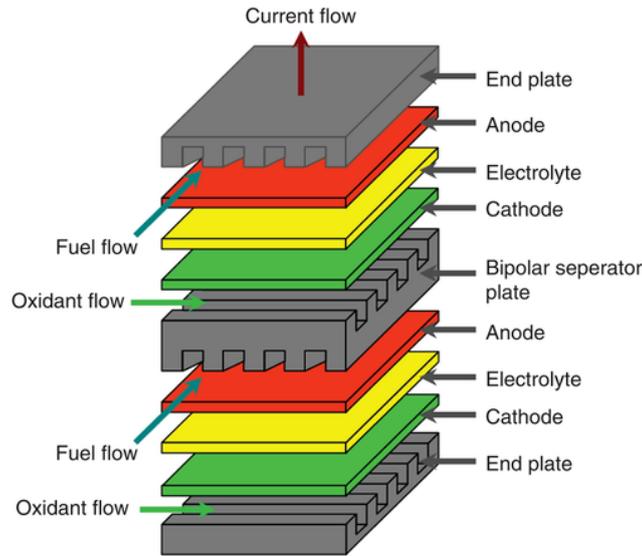


Figura 9: Estructura de una pila de combustible con más de una celda. Fuente: Google imágenes.

Como se puede observar en cada placa (sea bipolar o final) el oxidante pasa en la parte más cercana al cátodo y combustible en la zona más cercana al ánodo, la replicación de la estructura generando más celdas está sujeta a la necesidad de corriente resultante que se necesite.

Entonces, la manera de operar de una pila funciona de la siguiente manera:

En primer lugar, se da la admisión y transporte de ambos reactivos necesarios, para ello es necesario lo que se conoce como placas de flujo que tienen un tamaño y geometría a medida para cada caso con la intención que la distribución y el transporte de reactivos sea lo más eficiente, es decir, que estos entren a la velocidad necesaria para que la pila no se inhíba. Estas placas suelen tener unos caminos o canales por los cuales los flujos de entrada deben circular.

Luego ocurren las reacciones electroquímicas en el ánodo y en el cátodo en las cuales se deben cuidar aspectos como la velocidad de la reacción ya que está estrechamente relacionadas con la producción de corriente eléctrica, por tanto, se suelen usar catalizadores para acelerar dichas reacciones, pues el objetivo reside en la maximización de la corriente entregada. Muchas veces la propia cinética de las reacciones puede ser un factor limitante en cuanto a términos de eficiencia se refiere.

A continuación, se dan las conducciones electrónica e iónica. La primera es relativamente sencilla, pues un simple medio conductor (un cable, por ejemplo) basta para que los electrones generados en el ánodo se consuman en el cátodo. No así de sencillo es para los iones, estos poseen una mayor masa y un mayor tamaño y los electrolitos deben proveerlos de un camino que les permita moverse del cátodo al ánodo por una membrana de intercambio protónico para ser consumidos, por estas razones muchas veces se ve dificultado obteniéndose una pila menos eficiente.

Finalmente está la salida de los productos de reacción, en el caso del hidrógeno sería el agua, si es un hidrocarburo hay que sumarle el CO<sub>2</sub>. Las dificultades asociadas a la entrada de productos se pueden aplicar a la salida de productos. Estos podrían impedir la reacción de nuevos reactivos y, aunque con normalidad no suele causar problema, si no se evacuan correctamente en las

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

PEMFC (pilas de combustible de membrana electrolítica polimérica) pueden acabar por inundar la propia membrana, causando así problemas graves en la instalación.

Dichas PEMFC son aquellas que representan un mayor interés en el presente trabajo, pues la pila que se utilizará en la parte experimental es de este tipo, éstas como ya se explicará más adelante transportan iones hidronio y sus semirreacciones redox son las relativas a la Ec 5.



Las reacciones redox, ocurriendo en una pila hacen a esta generar una densidad de potencia que se considera como el producto de la intensidad de dicha corriente anteriormente descrita por el voltaje de la pila.

Entre las formas de representaciones características de las pilas de combustible se encuentran las curvas de densidad de potencia en función de la corriente, de esta manera se puede construir la curva i-V de una pila obteniendo los valores de corriente y tensión por ejemplo mediante el uso de multímetros a la salida eléctrica de la pila, registrados los puntos de interés se puede construir una curva de densidad de potencia multiplicando cada uno de los puntos de la curva por el valor de la intensidad. La Figura 10 muestra un ejemplo de este tipo de curvas en las cuales el eje de ordenadas representa el voltaje y el de abscisas la corriente.

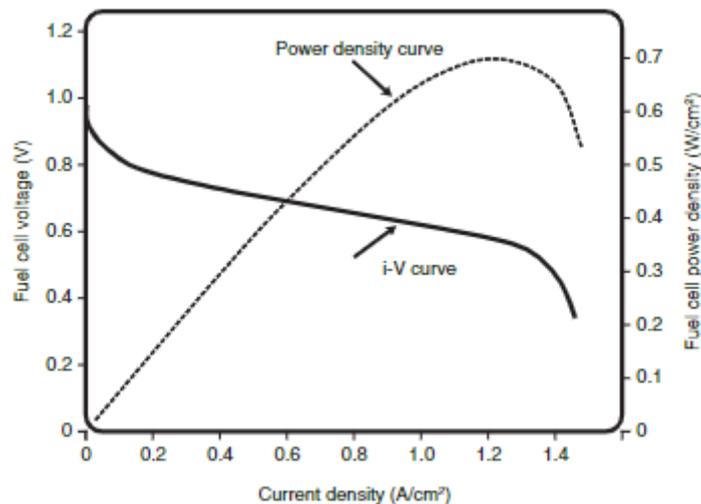


Figura 10: Ejemplos de curvas de densidad de potencia y curvas i-V de una pila de combustible. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. *Fuel Cell Fundamentals*

La corriente que suministra una pila es proporcional a la cantidad de combustible que se consume, pues el número de electrones que genera la pila está relacionado por estequiometría con el combustible introducido al tratarse de una reacción química, por tanto la energía que la pila sea capaz de entregar, al igual que la tensión que esta genera, también estarán relacionadas con la cantidad de combustible que se consume.

La corriente que suministra una pila es proporcional al combustible que consume. pues el número de electrones que genera la pila está relacionado por estequiometría con el combustible

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

introducido al tratarse de una reacción química, por tanto la potencia que la pila sea capaz de entregar, al igual que la tensión que esta genera, también estarán relacionadas con la cantidad de combustible que se consuma.

Esto explica que el voltaje de la pila sea considerado una magnitud de eficiencia y, por tanto, su representación gráfica así lo sea también. Entendiendo esto se evidencia la necesidad de mantener alto el voltaje incluso en situaciones donde la demanda de corriente también sea alta, sin embargo, esto no es para nada tarea fácil. Además, el voltaje de una pila de combustible real siempre va a ser menor que aquel previsto a nivel termodinámico por la existencia de pérdidas irreversibles y, a mayor corriente se saca de la pila, estas pérdidas son mayores. A continuación, se mencionan los tres tipos de pérdidas y a que efectos están asociadas:

- Pérdidas de activación ( $\eta_{ACT}$ ): estas pérdidas están asociadas a la reacción electroquímica que son las que producen mayoritariamente una caída del voltaje al inicio de la curva i-V, es decir, a bajas intensidades.
- Pérdidas óhmicas ( $\eta_{OHMIC}$ ): son pérdidas asociadas a la resistencia eléctrica debida a la conducción de las cargas en la pila y se dan a intensidades intermedias de forma principal, es decir, en la zona central de la curva
- Pérdidas de concentración ( $\eta_{CONC}$ ): que se dan sobre todo en la parte final de la curva (a altas intensidades) y se deben al transporte de masa.

Resultando que el valor del voltaje para una pila de combustible real puede ser calculado de la manera reflejada en la Ec 6.

$$V = E_{THERMO} - \eta_{ACT} - \eta_{OHMIC} - \eta_{CONC} \quad (6)$$

Donde  $E_{THERMO}$  es la tensión de la pila a circuito abierto. Las diferentes pérdidas reducen la tensión de la pila al aumentar la intensidad que sale de la pila.

### TERMODINAMICA Y PILAS DE COMBUSTIBLE.

La termodinámica es el estudio de la energía o, mejor dicho, el estudio de las transformaciones energéticas. En tanto en cuanto las pilas de combustible son aparatos que realizan dichas transformaciones energéticas la comprensión de la termodinámica de estas es vital para la comprensión de las propias pilas en sí.

Para explicar la termodinámica de las pilas se van a definir algunos términos termodinámicos que aclararán y harán más comprensible este punto.

La primera ley de la termodinámica indica que la variación de la energía interna en un sistema cerrado es debido a un intercambio de calor o de trabajo con el exterior.

$$\Delta U = Q - W \quad (7)$$

La forma diferencial de la primera ley, y considerando la segunda ley, se obtiene la ecuación fundamental de la termodinámica.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

$$dU = TdS - pdV \quad (8)$$

En esta ecuación fundamental, la energía interna está en función de la entropía y del volumen,  $U = U(V, S)$ . Muchas veces un problema termodinámico se simplifica aplicando una transformada de Legendre a la energía interna, definiendo una nueva función termodinámica. En procesos termodinámicos a temperatura y presión constante como sucede en una pila de combustible, es conveniente la transformada de Legendre mostrada en la Ec 9, la energía libre de Gibbs:

$$G = U - \left( \frac{dU}{dS} \right)_V S - \left( \frac{dU}{dV} \right)_S V = U - TS + pV \quad (9)$$

La derivada de la energía libre de Gibbs es

$$dG = dU - TdS - SdT + Vdp + pdV \quad (10)$$

Simplificando,

$$dG = -SdT + Vdp \quad (11)$$

La energía libre de Gibbs es una función de estado que depende de la temperatura y la presión,  $G = G(p, T)$ .

Considerando también el trabajo eléctrico, el cálculo del voltaje máximo teórico se puede calcular entonces a partir de la energía libre de Gibbs:

$$dW = PdV + dW_e \quad (12)$$

Lo que haría que la ecuación de Gibbs también llevase dicho último valor que resta en su fórmula. A esto se le debe sumar que la temperatura y la presión en una celda de combustible es constante y por tanto su diferencial será 0, lo que resulta en que el potencial de Gibbs será la negativa del diferencial de trabajo eléctrico:

$$\begin{aligned} dG &= -SdT + Vdp - dW_e \\ dG &= -dW_e \end{aligned} \quad (13)$$

A partir de esta demostración se puede obtener la relación entre la energía libre de Gibbs y el voltaje:

$$W_{elec} = QE = nFE \quad (14)$$

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Donde  $n$  es el número de electrones,  $F$  la constante de Faraday y  $E$  el potencial eléctrico de la pila. Despejando:

$$E^{\circ} = \frac{W_{elec}}{nF} = -\frac{\Delta g^{\circ}}{nF} \quad (15)$$

$E^{\circ}$  sería el potencial estándar.

La variación del voltaje con la concentración se mide a partir del potencial químico, este sirve para estudiar el cambio de la energía libre de Gibbs con la variación de las especies químicas del sistema. Matemáticamente:

$$\mu_i^{\alpha} = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T, p, n_{j \neq i}} \quad (16)$$

Donde  $\mu_i^{\alpha}$  es el potencial químico de las especies  $i$  en fase  $\alpha$  y la parte de la derecha de la ecuación expresa el cambio cuantitativo de la energía libre de Gibbs en el sistema para un cambio infinitesimal creciente en la cantidad de especies  $i$  para procesos donde la temperatura, presión y cantidades de otras especies se mantienen constantes. Entonces la variación de concentraciones varía la energía libre de Gibbs y, por tanto, el voltaje reversible de la pila. El potencial químico está relacionado con la concentración mediante la actividad.

$$\mu_i = \mu_i^{\alpha} + RT \ln a_i \quad (17)$$

Donde la actividad sería:

$$a_i = \gamma(p_i / p^0) \quad (18)$$

y sería un valor de la actividad entre 0 y 1 que describe la idealidad del gas, siendo que si el valor fuese 1 este sería ideal.

A partir de la combinación de las ecuaciones anteriores se puede calcular los cambios de la energía libre de Gibbs por un sistema de especies químicas  $i$  mediante:

$$dG = \sum_i \mu_i dn_i = \sum_i (\mu_i^0 + RT \ln a_i) dn_i \quad (19)$$

Asumiendo una reacción química tipo:



Donde las letras en mayúsculas representan las especies y las minúsculas las cantidades estequiométricas de estas se puede calcular  $\Delta g$  como:

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

$$\Delta g = (m\mu_M^0 + n\mu_N^0) - (\mu_A^0 + b\mu_B^0) + RT \ln \frac{\alpha_M^m \alpha_N^n}{\alpha_A^1 \alpha_B^b} \quad (21)$$
$$\Delta g = \Delta g^0 + RT \ln \frac{\alpha_M^m \alpha_N^n}{\alpha_A^1 \alpha_B^b}$$

Esta es conocida como la isoterma de Van't Hoff, que explica cómo cambia la energía libre de Gibbs de un sistema en función de las actividades de los reactivos y productos de este, relacionando esta ecuación con la que relacionaba dicha medida con el potencial de la celda, se obtiene:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\alpha_M^m \alpha_N^n}{\alpha_A^1 \alpha_B^b} \quad (22)$$

Para un caso general, la ecuación toma esta forma:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \frac{\prod \alpha_{\text{productos}}^{v_i}}{\prod \alpha_{\text{reactivos}}^{v_i}} \quad (23)$$

En el caso concreto de la formación de hidrógeno y teniendo en cuenta que la actividad de los gases (hidrógeno y oxígeno) como su presión parcial y la del agua como 1 ya que se presupone un funcionamiento va a estar por debajo de 100°C y por tanto saldrá de forma líquida, y resulta:

$$E = E^0 - \frac{RT}{2F} \ln \frac{1}{p_{H_2} p_{O_2}^{1/2}} \quad (24)$$

CINÉTICA Y PILAS DE COMBUSTIBLE.

Lo que se ha enseñado relacionado con la termodinámica de las pilas de combustible consiste en la idealidad que se presupone de estas, a nivel práctico es muy necesario comprender lo que sucede en términos cinéticos para tener una visión real de aquello que sucede en las pilas de combustible, más concretamente, esta explica los mecanismos que se dan en las pilas para que las reacciones se den.

Las reacciones electroquímicas implican la transferencia de carga, en concreto de electrones, entre un electrodo y una especie química, este concepto permite diferenciarlas de las reacciones químicas ya que, en estas últimas la transferencia de carga ocurre directamente entre las especies y no implica la liberación de electrones libres. Esto también implica la heterogeneidad de los procesos electroquímicos, ya que las reacciones electroquímicas solo podrán darse en aquellas interfaces entre el electrodo y el electrolito.

Por ejemplo, sería obvio que para una reacción  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  no habría ni hidrógeno ni protones dentro del propio metal de la misma manera que no podrían haber electrones en el electrolito, ergo la reacción se debe dar en la interfaz entre ambos.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Los electrones que intervienen en las reacciones electroquímicas son consumidos o generados precisamente por estas, de esta manera la intensidad eléctrica de la reacción es una medida que sirve para cuantificar la velocidad de la reacción, la unidad de la corriente es el amperio y que siguiendo la ley de Faraday nos lleva a lo reflejado en la Ec 25.

$$i = \frac{dQ}{dt} = nF \frac{dN}{dt} \quad (25)$$

En esta  $n$  es el número de moles de electrones,  $F$  la constante de Faraday y  $\frac{dN}{dt}$  es la velocidad en moles/segundos de la reacción.

Si bien es cierto que la intensidad ofrece información muy interesante y necesaria a cerca de la velocidad de la reacción hay que tener en cuenta que tal y como se ha comentado con anterioridad, la reacción solo se da en la interfase electrodo-electrolito, esto hace que la densidad de corriente ( $j$ ) ofrezca información más útil ya que mide la corriente que pasa por una unidad de superficie, para ello se realiza el cociente entre la corriente “ $i$ ” y el área del electrodo “ $A$ ”.

$$j = \frac{i}{A} \quad (26)$$

Esta magnitud también permite, al igual que la corriente, utilizar ratios en función de la velocidad de la reacción:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dN}{dt} = \frac{i}{nFA} = \frac{j}{nF} \quad (27)$$

La existencia de la energía de activación, así como que la materia implicada en los procesos electroquímicos también lo sea, hace que los cocientes anteriormente descritos sean finitos. Es decir, dicha energía de activación impide que los productos puedan transformarse en reactivos tal y como muestra la Figura 11.

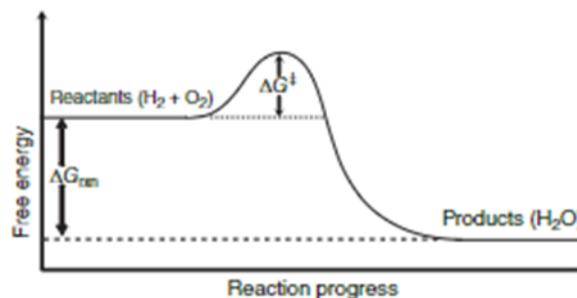


Figura 11: Energía de activación. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals

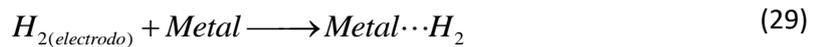
Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Un ejemplo que funciona muy bien para explicar la razón de la existencia de esta energía de activación podría ser el estudio de la reacción  $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$  en tanto en cuanto a los pasos que se deben seguir para que esta se lleve a cabo de forma completa.

En primer lugar, debe transportarse de masas de hidrógeno desde el seno del gas hasta las cercanías del electrodo:



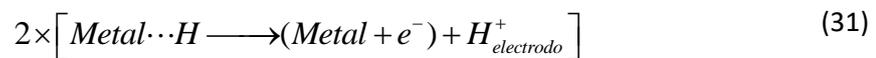
En la Ec. 29, el hidrógeno se ha absorbido en la superficie del electrodo:



En la Ec. 30, la molécula de hidrógeno se separará en dos moléculas diferentes unidas por quimisorción:



El siguiente paso, como muestra la Ec. 31 consiste en la transferencia de electrones desde el hidrógeno quimisorbido al electrodo pasando protones al electrolito:



Finalmente, los protones se alejan del electrodo hacia el seno del electrolito, tal y como se ve en la Ec. 32.



De entre todos los procesos mencionados y que deben darse para que la reacción se dé la velocidad vendrá determinada por aquel más lento. Para dicha reacción este sería el cuarto paso, tal como muestra la Figura 12 la energía libre del Gibbs del hidrógeno relacionado con el metal (electrodo) aumenta a medida que aumenta la distancia a este, sin embargo, ocurre justo lo contrario para los protones y los electrones.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

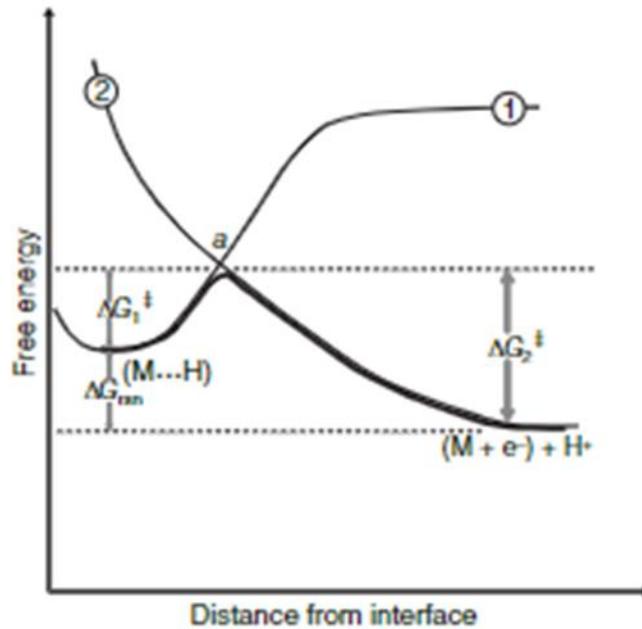


Figura 12: Valor de la energía libre frente a la distancia a la interfaz electrodo-electrolito. La curva 1 representa la energía del estado Metal...H en función de separación entre H y la superficie del metal. La curva 2 muestra la energía libre de los productos. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. *Fuel Cell Fundamentals*

El punto representado por a se denomina el estado activado, las especies en dicho punto han superado la barrera de activación y por tanto pueden convertirse tanto en reactivos como en productos independientemente.

En las pilas de combustible, el interés reside en la corriente producida por las reacciones electroquímicas, entonces, se va a expresar las ratios en términos de densidad de corriente sabiendo que  $j = n f J$ .

$$\begin{aligned} j_1 &= n F c_R f_1 e^{-\Delta G_1 / RT} \\ j_2 &= n F c_P f_2 e^{-(\Delta G_1 - \Delta G_{RXN}) / RT} \end{aligned} \quad (33)$$

Siendo que estas serían las ecuaciones para cada una de las reacciones electroquímicas que se dan simultáneamente en un equilibrio químico. Siempre y cuando se de esta condición de equilibrio ambas serán iguales y serán 0. La densidad de corriente neta  $j_0$  también será 0. Las c de ambas ecuaciones hacen referencia a las concentraciones de reactivos y productos en la superficie respectivamente y f la ratio de conversión de reactivos en productos.

La ausencia de equilibrio en una reacción pondría el estudio de esta en una situación en la cual uno de los valores f sería mayor que otro, existiría entonces una descompensación entre los iones y electrones generados y consumidos. Esto produce que las cargas anteriormente mencionadas se acumulen tanto en el electrodo (electrones) como en el electrolito (iones).

Las siguientes imágenes muestran una manera alternativa de entender el equilibrio de la reacción: en la imagen (a) de la Figura 13 se muestra la variación de energía que deben sufrir las especies en la quimisorción anteriormente descrita, en el lado de la derecha está el estado de

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

menor energía y a la derecha el de mayor energía, esto implica que el camino de las reacciones directa e inversa será distinto en cuanto a la barrera energética que deben superar.

La diferencia de velocidades genera una acumulación de cargas (protones en el electrolito y electrones en el electrodo), esto se da hasta que la diferencia de potencial como se ve en la imagen (b) de la Figura 13 contrarresta la diferencia de energía libre química entre los diferentes estados de la reacción, es decir, hasta que se llega al equilibrio.

Finalmente, la imagen (c) de la Figura 13 muestra el efecto combinado de los potenciales químico y eléctrico, donde se igualan las velocidades para ambos sentidos de la reacción. La barrera energética que se debe superar será un valor intermedio a los de la reacción directa e inversa

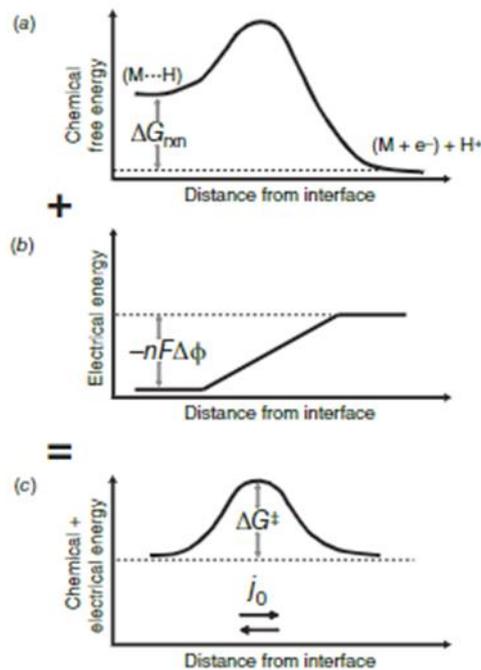


Figura 13: Gráficas de energía frente a distancia de la interfaz. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals

El valor del voltaje de la pila será la suma de las diferencias entre los niveles energía de los estados reactivo y producto. Se introduce entonces el término de potencial de Galvani, siendo este el valor de los potenciales interfaciales del ánodo y cátodo. De estos no se conoce el valor exacto, pero si se sabe que la suma de ambos da como resultado la tensión termodinámica neta de la pila en total.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

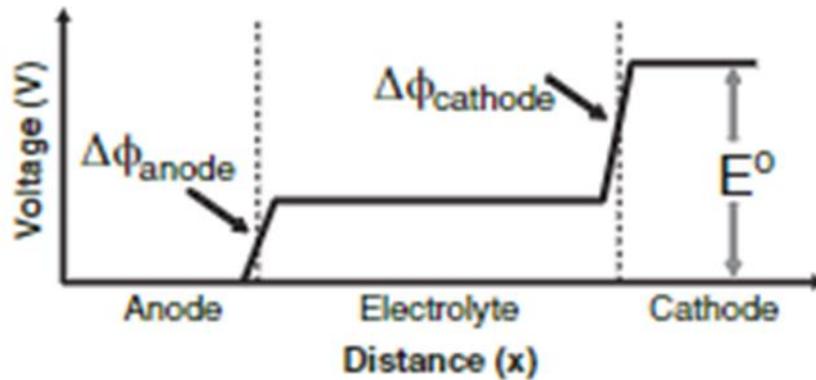


Figura 14: Gráfica de potencial-distancia. Fuente: Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals

Otro fenómeno que se da en estas reacciones es la sensibilidad al voltaje de la energía libre de Gibbs, esto se traduce además en un cambio de la barrera de activación energética que se debe superar para que dichas reacciones se den. La producción de una corriente neta, entonces precisará del sacrificio de una parte del voltaje termodinámico disponible de la pila, para ello se debe aprovechar el potencial de Galvani reduciéndolos no necesariamente en la misma medida.

En el equilibrio, las densidades de corriente están dadas por  $j_0$ , fuera de este las densidades de corriente se pueden considerar como el producto de esta y otro factor que incluye datos sobre las barreras de activación. Según la Ec. 9, la fuerza neta:

$$\begin{aligned} j_1 &= j_0 e^{\alpha n F \eta / RT} \\ j_2 &= j_0 e^{-(1-\alpha) n F \eta / RT} \\ j &= j_1 - j_2 = j_0 (e^{\alpha n F \eta / RT} - e^{-(1-\alpha) n F \eta / RT}) \end{aligned} \quad (34)$$

Sabiendo la dependencia de  $j_0$  respecto de las concentraciones de reactivos y productos se puede obtener la que se conoce como Ecuación de Butler-Volmer, que es de gran importancia en las celdas de combustible:

$$j = j_0^0 \left( \frac{c_R^*}{c_R^{0*}} e^{\alpha n F \eta / RT} - \frac{c_P^*}{c_P^{0*}} e^{-(1-\alpha) n F \eta / RT} \right) \quad (35)$$

Los valores de  $\eta$  representan la pérdida de voltaje,  $n$  es el número de electrones transferidos en la reacción  $c_R^*$  y  $c_P^*$  son las concentraciones en la superficie  $j_0^0$  viene dada por los valores de referencia de concentración de reactivo y producto  $c_R^{0*}$  y  $c_P^{0*}$ , y es, efectivamente la densidad de corriente estándar.

TRANSPORTE DE CARGAS Y PILAS DE COMBUSTIBLE.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

La medida que se utiliza en el transporte de cargas, y que se representa mediante el símbolo  $J$  es el flujo, siendo este considerado como la cantidad (en este caso de carga) fluye por un material por unidad de superficie y tiempo. En este caso particular, se empleará  $j$ , que ya fue anteriormente definida como densidad de corriente y matemáticamente se expresa como:

$$j = \sigma \frac{dV}{dx} \quad (36)$$

Donde  $\sigma$  representa la conductividad, que mide la permisividad del material a dejar fluir las cargas y donde  $\frac{dV}{dx}$  es el campo eléctrico proporcionado para mover la carga, es decir, permite relacionar la variación del voltaje a lo largo de un eje con la conductividad

El proceso de transporte de cargas no está, evidentemente, libre de pérdidas, esto se debe a la inherente resistencia al flujo de carga que los conductores de carga tienen. Estas pérdidas existen y son de dos tipos: por un lado, se encuentran aquellas producidas por los electrones y, por otro lado, las de naturaleza iónica, su valor dependerá de la longitud y la superficie del transportador de cargas, así como de la conductividad propia del material:

$$R = \frac{L}{A\sigma} \quad (37)$$

Dicha resistencia que como ya se ha dicho es inherente al proceso de transporte de carga depende de diversos factores que a continuación se comentan. En función también de estos la resistencia será mayor o menor, lo que tendrá una implicación directa en el valor que toma las pérdidas.

En primer lugar, cabe destacar que el valor de las resistencias también, al igual que se utiliza la densidad de carga (carga por unidad de área), el valor de las resistencias estará normalizado al valor del área que las pilas tengan. Este valor normalizado se conoce como ASR, para su cálculo se multiplica el valor del área por la resistencia óhmica cuya expresión ya se ha mostrado, dicho de otra manera, el valor de la ASR será la longitud del electrodo entre el valor de la conductividad del material.

Por otro lado, también se debe tener en cuenta el grosor del conductor, lo más beneficioso, tratando de reducir la resistencia es, reducir de igual manera el grosor. Esto hará que el movimiento de iones entre el ánodo y cátodo será más sencillo. Sin embargo, minimizar el grosor tiene una serie de limitaciones empezando por la integridad mecánica que supone hacerlos demasiado delgados implicando que la membrana así lo sea y que puede llegar a deteriorarla. Otra limitación sería la falta de uniformidad, ya que el desgaste de los electrolitos sería diferente en las distintas partes más o menos gruesas de estos. A esto se le suma el riesgo de cortocircuito en electrolitos extremadamente finos o el hecho de que pueda haber cruces de combustible en el interior de las celdas. Por otro lado, está la resistencia de contacto asociada a la interfaz electrolito-electrodo que es independiente al grosor. Finalmente, la rotura dieléctrica se alcanza cuando el grosor del electrolito es tan fino que el campo eléctrico de la membrana supera el campo de rotura dieléctrica del material (valor crítico).

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Los componentes de las pilas forman un circuito eléctrico en serie y las resistencias de cada uno de los materiales se sumarán, además de estas resistencias se le debe agregar aquellas asociadas a las intersecciones entre los materiales (pérdidas de contacto).

Como ya se ha comentado la conductividad es la medida que permite conocer la susceptibilidad del flujo de las cargas eléctricas por un material, esto implica que cada material tendrá un valor distinto para esta que viene determinado por la Ec. 38.

$$\sigma_i = (|z_i| F) c_i u_i \quad (38)$$

Donde  $c$  es la concentración de portadores de carga,  $u$  la movilidad de estos en el material,  $z$  es el número de portadores de carga en función del ion presente y  $F$  la constante de Faraday.

En el caso de los electrones, la movilidad viene determinada por el modelo de Drude:

$$u = \frac{q\tau}{m} \quad (39)$$

Donde  $\tau$  es el tiempo libre medio entre eventos de dispersión,  $m$  es la masa del electrón, y  $q$  es la carga elemental del electrón en culombios.

El transporte iónico se rige por otros conceptos pues las pérdidas en este mucho mayor que en el caso electrónico debido a que el transporte se da por el salto de estos iones entre los huecos existentes en la estructura del material, la velocidad de salto dependerá de la difusividad de materia:

$$D = D_0 e^{-\Delta G_{act}/RT} \quad (40)$$

Donde  $D_0$  es una constante que refleja la frecuencia de intento del proceso de salto,  $\Delta G_{act}$  es la barrera de activación para el proceso de salto,  $R$  es la constante del gas perfecto, y  $T$  es la temperatura.

La movilidad será:

$$u = \frac{|z_i| FD}{RT} \quad (41)$$

Donde  $|z|$  es el número de carga del ion,  $F$  es la constante de Faraday,  $R$  es la constante del gas, y  $T$  es la temperatura (K).

Acudiendo a la definición de conductividad:

$$\sigma = \frac{c(z_i F)^2 D}{RT} \quad (42)$$

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Siendo conocidos ya los conceptos relacionados con la termodinámica, cinética y transporte de cargas cabe destacar cual sería la expresión general que gobierna las curvas I-V mediante las cuales se representa el comportamiento de las pilas, atendiendo a [13] esta quedaría así:

$$V = V_{oc} - A_1 \cdot \ln \frac{i}{i_0} - i \cdot R \cdot S - m \cdot \exp(ni) \quad (43)$$

Donde  $V$  es la tensión de la pila,  $V_{oc}$  la tensión del circuito abierto reversible,  $i$  es la densidad de corriente de la célula  $i_0$  es la densidad de corriente cuando las condiciones son las de circuito abierto reversible,  $R$  es la resistencia protónica de la membrana y  $S$  el área de la membrana expuesta al flujo de protones, mientras que  $m$  y  $n$  son parámetros empíricos asociados al transporte de masa.

$A_1$ , por otro lado, es la suma de las pendientes de la ecuación de Tafel, que es:

$$A_1 = \frac{RT}{2\alpha F} \quad (44)$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de transferencia de carga,  $R$  la constante del gas,  $T$  la temperatura y  $F$  la constante de Faraday.

### **TIPOS**

En lo que respecta a los tipos de pilas de combustibles existen 5 tipos que son diferentes entre ellas en cuestiones como el electrolito utilizado, el catalizador o los propios componentes de las pilas.

Las PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells), de las que ya se ha hablado anteriormente, son pilas cuyo electrolito es una membrana polimérica, esta debe ser muy fina y la opción principal de la que se hace uso es del NAFION®, un copolímero sulfonado de tetrafluoropoliuretano. El catalizador de este tipo de pila son metales nobles, principalmente el platino, y los electrodos suelen ser materiales porosos basados en el carbono donde se difunden los gases. La temperatura de operación de estas pilas suelen ser bajas, por debajo de los 80°C, que hacen este tipo de pilas muy útiles en algunas aplicaciones. Un subtipo de este tipo de pila es DMFC (Direct Methanol Fuel Cells) donde el combustible es el metanol.

Las PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells), en cambio, utilizan como electrolito ácido fosfórico líquido, este se encuentra inmovilizado dentro de la pila, trabaja a una mayor temperatura que la anterior (200°C) y en cuanto a los materiales del catalizador y los componentes de la pila son iguales que para las PEMFC.

Las AFC (Alkaline Fuel Cell) en lugar de utilizar un ácido usan una base, el hidróxido de potasio también inmovilizado, pues está en estado líquido, trabaja en un rango de temperaturas bajo (60-220°C) y los componentes de la pila y el catalizador son basados en carbono y platino, respectivamente.

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

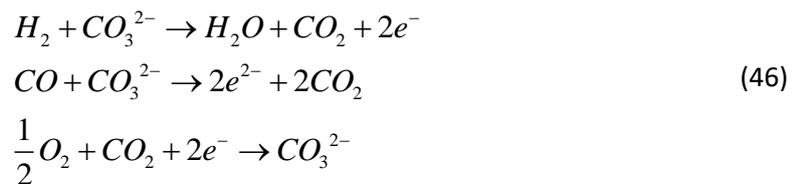
Estas tres pilas de combustibles son las que trabajan a baja temperatura, esto es debido a la selección del electrolito empleado puesto que los que son utilizados en estas pilas precisan de una menor temperatura para realizar la conducción iónica. Los portadores de carga son, para las dos primeras  $H^+$  y para la AFC  $OH^-$ , esto va en relación a la naturaleza ácida o básica de los electrolitos, en la PEMFC y la PAFC son ácidos mientras que en la AFC es básico.

Las SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) están destinadas al uso de syngas o gas natural sintético fruto de la reformación de hidrocarburos, estas usan como electrolito membranas cerámicas, en concreto de óxido de circonio estabilizado con itria que es un gran conductor de iones.

Las semirreacciones redox de estas se dan de forma diferente, pues ahora el portador de carga es el  $O^{2-}$ , por tanto estas se darían así:



Las MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells) utilizan sales de carbonato fundido como un electrolito que está suspendido en una matriz de cerámica porosa que es inerte, se utilizan para syngas también y las reacciones que tienen lugar son las mostradas en Ec. 46.



En este caso hay dos oxidaciones debido a la composición del alimento de la pila. [13]

Estas dos últimas son consideradas de alta temperatura, pues ambas trabajan por encima de los  $600^\circ C$  pudiendo llegar a hacerlo hasta  $1000^\circ C$ .

### USOS

Los usos que pueden tener las pilas de combustible son todos aquellos donde se precise una corriente eléctrica, es decir, que se pueden utilizar como alimentación eléctrica en cualquier caso donde esta sea necesaria.

Uno de estos principales usos de las pilas de hidrógeno es el sector del transporte en cualquier medio, actualmente hay empresas punteras apostando por este combustible tanto en transporte terrestre, como aéreo y marítimo.

Quizá uno de los puntos de mayor interés se encuentre en la producción de vehículos unipersonales de hidrógeno, empresas como Toyota llevan años investigando y sacando al mercado nuevas versiones de su vehículo de hidrógeno, el Toyota Mirai. En España solo se vende este modelo además del modelo Nexa de la compañía, también asiática, Hyundai.

Estos vehículos presentan una ventaja en cuanto a emisiones de dióxido de carbono aparte de que a nivel de autonomía presentan una mayor cantidad de kilómetros a realizar que los coches eléctricos (aunque un mayor coste económico) y un menor coste económico que el diésel y la gasolina empleados en el sector de la automoción en la actualidad.

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

La principal problemática que presenta el uso de coches de hidrógeno en la actualidad es la ausencia de puntos de repostaje en el panorama nacional. La existencia de hidrogeneras en España se reduce, a día de hoy, a las grandes ciudades. Si bien hay proyectos de apertura de estas en entornos menos urbanitas o en ciudades más pequeñas, para el usuario es complicado encontrar un lugar donde repostar.



Figura 15: Mapa de las hidrogeneras actuales en la península ibérica.

Uno de los transportes más en boga a día de hoy son los vehículos aéreos no tripulados, más conocidos como drones, estos pueden representar un gran avance en diversos sectores, desde por ejemplo el reparto de pedidos a nivel comercial hasta a cuestiones de defensa.

Se han realizado y puestos en el mercado varios de estos drones que funcionan con pilas de combustible y en los casos en los que se han tomado modelos idénticos funcionando con pilas de combustible y pilas LiPo, las diferencias en cuanto a autonomía son favorables a las primeras. [14]

Otro de los usos que se le puede dar es la generación de energía, bien a nivel doméstico o industrial o bien para la alimentación de dispositivos móviles y no estacionarios. En el primer caso, se trata de dispositivos similares a los generadores de gasolina que se pueden utilizar para alimentar la red eléctrica de una casa en casos de emergencia o de ausencia de conexión a la red pública. En el caso de alimentación de dispositivos móviles se trata del uso de cartuchos de hidrógeno con una baja cantidad de este para alimentar las pilas y proveer de electricidad a diversos aparatos. La ventaja de estos es un ahorro en el tiempo de carga.

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

### 3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS

El montaje empleado consiste en los siguientes elementos que a continuación se explicarán:

- Pila de combustible Horizon H100 de 100W.
- Alimentación eléctrica.
- Carga electrónica regulable.
- Placa de adecuación de señales con sensores de corriente, tensión y temperatura.
- Sistema de adquisición de datos.
- Multímetros Fluke.

El suministro de combustible de hidrogeno se realizará en el laboratorio LADBER, a partir de hidrógeno producido por un sistema de hidrólisis de agua, este se introducirá en la pila a bajas presiones (<0.5bar).

*Pila de combustible Horizon H100.*

El sistema de la pila consiste en diferentes partes que se van a dividir, para simplificar la explicación en dos. Por un lado, está la propia pila y el resto de componentes auxiliares de esta y por otro lado está el controlador.

En la Figura 16 se muestra las fotografías de catálogo de la pila de combustible Horizon H100 y seguidamente una explicación de las partes de esta.

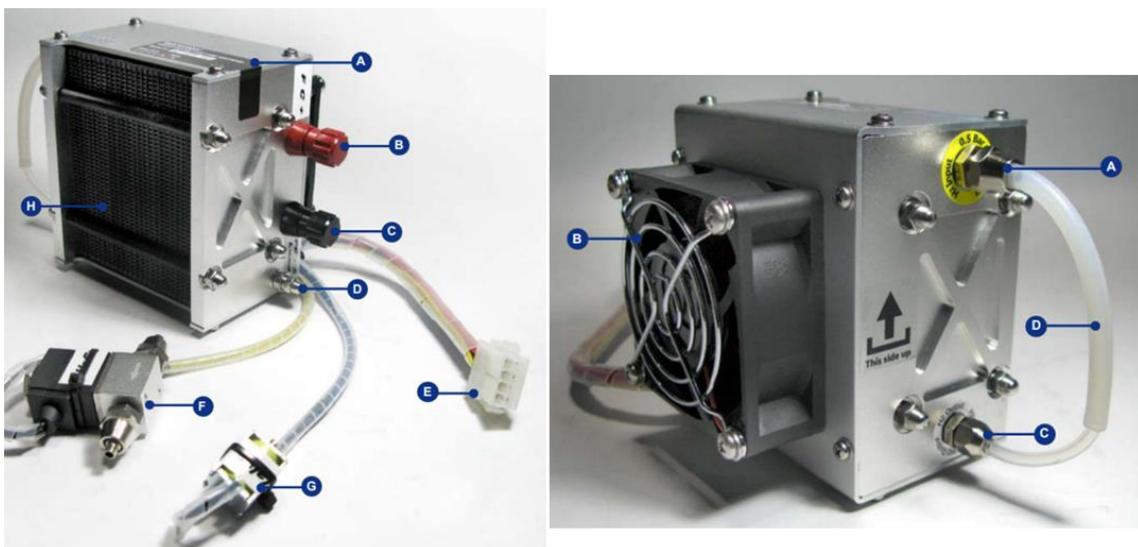


Figura 16: Imágenes de la pila Horizon H100 de 100W.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

En la imagen de la izquierda en la Figura 16, la letra A indica un precinto de garantía con una serie de advertencias escritas, las letras B y C son los bornes de la pila que entregan la corriente producida por esta, la letra D es la conexión a tierra, E es el conector para el controlador, F es la válvula de entrada de hidrógeno y G es la válvula de purga de hidrógeno que purga de agua y aire el gas.

En la imagen de la derecha de la Figura 16 A representa el conector de entrada de hidrógeno a la pila, B es el ventilador de refrigeración y entrada de aire a la pila, C es el conector de salida y D es el tubo que conecta la entrada y la salida de hidrogeno permitiendo que la humedad de la membrana no varíe y se seque.

En el caso del controlador, se muestra la figura 17 del sistema:

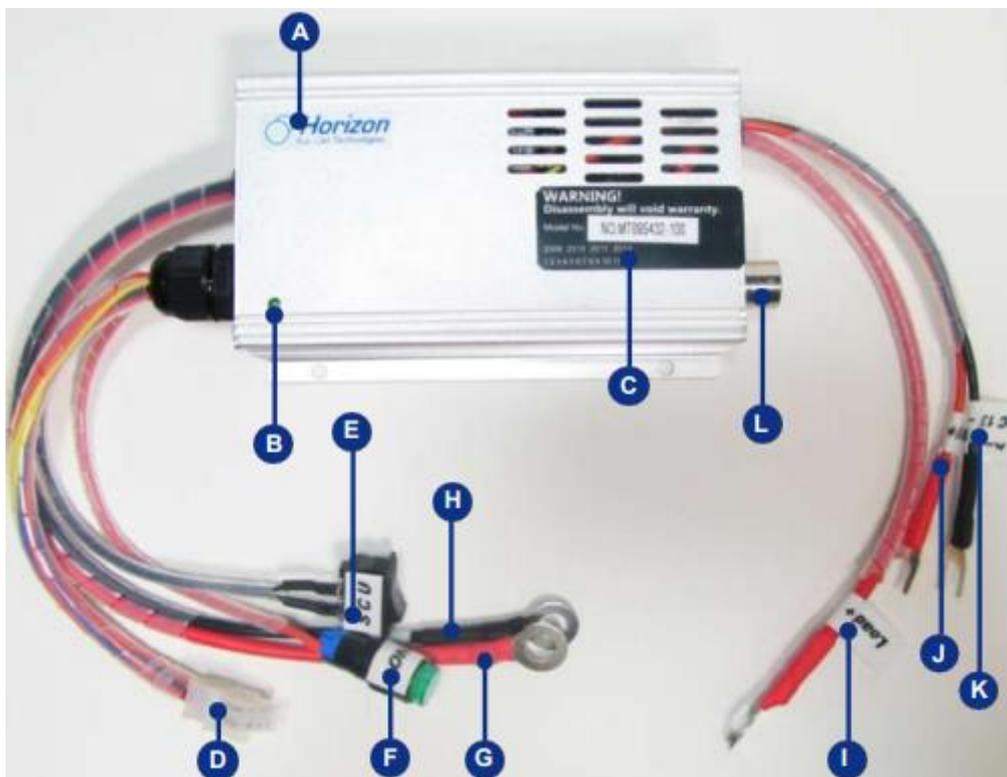


Figura 17: Subsistema controlador de la pila Horizon H100 de 100W.

En este caso la letra A es el logo de la compañía ya que en caso de utilizar otro controlador no específico se pierde la garantía, la B es un led que muestra el encendido/apagado del equipo, la C es una etiqueta de advertencia, la D es la conexión a la pila, la E es el interruptor SCU que es una unidad de corto circuito que mejora el rendimiento de las pilas, la F es el interruptor de encendido/apagado del equipo la G y la H son los conectores a la salida de la pila, I es el cable que se conecta a la carga electrónica regulable, J y K se conectan a una fuente de alimentación de +/-13 Voltios.

*Alimentación eléctrica.*

Esta se trata de una fuente de alimentación clásica. Se aplica una tensión de 13 V, y se limita la intensidad de 5 A para alimentar el controlador de la pila.

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

### *Carga electrónica regulable.*

Una carga electrónica regulable es un dispositivo que se utiliza normalmente para el ensayo de prueba de fuentes de energía, en este caso de la pila de hidrógeno. Existen multitud de opciones comerciales que se pueden utilizar para este cometido, sin embargo, se decidió utilizar la carga electrónica desarrollada en [16]. Esta carga consiste en una serie de circuitos conectados entre sí y a una placa Arduino UNO. Los circuitos consisten básicamente en una etapa de alimentación, una de control de corriente, un sensor de corriente, otro de tensión, un controlador de la ventilación y, por último, una etapa de potencia.

Originalmente la carga estaba desarrollada para el ensayo de pilas LiPO y realizar ensayos de descarga de este tipo de pilas de manera controlada y obtener información acerca del estado de la pila.

El funcionamiento de esta puede ser de tres maneras distintas en función del parámetro que se deseé controlar. La carga permite fijar valores constantes tanto de corriente, como de resistencia y potencia. En este caso se han empleado el método que permite demandar valores de corriente concretos. De esta manera se permite conocer mediante el uso de multímetros a tiempo real el valor de la intensidad y comprobar si coincide con el demandado permitiendo de esta manera un control agilizado del proceso.

Cabe destacar que la carga presentó una limitación en la cual no era capaz de superar los tres amperios de demanda de intensidad, es por ello que se le conectarían una serie de resistencias, de esta manera se permite la regulación mediante software de la carga regulable, pero teniendo un aporte fijo que demanda intensidad a la pila.

Esta estará conectada a la pila de combustible, a la red eléctrica y al ordenador personal vía puerto USB donde por mediación del software PuTTY se le enviarán comandos a la carga electrónica regulable para que ajuste la demanda de corriente. Para ello, se debe comunicar el puerto desde donde se recibe la información y la velocidad de esta tal y como se muestra en la figura 18:

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

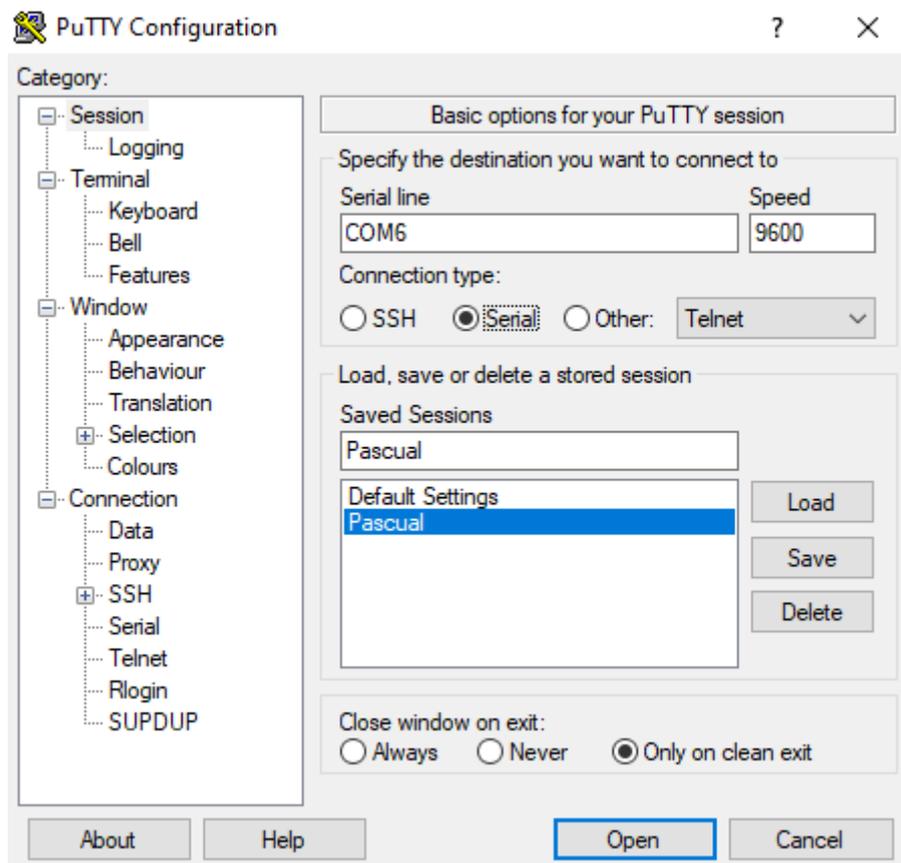
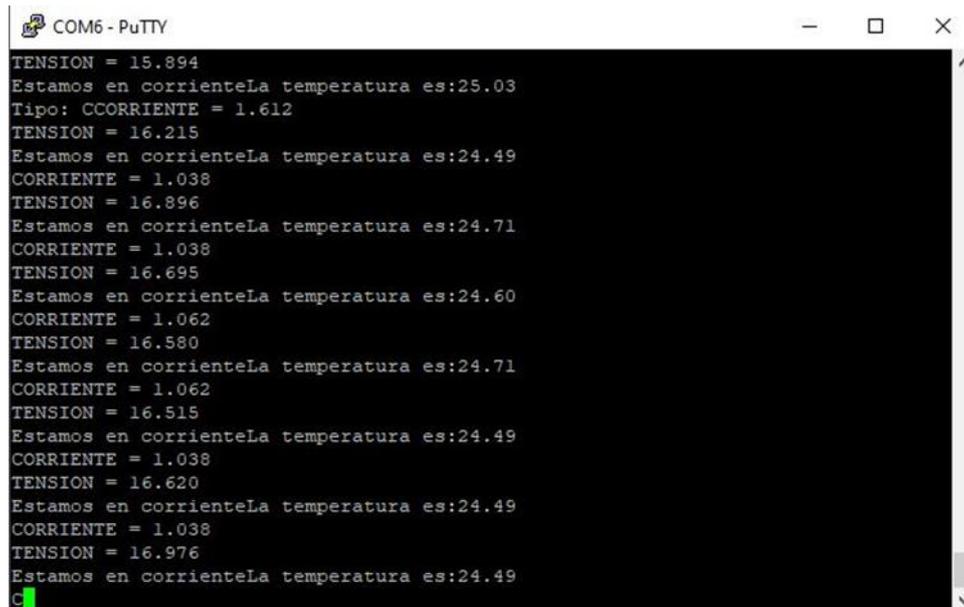


Figura 18: Configuración del software PuTTY.

La programación de la carga permite conocer, en este caso mediante la comunicación anteriormente descrita diferentes parámetros de esta: la corriente, la tensión y la temperatura de la propia carga, el valor de la temperatura es importante en tanto en cuanto esté el factor limitante de la potencia de la pila. En cuanto a la comunicación, al emplear el modo de corriente en la pantalla de la interfaz de PuTTY que se muestra en la Figura 19 se escribirán comandos con la letra C acompañando al valor en amperios que se desee demandar. Por ejemplo, si fuesen 5 amperios, el comando "C5".

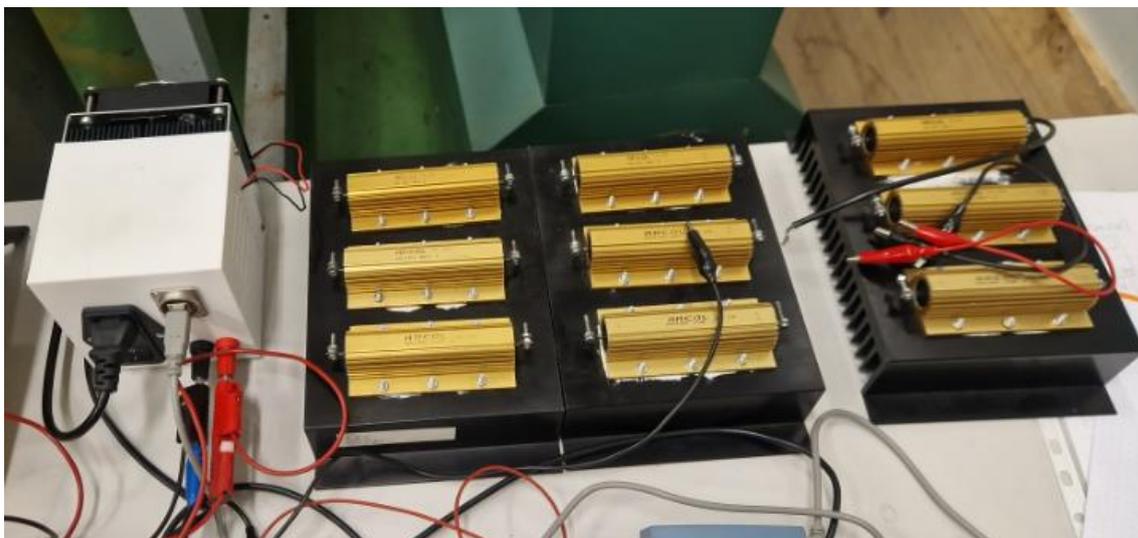
## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto



```
COM6 - PuTTY
TENSION = 15.894
Estamos en corrienteLa temperatura es:25.03
Tipo: C CORRIENTE = 1.612
TENSION = 16.215
Estamos en corrienteLa temperatura es:24.49
CORRIENTE = 1.038
TENSION = 16.896
Estamos en corrienteLa temperatura es:24.71
CORRIENTE = 1.038
TENSION = 16.695
Estamos en corrienteLa temperatura es:24.60
CORRIENTE = 1.062
TENSION = 16.580
Estamos en corrienteLa temperatura es:24.71
CORRIENTE = 1.062
TENSION = 16.515
Estamos en corrienteLa temperatura es:24.49
CORRIENTE = 1.038
TENSION = 16.620
Estamos en corrienteLa temperatura es:24.49
CORRIENTE = 1.038
TENSION = 16.976
Estamos en corrienteLa temperatura es:24.49
c
```

*Figura 19: Interfaz del software PuTTY.*

Cabe destacar que, la carga presentó una limitación por la cual no se pudieron superar los 3A de demanda, es por ello que se necesitó de la conexión de resistencias para poder generar mayor demanda de amperaje y tener hasta tres amperios regulables. Se muestra en la Figura 20 cómo quedaría la carga con las resistencias:



*Figura 20: Carga y resistencias.*

### *Placa de adecuación de señales.*

Para la realización de las gráficas de intensidad-voltaje e intensidad-potencia se deben obtener los valores de voltaje e intensidad de la pila, para ello se deben obtener los valores de esas señales mediante la sensorización de estas. Además, se obtendrán también las señales de temperatura ambiental y de la temperatura de la pila, esta última estará relativamente aproximada puesto que la no existencia de ningún tipo de perforación superficial en la estructura de la placa que permita la introducción de una sonda. La temperatura de

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

funcionamiento de la pila es un parámetro fundamental en el control de la pila, porque depende fuertemente la potencia generada por la pila y la eficiencia de la misma.

La sensorización y adecuación de las señales es muy importante ya que luego estas serán recogidas por un sistema de adquisición de datos que permite como máximo 5.5V de entrada por señal.

Respecto a los sensores utilizados para estas placas de adecuación, en el caso de la temperatura ambiente se va a utilizar un sensor LM35 junto a un operacional alimentado a 15V y en el de la temperatura interna un termopar junto con un circuito de compensación AD595 con alimentación a 5V, estos permiten convertir la variación de temperatura en un cambio en el voltaje a la salida de este, esto implica la necesidad de conocer la equivalencia entre la tensión de salida del sensor y la temperatura real que está midiendo, para ello se hizo uso de un horno seco, que permite controlar la temperatura a la que están las cavidades de este.

El proceso de calibración consiste en que, teniendo en cuenta que en principio, la temperatura de la celda no superará los 120°C y la ambiental los 50°C se ajusta al 80% del máximo de tensión que puede llegar a registrar (4 voltios) mediante el ajuste de un par de potenciómetros (uno por sensor) y midiendo dichos valores de corriente con un multímetro Fluke conectado a la salida de dichos sensores. Progresivamente se irá bajando la temperatura y tomando datos (5 por cada medida de temperatura), esto nos permitirá linealizar el comportamiento de los sensores y obtener una ecuación que relacione la temperatura y la tensión.



Figura 21: Proceso de adaptación de las señales de temperatura.

Las rectas obtenidas son las correspondientes a la figura 22:

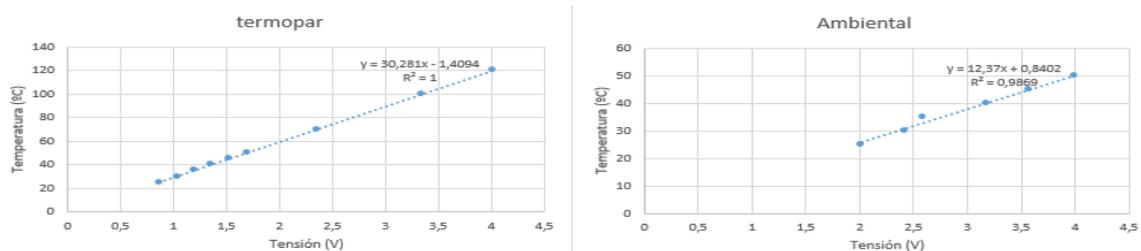


Figura 22: Rectas tensión-temperatura para los sensores de temperatura.

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

De manera similar se procedió con el sensor de tensión, para ello se tomaron medidas de tensión a la entrada y la salida del sensor, de esta y conocer la ganancia del sensor:

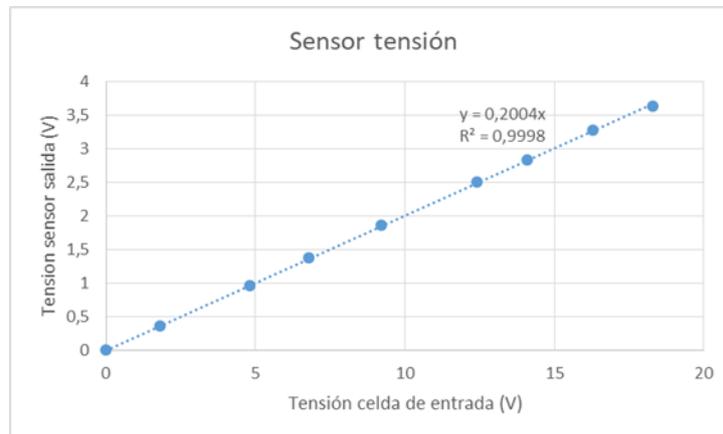


Figura 23: Recta calibrado sensor de tensión.

Por otro lado, el sensor de corriente es un ACS712 totalmente integrado basado en el efecto Hall que tiene el circuito de la Figura 24:

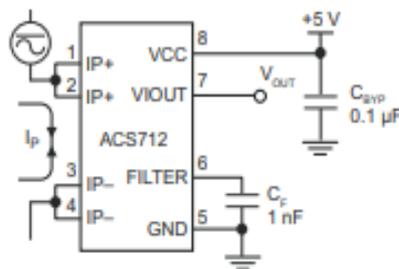


Figura 24: Circuito del sensor de corriente.

Este sensor emite una señal analógica que varía con la corriente unidireccional la ecuación que traduce los valores de salida a los valores originales viene expresada en la Ec. 47:

$$I = 15.15V_{\text{entrada\_sensor}} - 2.5 \quad (47)$$

De esa manera se calcula la intensidad de la celda después de haber sido traducida en una señal de tensión menor a 5.5V.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

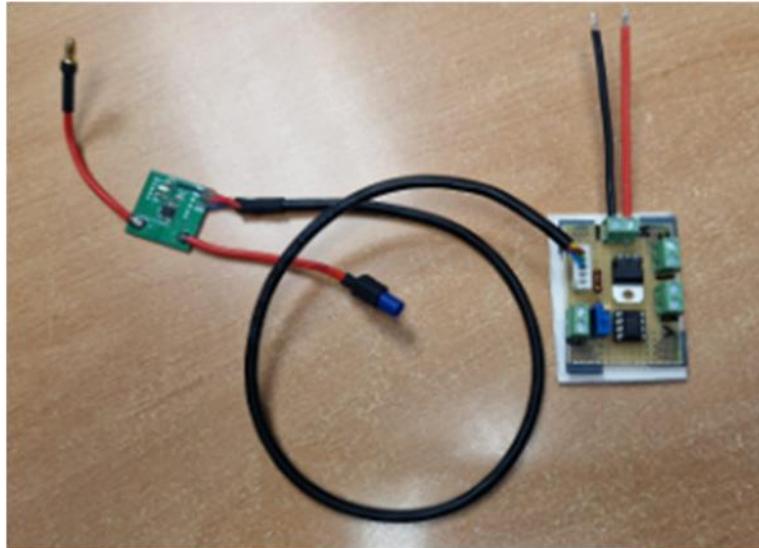


Figura 25: Placa de sensores de corriente y tensión.

Para el uso de los sensores de temperatura empleados se ha utilizado la placa empleada en [16], que estaba ideada para un proyecto en el cual se medían otras señales como flujos de metanol, esta también se emplea para la obtención de señales de corriente y tensión que posteriormente serán llevadas a los sensores externos a la placa. El esquema de la placa empleado es el mostrado en la Figura 26.

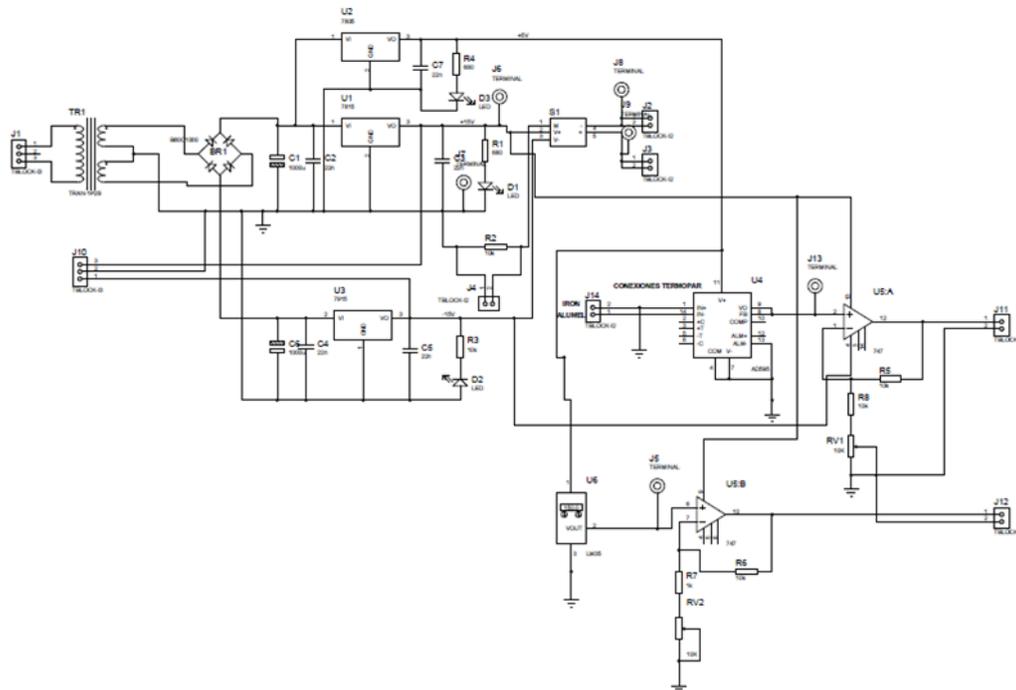
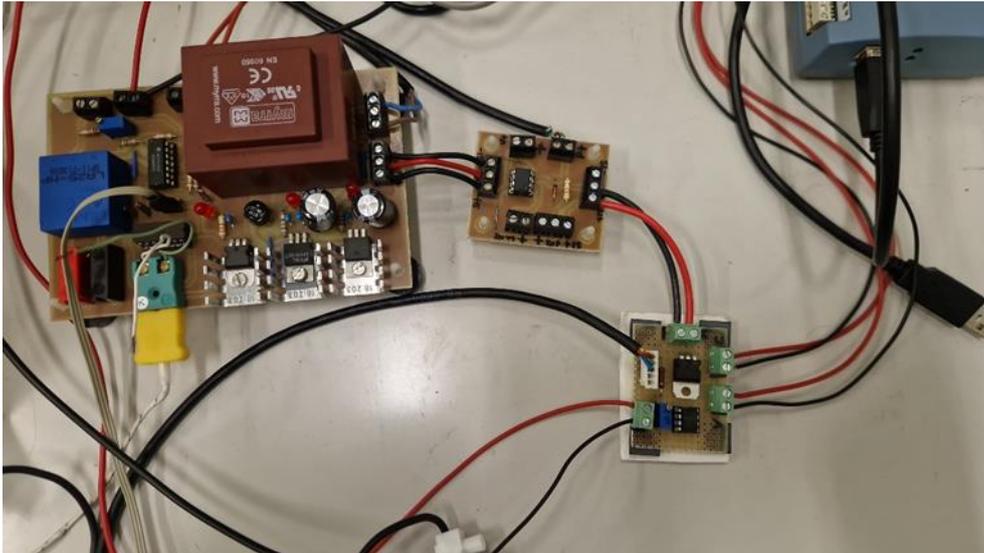


Figura 26: Esquema de la placa de sensores.

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

En la Figura 27 se muestra la vista de la placa de sensores.



*Figura 27: Vista de la placa de sensores.*

### *Sistema de adquisición de datos.*

La placa anteriormente descrita se encarga de la obtención de las señales y de realizar un trabajo de traducción entre magnitudes a medir y tensión que permita el registro de estas señales de tensión.

Por otro lado, para la obtención de las medidas de las magnitudes de interés se necesitarán las siguientes dos cosas: la traducción a partir de los datos conocidos y trabajados de los sensores desde las señales obtenidas hasta las magnitudes de interés y la comunicación de todos estos datos con un ordenador que registre los ensayos realizados. Estas cosas se obtendrán mediante el uso de una tarjeta de adquisición de datos (hardware) y la replicación del programa utilizado en [16] (software) adaptándolo a las medidas y los sensores empleados en esta ocasión.

Para ello se instalaron dos software distintos: Labview, que se utiliza para la programación, e Instacal, que se utiliza para la comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos y el propio programa de Labview. Para la instalación de labview se utilizó el software y las licencias que la UPV proporciona para ello, además se deberá rellenar la información concreta que se requiere para la instalación de los programas, así como la reiniciación del ordenador tras la instalación de este, cabe destacar que también se hubo de instalar la librería ULx for NI, también obtenida mediante la web oficial de National Instruments.

Respecto a la tarjeta de adquisición de datos utilizada, esta es una USB-1608G de Measurement Computing (MC). Estando ya instalado el software de programación se instalará el software propio de la tarjeta (instacal). Para ello se utilizará el software propio que ofrece MC.

En el programa utilizado, los cambios realizados fueron principalmente a la hora de actualizar a las relaciones entre las tensiones que los sensores pasan al sistema de adquisición de datos y los datos de interés que se pretenden medir. Si bien el programa cuenta con funcionalidades que no se van a implementar en este trabajo como, por ejemplo, el flujo de hidrógeno este tipo de funcionalidades no van a ser suprimidas de la replicación del programa realizada ya que esto

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

permite el uso del programa modificado para nuevas ocasiones en las cuales resulte interesante el uso tanto de los ajustes realizados para el registro de temperaturas, tensión e intensidad en este trabajo como el registro de otras mediciones.

Se muestra a en la figura 28 la parte del programa modificada:

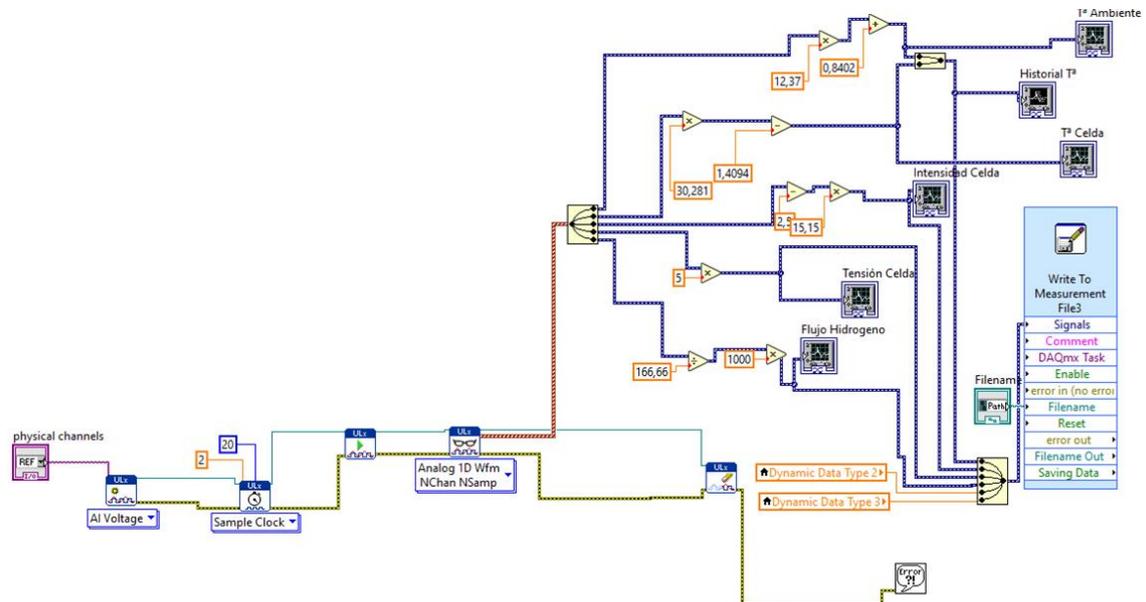


Figura 28: Parte del programa de lectura de señales en LabView modificada.

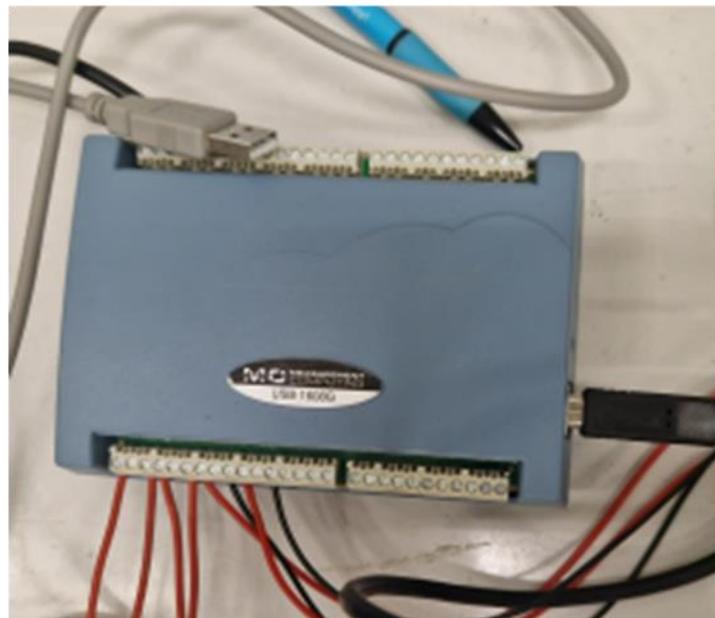


Figura 29: Sistema de adquisición de datos.



### **3.2 FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA**

A la hora de realizar experimentos el proceso constó de los siguientes pasos:

1. Conexión de todos los equipos a la red/a la fuente de alimentación (pila, carga, placa de sensores, ordenador...) y encendido de los multímetros.
2. Arranque del ordenador y conexión de la carga y el sistema de adquisición de datos mediante PuTTY e Instacall respectivamente.
3. Calibración de la placa mediante instacall.
4. Apertura del depósito de hidrógeno a 0.5 bar.
5. Comprobación de posibles fugas de hidrógeno a la entrada de la pila.
6. Encendido de la pila.
7. Comprobación de valores en los multímetros.
8. Selección de los canales que se desean medir en el sistema de adquisición de datos.
9. Selección del tiempo de ensayo.
10. Selección del nombre del archivo
11. Arranque de programa.
12. Apertura del archivo generado por LabView en MS Excel.
13. Tratamiento de los datos.

Es necesario conocer en que canales se está registrando cada una de las diferentes mediciones que se toman en los diversos ensayos realizados, en este caso la configuración es la siguiente:

Canal 0: Temperatura ambiente.

Canal 1: Temperatura de la pila.

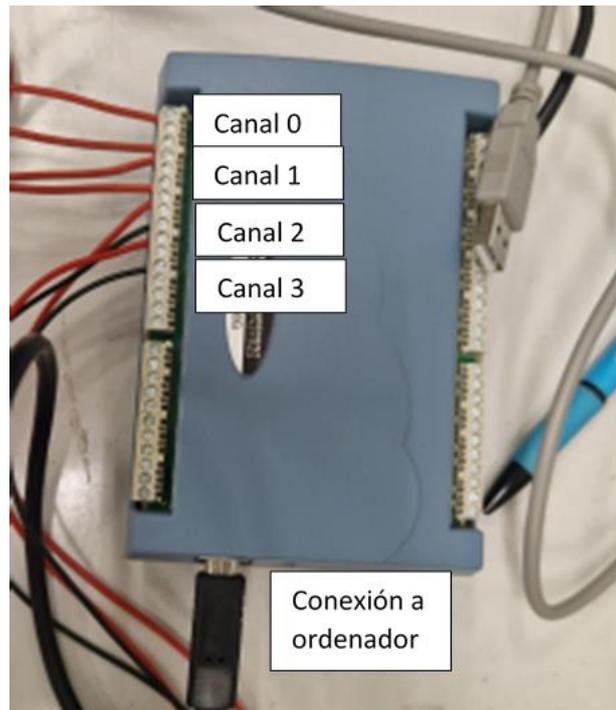
Canal 2: Intensidad de la pila.

Canal 3: Voltaje de la pila.

De igual manera es necesario prever el tiempo necesario para realizar un número de mediciones considerablemente suficiente permitiendo pasar por todo el rango de corrientes que se pretenden estudiar.

Otra cuestión a la que se le debe dar verdadera importancia es a la revisión durante el experimento tanto de los valores que devuelven los multímetros como de las gráficas que se van dibujando en el front panel que nos permite observar los valores que se registran a tiempo real, de esta manera se podrá tener la información por duplicado asegurando que verdaderamente los valores registrados vía software coinciden con aquellos que arroja el multímetro.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto



*Figura 31: Canales del sistema de adquisición de datos.*

## **CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN DEL SISTEMA**

En cuanto a los experimentos que se han realizado se encuentran 2 diferentes para los cuales, en esencia se emplearon los mismos equipos salvo el sistema de adquisición de datos y la adecuación de señales en uno de ellos. Todos estos experimentos se han llevado a cabo en el laboratorio LABDER del Instituto de Ingeniería Energética.

El primero de ellos consistió en la realización de las curvas I-V y I-P de forma manual, es decir, ir incrementando el valor de la intensidad mediante la carga electrónica e ir anotando los valores que los multímetros conectados a la salida de la carga daban. Esto permite generar unas gráficas donde, al tener pocos datos, se podrá observar sin fluctuaciones debidas al momento en el que se toma la medida y el estado de la pila en ese preciso instante, evitando así tener una alta dispersión y la necesidad de realizar ajustes.

El otro tipo de experimento consiste en la realización de ensayos en los cuales se utilizan todos los equipos y se realiza un registro de los valores de temperaturas, tensión y corriente mediante los medios explicados con anterioridad. Este tipo de experimento presenta la ventaja de no tener que realizar anotaciones manuales ya que todos los datos estarán informatizados, además el ajuste a la realidad de este experimento es mayor puesto que el número de datos, teniendo en cuenta que la frecuencia de registro es de 0.5 segundos

### **4.1 MEDIDAS DE SEGURIDAD**

En cuanto a las medidas de seguridad que se han tomado para llevar a cabo los ensayos estas han consistido en la realización minuciosa del protocolo de pasos anteriormente descrito haciendo especial hincapié en asegurar que no existen fugas de hidrógeno. Como ya se conoce, este gas es muy volátil y presenta un peligro ante posibles reacciones de combustión, es por ello que es tan necesario controlar dichas fugas, pese a que la posibilidad de la existencia de una chispa que pudiera prender el hidrógeno pasa por un cortocircuito o algún fallo eléctrico.

Para minimizar esos riesgos con las fugas se aseguró que la entrada de hidrógeno a la pila estuviera bien sellada, esta consiste en una serie de conectores que adaptan la salida de la botella a la entrada a la pila. En primer lugar, se realizaba un barrido sensorial para asegurar que no había ninguna fuga fácilmente detectable. Después se realizaba un barrido mediante un detector de hidrógeno Dräger Xam 5000 para detectar si todavía sigue filtrándose gas, si este detector emite alguna señal es necesario apretar las conexiones de la entrada o utilizar cinta de teflón para forrar las roscas.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto



*Figura 32: Detector de hidrógeno.*

Además de las medidas de seguridad activas también se cuenta de forma pasiva con ventiladores en el laboratorio LABDER del Instituto de Ingeniería Energética de la Universitat Politècnica de València, donde se realizaron los experimentos que permiten una regulación de la cantidad de hidrógeno presente en la atmósfera del área de trabajo reduciendo así la posibilidad de generar una atmósfera explosiva.

#### **4.2 MONITOREO DE LA EXPERIMENTACIÓN**

Cabe destacar que, tal y como se ha dicho, es necesario prestar atención a diferentes medidas tomadas durante los ensayos, esto sirve para detectar posibles fallos ocurridos a lo largo de estos, para ello se debe atender simultáneamente a los valores que se observan en el front panel de la programación de los ensayos como a los multímetros pudiendo identificar caídas de tensión o corriente.

Además, esto también permite identificar posibles diferencias u errores entre aquellas mediciones registradas por el programa y los valores reales medidos en continuo por los multímetros, permitiendo, en caso de ser necesario, la interrupción de los ensayos ante dichas discrepancias.

Se muestra en la Figura 32 cuál es la visión que se tiene del front panel durante los ensayos

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

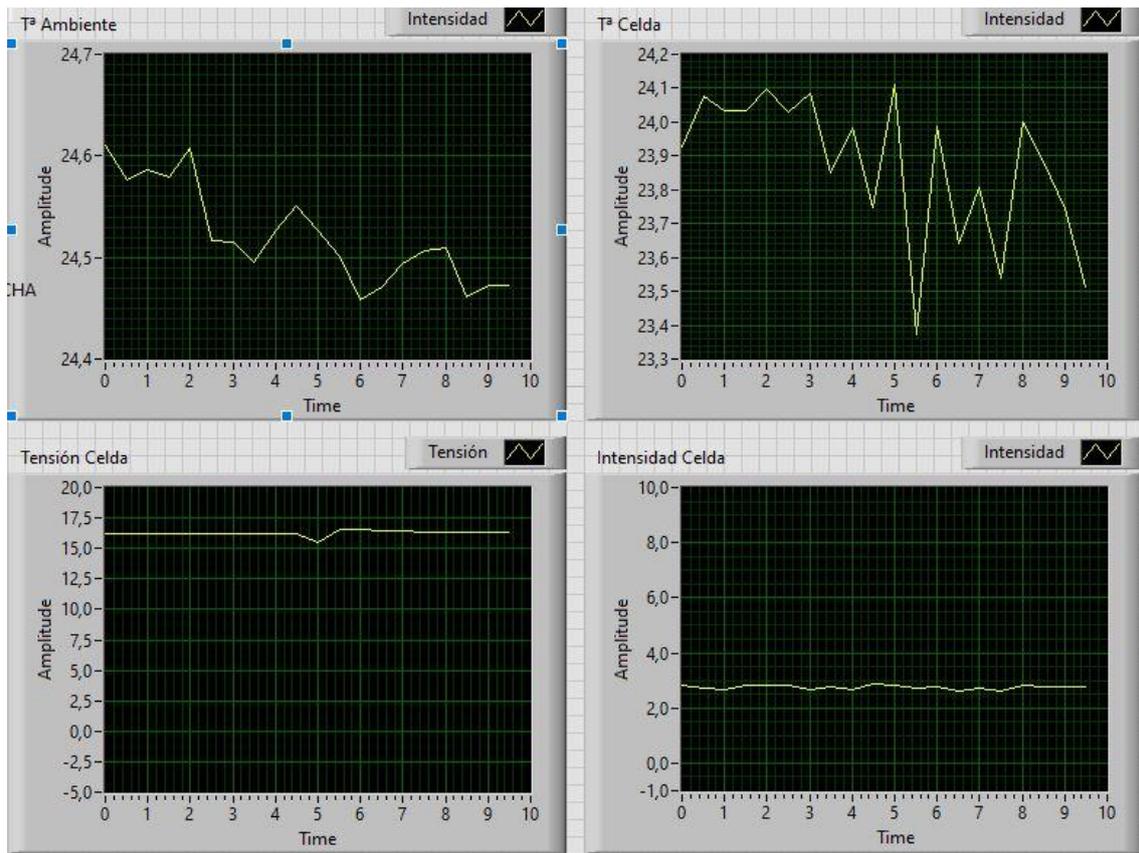


Figura 33: Vista del front panel.

## **CAPÍTULO 5. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS**

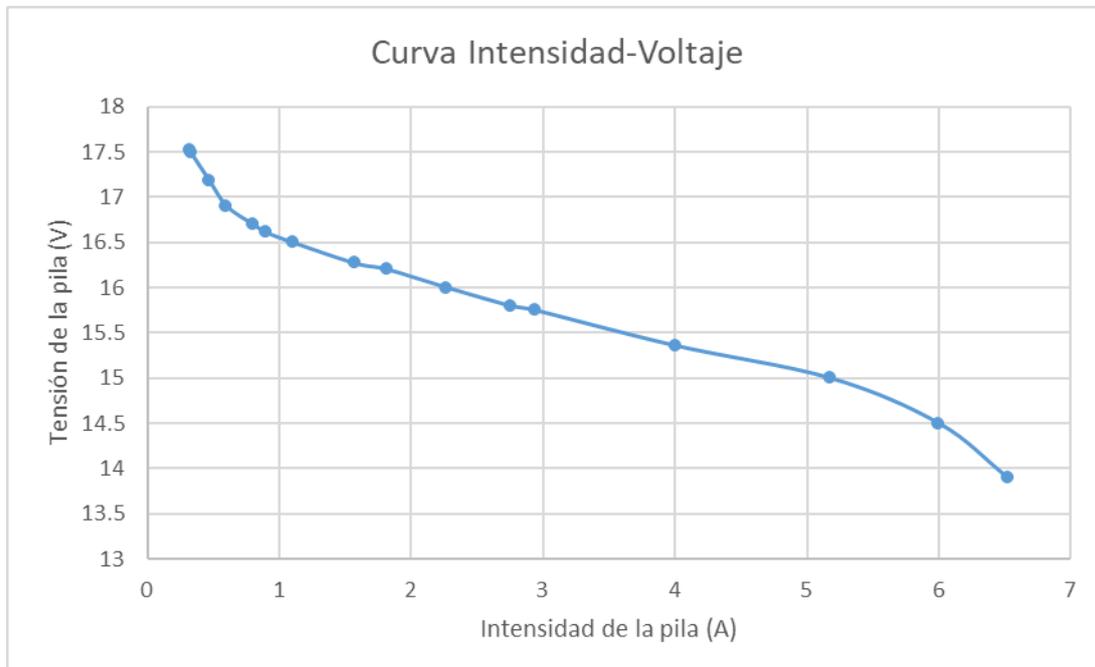
Como ya se ha comentado anteriormente, la forma de caracterizar las pilas de hidrógeno es la realización de curvas corriente-tensión y corriente- potencia, para ello se han realizado los ensayos descritos en el punto inmediatamente anterior obteniéndose resultados diferentes a nivel visual pero esencialmente muy similares en los cuales se aprecia un comportamiento esperado en la experimentación de la pila.

Para que los resultados se acercasen lo máximo a la realidad y entendiendo que pueden existir errores de medición al realizar dicha toma de valores de forma visual, se procedió de manera que cada vez que la electroválvula de purgado de la pila se activaba y emitía un sonido de escape, permitiendo la toma manual de datos siempre en momentos idénticos.

Para el cálculo de la potencia, se ha acudido a su definición, entendiéndose esta como el producto entre el voltaje y la intensidad que la pila entrega.

Respecto a los primeros ensayos realizados, se fue anotando los valores de intensidad y voltaje y se representarían mediante el uso de MS Excel.

La Figura 34 y la Figura 35 muestran las gráficas obtenidas mediante esta experimentación



*Figura 34: Curva de Intensidad-Voltaje del primer experimento con la pila de combustible H100.*

Respecto a la curva de intensidad-potencia, de la cual ya se ha comentado la forma de tratar los datos obtenidos para llegar a obtener los resultados necesarios, se han realizado los cálculos

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

pertinentes y la representación de los resultados obtenidos mediante el software MS Excel obteniéndose el resultado mostrado en la figura 35.

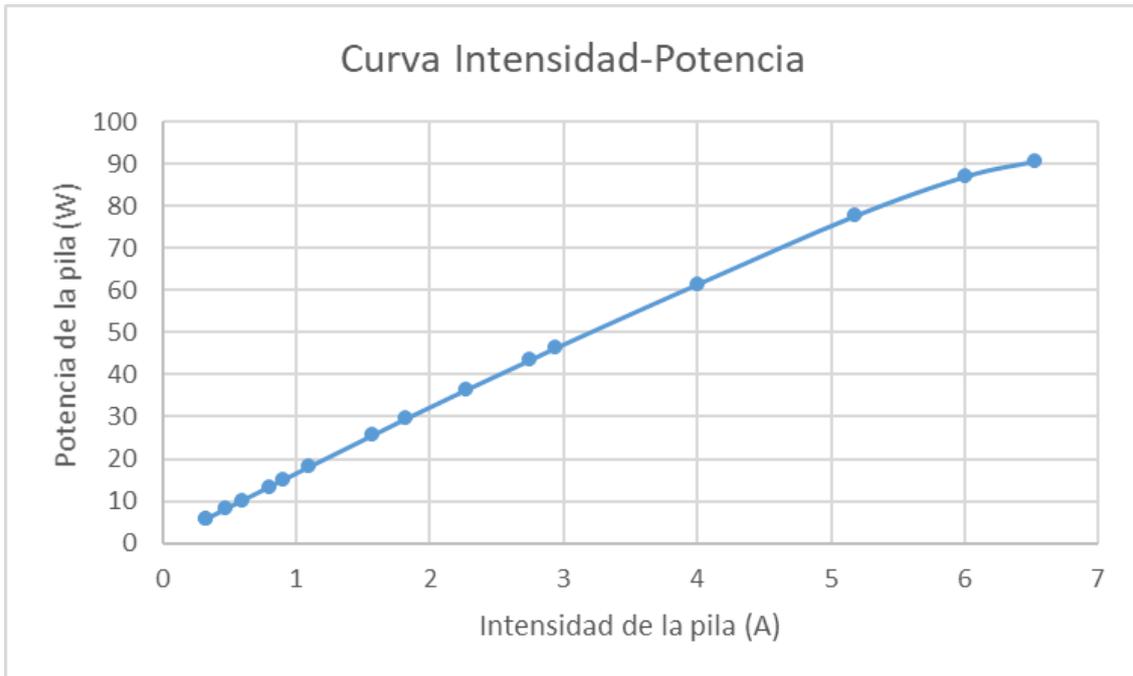


Figura 35: Curva de Intensidad-Potencia experimental del primer experimento de la pila de combustible H100.

Por otro lado, siguiendo el protocolo de funcionamiento del sistema descrito en el punto 3.2, se realizaron los ensayos de automatización para la caracterización de la celda que concierne a este trabajo. El equipo graba un fichero con el nombre que se le ha dado en el front panel, este se puede trabajar con MS Excel permitiendo así representar las gráficas y mediante la herramienta Solver encontrar una expresión que la describa.

En primer lugar, se muestra en la Figura 36 la curva de corriente-tensión obtenida:

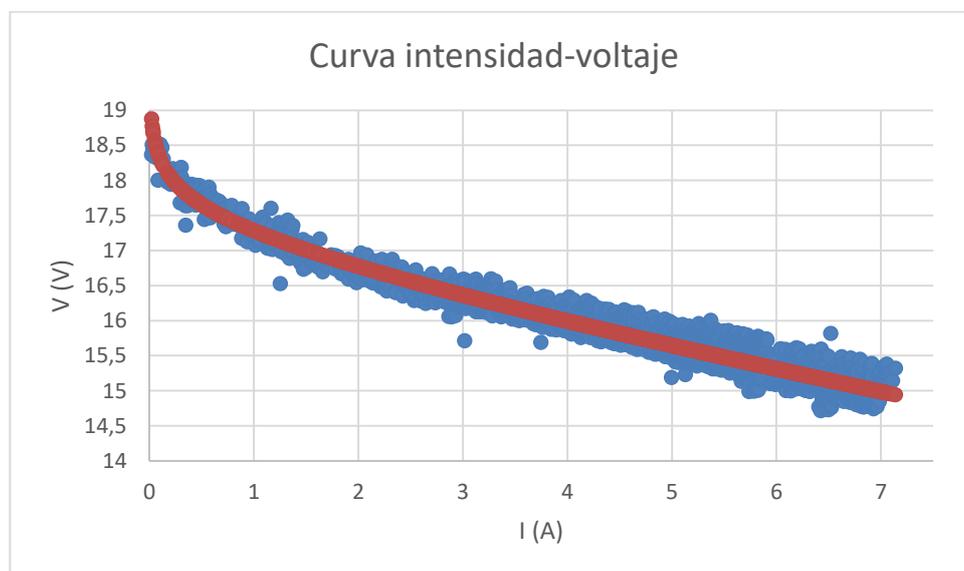


Figura 36: Curva de intensidad-voltaje del segundo experimento para la pila de combustible H100.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Se ve en la Figura 37 la de potencia-corriente:

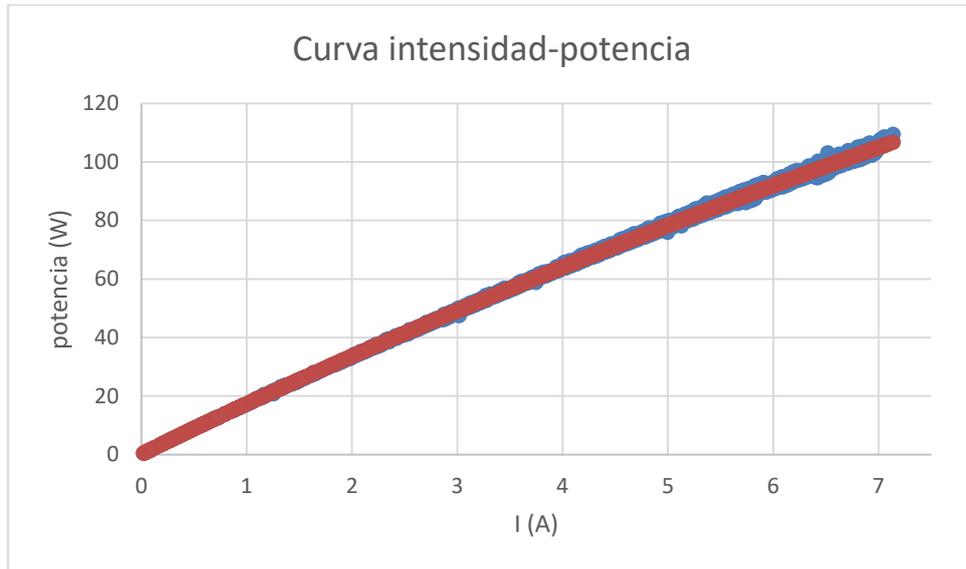


Figura 37: Curva de intensidad-potencia del segundo experimento para la pila de combustible H100.

En azul se ven los todos los datos que fueron registrados por el sistema, mientras que en naranja se ve los valores para el ajuste de las curvas a la expresión que se utiliza para describir el comportamiento de las pilas y que tiene en cuenta los diferentes tipos de pérdidas:

$$V = V_{oc} - A_1 \cdot \ln \frac{i}{i_0} - i \cdot R \cdot S - m \cdot \exp(ni) \quad (48)$$

Como los valores que se han obtenido, a diferencia de los que se expresan en esta ecuación son de intensidad y no a los de la intensidad por superficie, la ecuación entonces queda:

$$V = V_o - A \cdot \ln \frac{I}{I_0} - I \cdot R - m \cdot \exp(nI) \quad (49)$$

En la Tabla 2 se muestran los valores de los parámetros obtenidos en el ajuste mediante Solver y la ecuación que relaciona el voltaje con la intensidad de manera numérica:

Parámetro	Valor
$V_o(V)$	<b>18,519</b>
$A(V)$	<b>0,340</b>
$I_o(A)$	<b>0,075</b>
$R(Ohm)$	<b>0,272</b>

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

<b>m(V)</b>	<b>0,083</b>
<b>n(A<sup>-1</sup>)</b>	<b>0,001</b>

Tabla 2: Parámetros de la curva Intensidad-Voltaje.

De manera que la expresión de la curva quedaría según la Ec. 50.

$$V = 18.519 - 0.340 \cdot \ln \frac{I}{0.075} - 0.272 \cdot I - 0.083 \cdot \exp(0.001 \cdot I) \quad (50)$$

Como se ha comentado en la parte introductoria del documento, este trabajo está enfocado hacia los vehículos aéreos no tripulados (drones) que utilizar hidrógeno como combustible mediante el uso de pilas, es por ello, tal y como se ha comentado con anterioridad, el control de la temperatura para activar sistemas de refrigeración, así como para las estimaciones de los niveles de hidrógeno presente en los depósitos mediante el empleo de ecuaciones de estado. Es por ello que se tomaron medidas de temperatura durante las experimentaciones de la manera explicada en la descripción de los equipos. Las gráficas que se han obtenido representan los valores de temperatura frente al tiempo transcurrido.

La primera gráfica de temperatura que se muestra es la gráfica de la temperatura de la celda:

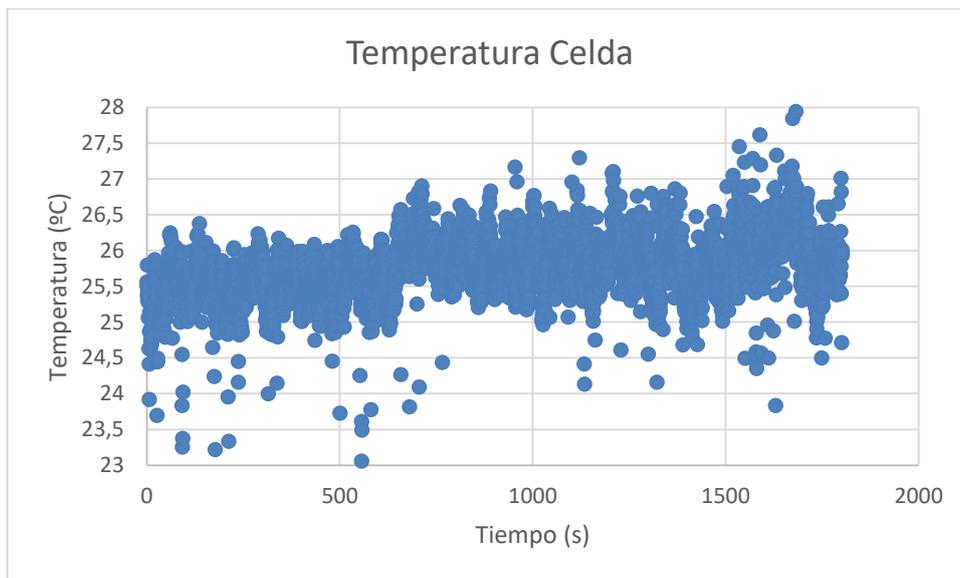
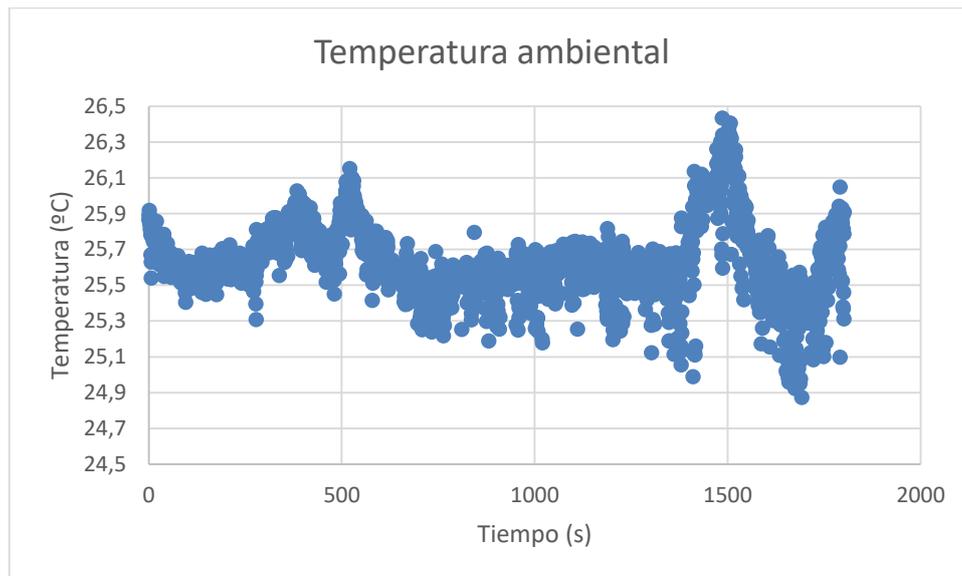


Figura 38: Gráfica de la temperatura de la celda.

La gráfica mostrada en la Figura 39 es la de la temperatura ambiental:

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto



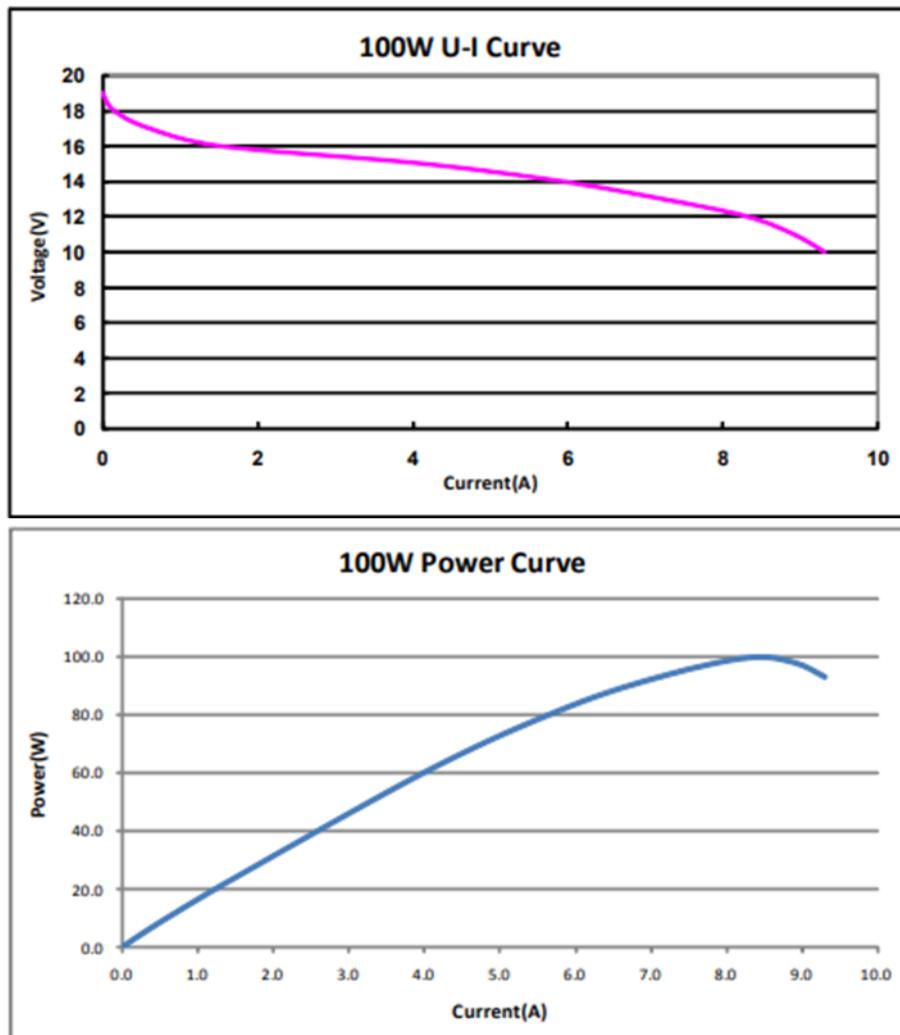
*Figura 39: Gráfica de la temperatura ambiental.*

Respecto a estas dos gráficas se puede comentar que la temperatura para el ensayo relacionado no ha sufrido grandes variaciones pues oscila entre 25 y 27°C en el caso de la temperatura de la celda, pese aunque se pueda encontrar una ligera tendencia positiva, y entre 25 y 26.5° en el caso de la ambiental.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Una vez presentados los resultados que se han obtenido mediante la experimentación de los sistemas cabe analizar los resultados en función de las premisas que se tenían antes de comenzar a realizarlos y, de esta manera, establecer las conclusiones del trabajo evaluando si los objetivos que se pretendían alcanzar al inicio del mismo han resultado satisfechos o no.

En primer lugar, se va a comentar lo relacionado con la descripción de la pila de hidrógeno, para ello cabe destacar que, en el manual de la pila se mostraban las gráficas características de la pila, esto nos sirve para establecer diferencias entre los ensayos que se han realizado en el trabajo y los resultados obtenidos frente a los esperados.



*Figura 40: Gráficas características aportadas por el fabricante.*

Teniendo en cuenta estas gráficas se pueden mencionar dos diferencias principales:

## Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

En la curva V-I, se observa como en la gráfica aportada por el fabricante, las pérdidas que se generan debido al transporte de masas son mucho más apreciables de lo que se aprecia en las curvas que se han desarrollado mediante los ensayos. No ocurre esto con las pérdidas debidas a la reacción química y las pérdidas óhmicas.

Esta ausencia de caída de la tensión también se aprecia en la curva P-I, sin embargo, la diferencia más importante que se aprecia es que en el ensayo se superaron los 100W de potencia en lugar de caer.

Ambas diferencias comentadas anteriormente se pueden asociar principalmente al desgaste o ausencia de este de la membrana de intercambio protónico que la pila de hidrógeno contiene como electrolito. Es decir, el fabricante entrega como dato un valor medio, en función de aspectos como cuanto de nueva sea la pila o la propia naturaleza de esta puede variar en los resultados obtenidos. En este caso se trata de una pila relativamente nueva lo que explica que supere la potencia máxima de 100 W, sin embargo está no llega a alcanzar un 10% de este valor máximo por tanto se asume que el comportamiento de la pila en este sentido es normal

Por otro lado, en las medidas de temperatura tomadas, cabe destacar las diferencias entre las curvas realizadas mediante ensayos automatizados y los no automatizados, en las primeras, representadas en las figuras 34 y 35 se aprecia que las pérdidas por concentración sí que existen, a diferencia de las representadas en las figuras 36 y 37 de los ensayos automatizados, la explicación que se le da a esto está relacionada con la cantidad de datos recogidos; en los ensayos automatizados se recogen datos cada medio segundo, esto implica una mejor ajuste a la realidad mientras que en los ensayos no automatizados, donde únicamente se realiza una medida de tensión e intensidad para cada rango del eje de la intensidad, por tanto al realizarse en primer lugar los ensayos no automatizados y guardar cierta similitud con los gráficos aportados por el fabricante estas se asumieron como correctas. Con posterioridad se realizarían los ensayos no automatizados, que si bien no se ajustan tanto a los datos aportados por el fabricante resultan más fiables por la cantidad de datos tomados.

Con respecto a la temperatura se puede decir que, para estos ensayos no representa una medición crítica ni se aprecian prácticamente influencia en el rendimiento de la pila de los cambios de temperatura registrados, principalmente porque estos no han sido muy grandes. Atendiendo a la Figura 38 se puede observar como la diferencia entre la menor medida de temperatura registrada y la mayor apenas hay una diferencia de 5 K, esto explicaría que la superficie de la pila no aumenta demasiado su temperatura conforme avanzan los experimentos, sobre todo si se atiende a donde están el grueso de las mediciones y se observa que se asemeja mucho a una línea recta.

La temperatura exterior, representada en la Figura 39 y entendida como un dato de control, sirve también para comparar los datos de la temperatura de la celda y esta. Se observa una diferencia entre el máximo y el mínimo registrado de 1.5 K aproximadamente, que coincide con la diferencia entre los máximos registrados por ambos sensores de temperatura y de 2 K en el caso de los mínimos registrados. Esto representa que con esas diferencias entre temperaturas máximas y mínimas y las comparaciones entre las medidas de ambos sensores permite concluir con que las temperaturas registradas son prácticamente iguales.

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Por último, cabe destacar que los resultados son los esperables pues la ventilación y la refrigeración durante el ensayo eran suficiente como para que la temperatura no tuviera saltos demasiado grandes.

## **CAPÍTULO 7. RELACIÓN DEL TFG CON LOS ODS.**

Los objetivos de desarrollo sostenible, conocidos por sus siglas ODS, consisten en unas metas que todos los estados miembros de las naciones unidas llevan tomando desde el año 2015 englobado dentro del marco de la agenda 2030. La adopción de los ODS precisa del compromiso colectivo para la consecución de los mismos basado en la comprensión de la situación actual y la necesidad del cumplimiento de los mismos para alcanzar unos estándares de vida globales más justos, así como también la complejidad que estos implican, convirtiéndolos en un verdadero reto. Por otro lado, cabe destacar que estos ODS son los sucesores de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), de manera que han permitido ampliar el alcance de manera muy ambiciosa siendo que su objetivo no solo se basa en la erradicación de la pobreza, sino que se está centrando en otros objetivos y cuestiones como la protección del planeta, el combate contra el cambio climático o la paz mundial, por ejemplo, interseccionalmente.

La Agenda 2030 marca el camino que lleva a un desarrollo inclusivo, equitativo e igualitario, se esta manera, el crecimiento económico debe ser socialmente ético y sostenible con el medio ambiente. Una de las particularidades de los ODS es que están considerados como un conjunto, es decir, no son indivisibles, por tanto, un avance en una materia repercute un avance en otra, pues están interrelacionados. Para la consecución de los ODS se precisa de la participación de todos los sectores de la sociedad (gobiernos, sociedad civil, sector privado, ciudadanos...). La transformación global para un futuro sostenible y ético en lo social pasa por conseguir los ODS.

En la figura 41 se hallan todos los ODS:



*Figura 41: Objetivos de desarrollo sostenible.*

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

En la Figura 42 se muestran señalados los ODS con un grado de relación alto.



Figura 42: ODS relacionados con el TFG.

Objetivos de desarrollo sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza.			X	
ODS 2. Hambre cero.			X	
ODS 3. Salud y bienestar.		X		
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.		X		
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.	X			
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

ODS 10. Reducción de las desigualdades.			<b>X</b>	
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.	<b>X</b>			
ODS 12. Producción y consumo responsables.		<b>X</b>		
ODS 13. Acción por el clima.	<b>X</b>			
ODS 14. Vida submarina.			<b>X</b>	
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.			<b>X</b>	
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				<b>X</b>
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.		<b>X</b>		

*Tabla 3: Grado de relación con cada ODS.*

Evidentemente, este trabajo está mucho más relacionado con aquellos ODS que tienen que ver con investigación y desarrollo, es por ello que aparecen señalados en la Figura 42. Aquellos objetivos que estén relacionados con aspectos sociales como el fin de la pobreza o igualdad de género no procede considerarlos para este tipo de proyectos. Cabe destacar que algunos de los no señalados (como el de agua limpia y saneamiento o el de vida submarina) guardan relación con el TFG en menor medida, de manera que no han sido considerados de igual manera que aquellos que son considerados procedentes pero de manera indirecta sí que están relacionados.

El primero de los ODS con el que sí está relacionado es con el de energía asequible y no contaminante. Si bien es cierto, tal y como se comenta a lo largo del trabajo que el hidrógeno dependiendo del proceso de obtención del cual provenga está estrechamente relacionado con lo contaminante que este sea o deje de ser el uso de este tipo de tecnologías representa un avance en cualquier caso. Respecto al hidrógeno utilizado en el proyecto se trata de hidrógeno bastante limpio teniendo en cuenta que en el laboratorio LABDER se cuenta con placas solares que permiten obtener el combustible sin generar gases contaminantes, es por tanto que en este aspecto el trabajo cumple con el objetivo.

Si se recuerda que, en este caso, el trabajo consiste en la puesta en marcha de un banco de pruebas para pilas de hidrógeno se entiende que cumpla con el objetivo número 9 de industria, innovación e infraestructura, pues este tipo de tecnologías están actualmente en desarrollo y significan una verdadera novedad, además el hecho de que la forma del trabajo sea precisamente un banco de pruebas lo relaciona estrechamente con la infraestructura entendiendo que podría ser replicado en cualquier proceso productivo en el que fuese necesario introducir una tecnología similar, impactando también entonces a la industria.

Por otro lado, actualmente las ciudades presentan una gran cantidad de coches y medios de transporte públicos que en la mayoría ocasiones consumen combustibles fósiles, lo que tiene un impacto en el aire que se respira en los núcleos urbanos y llegando a repercutir en la salud de sus ciudadanos, de hecho, grandes capitales y ciudades tanto a nivel nacional como internacional ya están limitando la entrada de este tipo de vehículos al centro de estas. Las tecnologías que se mencionan y estudian en este TFG son de gran importancia en este sentido, el desarrollo de coches y vehículos para transporte público impulsados por pilas de hidrógeno

### Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

permitiría descarbonizar en gran medida las ciudades, sobre todo aquellas que no cuentan con un sector industrial demasiado fuerte y en las que es el sector servicios aquel que genera más ingresos para los negocios locales.

El cuarto de los ODS con el que se puede relacionar el TFG es el de acción por el clima pues, como ya se ha explicado, las circunstancias actuales en relación con los problemas climáticos están muy relacionados con la forma en la que el ser humano obtiene la energía que necesita tanto para realizar procesos habituales de la vida cotidiana como también para los procesos industriales que actualmente mantienen la economía mundial. De esta manera, este tipo de trabajos están relacionados porque ponen de manifiesto nuevas formas de energía que permiten un menor impacto climático postulándolas como opciones a futuro que cada día se acercan más a la actualidad.

## **CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Statista, (consultado el día 25/09/2023). Emisiones globales históricas de CO2 procedentes de la actividad industrial y los combustibles fósiles de 1757 a 2022. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/635382/emisiones-historicas-de-co2-globales/#:~:text=En%202021%2C%20se%20emitieron%20aproximadamente,de%20.000%20millones%20de%20toneladas.>
- [2] Shang-Ping Xie. Chapter 13 - Global Warming: Thermodynamic Effects (2024). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323954907000138>
- [3] Gobierno de Aragón (Consultado el día 27/09/2023). El cambio climático. <https://www.aragon.es/-/el-cambio-climatico#:~:text=La%20temperatura%20del%20planeta%20sube%3A%20es%20el%20calentamiento%20global,-Las%20temperaturas%20de&text=En%20los%20C3%BAltimos%20100%20a%C3%B1os,el%20C3%81rtico%2C%20hasta%205%20C2%BAC.>
- [4] Consejo Europeo (consultado el día 27/09/2023). Infografía - ¿Cómo está financiando la UE la transición a la neutralidad climática? <https://www.consilium.europa.eu/es/infographics/financing-climate-transition/>
- [5] Bueche, Frederick (julio de 1988). Ciencias físicas. <https://books.google.es/books?id=s91tr6RShikC&pg=PA74&dq=energ%C3%ADa+capacidad+para+realizar+un+trabajo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKewiN3YaywbzZAhVHrVkkHSDZCiYQ6AEIJzAA#v=onepage&q=energ%C3%ADa%20capacidad%20para%20realizar%20un%20trabajo&f=false>
- [6] Salaet, S.; Roca, J. (2010) AGOTAMIENTO DE LOS COMBUSTIBLES FÓSILES Y EMISIONES DE CO2: ALGUNOS POSIBLES ESCENARIOS FUTUROS DE EMISIONES. [https://www.usc.es/econo/RGE/Vol19\\_1/castelan/art1c.pdf](https://www.usc.es/econo/RGE/Vol19_1/castelan/art1c.pdf)
- [7] Coviello, Manilo; Altomonte, Hugo (2003). SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA EN AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE: EL APORTE DE LAS FUENTES RENOVABLES. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/e3e01264-2239-40dd-9fed-20e8a479664d/content>
- [8] Wikipedia. Crisis del petróleo de 1973 (consultado el 06/10/2023). [https://es.wikipedia.org/wiki/Crisis\\_del\\_petr%C3%B3leo\\_de\\_1973#cite\\_ref-altaya1\\_2-0](https://es.wikipedia.org/wiki/Crisis_del_petr%C3%B3leo_de_1973#cite_ref-altaya1_2-0)

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

[9] Alba Ríos J.J.; Barquín Gil, Julián; Nuñez Díaz-Otero, Mónica; Martínez Villar, Cesar; Moreda Díaz, Eduardo (2022). EL HIDRÓGENO COMO VECTOR PARA UN SISTEMA ENERGÉTICO RENOVABLE.

<https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/424/ALBA,%20BARQUI%CC%81N,%20DI%CC%81AZ,%20MARTI%CC%81NEZ%20Y%20MOREDA.pdf> (consultado el día 07/10/2023)

[10] Wikipedia. Vector energético (consultado el 08/10/2023).  
[https://es.wikipedia.org/wiki/Vector\\_energ%C3%A9tico](https://es.wikipedia.org/wiki/Vector_energ%C3%A9tico)

[11] Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Sitio web del hidrógeno. Colores del hidrógeno. (Consultado el 08/08/2023)  
<https://energia.gob.es/hidrogeno/Paginas/Index.aspx>

[12] Ryan O'Hayre; Suk-Won Cha; Whitney Colella; Fritz B. Prinz. Fuel Cell Fundamentals (2016)

[13] J. Maya-Cornejo, Abel Garcia-Bernabé, Vicente Compañ. Bimetallic Pt-M electrocatalysts supported on single-wall carbon nanotubes for hydrogen and methanol electrooxidation in fuel cells applications, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 43, Issue 2, 2018, Pages 872-884. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917340752>)

[14] S. Mekhilef, R. Saidur, A. Safari. Comparative study of different fuel cell technologies (2012) Pages 981-989 (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004709>)

[15] Dukowitz, Zacc. Hydrogen Drones on the Market + Applications They Benefit (2021)  
<https://uavcoach.com/hydrogen-fuel-drones/>

[16] Huet Sanchis, Joan. Desarrollo de una carga electrónica regulable para el análisis y clasificación de baterías de ion litio. Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de València. (2022)

[17] De Gregorio Montero, Víctor. SISTEMA DE MONITORIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN STACK DE PILA DE COMBUSTIBLE. Trabajo Fin de Grado. Universitat Politècnica de València. (2014)

## **PRESUPUESTO**



Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

## PRESUPUESTO

Todo proyecto debe ser evaluado a nivel económico, es por ello que parte del trabajo de fin de grado consiste en la realización de un presupuesto que refleje los gastos que se asumen para la realización del mismo.

El presente proyecto ha sido evaluado en cuatro partes diferenciadas en función del tipo de gasto realizado y son las siguientes:

El presupuesto del proyecto está seccionado en las diferentes partes que lo componen, siendo estas las siguientes:

- Recursos humanos.
- Materiales.
- Instalaciones.

Concepto	Ud	Cantidad	Precio (€/h)	Coste (€)
Director proyecto	Horas	25	25	625
Codirector proyecto	Horas	25	25	625
Codirector proyecto	Horas	25	25	625
Proyectante	Horas	300	15	4500
<b>Total</b>				<b>6375</b>

*Tabla 4: Presupuesto recursos humanos.*

Concepto	Ud	Cantidad	Precio (€/ud)	Coste (€)
Pila de combustible	Unidades	1	2000	2000
Fuente de alimentación eléctrica	Unidades	1	150	150
Carga electrónica regulable	Unidades	1	4976	4976
Placa	Unidades	1	2200	2200
Sistema de adquisición de datos	Unidades	1	155	155
Multímetro Fluke	Unidades	3	205	615
<b>Total</b>				<b>10096</b>

Diseño e implementación de un banco de pruebas para el análisis y evaluación de pilas de combustible de intercambio protónico de cátodo abierto

Tabla 5: Presupuesto materiales.

Concepto	Ud	Cantidad	Precio (€/ud)	Coste (€)
Alquiler laboratorio LABDER	Horas	25	100	2500
<b>Total</b>				<b>2500</b>

Tabla 6: Presupuesto de instalaciones.

Concepto	Ud	Cantidad	Precio (€/ud)	Coste (€)
Materiales	Unidades	1	6375	2000
Recursos Humanos	Unidades	1	10096	10096
Instalaciones	Unidades	1	2500	2500
<b>Total</b>				<b>14596</b>

Tabla 7: Presupuesto total.