

LINEA I+D EN TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS AVANZADAS

## ENTREGABLE PÚBLICO WEB

**SOLICITANTE:**

NOMBRE: ASOCIACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE LA INDUSTRIA DEL JUGUETE, CONEXAS Y  
AFINES (AIJU)

Dirección: Avda. de la Industria 23, 03440 – IBI, Alicante, España.

CIF: G-03182862

Este informe se compone de 14 páginas.

## ÍNDICE

<b>1. Objeto del documento y alcances .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Descripción de las tareas realizadas.....</b>	<b>3</b>
2.1 Descripción de elementos de la pila de combustible y selección de materiales .....	3
2.2 Modificaciones en el diseño original de los componentes de la pila de combustible .....	4
2.3 Fabricación de placas bipolares a partir de distintos materiales .....	5
2.3.1 Fabricación de placas bipolares de carbono .....	5
2.3.2 Fabricación de placas bipolares metálicas mediante fusión selectiva por láser .....	7
2.4 Caracterización de prototipos ensamblados con los componentes fabricados.....	10
<b>3. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>14</b>

## 1. Objeto del documento y alcances.

En el marco de proyectos anteriores se desarrolló un prototipo de pila de combustible, que si bien, contaba con una potencia aproximada a 1 kW, presentaba una serie de limitaciones en cuanto a densidad energética, rendimiento y costes. El objetivo de la línea de I+D cuya justificación se presenta en la presente memoria tenía como objetivo principal continuar con la investigación y desarrollo de la pila de combustible de alto rendimiento y bajo coste para aplicaciones portátiles de baja potencia <1000W que AIJU ha venido desarrollando desde hace más de una década. Los retos consistían en:

- Incrementar la densidad de corriente de la pila de combustible mediante el uso de MEA's avanzadas.
- Disminuir el peso de la pila mediante modificaciones en el diseño y la utilización de materiales más ligeros.
- Disminuir los costes de fabricación, mediante el uso de MEA's con bajo contenido en metales nobles, así como la evaluación de placas bipolares con diseños más sencillos que permitan disminuir los tiempos de mecanizado y/o materiales alternativos a los composites con carga carbonosa tradicionalmente utilizados.

## 2. Descripción de las tareas realizadas

### 2.1 Descripción de elementos de la pila de combustible y selección de materiales

La primera etapa del proyecto consistió en revisar los componentes que se venían empleando en anualidades anteriores para el ensamblado de la pila y en realizar la búsqueda de otros más actuales que pudieran sustituir a los primeros con el objetivo de mejorar las prestaciones del prototipo.

En las placas bipolares se realizaron dos modificaciones: cambios en el diseño para mejorar la distribución de la fuerza de cierre y el sellado de la pila de combustible para evitar fugas; cambio de material para aumentar ligereza y disminuir costes de fabricación. Para aumentar la ligereza del prototipo, se ha probado un material optimizado para esta aplicación de otro fabricante y, con el objetivo de abaratar costes de fabricación, se han producido placas bipolares metálicas mediante la técnica de fusión selectiva por láser empleando los medios disponibles en AIJU.

Para la fabricación de placas colectoras se ha elegido cobre con acabado superficial espejo para maximizar la superficie de contacto, y, para evitar su oxidación, éstas se han recubierto superficialmente con oro mediante Deposición Física de Vapor (PVD, de las siglas en inglés, *Physical Vapor Deposition*) empleando los medios disponibles en AIJU.

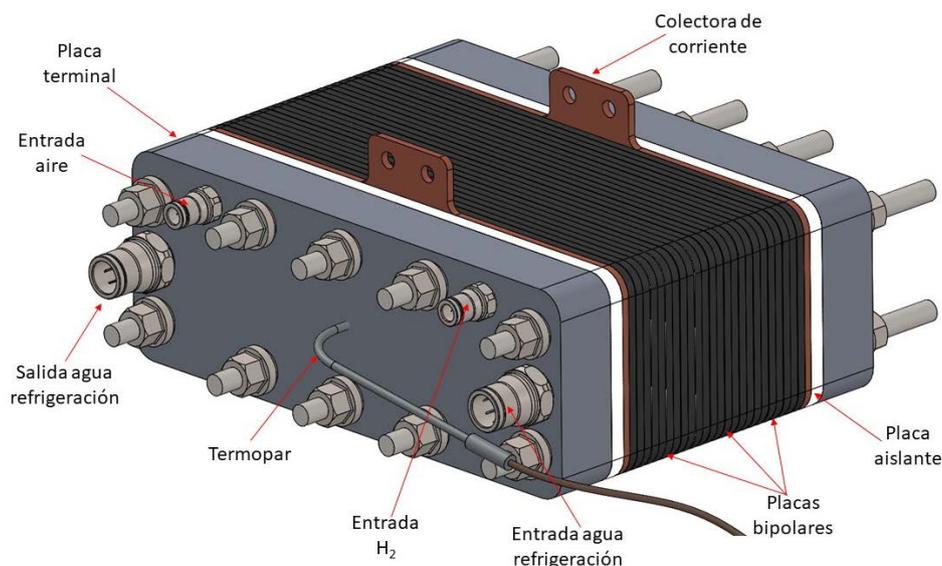
Finalmente, las placas terminales y las uniones atornilladas, cuyo objetivo es comprimir todos los componentes para asegurar un correcto sellado y contacto eléctrico de los mismos, se fabricaron, respectivamente, en aluminio, por su ligereza, y en acero 316L, para soportar las condiciones de corrosión que se dan en el stack.

## 2.2 Modificaciones en el diseño original de los componentes de la pila de combustible

Para mejorar el rendimiento del prototipo de pila de combustible desarrollado por AIJU, se tomaron como referencia las principales medidas del diseño previo, y, sobre éste, se llevaron a cabo las siguientes mejoras:

- Rediseño del sistema de sellado de la pila.
- Rediseño del sistema de cierre de la pila.
- Simplificación del diseño, para facilitar el montaje y reducir los costes de fabricación.
- Aumento de la simetría en el diseño, para minimizar la cantidad de piezas diferentes a fabricar.

El rediseño del sistema de sellado de la pila se basó en reubicar la posición de juntas tóricas y redimensionar las cajas en las que se albergan para conseguir el perfecto sellado tanto del circuito de refrigeración de la pila mediante recirculación de agua como de los circuitos de gases. Por su parte, el rediseño del sistema de cierre, consistió en modificar la localización de las uniones roscadas para homogeneizar superficialmente la distribución de la fuerza de cierre y en optimizar el espesor de las placas terminales. Para ello, se realizaron simulaciones térmicas, fluidodinámicas y estructurales de distintos diseños para validar el más adecuado. Tras diversos diseños y correspondientes simulaciones, se determinó que el espesor óptimo de las placas terminales de aluminio era 25 mm, para lo cual eran necesarias 10 uniones atornilladas de acero inoxidable y métrica M8 dispuestas a través de todos los elementos que conforman el stack con par de apriete de 18 Nm. En base a estos resultados, se modificaron el resto de componentes de la pila de combustible con el objetivo de reubicar los orificios necesarios para situar las uniones atornilladas pasantes.



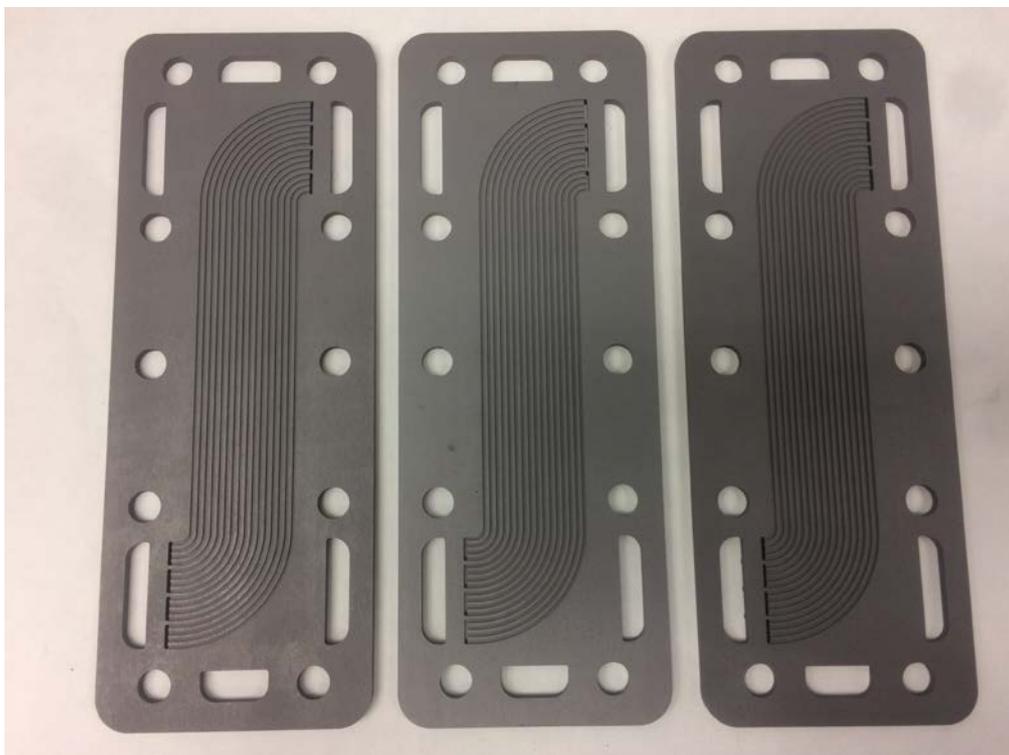
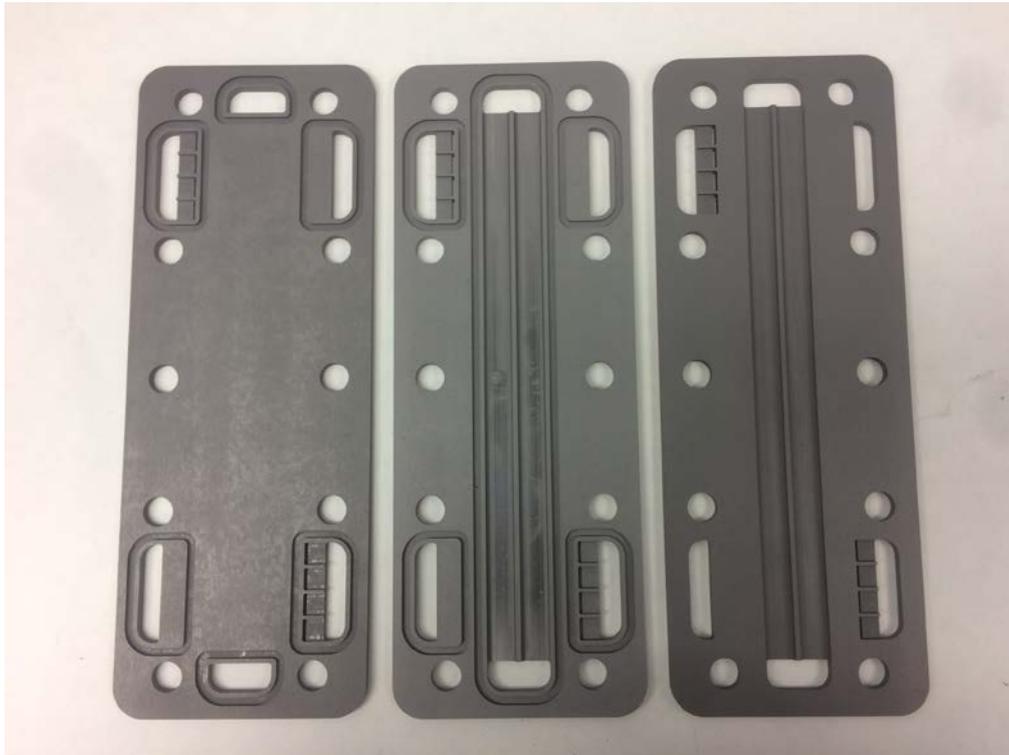
**Figura 1. Renderizado del prototipo de la pila de combustible diseñada.**

## 2.3 Fabricación de placas bipolares a partir de distintos materiales

### 2.3.1 Fabricación de placas bipolares de carbono

Con el objetivo de aumentar la ligereza de la pila de combustible y mejorar sus propiedades mecánicas y eléctricas, se decidió sustituir el material de carbono que se venía utilizando por otro material de carbono tratado pirolíticamente que presentaba mejores prestaciones: menor densidad aparente ( $1.78 \text{ g/cm}^3$  frente a  $1.82 \text{ g/cm}^3$ ), menor resistividad ( $0.002 \text{ } \Omega\text{-cm}$  frente a  $0.02 \text{ } \Omega\text{-cm}$ ) y mayor esfuerzo de compresión ( $152 \text{ MPa}$  frente a  $95 \text{ MPa}$ ).

Tras determinar los diseños definitivos de las placas bipolares (placas 1, 2 y 3), éstos se proporcionaron a la empresa proveedora para que procedieran a la fabricación de las placas. El procedimiento de fabricación consistió en dos etapas: mecanizado de las piezas y post-tratamiento pirolítico. La Figura 2 muestra las placas bipolares recibidas en las instalaciones de AIJU. Asimismo, también se mecanizaron placas bipolares empleando el material de carbono utilizado anteriormente para tomar éstos como referencia en las posteriores pruebas de validación que se realizarían.



**Figura 2. Placas bipolares fabricadas con el nuevo material. Diseños nuevos de a) placa 1; b) placa 2; c) placa 3.**

### 2.3.2 Fabricación de placas bipolares metálicas mediante fusión selectiva por láser

Buscando abaratar los costes asociados a los materiales de carbón comúnmente empleados en las pilas de combustible y a la fabricación de placas bipolares a partir de éstos, se decidió estudiar la posibilidad de emplear placas bipolares metálicas fabricadas mediante fusión selectiva por láser.

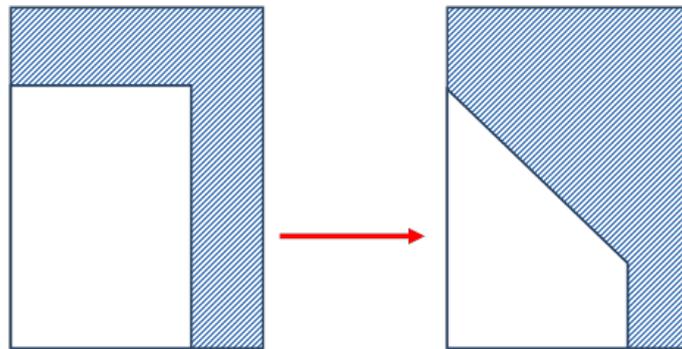
El material utilizado fue acero inoxidable 316L (SLM Solutions Group AG, Lübeck, Alemania) en forma de polvo con tamaños de partículas entre 10 y 45  $\mu\text{m}$ . Los experimentos fueron realizados con un sistema de fusión selectiva por láser SLM Solutions SLM280HL (SLM Solutions Group AG, Lübeck, Alemania) equipado con un láser de fibra Ytterbium con una longitud de onda de 1070 nm y una potencia máxima de 400 W (véase Figura 3).



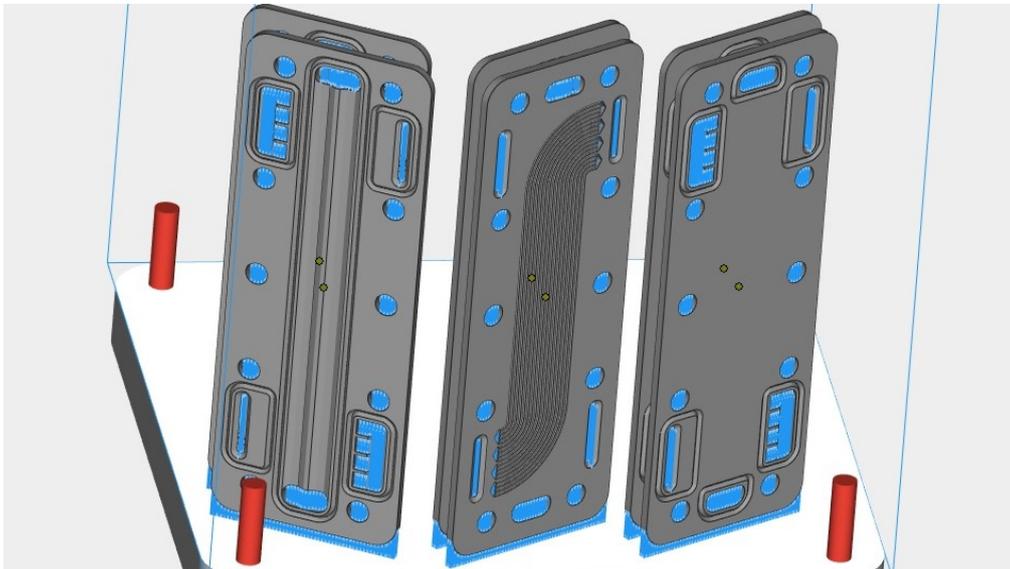
**Figura 3. Sistema de fusión de laser selectivo SLM Solutions SLM280HL utilizado.**

La fabricación de placas bipolares mediante esta técnica presentó diversos inconvenientes asociados a las dimensiones del diseño inicial y a las tolerancias conseguibles en esta tecnología de fabricación. A pesar de realizar diversos cambios en los parámetros de fabricación, no se logró obtener resultados satisfactorios. Por ello, se propusieron cambios en el diseño de las placas bipolares considerando las limitaciones de la fabricación aditiva a través de la fusión selectiva por láser. Así, se evitaron las zonas de voladizos en los canales finos para el transporte de gases y en las cavidades para las juntas tóricas (Figura 4). Otra mejora del diseño implicó la reubicación y/o reducción del tamaño de los agujeros pasantes con la posibilidad de mecanizarlos en post proceso, aumentando su diámetro al tamaño deseado. En comparación con el diseño inicial, el diseño mejorado tiene menor necesidad de estructuras de soporte. Además, los agujeros pasantes

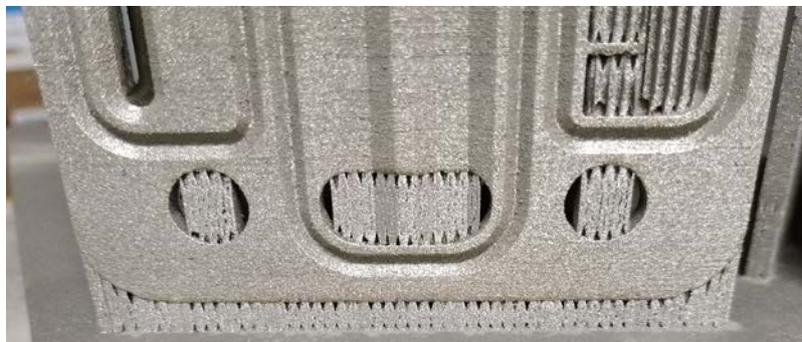
correspondientes al circuito de gases pueden realizarse con soportes mucho más sencillos. Asimismo, también se propuso la fabricación de las piezas dispuestas verticalmente.



**Figura 4. Esquema para visualizar el cambio de ángulos.**

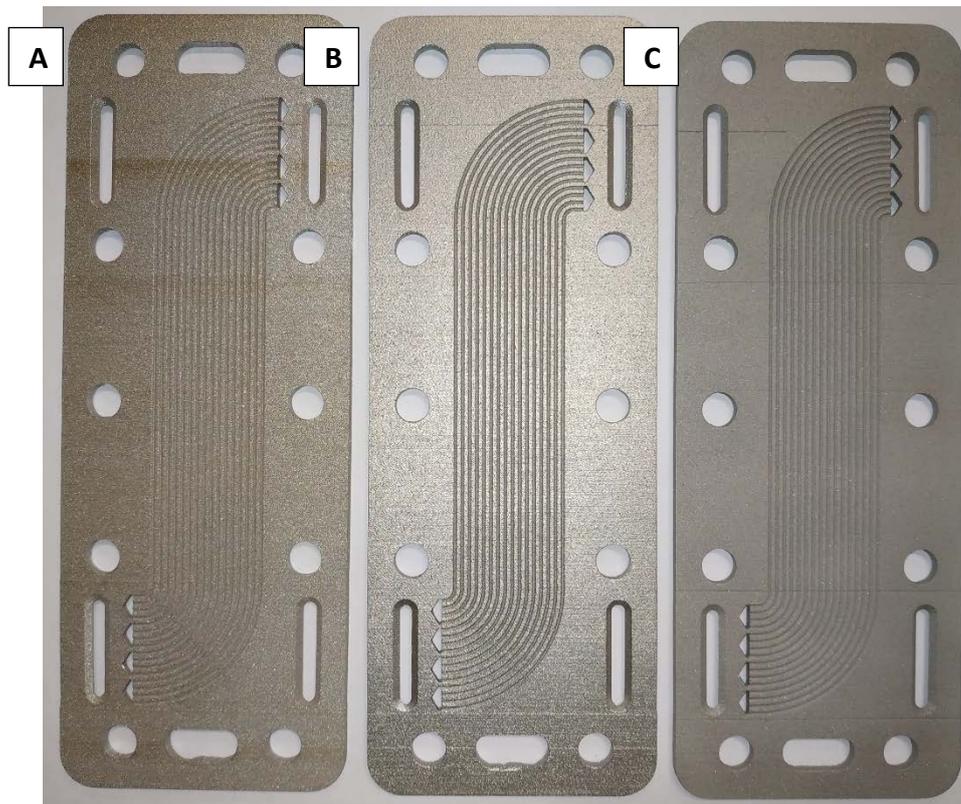


**Figura 5. Diseño de la plataforma de fabricación.**



**Figura 6. Buena unión de las piezas con sus soportes inferiores, agujeros con formas redondas sin signos de ovalado.**

Un factor importante para el uso de las piezas como placas bipolares en una pila de combustible es el acabado final de las mismas. Por un lado tiene que permitir un buen acoplamiento de las juntas tóricas para garantizar el sellado entre dos placas adjuntas. Por otro lado, las placas tienen que tener un buen contacto con las membranas de la pila de combustible. Por ello, con el fin de obtener distintos acabados superficiales, las placas fueron tratadas con dos métodos distintos: chorreo con micro esferas de vidrio y chorreo con arena. La Figura 7 muestra los distintos acabados superficiales de las placas, en comparación con la superficie original sin tratamiento. En comparación, el tratamiento con chorreo con arena resultó en la superficie más homogénea con una textura muy uniforme. Por ello se decidió utilizar este tratamiento para llevar a cabo las pruebas de ensamblaje en pila de combustible.



**Figura 7. Distintos acabados de las piezas finales: (A) Acabado original sin post-procesado, (B) acabado con chorreo de micro esferas de vidrio, (C) acabado con chorreo de arena.**

## 2.4 Caracterización de prototipos ensamblados con los componentes fabricados

La última fase del proyecto consistió en validar las pilas de combustible ensambladas con los distintos componentes fabricados para evaluar las mejoras que aportan las modificaciones realizadas en el diseño de los mismos sobre el rendimiento de la pila de combustible tipo PEM. La Tabla 1 recoge los distintos ensamblajes ensayados.

**Tabla 1: Resumen de ensamblajes realizados y ensayados.**

# Ensamblaje	Descripción	Componentes	
		Placas Bipolares	MEA
1	Referencia	Original	Original
2	cambio MEA	Original	MEA2
3	cambio material bipolares para mejorar prestaciones	Tratamiento pirolítico	MEA2
4	cambio bipolares para abaratar costes	Fusión selectiva por láser	MEA2

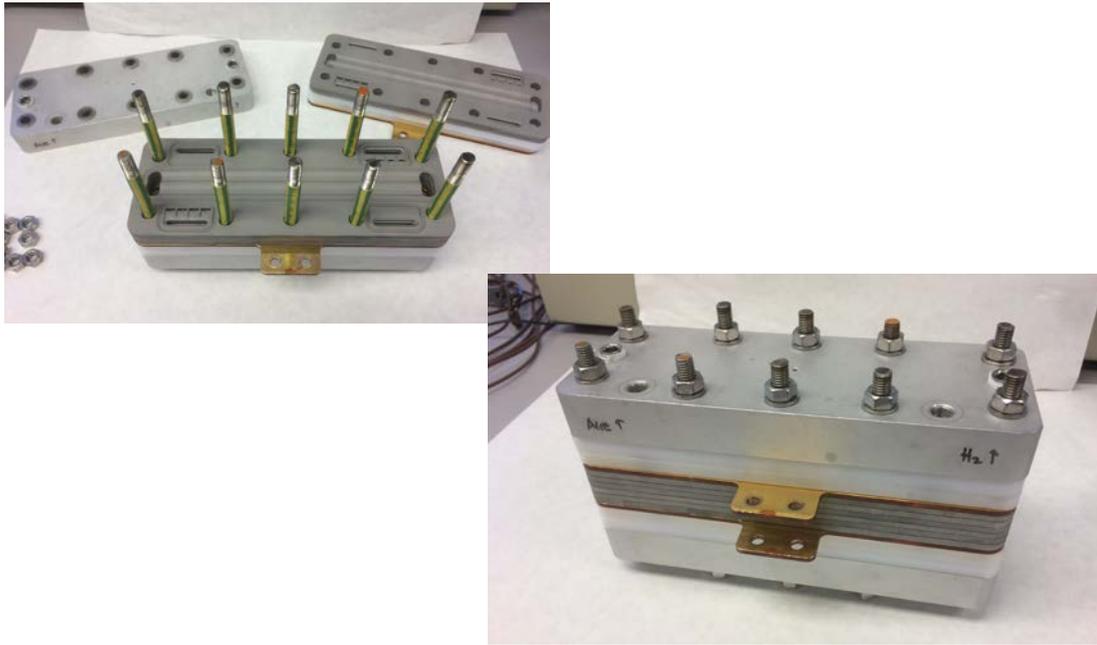
Los ensayos de validación se han realizado en el banco de pruebas disponible en AIJU para la caracterización de pilas de combustible tipo PEM. Éste cuenta con los siguientes elementos:

- Humidificador de aire
- Instrumentación y valvulería de control (controladores máxicos, reguladores de presión, sensores de presión, sensores de humedad).
- Sistema de refrigeración de la pila de combustible mediante recirculación de agua.
- Carga electrónica
- Cuadro de control
- Software de control y registro de parámetros de proceso

La Tabla 2 resume los parámetros de operación empleados en la validación de los distintos ensamblajes de prototipo. La Figura 8 muestra el detalle de la pila de combustible. La Figura 9 muestra una fotografía del banco de pruebas de AIJU para la caracterización de pilas de combustible tipo PEM. Asimismo, la Figura 10 muestra una imagen de la interfaz del software de control empleado.

**Tabla 2: Resumen de parámetros de operación para la validación de los distintos ensamblajes de prototipo.**

Caudal de aire (NL/min)	12
Caudal de H2 (NL/min)	4
Presión de aire (barg)	1.1
Presión de H2 (barg)	1.1
Temperatura stack (°C)	75
Temperatura humidificador (°C)	75



**Figura 8. Pila de combustible ensamblada (ejemplo).**



**Figura 9. Banco de pruebas de AIJU para la caracterización de pilas de combustible tipo PEM.**

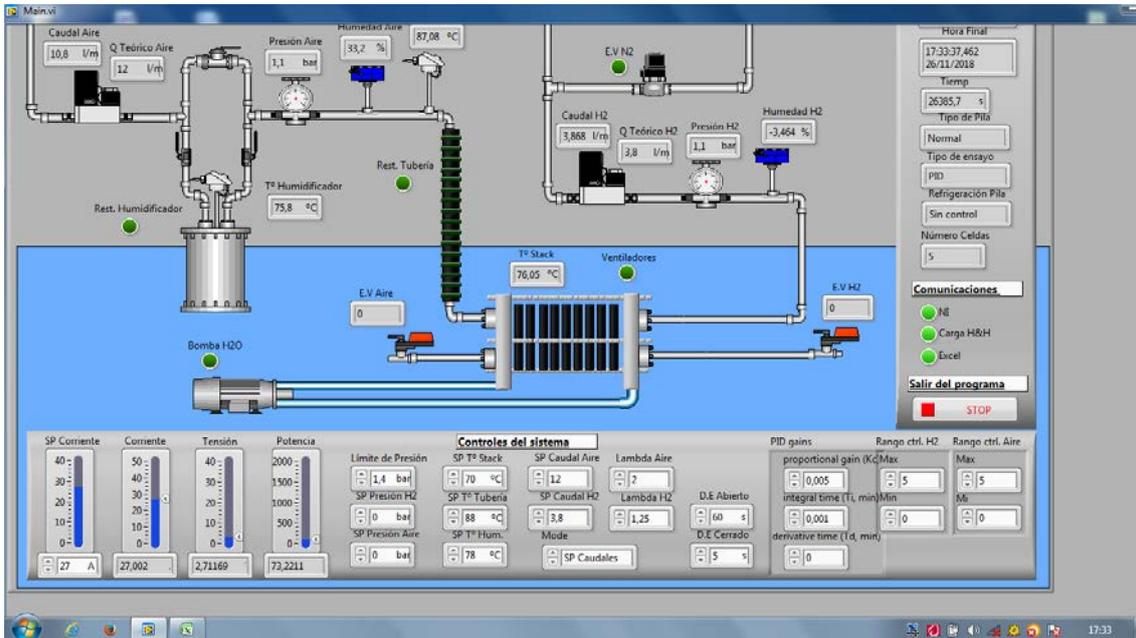


Figura 10. Imagen del software de control.

En todos los ensamblajes realizados, la tensión aplicada se distribuyó uniformemente entre las celdas que conformaban el stack. La Figura 11 muestra las curvas de potencia obtenidas para los ensamblajes #1, #2 y #3.

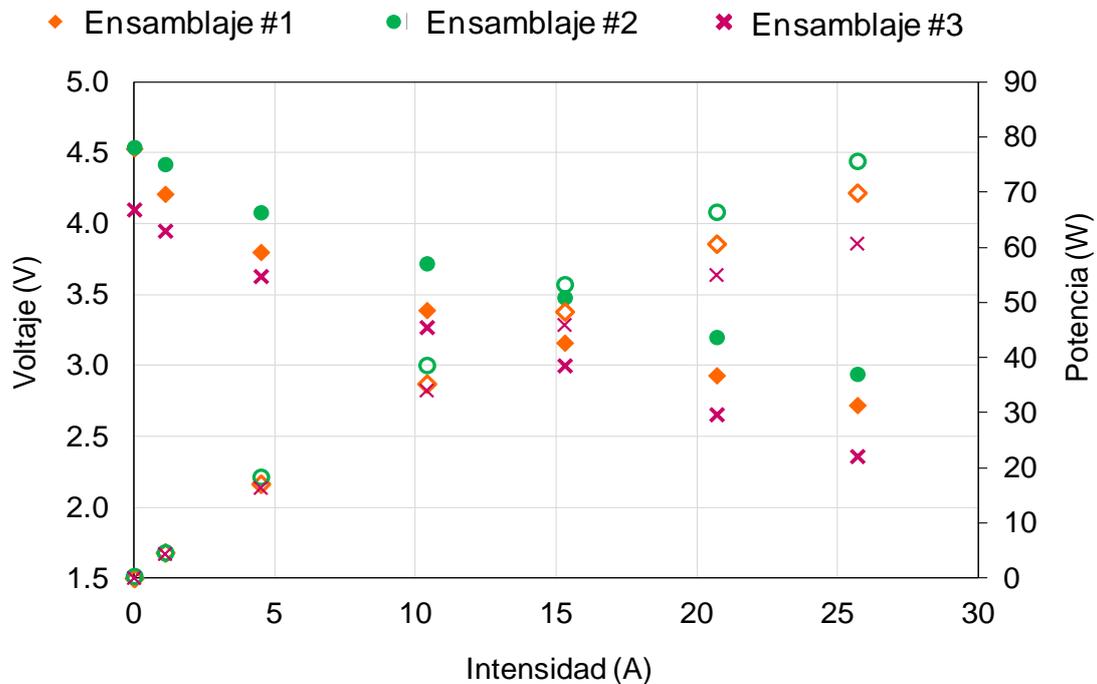
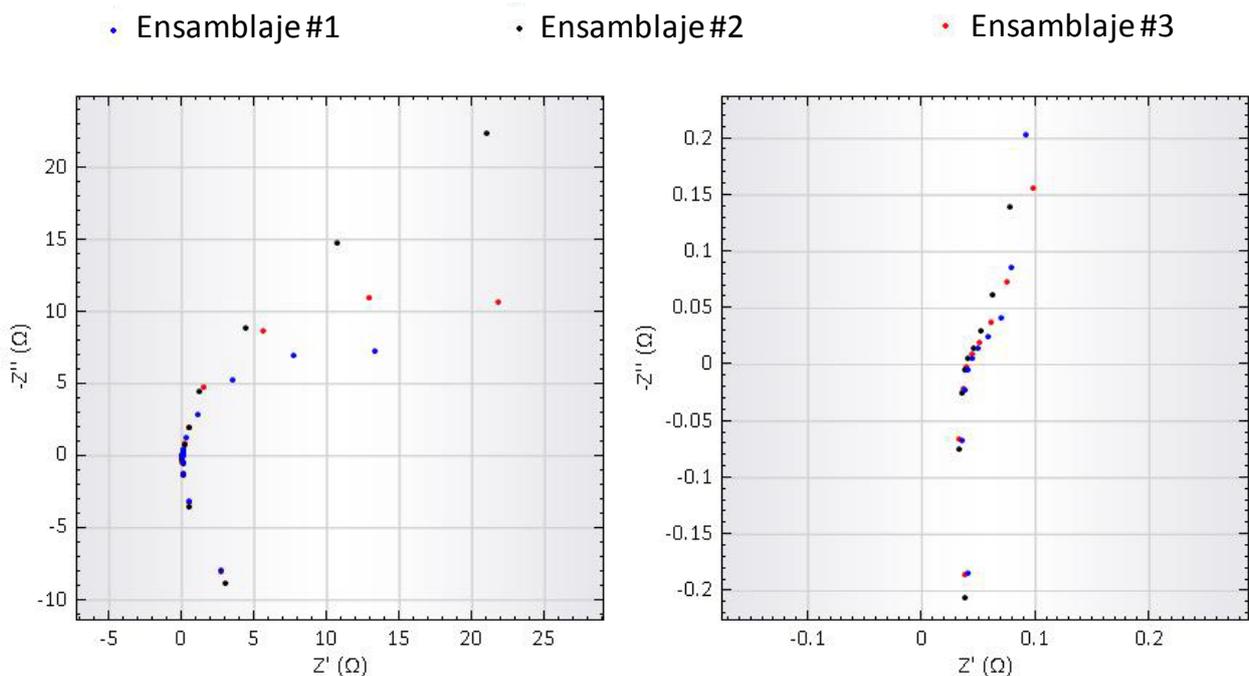


Figura 11. Curvas de potencia de las pilas de combustible ensambladas.

Frente al ensamblaje considerado como referencia de los materiales empleados con anterioridad, el rendimiento de la pila de combustible mejora ligeramente al sustituir las membranas anteriores por las nuevas en el Ensamblaje #2, indicando que bajo las mismas condiciones de operación, las últimas permiten un mejor funcionamiento del stack. No obstante, al sustituir el material de las placas bipolares por otro con mejores prestaciones (mejores propiedades mecánicas y eléctricas), no se observa mejora en el funcionamiento del stack, sugiriendo que son los procesos que ocurren entre el electrodo de la MEA y las placas bipolares los que están limitando el buen funcionamiento de la pila, más que la propia resistencia eléctrica de los componentes del prototipo. Complementariamente, se determinó el espectro de impedancia electroquímica de cada ensamblaje (Figura 12) y se observó que la resistencia óhmica, asociada a los materiales del mismo, y la resistencia de polarización, asociada a la transferencia de carga o difusión de iones a través de la interfase, eran muy similares entre ensamblajes diferentes, sugiriendo de nuevo que las limitaciones están asociados a los procesos que ocurren en la zona de reacción tales como la difusión de reactivos y productos.



**Figura 12. EIS de las pilas de combustible ensambladas.**

Por su parte, el ensamblaje #4 no se pudo ensayar en el banco de pruebas debido a que no fue posible conseguir sellar el stack debido a que el gas era capaz de escapar a través de la rugosidad superficial de las placas metálicas.

### 3. Conclusiones y recomendaciones

A la vista de los resultados se pudieron extraer las siguientes conclusiones:

- Durante esta anualidad se ha conseguido un diseño de pila de combustible ligero, con placas bipolares de carbono, que no fuga gracias a las modificaciones realizadas en las cajas de las juntas tóricas y en el sistema de cierre con tornillos y placas terminales.
- La sustitución de MEAs ha permitido mejorar ligeramente el funcionamiento del stack.
- El funcionamiento del stack aún está limitado por procesos que ocurren en la zona de reacción. Las limitaciones podrían asociarse a dificultades en la difusión de los reactivos desde los canales hacia el electrodo a través de los GDLs; dificultades en la evacuación del agua desde los electrodos hacia los canales, lo que disminuye la superficie activa expuesta a los reactivos para llevar a cabo la reacción; y a problemas de encharcamiento de agua en el interior de los canales.
- La fabricación de placas bipolares mediante la fusión selectiva por láser de placas metálicas presenta limitaciones. El acabado conseguido aún aplicando procesos de post-tratamiento superficial, no permite el correcto sellado del stack.

En vista de estas conclusiones, las futuras investigaciones deberían centrarse en: mejorar el diseño de los canales de gases de las placas bipolares en contacto con las MEAs para favorecer la difusión de reactivos hacia la zona de reacción y la evacuación de agua desde ésta hacia los canales y hacia el exterior para evitar el fenómeno de encharcamiento; mejorar las propiedades superficiales de las placas bipolares fabricadas por fusión selectiva por laser para evitar fugas; mejorar el diseño para disminuir el espesor de las diferentes placas que conforman el stack y con ello, aumentar la ligereza del prototipo de pila de combustible PEM desarrollado.