Autorizada la entrega del proyecto:

Caracterización y ensayo de pilas de combustible cilíndricas

Realizado por:

José Manuel Gurucharri Fernández

Vº Bº del director del proyecto:

Firmado: **Domingo Miguel Guinea García-Alegre**

Fecha: ……/……../……

Vº Bº del coordinador de proyectos:

Firmado: **Álvaro Sánchez Miralles**

Fecha: ……/……../……

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial

PROYECTO FIN DE CARRERA

CARACTERIZACIÓN Y ENSAYO DE PILAS DE COMBUSTIBLE CILÍNDRICAS

AUTOR: José Manuel Gurucharri Fernández

MADRID, Junio 2010

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

Ingeniero en Automática y Electrónica Industrial

PROYECTO FIN DE CARRERA

CARACTERIZACIÓN Y ENSAYO DE PILAS DE COMBUSTIBLE CILÍNDRICAS

DIRECTOR: **Domingo Miguel Guinea García-Alegre**

AUTOR: **José Manuel Gurucharri Fernández**

MADRID, Junio 2010

CARACTERIZACIÓN Y ENSAYO DE PILAS DE COMBUSTIBLE CILÍNDRICAS

Autor: Gurucharri Fernández, José Manuel.

Director: Guinea García-Alegre, Domingo Mª.

Entidad Colaboradora: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

RESUMEN DEL PROYECTO

En un mundo tan industrializado como en el que actualmente vivimos, la energía eléctrica es una herramienta esencial. Por tanto, tendemos a buscar sustitutos de la energía eléctrica de red que nos ofrezcan un respaldo de energía para áreas críticas, o para generar servicios locales de energía en áreas que son inaccesibles a líneas de energía.

Una de las alternativas más importantes al petróleo como combustible, tanto para la generación de energía eléctrica como para el transporte, es el uso de celdas de energía, cuyo combustible básico es el hidrógeno.

Hasta el momento todas las celdas de combustible desarrolladas habían sido planas, con los electrodos y la membrana sobre el mismo plano.

Este proyecto trata de abordar el reto de una pila de combustible que rompa el esquema de las anteriores, realizando una pila de combustible cilíndrica, cuya principal ventaja respecto a las anteriores es que tiene una mejor relación potencia-volumen.

Hay que tener claros unos conceptos de diseño que en los casos anteriores no se daban:

1) En la pila cilíndrica se crea una cámara interior, en donde se introducirá el hidrógeno, y en el exterior de la pila habrá aire u oxígeno.
2) La MEA (Membrane-Electrode Assembly) debe ir en medio de la cara interior y la cara exterior para que se produzcan las reacciones del hidrógeno en el interior y del oxígeno en el exterior.
3) A partir del punto 1) queda definida la polaridad de cada lado. En la cámara interior estará la polaridad negativa y en el exterior la polaridad positiva.
4) A tenor de los puntos 2) y 3) se llega a la siguiente conclusión: el cilindro que forme la estructura de la pila debe tener separadas la cara interior de la cara exterior para que no se produzcan cortocircuitos, por lo que ya no puede ser un solo cilindro conductor el que forme la estructura, sino que deben ser dos, eléctricamente aislados, y en medio de ambos debe estar la MEA.

5) La cámara interior debe ser estanca, tanto para que no haya fugas como para que no haya pérdidas de rendimiento.

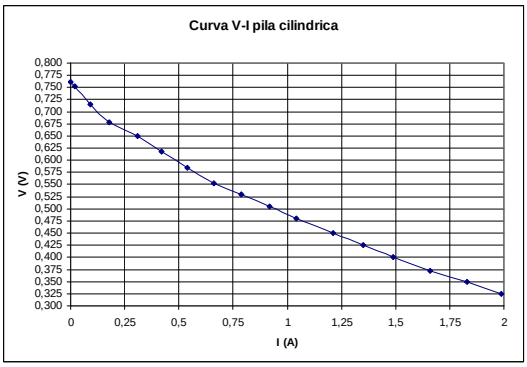
Una vez asentadas las bases se procede a su construcción, teniendo especial cuidado y haciendo hincapié en la hermeticidad de la cámara interior.

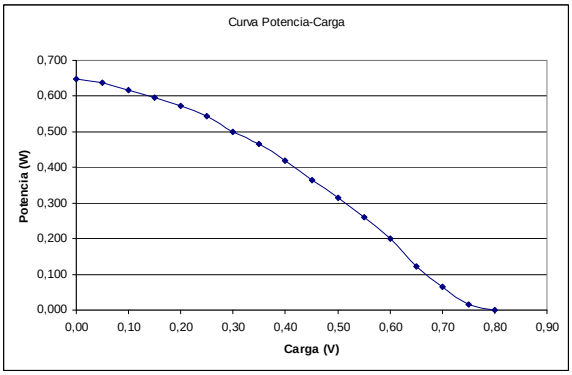
Precisamente por hacer hincapié e intentar asegurar lo mas posible la estanqueidad, se abusó del uso de sellantes, en concreto un sellante para tuberías de la marca Loctite terminó corrompiendo la MEA, haciendo los resultados de esta primera versión inservibles.

En la segunda versión se prescindió del uso del sellante mencionado anteriormente además de mejorar algunos otros aspectos, siempre con el fin de evitar fugas y asegurar la estanqueidad.

El resultado final de la pila de combustible cilíndrica funcional es el que se muestra en la siguiente imagen:

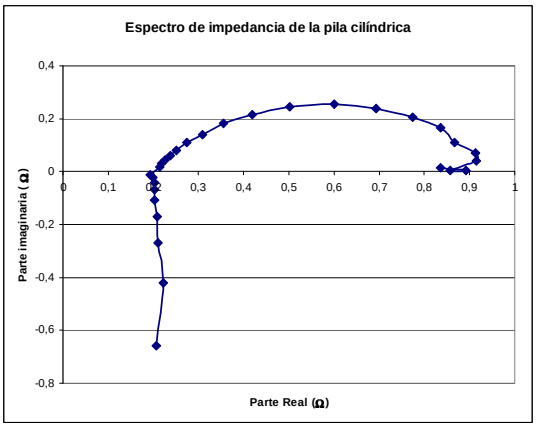
Los resultados que arrojó la pila de combustible cilíndrica son los siguientes:





Las conclusiones que se pueden sacar de estos resultados son que a menor voltaje la potencia se mantiene más constante (el decremento absoluto es menor), y se podría decir que la zona de trabajo óptima sería entre 0,325 V y 0,4 V medidos en la pila.

Para profundizar más dónde se podría mejorar el rendimiento de la pila se realizó un espectro de impedancia, que se muestra a continuación:



Gracias al espectro de impedancia se puede saber que la membrana esta trabajando correctamente, pues presenta una resistencia de 0,2 Ω, y por otro lado se tienen perdidas de 0,65 Ω que pueden ser debidas a problemas de contacto o de difusión.

Los resultados obtenidos son esperanzadores para ser la primera vez que se realiza una pila de combustible de este tipo, y con el paso del tiempo y la evolución de materiales y desarrollando la pila con vistas a una implantación comercial se mejorará su rendimiento y su relación potencia-volumen.

CHARACTERIZATION AND TESTING OF CYLINDRICAL FUEL CELLS

PROJECT SUMMARY

In a highly industrialized world in which we live nowadays, electric energy is an essential tool. Therefore, we tend to look for substitutes of the electricity network that provide us a backup power for critical areas, or to generate local energy services in areas that are inaccessible by power lines.

One of the most important alternatives to oil as a fuel for both electric energy generation and for transport is the use of fuel cells, whose basic fuel is hydrogen.

So far all developed fuel cells were flat, with the electrodes and the membrane on the same plane.

This project try to succeed in the challenge of a fuel cell that breaks the previous scheme, making a cylindrical fuel cell, whose main advantage over previous ones is that it has a better power-volume relationship.

It has to be clear some design concepts that in the previous cases had not:

1) In the fuel cell will be an inner chamber, where hydrogen will be introduced and on the outside of the pile there will be air or oxygen.
2) The MEA (Membrane-Electrode Assembly) should go between the inside and the outside to bring about the reactions of hydrogen and oxygen inside outside.
3) From point 1) it is defined the polarity of each side. In the inner chamber is the negative polarity and positive polarity on the outside.
4) From points 2) and 3) leads to the following conclusion: the cylinder that forms the structure of the battery should have separated the inside of the outside so that no short circuits occur, so no cylinder can be a single conductor which form the structure but must be two, electrically isolated, and in the middle of both must be the MEA.
5) The inner chamber must be isolated, for there are no leaks and that there be no loss of performance.

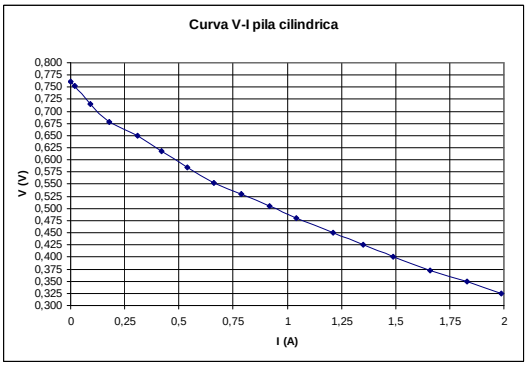
Once settled the bases are necessary to its construction, with special care and emphasis on sealing the inner chamber.

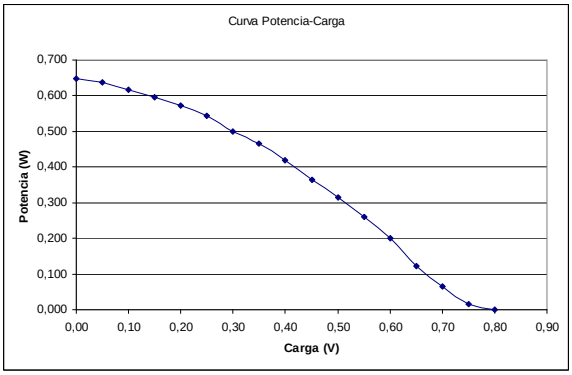
Precisely because of stress and trying to ensure as much as possible the seal, the use of sealants was abused, in particular a pipe sealant Loctite brand ended corrupting the MEA, making the results of this first version useless.

In the second version the use of sealant above was dispensed and improves some other aspects, always with a view to prevent leaks and ensure tightness.

The final result of the functional cylindrical fuel cell is shown in the image:

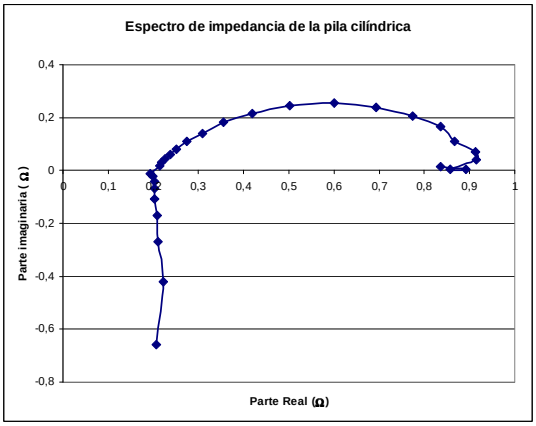
Results for cylindrical fuel cell are as follows:





The conclusions can be drawn from these results is that a lower voltage power remains more constant (absolute decrease is lower), and it could say that the optimal work zone would be between 0.325 V and 0.4 V measured in the fuel cell.

To go deeper where it could improve the performance of the fuel cell it was performed an impedance spectrum, shown below:



Thanks to the impedance spectrum it can be known that the membrane is working correctly, it has a resistance of 0.2 Ω, and on the other hand it has lost of 0.65 Ω which may be due to contact problems or dissemination.

The results are hopeful for the first time it's made a fuel cell of this type, and with the pass of time and the evolution of materials and developing the battery with a commercial deployment point of view, it will improve its performance and power-volume relationship.

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente deseo dar las gracias a mi director "personal" del proyecto, Domingo Guinea García-Alegre, por su apoyo y orientación a la hora de afrontar con éxito el proyecto encomendado, así como por la atención prestada para resolver las dudas surgidas en el desarrollo del mismo. También mencionar a Rubén, Eugenio, Domingo, María y toda la demás gente anónima del CSIC que participó en este proyecto y que sin su ayuda no hubiera sido posible.

Agradecer también a todo el personal de la Universidad Pontificia de Comillas por haber participado en mi desarrollo profesional.

A mis compañeros y amigos, por los recuerdos que me regalaron; por esas tardes tan largas y que depararon tan buenos momentos. Y por hacer lo más ameno posible las situaciones difíciles.

Gracias a mi hermana y amigos, que han sabido apoyarme en cada momento transmitiendo todo su apoyo y confianza.

Y por último, pero sin duda el más especial, debo dar mi mayor agradecimiento a mis padres, por su apoyo incondicional, su ánimo incansable, sus deseos de darme lo mejor. Soy consciente y estoy realmente agradecido del gran esfuerzo que han realizado para llegar hasta aquí, y espero que algún día les pueda corresponder.

"A mis padres, hermana y amigos
por estar ahí, a mi lado,
cuando les necesité."

Memoria

Índice general

Parte I Memoria **8**

Capítulo 1 Introducción **9**

1 Introducción a la tecnología 10

2 Estudio de las tecnologías existentes 11

3 Motivación del proyecto 14

Capítulo 2 Realización de una pila de combustible cilíndrica. **16**

1 Introducción 16

2 Diseño de una pila de combustible preliminar plana de 5 celdas ... 16

2.1 Elementos que componen la pila de combustible preliminar plana de 5 celdas 17

2.2 Elementos mejorados en la construcción de la pila 17

2.2.1 El sellante 18

2.2.2 La membrana 19

2.3 Pila de combustible de 5 celdas mejorada 20

3 Diseño de una pila de sección circular 21

3.1 Premisas y conceptos de diseño 22

3.2 Componentes que forman la pila de sección circular 23

3.3 Circuito de flujo del hidrógeno 28

3.4 Modificaciones de la segunda versión. 29

3.4.1 Supresión del sellante de tuberías 29

3.4.2 Circuito de flujo del hidrógeno 29

3.5 Resultado del montaje funcional 31

Capítulo 3 Resultados y análisis de los resultados **33**

1 Realización de los ensayos: Metodología 33

1.1 Estación de trabajo 34

1.2 Carga electrónica 36

1.3 Analizador de Respuesta en Frecuencia 36
1.4 Software específico 37
1.5 Salida de gases 42
2 Prueba de compresibilidad 43
3 Pila de combustible de 5 celdas 47
4 Pila de combustible de sección circular: versión primera 51
4.1 Prueba de estanqueidad 51
5 Pila de combustible de sección circular: versión segunda 53
5.1 Curva V-I 54
5.2 Espectro de impedancia 56
Capítulo 4 Discusión y conclusiones 58
1 Prueba de compresibilidad 58
2 Pila de combustible de 5 celdas 58
3 Pila de combustible de sección circular: versión primera 60
4 Pila de combustible de sección circular: versión segunda 61
4.1 Curva V-I 61
4.2 Espectro de impedancia 62
5 Conclusiones 63
Capítulo 5 Futuros desarrollos 64
Capítulo 6 Bibliografía 66
Parte II Datasheets 67

Índice de figuras

Figura 1: Funcionamiento de la pila de Daniell. 11
Figura 2: Funcionamiento de una pila de combustible. 12
Figura 3: Distintos materiales del ensayo de compresibilidad 18
Figura 4: Sistema de prensado de la MEA 20
Figura 5: Pila de combustible de 5 celdas 20
Figura 6: Estructura para repartir la presión de forma homogénea 21
Figura 7: Planta del cilindro exterior 24
Figura 8: Colocación de la cinta de doble cara 24
Figura 9: Situación de las tapas de plástico y de metacrilato 25
Figura 10: Situación de los sellantes 26
Figura 11: Racor de 1/8 de pulgada y salida a rosca de Swagelok de 3 mm 27
Figura 12: Circuito del flujo de hidrógeno 28
Figura 13: Circuito del flujo de hidrógeno del segundo diseño 30
Figura 14: Pila de combustible cilíndrica 31
Figura 15: Vista del cierre de la pila de combustible cilíndrica 32
Figura 16: Vista interior de la pila de combustible cilíndrica 32
Figura 17: Estación de trabajo 1 (para pilas de potencia baja) 35
Figura 18: Estación de trabajo 2 (para pilas de potencia media) 35
Figura 19: Carga electrónica 36
Figura 20: Analizador de Respuesta en Frecuencia 37
Figura 21: Pestaña Planta del software de la estación 38
Figura 22: Pestaña Caudal de gases del software de la estación 38
Figura 23: Pestaña Humectación del software de la estación 39
Figura 24: Pestaña Presión de gases del software de la estación 39
Figura 25: Pestaña Potencia de la pila del software de la estación 40
Figura 26: Pestaña Carga Electrónica del software de la estación 40
Figura 27: Pestaña Temperatura de la pila del software de la estación 41
Figura 28: Pestaña Control I2C-PC del software de la estación 41
Figura 29: Instalación de gases 42

Figura 30: Ensayo de compresibilidad del composite 45
Figura 31: Ensayo de compresibilidad del viton 45
Figura 32: Ensayo de compresibilidad de la silicona 46
Figura 33: Ensayo de compresibilidad del teflón 46
Figura 34: Resultado global del ensayo de compresibilidad 47
Figura 35: Curva V-I de la pila de combustible de 5 celdas 48
Figura 36: MEA corrupta de la primera versión 52
Figura 37: Curva V-I de la pila cilíndrica 55
Figura 38: Espectro de impedancia 57
Figura 39: Curva Potencia-Carga de la pila cilíndrica 61
Figura 40: Botella de hidrógeno comercial 65

Índice de tablas

Tabla 1: Tipos de celdas de combustible.....13
Tabla 2: Ensayo de compresibilidad.....43
Tabla 3: Mediciones de la pila de combustible de 5 celdas.....48
Tabla 4: Mediciones de la pila de combustible de 5 celdas.....49
Tabla 5: Mediciones de la pila de combustible de 5 celdas.....50
Tabla 6: Intensidad de cortocircuito según caudal en pila cilíndrica.....54
Tabla 7: Variaciones en la carga de la pila cilíndrica.....55
Tabla 8: Espectro de impedancia.....57

Parte I MEMORIA

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN

Es una realidad que la demanda de energía está creciendo a una velocidad elevada y que los combustibles fósiles, principales fuentes de energía, están presentando problemas serios como la disminución de las reservas de petróleo, la contaminación (por ejemplo, mediante la generación de gases de efecto invernadero), la subida de precios y su escasa compatibilidad con la regulación de la política de medio ambiente. En esta última ha habido cambios significativos en los últimos años. Por ejemplo, Europa ya redujo el año pasado en un 8% las emisiones de CO_2 y se ha propuesto una mejoría de la eficiencia energética de un 18% entre 1995 y el 2010, además de duplicar el uso de las energías renovables.

Ahora mismo, los combustibles más utilizados en los vehículos, gasolina y gasóleo, son derivados del petróleo. Estos combustibles presentan varios inconvenientes: previsible agotamiento en las próximas décadas, dependencia energética externa para los países no productores como el nuestro, previsible encarecimiento gradual, emisión neta de gases de efecto invernadero, etc. Estos inconvenientes plantean la necesidad, sobre todo a medio y largo plazo, de utilizar combustibles alternativos, como el hidrógeno. A diferencia de los derivados del petróleo, el hidrógeno se podría generar indefinidamente a partir de fuentes de energía renovable.

Las pilas de combustible, entre otras las Pilas de Combustible de Membrana de Conducción Protónica (PEM), están llamadas a ser con toda probabilidad el sistema energético alternativo a la combustión de combustibles fósiles, para la producción de energía eléctrica o mecánica partir de energía química en el siglo XXI, dado su elevado rendimiento y

las bajas emisiones, realmente emisiones cero en el punto de uso. Pese a ser descubiertas en el año 1839, existen aún muchos aspectos en los que se necesita profundizar en los conocimientos que de estas pilas se tienen, de forma que se conviertan en pocos años en una tecnología competitiva.

1 Introducción a la tecnología

Para entender el funcionamiento teórico de esta tecnología hay que remontarse a 1800 cuando Volta dio a conocer al mundo la primera pila eléctrica. [2] Se trataba de una serie de pares de discos apilados de zinc y de cobre, separados unos de otros por trozos de cartón o de fieltro impregnados de agua o de salmuera, que medían unos 3 cm de diámetro. Su apilamiento con conexión en serie permitía aumentar la tensión a voluntad, otro descubrimiento de Volta.

De ahí se salta a la pila de Daniell, en 1836, que supuso una gran mejora sobre la pila voltaica. [2] La celda o pila Daniell original consiste de un ánodo de zinc metálico central inmerso en una vasija de barro poroso que contiene una disolución de sulfato de zinc. La vasija porosa, a su vez, está sumergida en una disolución de sulfato de cobre contenida en una vasija de cobre de mayor diámetro, que actúa como cátodo de la celda. El uso de una barrera porosa evita que los iones de cobre de la disolución de sulfato de cobre alcancen el ánodo de zinc y sufran una reducción directa. Esto haría ineficaz la celda porque se llegaría al equilibrio, por transferencia directa de electrones entre Zn y Cu_2^+, sin generar la corriente eléctrica que se obtiene al obligar a los electrones a ir por el circuito exterior.

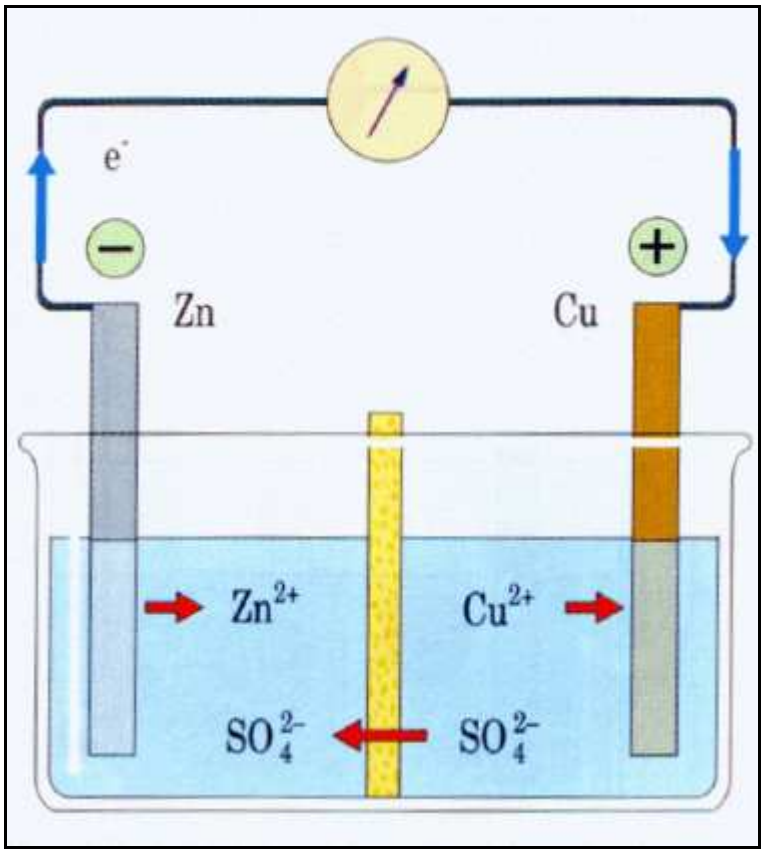


Figura 1: Funcionamiento de la pila de Daniell.

El material poroso opone mucha resistencia al paso de los iones por lo que la celda tiene una gran resistencia que disminuye la corriente obtenida. No obstante, si no permitiese el paso de aniones entre las dos disoluciones (en sentido inverso a los electrones) la pila se polarizaría rápidamente y dejaría de funcionar.

2 Estudio de las tecnologías existentes

Actualizando la información anterior hasta el día de hoy, conviene hacer una breve definición: *Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico en el cual la energía de una reacción química se convierte directamente en electricidad*. A diferencia de la pila eléctrica o batería, una pila de combustible no se acaba ni necesita ser recargada; funciona mientras el combustible y el oxidante le sean suministrados desde fuera de la pila.

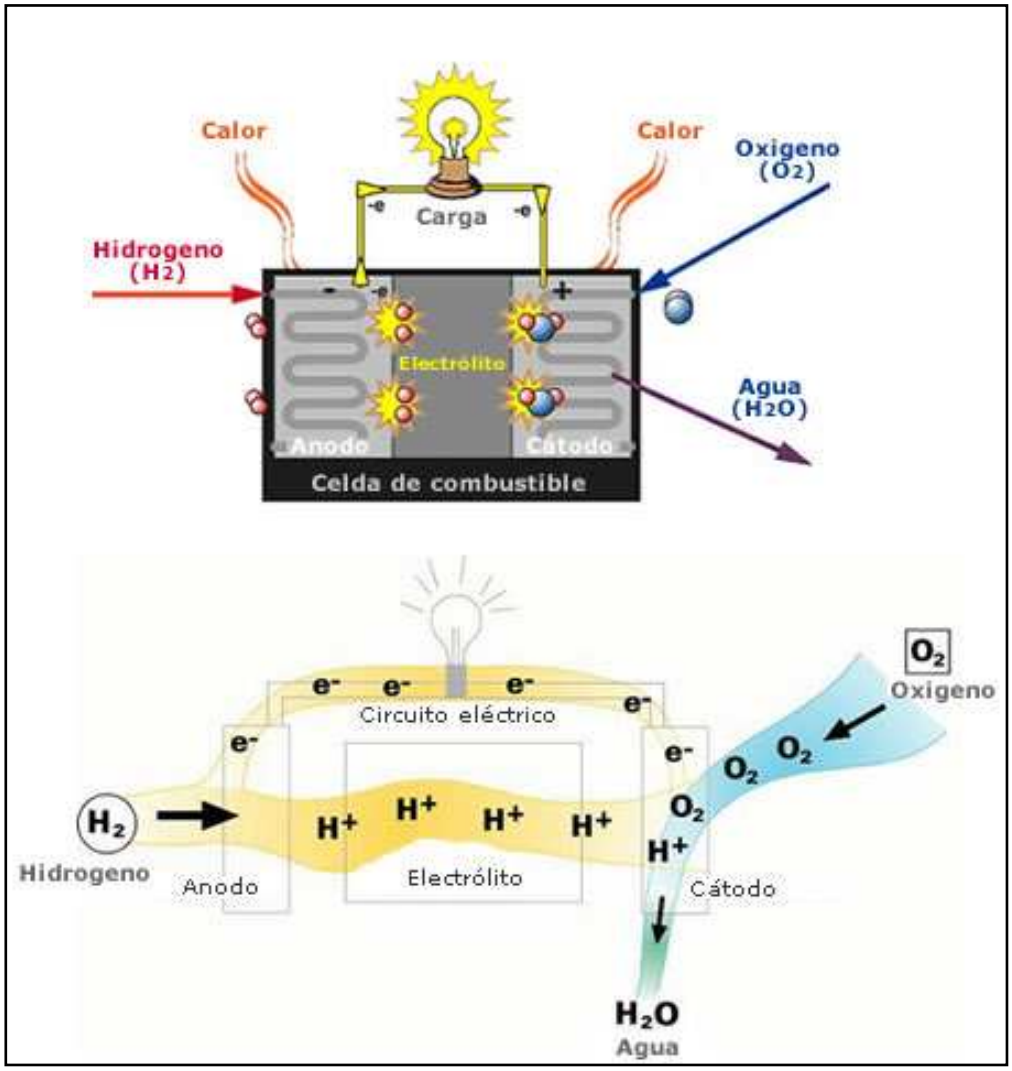


Figura 2: Funcionamiento de una pila de combustible.

Como se muestra en la Figura 2, una pila de combustible consiste en un ánodo en el que se inyecta el combustible - comúnmente hidrógeno, metano, amoniaco o hidracina - y un cátodo en el que se introduce un oxidante - normalmente aire u oxígeno. Los dos electrodos de una pila de combustible están separados por un electrolito conductor iónico.

En el caso de una pila de combustible de hidrógeno-oxígeno con un electrolito de hidróxido de metal alcalino, las reacciones que se producen son:

- Ánodo: $2H_2 + 4OH^- + 4H_2O + 4e^-$

- Cátodo: $O_2 + 2H_2O + 4e^- + 4OH^-$

Los electrones generados en el ánodo se mueven por un circuito externo que contiene la carga y pasan al cátodo. Los iones OH^- generados en el cátodo son conducidos por el electrolito al ánodo, donde se combinan con el hidrógeno y forman agua. El agua producida en el ánodo debe ser extraída continuamente para evitar que inunde la pila.

Los tipos de celda de combustible a día de hoy son:

NOMBRE	ELECTROLITO	RANGO	TEMPERATURA DE TRABAJO	EFICIENCIA ELÉCTRICA
Energía Azul	membrana de polietileno	Superior a 250 kW		
Pila de combustible alcalina (AFC)	solución alcalina	de 10 a 100 kW	inferior a 80°C	Celda: 60–70% Sistema: 62%
Célula de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM FC)	membrana polimérica	de 0,1 a 500 kW	70–200 °C	Celda: 50–70 % Sistema: 30–50 %
Direct methanol fuel cell (DMFC)	membrana polimérica	de pocos mW a 100 kw	20–120 °C	Celda: 20–30 %
Phosphoric acid fuel cell (PAFC)	Ácido fosfórico	Superior a 10 MW	200 °C	Celda: 55 % Sistema: 40 %
Molten carbonate fuel cell (MCFC)	Carbonato-Alcalino Fundido	100 MW	650 °C	Celda: 55 % Sistema: 47 %
Protonic ceramic fuel cell (PCFC)	cerámica		700 °C	
Solid oxide fuel cell (SOFC)	Electrolito de Óxido Cerámico	Superior a 100 kW	800–1000 °C	Celda: 60–65 % Sistema: 55–60 %

Tabla 1: Tipos de celdas de combustible.

Las pilas PEMFC, que son las que atañen a este proyecto, [1] se manejan con menos facilidad, pero poseen mayores densidades de potencia. Por otro lado, funcionan a temperaturas relativamente bajas (< 100 ºC actualmente), lo que tiene sus ventajas, como son la facilidad de aislamiento y la rapidez de calentamiento, pero entre los inconvenientes se encuentra la menor calidad del calor generado. Este compromiso entre prestaciones y facilidad de operación las hacen especialmente indicadas para aplicaciones intermedias, que requieran desde centenas de vatios hasta unas pocas centenas de kilowatios, incluyendo por tanto los vehículos utilitarios.

3 Motivación del proyecto

El motivo principal es porque nunca antes se ha hecho una pila de combustible que no sea plana. Hasta el día de hoy todas las pilas de combustible y todos los prototipos son de membrana y electrodos sobre el mismo plano. Este proyecto propone un paso adelante en la evolución de las pilas de combustible, al realizar la primera pila de combustible cilíndrica, cuya principal ventaja y motivo por el que se intenta construir es su mejor relación potencia-volumen.

Esto se considera un paso inicial en la creación de una tecnología de pilas PEM cilíndricas, que a medio y largo plazo podría permitir obtener altas densidades volumétricas y másicas de potencia. Esto se debe principalmente a que estas pilas sólo necesitarían placas terminales en las tapas del cilindro (cuya área se puede minimizar frente al área activa).

Se abre todo un abanico de posibilidades mediante la construcción de la pila de combustible de estructura cilíndrica, ya que como bien se comenta en futuros desarrollos, da pie a en un futuro llevar uno mismo su pila de hidrógeno con forma de mechero y recargable con capsulas de hidrógeno.

Capítulo 2 REALIZACIÓN DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE CILÍNDRICA.

1 Introducción

Antes de poder llevar a cabo cualquier diseño y construcción de la pila de combustible cilíndrica, hay que adaptarse y familiarizarse con los elementos y herramientas que componen y se usan en cualquier pila de combustible y en su experimentación.

Para esta adaptación se usó una pila plana de 5 celdas, construida por unos compañeros, miembros del *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*.

Debido a problemas técnicos, hubo que reconstruirla para poder continuar con la adaptación al nuevo entorno de trabajo, con lo cual se retrasó ligeramente el objetivo final de este proyecto.

2 Diseño de una pila de combustible preliminar plana de 5 celdas

Se va a omitir cómo se construye una pila de combustible plana de 5 celdas porque este trabajo está redactado en la tesis doctoral *Diseño, caracterización y modelado de una nueva pila de combustible* de Domingo M. Guinea Gª-Alegre.

Se hará un breve resumen de los elementos que componen esta pila de combustible plana de 5 celdas, y la aportación y mejora del nuevo diseño con respecto al viejo.

2.1 Elementos que componen la pila de combustible preliminar plana de 5 celdas

Básicamente, la pila de combustible plana de 5 celdas se compone de:

- Láminas corrugadas: se usan como elementos canalizadores de gases a lo largo de las celdas y sirven de camino a la corriente.
- MEA (Membrane-Electrode Assembly): ensamblaje de los electrodos con la membrana. Como membrana de intercambio protónico se suele utilizar Nafion, membrana comercial de copolímero de tetrafluoroetileno sulfonado. El catalizador habitual es platino en finas partículas soportadas sobre materiales de carbono de elevada superficie específica. La superficie de los electrodos coincide con la de las láminas corrugadas.
- Marcos de silicona: Se usan como sellante para garantizar la estanqueidad de la pila de combustible.
- Placas terminales: Son de metacrilato, sirven para hacer presión sobre toda la superficie de la pila de combustible y garantizar el cierre hermético junto con los marcos de silicona. La ventaja de usar metacrilato es que permite ver el interior de la pila de combustible y controlar el nivel de inundación o de sequedad visualmente.

2.2 Elementos mejorados en la construcción de la pila

2.2.1 El sellante

El primer elemento que se mejoró fue el sellante. Para ello se llevaron a cabo diversas pruebas de compresibilidad con distintos materiales, algunos novedosos y otros usados anteriormente.

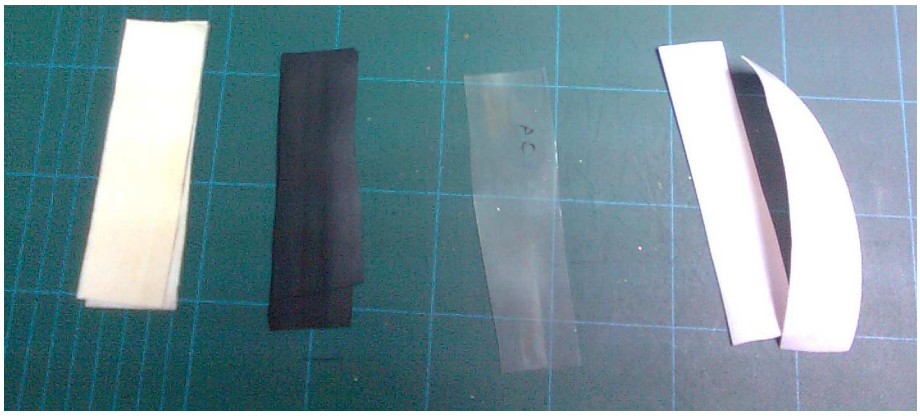


Figura 3: Distintos materiales del ensayo de compresibilidad

Los materiales probados en el ensayo, y según se observan en la Figura 3, de derecha a izquierda, son:

- Teflón: Es capaz de resistir temperaturas de unos 300º C durante largos periodos sin apenas sufrir modificaciones. Es resistente a la mayoría de los ácidos y las bases. Es resistente (insoluble) a muchos disolventes orgánicos. Todo esto es posible debido a que los átomos de flúor del teflón crean una especie de barrera que dificulta el ataque de agentes químicos sobre la estructura carbonada del mismo.
- Silicona: Es un polímero inodoro e incoloro hecho principalmente de silicio. La silicona es inerte y estable a altas temperaturas, lo que la hace útil en gran variedad de aplicaciones industriales.
- Viton: Los fluoroelastómeros VITON son uno de los cauchos sintéticos más resistentes al calor y a los fluidos que jamás se han

desarrollado. Resisten muchos cientos de fluidos normales y difíciles entre márgenes de temperatura muy amplios y proporcionan un servicio de estanqueidad seguro por mucho tiempo.

- Composite teflón – fibra de vidrio: El teflón puede ser cargado con fibra de vidrio en un porcentaje que varía de 5 a 40 %. La adición de fibra de vidrio mejora la resistencia al desgaste y, en un menor grado, la deformación por carga, dejando inalterables las características eléctricas y químicas.

2.2.2 La membrana

El segundo y último elemento susceptible de mejora fue la membrana de Nafion de la MEA, pasando de usar Nafion N-115 a Nafion N-117. El Nafion es una membrana polimérica transparente capaz de transportar iones H+ (protones) a través de la estructura del polímero, y mientras el N-115 se caracteriza por un grosor de 127 µm, el N-117 se caracteriza por un grosor de 178 µm.

Éste es el principal motivo por el que se decide usar Nafion N-117, ya que el N-115 es más frágil y más susceptible de rotura frente a altas presiones y altas temperaturas, como cuando se cierra la pila con un par de apriete elevado y se fija el punto de trabajo de la pila de combustible en tensión baja y corriente alta.

Una parte crítica en el montaje de la pila de combustible es el ensamblaje de la MEA, la unión de los electrodos de tela de carbón y platino con la membrana de Nafion. Para eso se utiliza una prensa especialmente diseñada para ello, con unas planchas, en las que se introducen unos soldadores que las calientan a 120 ºC. Posteriormente se deposita en medio de las planchas la MEA, envuelta en papel de aluminio para evitar que el

Nafion se adhiera a las planchas, y se prensa durante 10 minutos.

Figura 4: Sistema de prensado de la MEA

2.3 Pila de combustible de 5 celdas mejorada

El resultado del montaje y reconstrucción de la pila de combustible de 5 celdas se aprecia en la Figura 5.

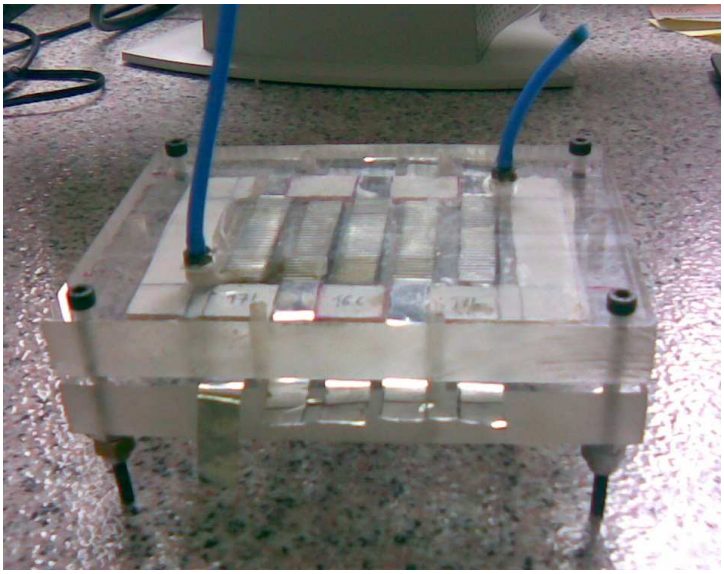


Figura 5: Pila de combustible de 5 celdas

Hay que mencionar que la imagen de la pila de combustible mostrada en la Figura 5 no es el montaje final. Esto se debe a que el metacrilato no ejerce una presión homogénea sobre toda la superficie de la pila, sino que a mayor presión en sus extremos mayor curvatura o flexión adquiere en la zona central. Esto se soluciona con dos conjuntos como el mostrado en la Figura 6, formado por dos barras de hierro que, al ejercer la presión lateral mediante tuercas, apenas se curvan o flexionan, a diferencia del metacrilato, y reparten la presión equitativamente.

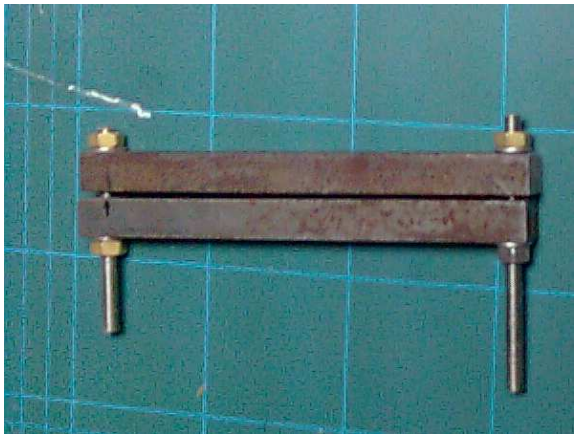


Figura 6: Estructura para repartir la presión de forma homogénea

3 Diseño de una pila de sección circular

El propósito por el que se quiere desarrollar una pila de sección circular en vez de seguir desarrollando las pilas planas es porque la relación potencia-volumen es mejor en las primeras, lo que significa que para el mismo volumen las pilas de sección cilíndrica ofrecen más potencia que las pilas planas.

3.1 Premisas y conceptos de diseño

Para que el diseño tenga claras posibilidades de éxito, hay que tener en cuenta una serie de circunstancias y requisitos que se dan o necesitan en las características de una pila de sección circular y no se daban o necesitaban en las pilas planas:

1) En la pila cilíndrica se crea una cámara interior, en donde se introducirá el hidrógeno, y en el exterior de la pila habrá aire u oxígeno.
2) La MEA debe ir en medio de la cara interior y la cara exterior para que se produzcan las reacciones del hidrógeno en el interior y del oxígeno en el exterior.
3) A partir del punto 1) queda definida la polaridad de cada lado. En la cámara interior estará la polaridad negativa y en el exterior la polaridad positiva. La implicación de esto es que hay que sacar un cable desde el interior de la pila al exterior para que haga de conexión.
4) A tenor de los puntos 2) y 3) se llega a la siguiente conclusión: el cilindro que forme la estructura de la pila debe tener separadas la cara interior de la cara exterior para que no se produzcan cortocircuitos, por lo que ya no puede ser un solo cilindro conductor el que forme la estructura, sino que deben ser dos, eléctricamente aislados, y en medio de ambos debe estar la MEA.
5) La cámara interior debe ser estanca, tanto para que no haya fugas que supondrían pérdidas de rendimiento, como para que no haya

reacciones no controladas del hidrógeno que puedan poner en peligro los materiales o al usuario.

3.2 Componentes que forman la pila de sección circular

A continuación se detallarán todos los componentes que componen la pila de combustible de sección circular, desde el interior hacia el exterior.

- Cilindro interior: Es una malla de hierro cerrada. Asegura la rigidez de la estructura y la conductividad gracias al hierro y la transpirabilidad gracias a su estructura de malla.
- MEA: Formada por Nafion N-117 y por electrodos de tela de carbón. Va situada entre en cilindro interior y el exterior. Está en contacto con el hidrógeno de la cámara interior y con el aire u oxígeno del exterior. A la vez sirve de aislante entre los cilindros interior y exterior para que no se produzcan cortocircuitos.
- Cilindro exterior: Como pasaba en el cilindro interior, es una malla de hierro, pero en este caso no es cerrada, sino abierta como se muestra en la Figura 7, para poder introducir el Nafion entre los dos cilindros y luego ejercer presión sobre toda el área de manera uniforme, mediante el cierre y ajuste de un tornillo roscado con tuerca en el lado opuesto al de su cabeza.
- Cable de cobre: Se usan dos cables de cobre de 2mm de diámetro superpuestos, para que la resistencia interna de éstos sea menor que la de la pila y, por tanto, las pérdidas eléctricas más importantes no sean en ellos.

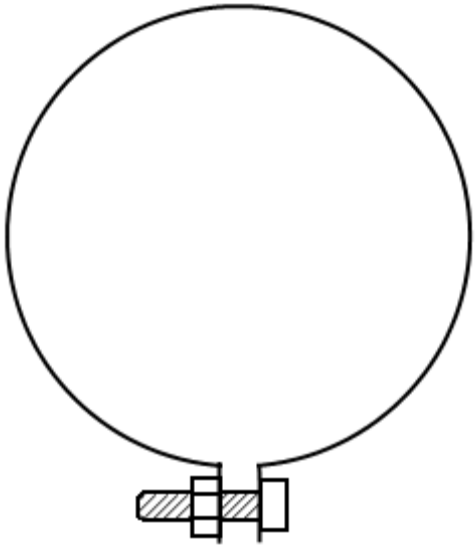


Figura 7: Planta del cilindro exterior

- Cinta de pegamento de doble cara: Se usa para sellar el interior de la cámara en las dos uniones entre la pared cilíndrica y cada una de las tapas: para evitar fugas entre la estructura de la tapa y el Nafion. Aunque por sí sola no es capaz de evitar completamente las fugas, sirve para soportar esfuerzos en estas uniones y, sobre todo, como soporte para los sellantes. Se coloca según se muestra en la Figura 8. Se usa cinta de doble cara para que se pueda pegar fácilmente a la pieza que viene a continuación, la tapa cilíndrica de plástico.

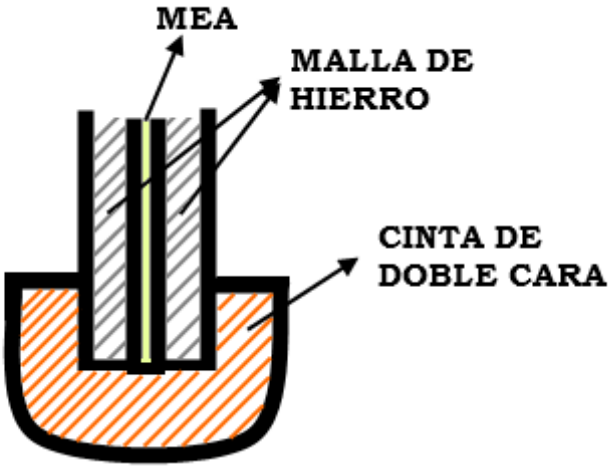


Figura 8: Colocación de la cinta de doble cara

- Tapas circulares de plástico: Se usan como piezas de encaje entre la cinta de doble cara y las tapas de metacrilato que se usan a continuación. Aunque la cinta de doble cara podría ir directamente sobre una pieza plana, con estas piezas de encaje se rigidiza la estructura (evitando movimientos laterales) y se mejora el sellado (aumentando la distancia de fuga). Una de las tapas tiene un agujero en su superficie lateral para la salida del cable soldado al cilindro interior. Su esquema se puede ver en la Figura 9.

- Tapas de metacrilato: Como ya se mencionó anteriormente, se usan tapas de metacrilato y no de otro material para poder apreciar lo que pasa dentro de la pila y controlar si se inunda o se seca. Sirven de cierre de la zona central hueca de las tapas de plástico y de módulo para ejercer presión en las bases de estas tapas de la pila y asegurar así la estanqueidad. Su esquema se puede ver en la Figura 9.

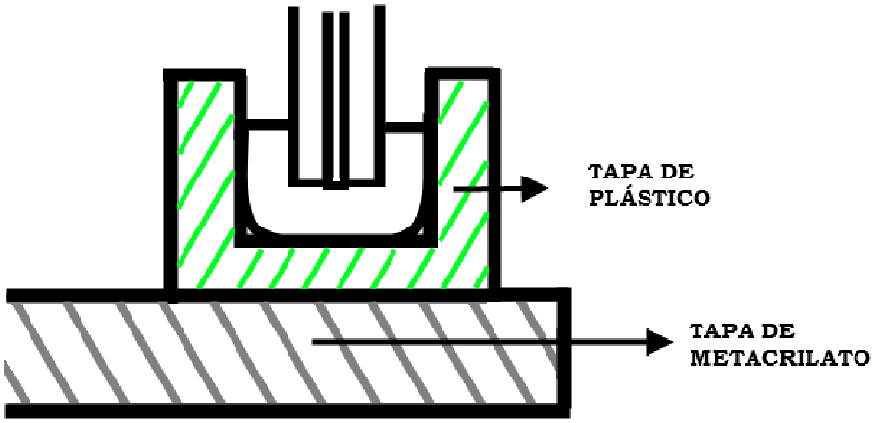


Figura 9: Situación de las tapas de plástico y de metacrilato

- Barra roscada pasante: Pieza fundamental en el montaje de la pila de combustible cilíndrica. La barra atraviesa la pila por el eje de revolución de los cilindros. Sirve para introducir hidrógeno en la cámara interior y a la vez para ejercer presión entre las tapas y

facilitar la estanqueidad. En los extremos de la barra se sitúan racores para la introducción y extracción del hidrógeno de la pila mediante tubos con conexiones especiales para evitar las fugas. Entre los racores y el metacrilato, alrededor de la barra, se han usado juntas tóricas que asegurarán la hermeticidad del taladro realizado en el metacrilato para que pase la barra. En la zona media la barra esta agujereada para que el hidrógeno alcance la cámara interior.

- Sellantes: Se han usado dos sellantes. El primero es un sellante para tuberías de la marca Loctite modelo 542, y se ha aplicado entre la cinta de doble cara y la tapa cilíndrica de plástico, por el interior y por el exterior. El segundo sellante es una silicona especial también de la marca Loctite, modelo 5398, y se ha aplicado entre la tapa de plástico y el cilindro exterior y entre la tapa de plástico y la tapa de metacrilato, tal como se aprecia en la Figura 10. El Loctite 542 es más líquido que el Loctite 5398. Inicialmente se empleó el primero para cubrir la mayor parte de las porosidades, y luego el segundo para dar consistencia mecánica: para que solidificase y evitase que el primero fuese arrastrado ante diferencias de presión.

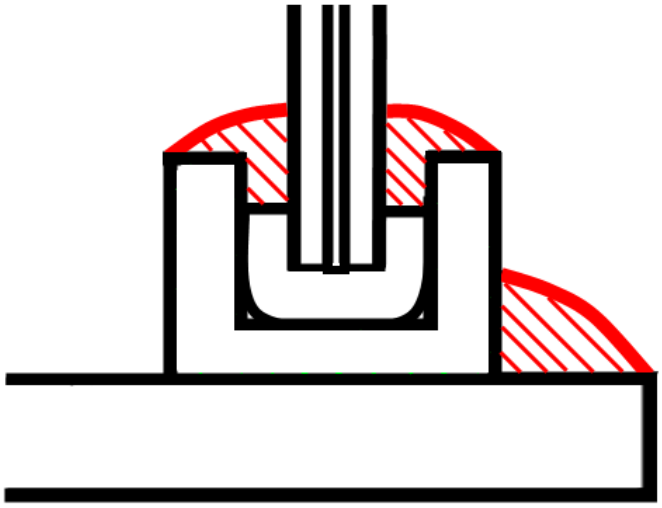


Figura 10: Situación de los sellantes

- Racores: De 1/8 de pulgada y con salida a rosca de Swagelok de 3 mm como el que se puede ver en la Figura 11. Se usan para conectar la cámara interior de la pila con los conductos de entrada y salida del hidrógeno. Entre la rosca realizada en las tapas de metacrilato y los racores que enlazan con los conductos, se enrolla cinta de teflón para garantizar que no haya pérdidas de gases a través de esta rosca.

Figura 11: Racor de 1/8 de pulgada y salida a rosca de Swagelok de 3 mm

3.3 Circuito de flujo del hidrógeno

El circuito que sigue el hidrógeno es el que se muestra a continuación en la Figura 12: El hidrógeno entra por uno de los extremo del tubo pasante y se cuela en la cámara interior a través de los taladros de la superficie lateral del tubo pasante y finalmente sale por el otro extremo del tubo.

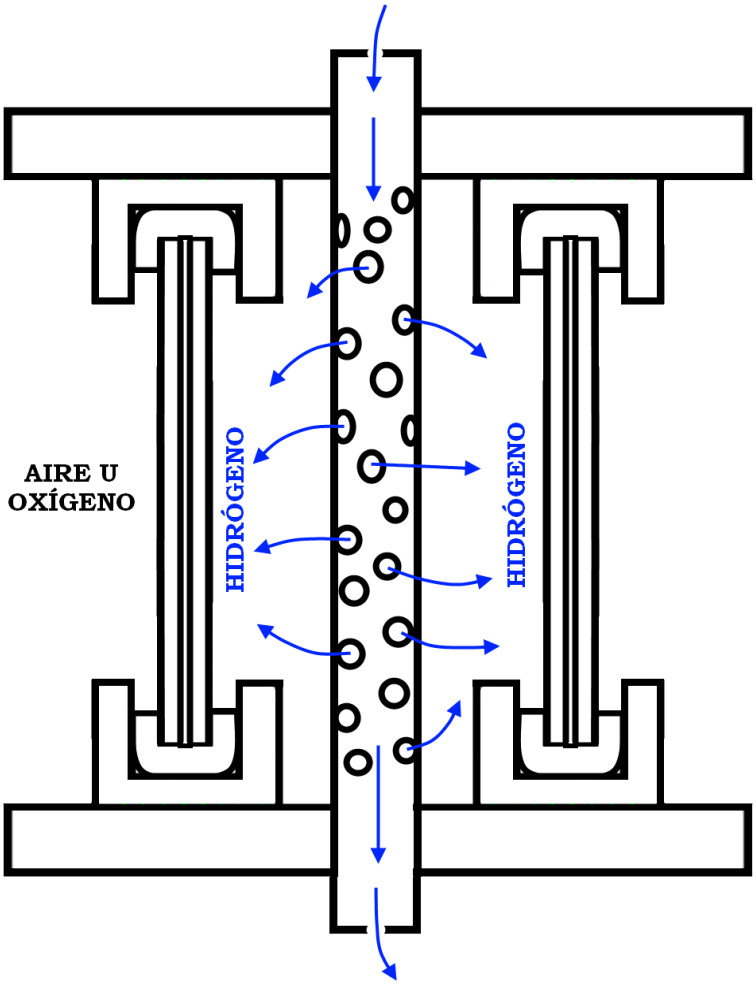


Figura 12: Circuito del flujo de hidrógeno

3.4 Modificaciones de la segunda versión.

3.4.1 Supresión del sellante de tuberías

Es la modificación más importante. Se cree que es la principal causa del mal funcionamiento de la pila de combustible anterior. Se confía en que sólo con el otro sellante, Loctite 5398, sea suficiente para garantizar la estanqueidad de la pila de combustible.

3.4.2 Circuito de flujo del hidrógeno

Se determina que para que el hidrógeno llegue mejor a toda la cámara interior de la pila de combustible y que haya un mejor aprovechamiento de este gas que en el diseño anterior, en el que una importante cantidad del hidrógeno seguía el camino recto del tubo pasante en vez de adentrarse en la cámara interna de la pila, es necesario cambiar el circuito de flujo del hidrógeno. La solución propuesta es la siguiente: taponar un extremo del tubo pasante y poner otro taladro con racor en la tapa de metacrilato donde se ha cerrado el extremo. El racor en este caso es de métrica 5 (M5) con salida a tubo de 4 mm. Con esto se consigue que haya un mayor flujo de hidrógeno en la cámara interior, ya que el propio hidrógeno sale hacia el exterior del tubo por mayor presión en el interior del tubo que en la cámara interna. Además, con esta modificación también se mejora la renovación del hidrógeno en el interior. Todo lo mencionado se puede entender mejor en la Figura 13.

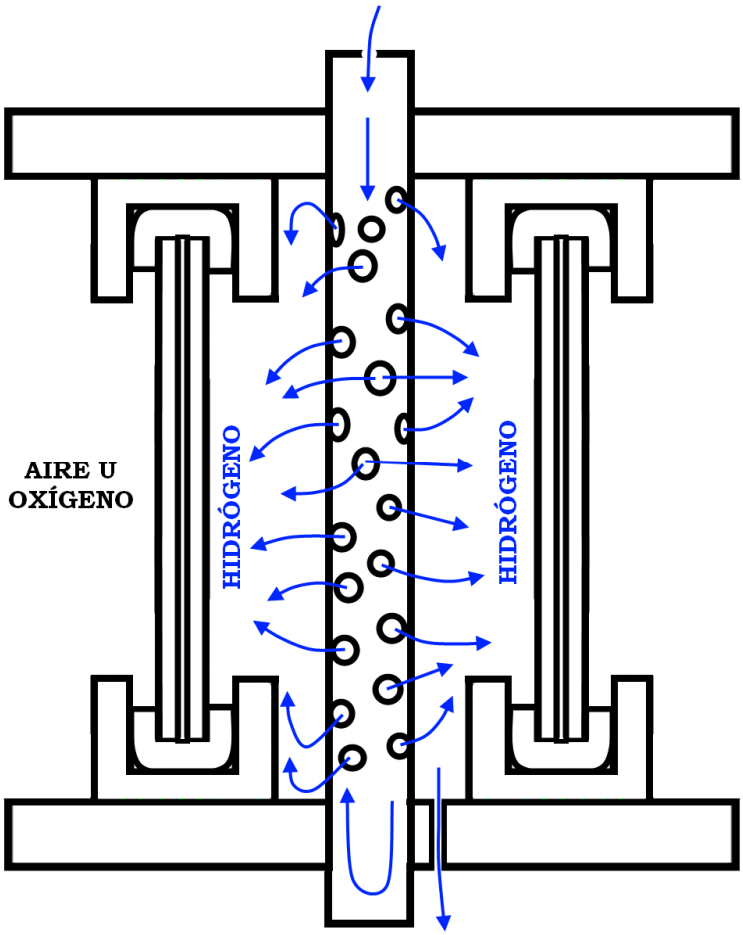


Figura 13: Circuito del flujo de hidrógeno del segundo diseño

3.5 Resultado del montaje funcional

El resultado final de todas las mejoras y soluciones aportadas es el mostrado en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16.

Figura 14: Pila de combustible cilíndrica

Figura 15: Vista del cierre de la pila de combustible cilíndrica

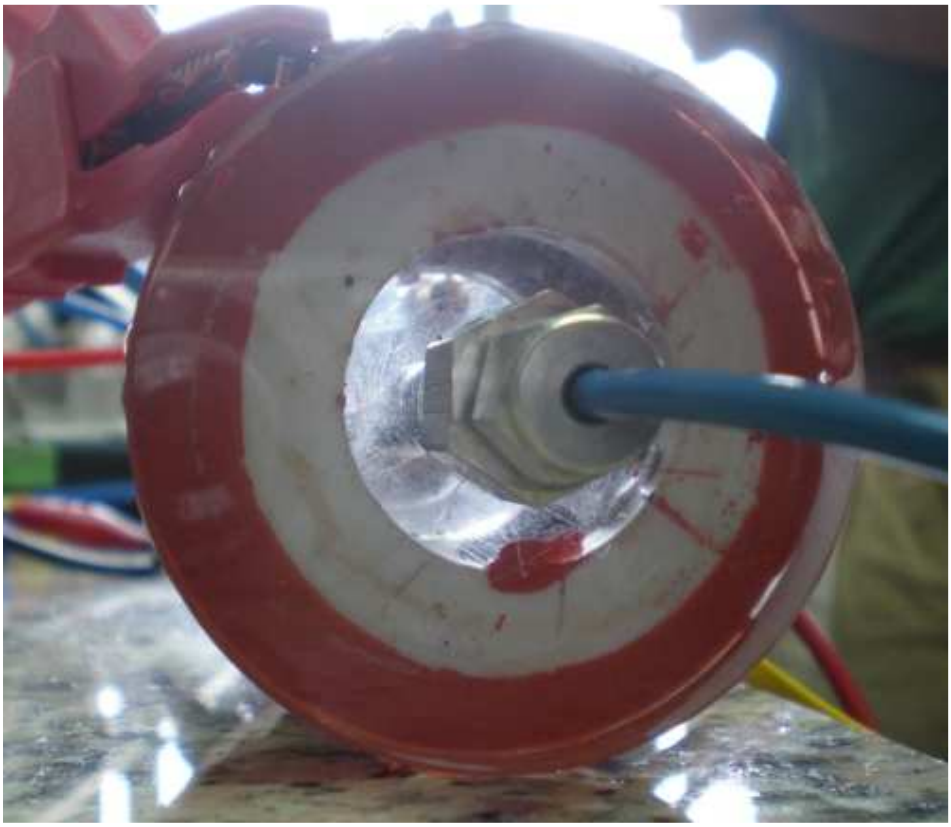


Figura 16: Vista interior de la pila de combustible cilíndrica

Capítulo 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados de los experimentos y ensayos de las pilas de combustible documentadas en secciones anteriores, y se analizan los resultados, tanto positivos como negativos, y las consecuencias e implicaciones que éstos conllevan.

1 Realización de los ensayos: Metodología

Para la realización de las distintas pruebas y ensayos han sido necesarios una serie de equipos que se pueden adquirir de proveedores especializados, y hardware y software expresamente diseñados por miembros del CSIC para trabajar y poner a prueba pilas de combustible.

Por un lado se tiene la carga electrónica y el impedancímetro, que son los equipos que se pueden adquirir de proveedores especializados, y sirven para llevar a la pila de combustible a puntos de trabajo específicos para su posterior análisis, ya sea a una determinada tensión o intensidad o a una determinada frecuencia. En el caso del impedancímetro, también se estudia la impedancia de la pila a la frecuencia seleccionada, a partir de la relación de fase y amplitud entre el cambio de voltaje y el cambio de intensidad de la pila.

Por otro lado se tiene la estación de trabajo, desarrollada íntegramente por el compañero del CSIC Wilton Agila. Se conecta a la pila de combustible mediante tubos de 4mm de diámetro exterior a través de los racores, y suministra el combustible de la pila, que en este caso es H_2, fijando el caudal de éste mediante un software que se detallará próximamente.

Y finalmente está el software con interfaz gráfico, que ha sido desarrollado en el lenguaje de programación gráfica de medidas y automatización LabView 8.5. Este software también ha sido desarrollado por el compañero del CSIC Wilton Agila.

1.1 Estación de trabajo

Una estación es un elemento fundamental para realizar pruebas y ensayos con cualquier pila de combustible. La empleada en este trabajo ha sido desarrollada por Wilton Agila, compañero del CSIC, que también desarrolló el software para la misma que se detallará más adelante.

La estación cuenta con entradas y salidas de hidrógeno y oxígeno, regulación del caudal de ambos, sensores de temperatura, control de humectación, conexión con ordenador, tanque de humectación y más elementos que no se han usado para este proyecto.

Antes de realizar cualquier ensayo, primero hay que eliminar el aire que haya en el interior del ánodo de la pila de combustible, para evitar que reaccione con el hidrógeno que se va a suministrar a este ánodo. Para ello antes de introducir hidrógeno se introduce nitrógeno durante 10 minutos, y pasado este tiempo se puede introducir hidrógeno con la seguridad de que no hay aire dentro.

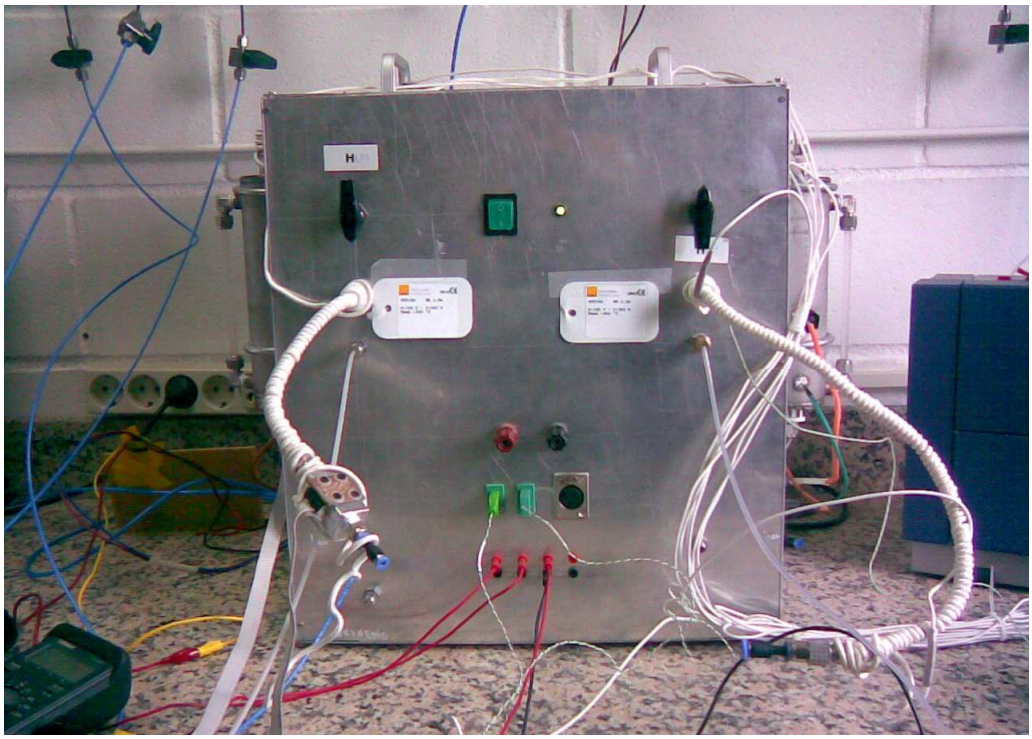


Figura 17: Estación de trabajo 1 (para pilas de potencia baja)

Figura 18: Estación de trabajo 2 (para pilas de potencia media)

1.2 Carga electrónica

Para poder caracterizar la pila a diferentes valores de tensión e intensidad se trabajó con la carga electrónica de AMREL modelo ZVL 100-10-20L, que se caracteriza por manejar potencias hasta 100 W, tensiones hasta 10 V_{dc} e intensidades hasta 40 A_{dc}.

Figura 19: Carga electrónica

1.3 Analizador de Respuesta en Frecuencia

Para poder realizar el espectro de impedancia se usó un Analizador de Respuesta en Frecuencia también de la casa AMREL, que se caracteriza por tener un rango de frecuencias que van desde 0,1 Hz hasta 20 kHz con una resolución de 0,01 Hz.

Figura 20: Analizador de Respuesta en Frecuencia

1.4 Software específico

Para la realización con éxito del proyecto se ha usado un software desarrollado por el compañero del CSIC Wilton Agila, basado en el lenguaje LabView 8.5.

Con este software se pueden regular y controlar caudales, humedades, potencias, presiones, temperaturas, tensiones e intensidades.

A continuación se muestran las diferentes pestañas que aparecen en él.

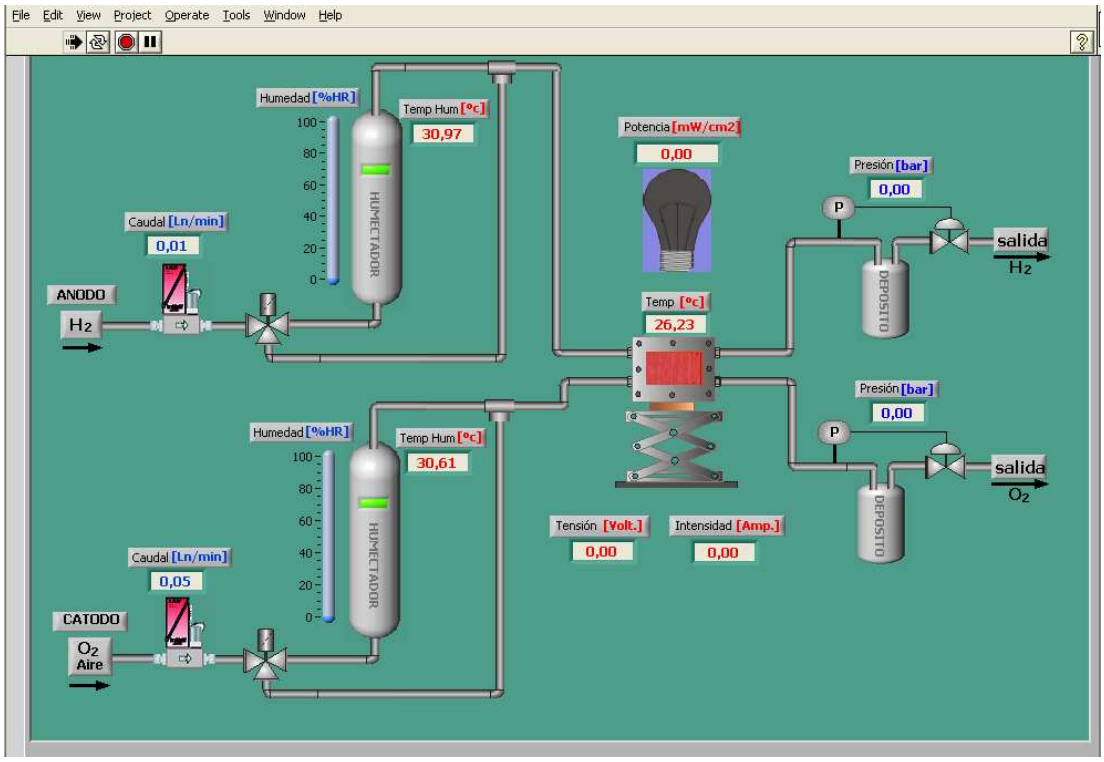


Figura 21: Pestaña Planta del software de la estación

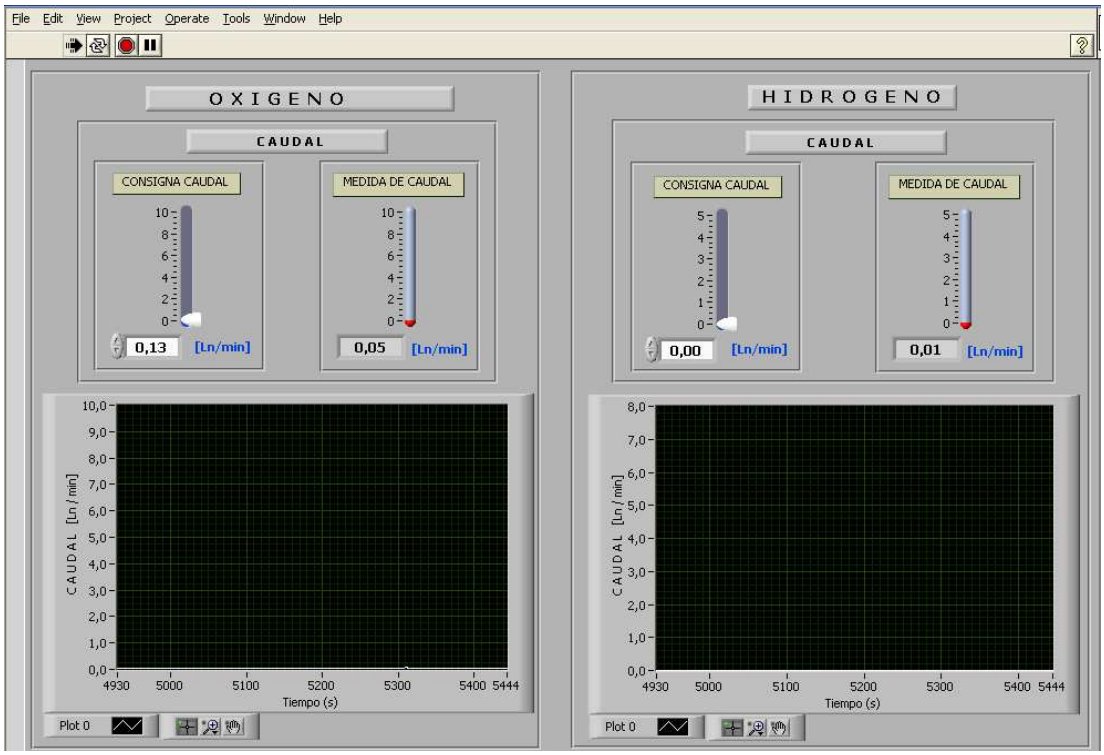


Figura 22: Pestaña Caudal de gases del software de la estación

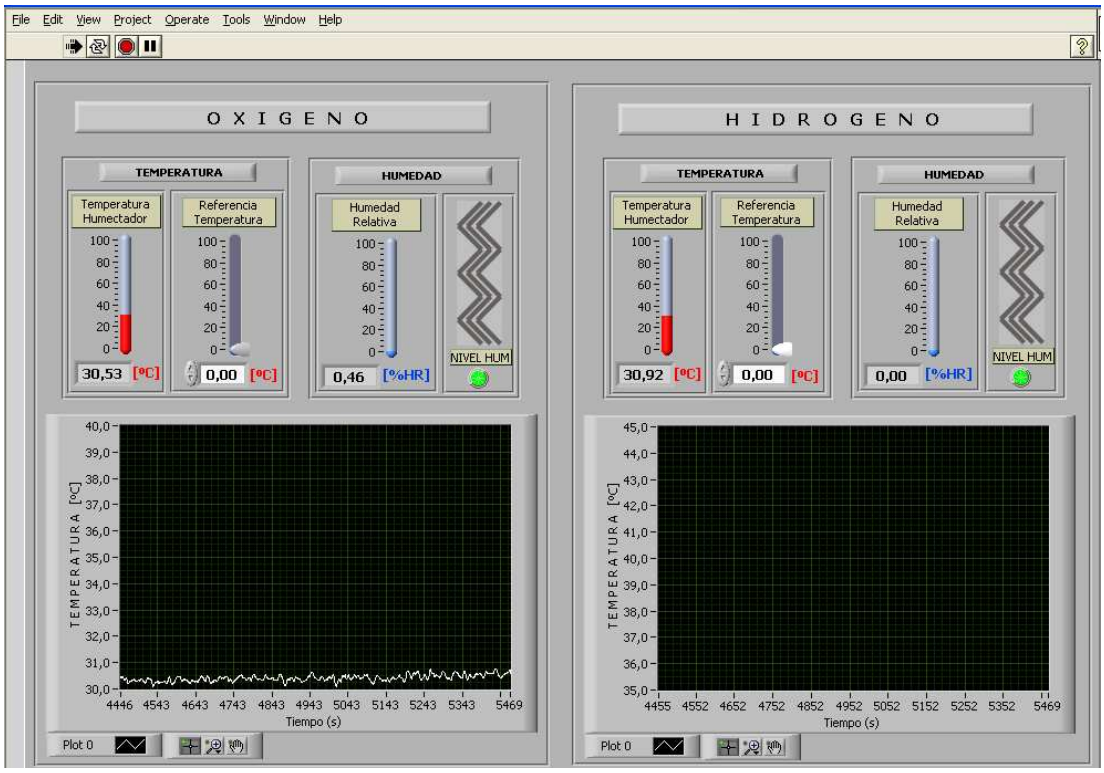


Figura 23: Pestaña Humectación del software de la estación

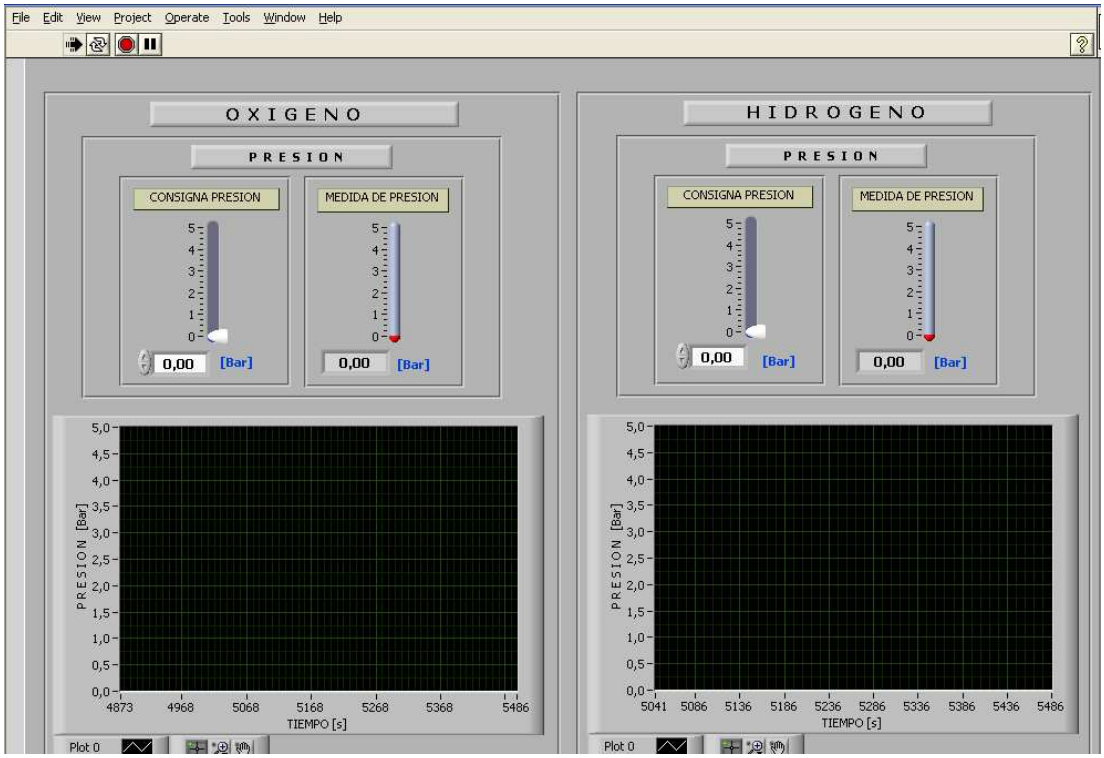


Figura 24: Pestaña Presión de gases del software de la estación

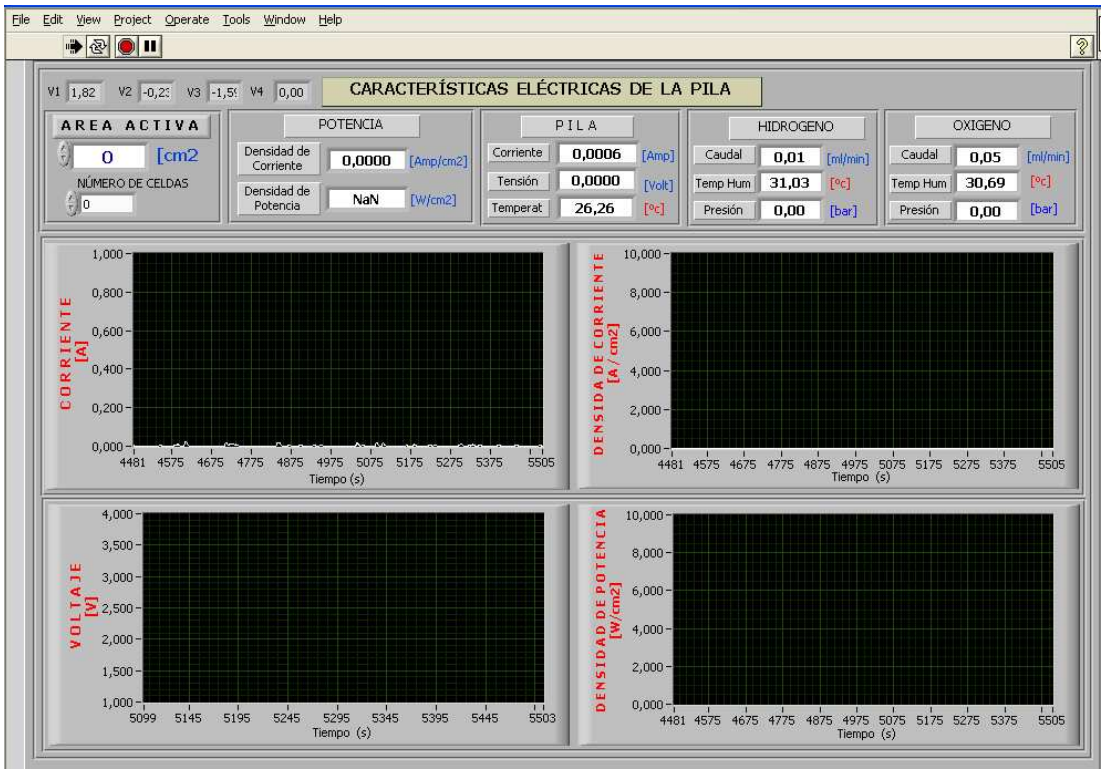


Figura 25: Pestaña Potencia de la pila del software de la estación

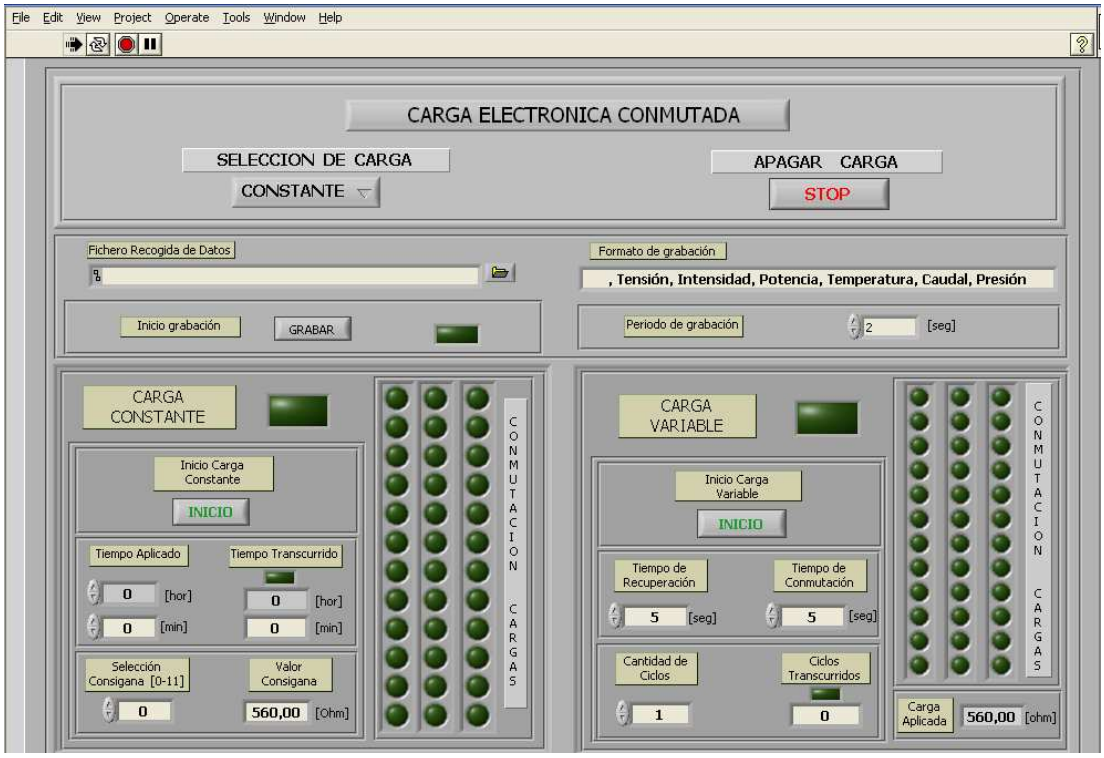


Figura 26: Pestaña Carga Electrónica del software de la estación

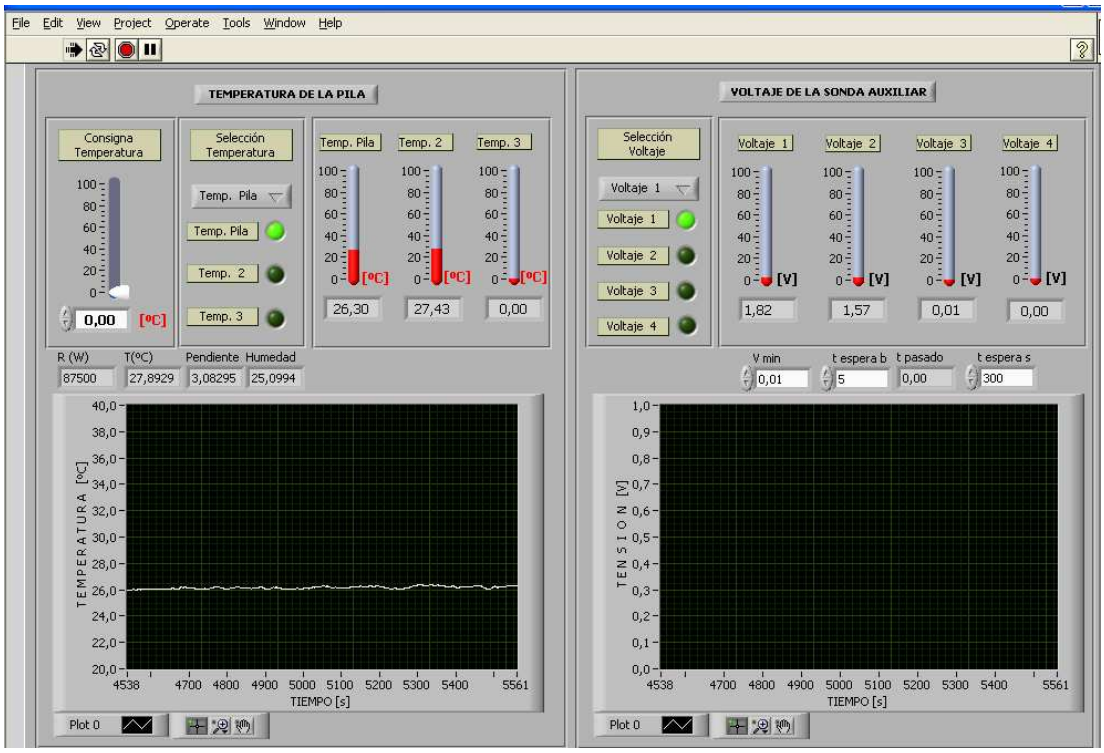


Figura 27: Pestaña Temperatura de la pila del software de la estación

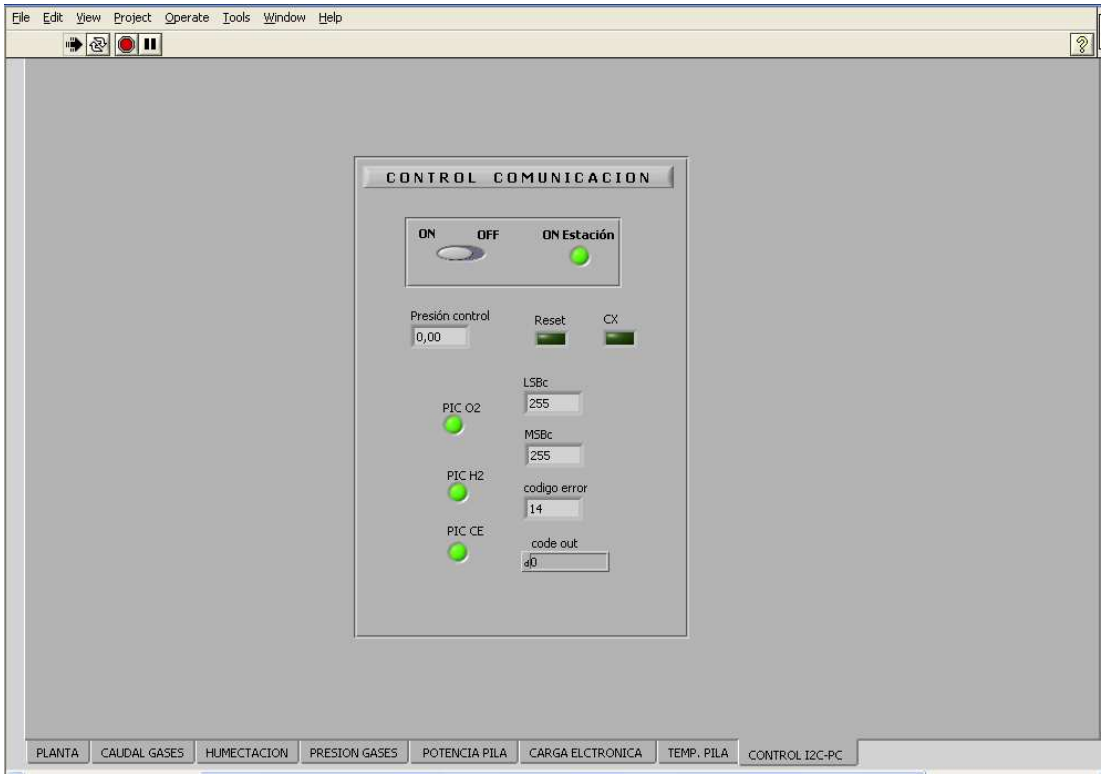


Figura 28: Pestaña Control I2C-PC del software de la estación

1.5 Salida de gases

Los gases son suministrados por una instalación exterior de bombonas de H_2, N_2 y O_2, la cual por medio de las canalizaciones que se ven en la Figura 29 se conecta a la estación de gases.

Figura 29: Instalación de gases

2 Prueba de compresibilidad

Se realizó una prueba de compresibilidad para ver la deformación de los sellantes ante esfuerzos de distinta magnitud. Esto permite ver cual de ellos es el más adecuado para deformarse y así absorber pequeños errores de fabricación.

El proceso fue el siguiente: Se recortaron segmentos de los distintos materiales a ensayo. Con ayuda de unas barras metálicas y se hizo presión a diferentes pares, y se midió primero su grosor inicial y luego su grosor según el par aplicado.

Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

	Teflón (mm)	**Composite** (mm)	**Silicona** (mm)	**Viton** (mm)
Grosor natural	0,76	0,24	1,03	0,99
Nº de capas	2 capas	5 capas	1 capa	2 capas
Grosor inicial	1,51	1,19	1,03	1,98
Ensayos				
Grosor a 0,05 N·m	1,47	1,11	0,98	1,8
Grosor a 0,1 N·m	1,46	1,1	0,96	1,78
Grosor a 0,2 N·m	1,45	1,09	0,96	1,78
Grosor a 0,5 N·m	1,43	1,07	0,95	1,75
Grosor a 1 N·m	1,40	1,04	0,90	1,69
Grosor a 2 N·m	1,35	1,01	0,86	1,55
Grosor a 5 N·m	1,22	0,96	0,65	1,16

Tabla 2: Ensayo de compresibilidad

A raíz de estas medidas se puede obtener su tensión de compresión mediante la ecuación:

$$T_{comp} = \frac{2 \cdot \frac{P}{r_m}}{\eta \cdot S}$$

Siendo: $P \equiv$ Par

$r_m \equiv$ radio medio de rozamiento entre la tuerca y la barra

$\eta \equiv$ Coeficiente de rozamiento

S ≡ superficie sobre la que se realiza el ensayo

Y su deformación relativa se obtiene como:

$$\varepsilon = \frac{g_i - g_f}{g_i}$$

Siendo: $g_i \equiv$ Grosor inicial

$g_f \equiv$ Grosor final

A continuación se muestra la gráfica de tensión de compresión frente a deformación relativa (τ frente a ε), que representan el comportamiento de los distintos materiales a compresión.

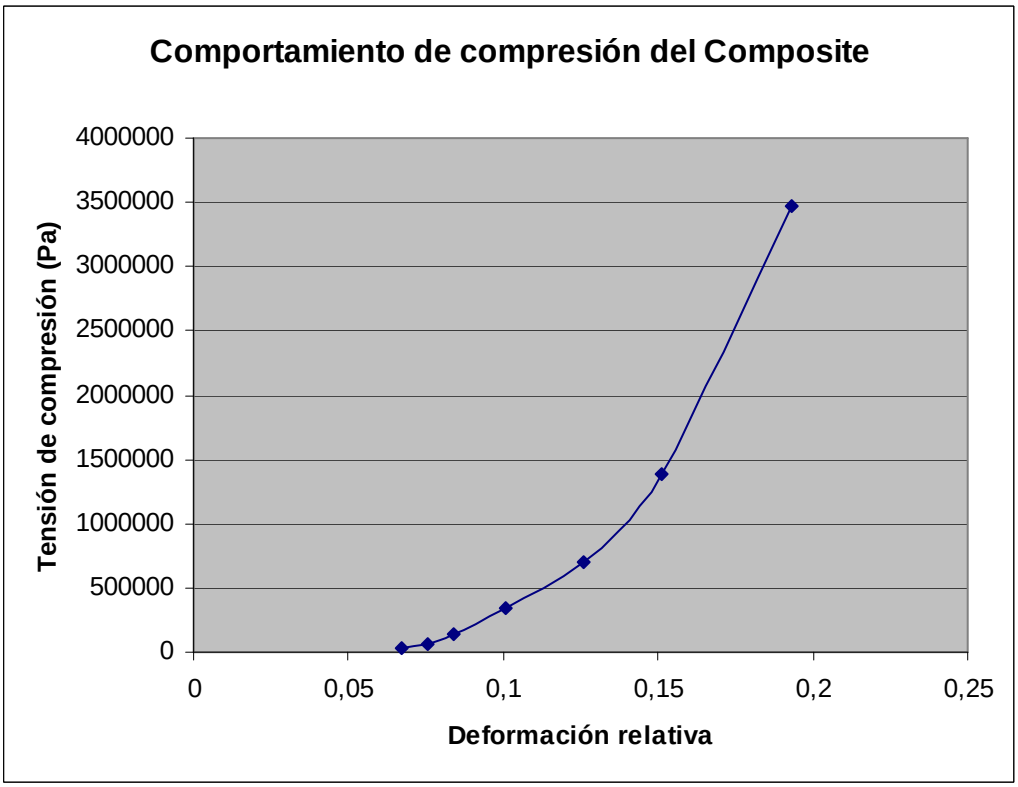


Figura 30: Ensayo de compresibilidad del composite

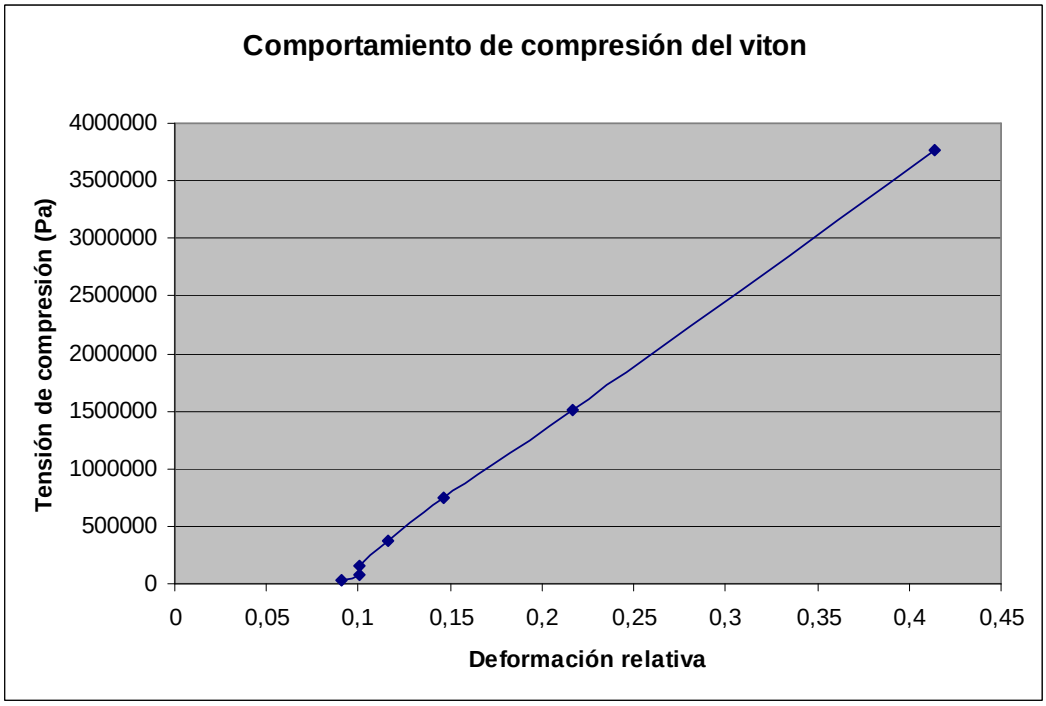


Figura 31: Ensayo de compresibilidad del viton

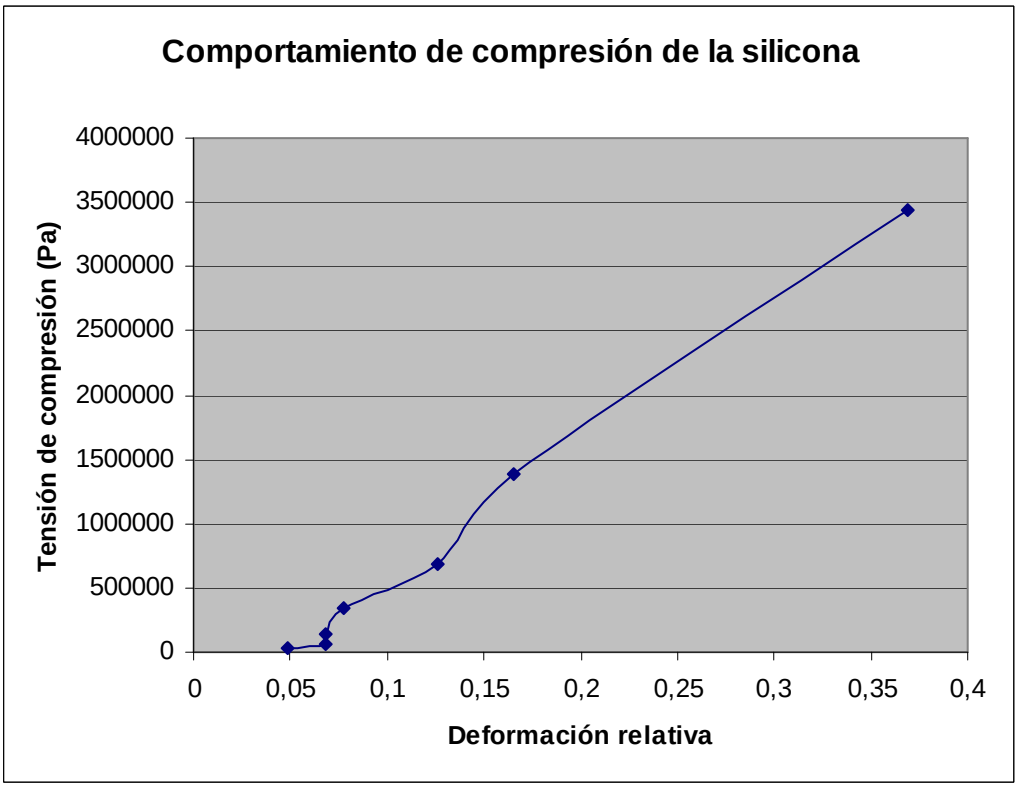


Figura 32: Ensayo de compresibilidad de la silicona

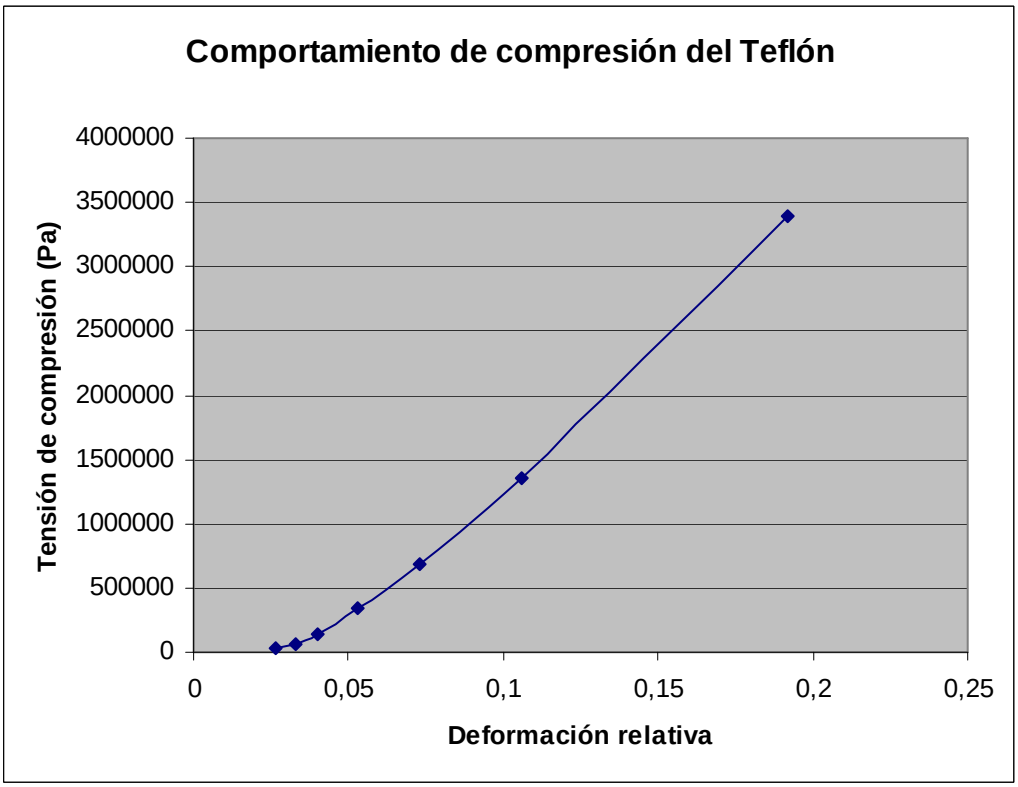


Figura 33: Ensayo de compresibilidad del teflón

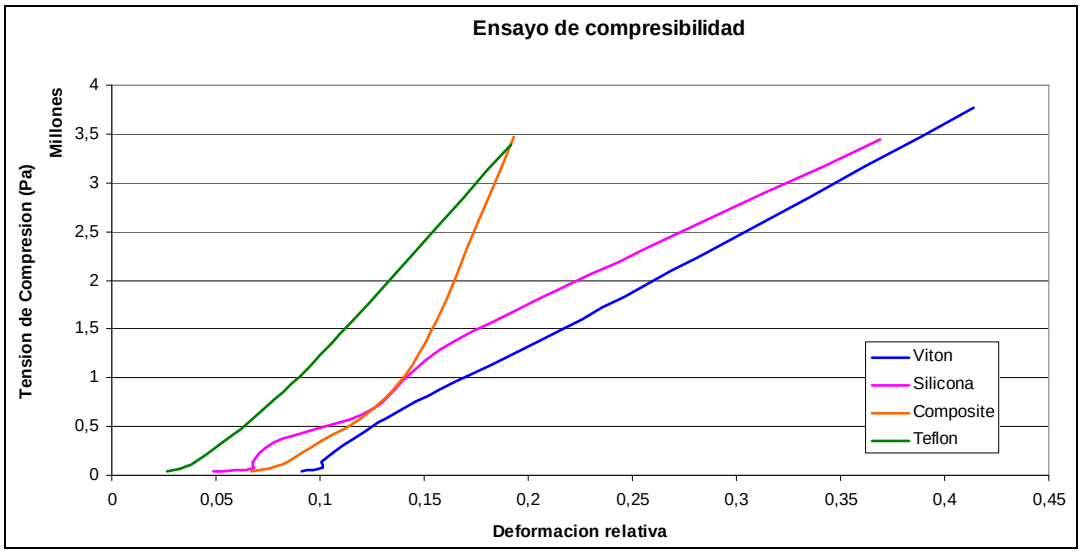


Figura 34: Resultado global del ensayo de compresibilidad

En vista de los resultados, el mejor material para su uso como sellante sería el Viton. Pero la mejora que aporta sobre la silicona es pequeña comparada con el coste, que es del orden de 10 veces el de la silicona. Como uno de los objetivos es hacer la pila de combustible viable económicamente para su posterior venta, se decide seguir usando, como sellante, la silicona.

3 Pila de combustible de 5 celdas

A continuación se muestra la gráfica más representativa de toda pila de combustible, la gráfica tensión-intensidad o gráfica V-I, donde se aprecian los distintos puntos de trabajo posibles así como también se puede apreciar la variación de la potencia de manera casi lineal según el punto de operación de la pila en la gráfica V-I.

Las condiciones del ensayo fueron caudal de hidrógeno y de oxígeno establecidos en 100mln/min y con humectación activada.

	VOLTAJE DE CELDAS (V)						
V (V)	1	2	3	4	5	I (A)	Potencia
2,143	0,505	0,435	0,327	0,437	0,439	0,27	0,57861
2,575	0,564	0,51	0,452	0,516	0,533	0,19	0,48925
3,052	0,657	0,618	0,564	0,609	0,604	0,13	0,39676
3,533	0,734	0,71	0,679	0,705	0,705	0,06	0,21198
4,002	0,812	0,799	0,792	0,797	0,802	0,01	0,04002

Tabla 3: Mediciones de la pila de combustible de 5 celdas

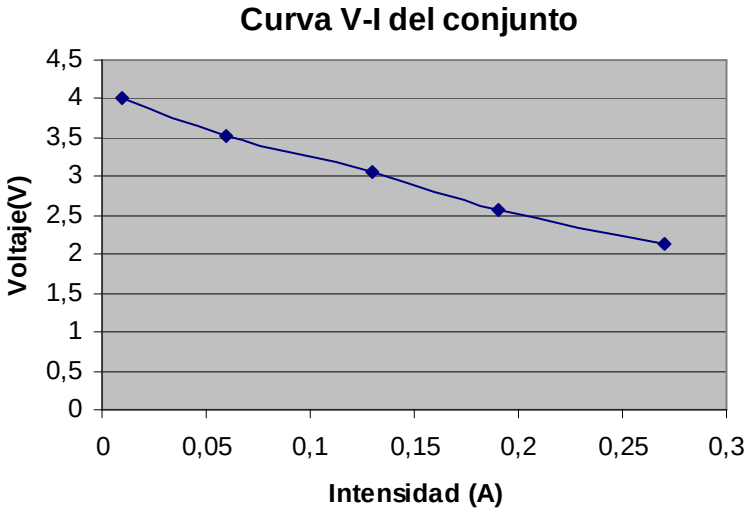


Figura 35: Curva V-I de la pila de combustible de 5 celdas

En la tabla que se muestra a continuación (Tabla 4) se quiere hacer ver que ante cambios en el punto de operación de la pila de combustible, su respuesta es similar a la de un sistema de segundo orden. Primero se alcanza la intensidad mínima y luego la máxima. La hidratación y el calor mejoran el funcionamiento y con el paso del tiempo es posible que se encharque alguna zona haciendo disminuir los valores.

		CELDAS							
V. Fuente	**V. Pila**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**I. Max**	**I. Min**	**I. Estable**
	1,656	0,338	0,343	0,335	0,356	0,284	0,85	0,52	0,74
	1,754	0,311	0,353	0,36	0,393	0,337	0,86	0,66	0,86
	2,191	0,418	0,435	0,439	0,478	0,421	0,66	0,62	0,62
1,4	1,695	0,36	0,415	0,348	0,328	0,244	0,88	0,83	0,84
1,35	1,682	0,337	0,419	0,358	0,326	0,242	0,89	0,86	0,88
1,3	1,679	0,332	0,412	0,349	0,323	0,263	0,92	0,87	0,9
1,2	1,458	0,29	0,391	0,297	0,296	0,184	1,01	0,93	0,97
1,1	1,377	0,279	0,39	0,289	0,275	0,144	1,03	1	1,01

Tabla 4: Mediciones de la pila de combustible de 5 celdas

En la siguiente tabla se pretende estudiar la variación de potencia a lo largo del tiempo:

t (min)	V. Pila	V. C1	V. C2	V. C 3	V. C4	V. C5	I. Estable	Potencia
0	1,674	0,292	0,319	0,338	0,403	0,322	0,36	0,60264
10	1,637	0,292	0,308	0,312	0,403	0,322	0,61	0,99857
20	1,686	0,272	0,312	0,356	0,405	0,341	0,72	1,21392
30	1,661	0,266	0,32	0,342	0,408	0,325	0,77	1,27897
40	1,679	0,266	0,325	0,343	0,405	0,34	0,8	1,3432
50	1,671	0,278	0,309	0,317	0,409	0,358	0,78	1,30338
60	1,656	0,275	0,314	0,313	0,403	0,351	0,8	1,3248
70	1,629	0,269	0,311	0,308	0,395	0,346	0,78	1,27062
80	1,611	0,268	0,312	0,289	0,401	0,341	0,78	1,25658
90	1,611	0,265	0,307	0,291	0,412	0,336	0,78	1,25658
100	1,615	0,26	0,311	0,289	0,414	0,341	0,78	1,2597
110	1,591	0,271	0,3	0,274	0,398	0,348	0,78	1,24098
120	1,658	0,28	0,315	0,301	0,41	0,352	0,78	1,29324
130	1,627	0,277	0,308	0,285	0,389	0,368	0,78	1,26906
140	1,588	0,279	0,31	0,273	0,377	0,349	0,78	1,23864
150	1,528	0,275	0,302	0,259	0,356	0,336	0,78	1,19184
160	1,539	0,269	0,295	0,264	0,361	0,35	0,78	1,20042
170	1,513	0,258	0,289	0,252	0,372	0,342	0,75	1,13475
180	1,52	0,245	0,27	0,286	0,376	0,343	0,75	1,14
190	1,639	0,267	0,298	0,341	0,4	0,333	0,74	1,21286
200	1,403	0,225	0,252	0,297	0,342	0,287	0,74	1,03822
210	1,681	0,291	0,34	0,344	0,411	0,295	0,74	1,24394
220	1,727	0,295	0,334	0,343	0,437	0,318	0,73	1,26071
230	1,683	0,292	0,339	0,337	0,409	0,306	0,73	1,22859
240	1,695	0,289	0,344	0,333	0,406	0,323	0,73	1,23735
250	1,66	0,262	0,335	0,351	0,398	0,314	0,73	1,2118
260	1,668	0,27	0,338	0,356	0,385	0,319	0,73	1,21764
270	1,691	0,265	0,341	0,353	0,41	0,322	0,71	1,20061
280	1,674	0,269	0,329	0,36	0,395	0,321	0,71	1,18854
290	1,681	0,271	0,324	0,358	0,402	0,326	0,71	1,19351
300	1,693	0,268	0,329	0,354	0,418	0,324	0,7	1,1851
310	1,672	0,257	0,315	0,351	0,409	0,34	0,71	1,18712

Tabla 5: Mediciones de la pila de combustible de 5 celdas

Todas las celdas mantienen unos voltajes constantes con respecto a sus valores estables. El las celdas de los extremos suele haber problemas de falta o de exceso de hidratación, con lo que sus valores suelen diferir del resto de celdas.

4 Pila de combustible de sección circular: versión primera

De este primer diseño se pudieron extraer pocos resultados técnicos debido a un percance principal: la MEA se había estropeado a causa del sellante de tuberías Loctite 542. Esto se podía apreciar a simple vista a través de la malla metálica, en la franja donde era visible el Nafion, que aparecía "hinchado".

Esto se hizo patente cuando los resultados eléctricos se mostraron muy pobres, prácticamente nulos, resultando voltajes de decenas de milivoltios e intensidades de unos pocos miliamperios, lo que resultó en una potencia media del orden de microvatios, con lo que no merecía la pena tener los valores resultantes en consideración.

4.1 Prueba de estanqueidad

A raíz de esto y para mejorar un segundo diseño, se decide realizar una prueba de estanqueidad para comprobar si el primer diseño es válido en este aspecto, si la cámara interior se mantiene aislada herméticamente.

Para ello se sumergió la pila en una cuba de agua y mientras estaba sumergida se introdujo aire a presión en la cámara interna. Las fugas saldrían a relucir en forma de burbujeo.

Los resultados fueron los siguientes:

- Fugas menores en dos puntos entre el cilindro exterior y el sellante. No hay una explicación clara a estas fugas. Pudieron ser debidas al deterioro del Nafion, al deterioro de la cinta de doble cara, o a la

falta o mal acondicionamiento del sellante Loctite 5398 en esos puntos concretos. Tampoco hay una solucion clara. Simplemente hay que tener más cuidado a la hora de echar el sellante sobre los cilindros de plástico y no escatimarlo.

- Fuga principal a través de los dos cables soldados al cilindro interior. Durante el diseño se pensó que con el recubrimiento termorretráctil sería suficiente para que entre los cables no hubiera fugas. Es un error difícil de imaginar, pero con fácil solución: sellar al final de los cables y su recubrimiento con Loctite 5398.

El resultado de la MEA estropeada por el sellante para tuberías Loctite 542 es el que se muestra en la Figura 36.

Figura 36: MEA corrupta de la primera versión

5 Pila de combustible de sección circular: versión segunda

Una vez que la pila cilíndrica ya es operativa es hora de hablar de resultados y rendimientos.

Para hacerse una idea de las posibilidades que ofrece esta pila a continuación se mencionan las posibilidades brutas que tiene:

- Tensiones:

V_{max} = 0,8 - 1 V por celda

V_{med} = 0,4 – 0,5 V por celda

- Intensidades según el medio donde este la pila:

I (con O_2 forzado) = 100 – 200 mA/cm^2

I (con aire forzado) = 50 – 100 mA/cm^2

I (con aire libre) = 20 – 50 mA/cm^2

Las condiciones en las que se ha probado la pila son en aire libre y la superficie funcional de la pila es de 36 cm^2 aproximadamente, luego debería ofrecer intensidades entre 720 y 1800 mA.

5.1 Curva V-I

Lo primero que se realiza es ver si varían mucho los resultados según el caudal de hidrógeno que se le aplique, en el caso más desfavorable ante falta de hidrógeno: en cortocircuito.

Los resultados obtenidos fueron:

Caudal	Intensidad (A)
15 ml/min	1,93
20 ml/min	1,99

Tabla 6: Intensidad de cortocircuito según caudal en pila cilíndrica

Como no hay apenas variación de la intensidad de cortocircuito, los resultados serán parejos aplicando un caudal de 15 ml/min que un caudal de 20ml/min. Por otra parte, como consecuencia, no se esperan mejoras significativas si se aumentase el caudal por encima de 20ml/min.

A continuación se fija el caudal en 20 ml/min y se hace una barrido de voltajes gracias a la carga del laboratorio, desde 0,00 V hasta el valor de circuito abierto, e incrementando cada vez en +0,05 V.

Los resultados obtenidos fueron:

Carga fijada (V)	I (A)	V (V)	P (W)
0,00	1,99	0,325	0,647
0,05	1,83	0,349	0,639
0,10	1,66	0,372	0,618
0,15	1,49	0,400	0,596
0,20	1,35	0,425	0,574
0,25	1,21	0,450	0,545
0,30	1,04	0,480	0,499
0,35	0,92	0,505	0,465
0,40	0,79	0,529	0,418
0,45	0,66	0,553	0,365
0,50	0,54	0,585	0,316
0,55	0,42	0,618	0,260
0,60	0,31	0,649	0,201
0,65	0,18	0,678	0,122
0,70	0,09	0,715	0,064
0,75	0,02	0,753	0,015
0,80	0	0,762	0,000

Tabla 7: Variaciones en la carga de la pila cilíndrica

A partir de la Tabla 7 se puede obtener la gráfica característica V-I:

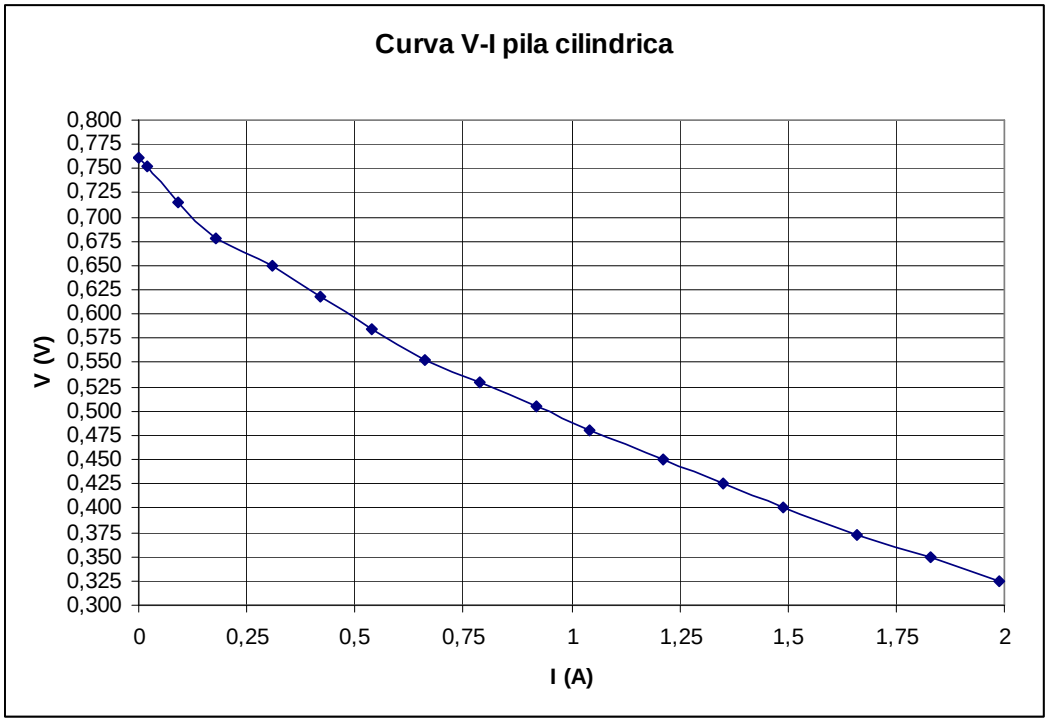


Figura 37: Curva V-I de la pila cilíndrica

5.2 Espectro de impedancia

Se realiza por medio del Analizador de Respuesta en Frecuencia. Nos indica las distribuciones de las pérdidas de la pila. Se hace un barrido de frecuencias, y según las impedancias óhmicas a las distintas frecuencia, se sabe que componente causa la mayor parte de las pérdidas.

Para esta prueba se hace un barrido de frecuencias en escala logarítmica con 5 puntos por década uniformemente distribuidos y que no sean múltiplos de 50 Hz para que no interfieran la frecuencia de red (50 Hz) y sus armónicos en la medida.

Los resultados son los siguientes:

	Impedancia	
Frecuencia (Hz)	**Parte Real (Ω)**	**Parte Imaginaria (Ω)**
0,1	0,83537779	0,01428988
0,16	0,89242694	0,00482854
0,25	0,85622492	0,005081
0,4	0,91462292	0,04185271
0,63	0,91249805	0,07053332
1	0,86710825	0,10954125
1,6	0,83577379	0,16548767
2,5	0,77345871	0,20435661
4	0,6921196	0,23831589
6,3	0,5996917	0,25331969
10	0,50289544	0,24636594
16	0,41891511	0,21529312
25	0,3543047	0,18130687
40	0,30872176	0,1400424
63	0,2748318	0,10992488
105	0,2504801	0,08017931
160	0,23680636	0,06044922
255	0,22683246	0,04368105

405	0,21900729	0,02961095
630	0,21355784	0,01898439
1005	0,19394287	-0,01332372
1600	0,1996273	-0,02345082
2500	0,20283	-0,04133997
4000	0,20211059	-0,06723324
6300	0,20275514	-0,10644883
10000	0,20801335	-0,16977249
16000	0,20961421	-0,27023301
25000	0,22138015	-0,41935244
40000	0,20701698	-0,65737403
63000	0,83537779	0,01428988

Tabla 8: Espectro de impedancia

Y a continuación se muestra su representación gráfica:

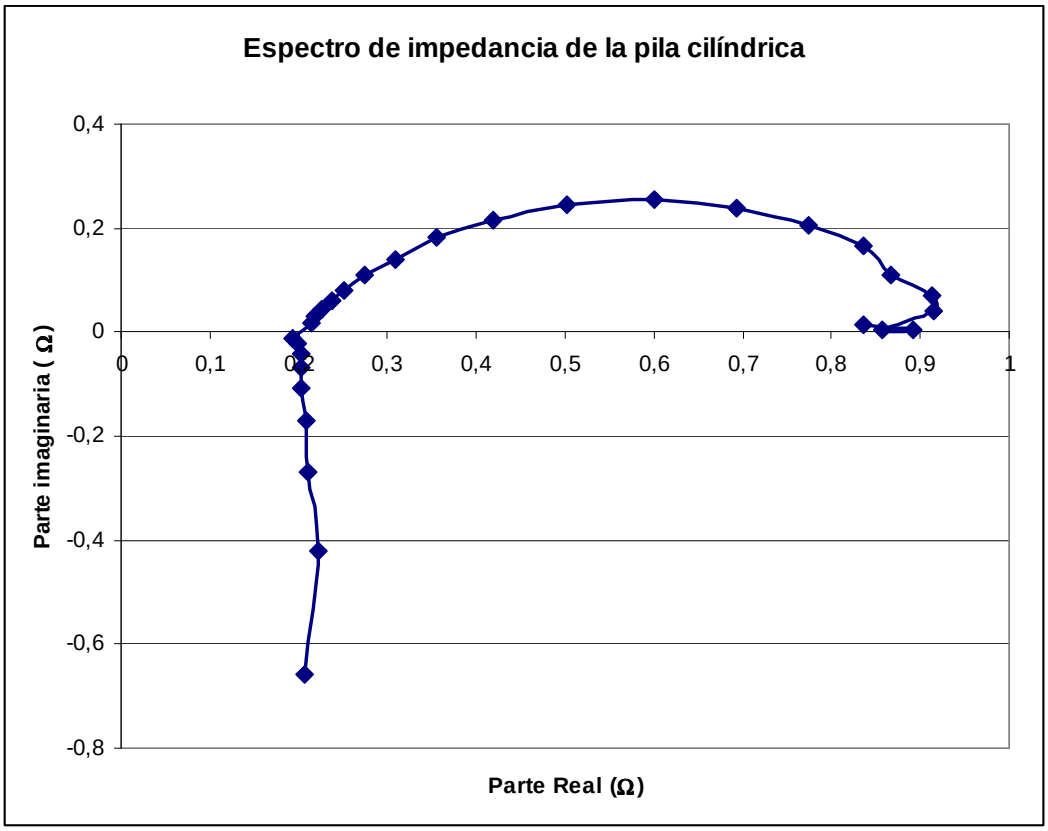


Figura 38: Espectro de impedancia

Capítulo 4 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En esta sección se discuten los experimentos y ensayos documentados en secciones anteriores. Una vez quedan las conclusiones establecidas, se toman medidas para mejorar el resultado analizado.

1 Prueba de compresibilidad

Después de analizar los resultados de la prueba de compresibilidad de la página 47, se llegan a las siguientes conclusiones:

- El viton es el mejor sellante entre piezas de metacrilato dada su alta compresibilidad.
- La silicona también es un buen sellante, no muy distante en resultados frente al viton, y además tiene la ventaja de que es más barato que su rival en resultados.

Luego para futuros diseños, y teniendo en cuenta el coste de los materiales para una fácil implantación industrial y posterior introducción en el mercado, se elige la silicona como sellante entre las capas de metacrilato.

2 Pila de combustible de 5 celdas

Después de analizar los resultados de las gráficas V-I y los distintos valores de cada celda estudiados en la página 50, se llega a las siguientes conclusiones:

- La pila requiere de un determinado tiempo para alcanzar su valor estable.
- Incluso cuando alcanza su valor estable, no es un valor "puramente estable", sino con variaciones debido a inestabilidades dentro de la pila como son inundaciones o sequedad en determinadas celdas.
- Hay que controlar el nivel de humedad de la pila y saber cuando hay que humectar, y en el caso de alcanzar el mercado, el usuario normalmente ni está dispuesto a hacer un control casi constante del nivel de humedad y sequedad de la pila, ni está cualificado para saber cuando humectar.
- Las celdas de los extremos siempre tienen valores ligeramente menores que el resto como norma general. Las posibles causas de este hecho son una diferencia de presión en los extremos debida a una posible flexión del metacrilato, o una distribución no uniforme del hidrógeno o/y del oxígeno en el interior de la pila.

3 Pila de combustible de sección circular: versión primera

Después de analizar los pocos resultados que se obtuvieron de esta primera versión de la pila de sección circular o pila cilíndrica en la página 51, se llega a las siguientes conclusiones:

- El sellante de tuberías Loctite 542 corrompió el Nafion, o, explicado de otra forma, hizo que la membrana de Nafion perdiera sus propiedades químicas, haciendo que los resultados eléctricos fueran muy escasos y, por tanto, descartables.
- Las fugas en los puntos concretos entre el sellante y el cilindro exterior se intentarán solventar no escatimando en el sellante y poniendo especial atención en que filtre hasta la cinta de doble cara, para prevenir fugas desde el punto más cercano al interior posible.
- La fuga entre cables se solventará trabajando solo con un cable. Anteriormente se pusieron dos cables, debido a las expectativas eléctricas de la pila de sección circular. Como estas expectativas quedan fuera del alcance en estos momentos, al tratarse de versiones alfa y beta de la pila cilíndrica, se usará sólo un cable de cobre de 2mm de diámetro, con su correspondiente protección, y sellando con silicona Loctite 5398 el extremo exterior de la protección con el cable.

4 Pila de combustible de sección circular: versión segunda

4.1 Curva V-I

Después de analizar los resultados de las gráficas V-I estudiados en la página 55, se llegan a las siguientes conclusiones:

- A menor voltaje la potencia se mantiene más constante (el decremento absoluto es menor) como se aprecia en la Figura 39, y se podría decir que la zona de trabajo óptima sería entre 0,325 V y 0,4 V medidos en la pila.

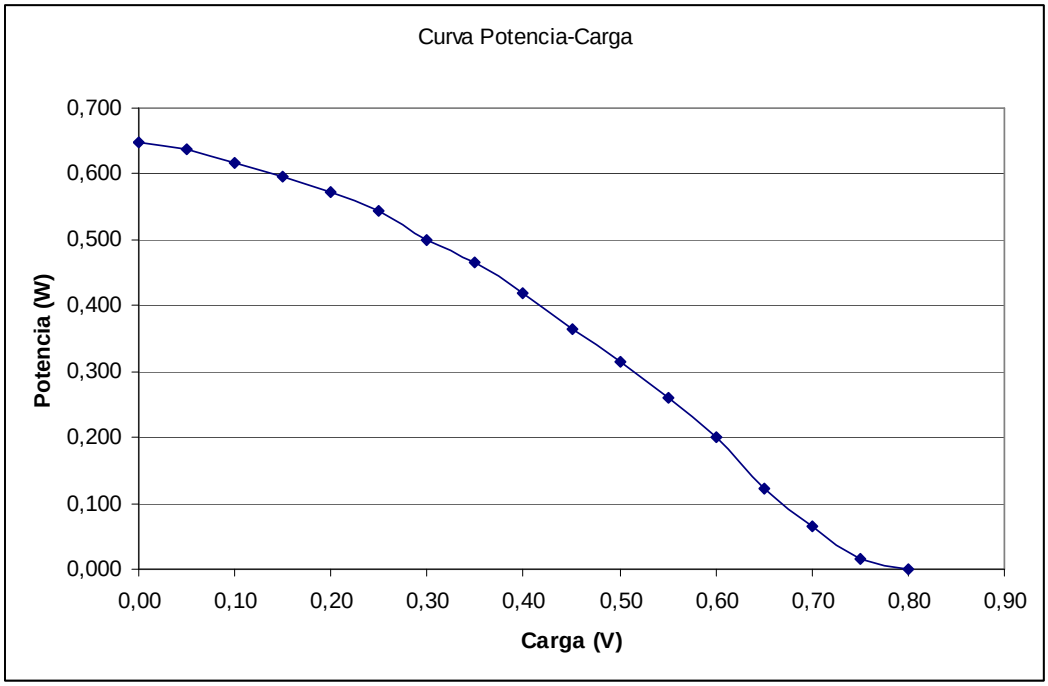


Figura 39: Curva Potencia-Carga de la pila cilíndrica

- La fuga principal del cable del diseño anterior se ha solventado con éxito.
- Sin realizar la prueba de estanqueidad, a simple vista no se aprecian fugas que haya que tener en consideración.

4.2 Espectro de impedancia

Después de analizar los resultados hay que destacar que es algo común que salgan semicírculos.

El extremo izquierdo del semicírculo, antes de que la gráfica baje verticalmente, nos indica que la membrana está funcionando en condiciones correctas, ya que representa una resistencia baja, teóricamente de 0,2 Ω.

El extremo derecho del semicírculo representa pérdidas notables (unos 0,65Ω, que se añaden a los 0,2Ω antes mencionados), pero no se pudo decir con precisión a qué son debidas o qué componente las causa. Seguramente sean problemas de contacto o de difusión, más probablemente de esto último.

La línea que desciende verticalmente se debe a que al subir la frecuencia sube la impedancia de la inductancia asociada a la creación de campos magnéticos, ya que ambas están directamente relacionadas.

$$f \uparrow \rightarrow Lw \uparrow$$

5 Conclusiones

A continuación se realiza un resumen de las distintas conclusiones que se han alcanzado de las discusiones anteriores.

- La silicona será el sellante a usar en pilas planas de aquí en adelante, debido a su buena deformabilidad y a su relación rendimiento-coste.
- No se usará sellante de tuberías Loctite 542 en la pila cilíndrica, porque tiene una mala reacción con el Nafion, estropeando este último.
- Sólo se usará como sellante Loctice 5398, confiando plenamente la estanqueidad a este producto.
- El uso de un solo cable de cobre en vez de dos ha tenido los resultados esperados, ahorrando costos en cobre y posibles fugas por usar dos.
- El rendimiento de la pila cilíndrica es aceptable, tratándose de una versión de desarrollo temprana.
- Habría que investigar más a fondo a que se deben las pérdidas no identificadas en el espectro de impedancia.

Capítulo 5 FUTUROS DESARROLLOS

Debido a la naturaleza del producto que se quiere fabricar, es muy difícil poder decir a ciencia cierta futuros desarrollos, ya que en este terreno la innovación está a la orden del día.

Pilas de combustible en general

En el desarrollo de pilas de combustible en general se buscan ciertos objetivos como por ejemplo el uso de nuevos materiales que hagan la pila más compacta pero a la vez más robusta, que eviten la flexión al ejercer presión en el caso de la pila plana.

También se buscan nuevos sellantes que garanticen la estanqueidad y soporten temperaturas y condiciones difíciles; o directamente un ingenio mecánico de cierre hermético y que evite el uso del sellantes.

Otra opción es encontrar un sustituto de la membrana de Nafion, que ofrezca mejor rendimiento, tenga un precio más económico o/y sea más resistente y tenga un método de creación de la MEA menos agresivo.

Pila de combustible en particular

En particular para la pila de combustible de sección circular una idea de futuro sería hacerla más compacta y sin necesidad de sellantes, sustituyendo las tapas de metacrilato y las tapas de plástico por una pieza única de cierre, que se rosque con el cilindro exterior y con junta tórica en

la base de la rosca, de tal forma que evite fuga de gases simplemente roscando bien la tapa.

Otro posible desarrollo, éste claramente con vistas a la comercialización, y que, en una de las sesiones de *brainstorm* (para los que no dominen la lengua de Shakespeare significa tormenta de ideas) que tuve con mis directores, un miembro del CSIC, Eugenio Villanueva, sugirió, es hacer la pila de combustible cilíndrica del tamaño necesario para que quepa la botella de hidrógeno en el interior, de tal forma que la pila en sí parezca un cinturón de la propia botella de hidrógeno, o según el tamaño de la pila, incluso a modo de camisa hermética. Las ventajas de esta idea es que la fuente de energía, entendida como la pila de combustible más el hidrógeno, es manejable y transportable fácilmente, que se reduce el volumen ocupado y que si se gasta el combustible no hay más que sacar la botella de hidrógeno y meter otra dentro del cinturón, tal como se muestra en la Figura 40.

Figura 40: Botella de hidrógeno comercial

Capítulo 6 BIBLIOGRAFÍA

[1] Diseño, caracterización y modelado de una nueva pila de combustible. Tesis doctoral de Domingo M. Guinea Gª-Alegre. Defendida el 11 de diciembre de 2009 en la ETSI-ICAI de la Universidad Pontificia de Comillas en Madrid.

[2] Wikipedia. www.wikipedia.org

Sección de Introducción, página 10.

- *"Se trataba de una serie de pares de discos apilados ..."*
- *"La celda o pila Daniell original consiste ..."*

Parte II DATASHEETS

Datasheets:

- Loctite 5398
- Metacrilato
- Carga electrónica AMREL ZVL 100-10-20L
- Impedancímetro AMREL

LOCTITE® 5398™

November 2004

PRODUCT DESCRIPTION

LOCTITE® 5398™ provides the following product characteristics:

Technology	Silicone
Chemical Type	Acetoxy silicone
Appearance (uncured)	Red
Components	One component - requires no mixing
Cure	Room temperature vulcanizing (RTV)
Application	Bonding or Sealing

LOCTITE® 5398™ is generally used for sealing applications, but also for bonding and for high temperature protection. It is primarily used in industrial bonding/sealing applications, heating engineering, industrial ovens, household electrical and industrial heating equipment. This product is typically used in applications up to 350 °C.

TYPICAL PROPERTIES OF UNCURED MATERIAL

Specific Gravity @ 25 °C	1.04
Viscosity @ 25°C, mPa·s (cP)	20,000
Flash Point - See MSDS	

TYPICAL CURING PERFORMANCE

Surface Cure

LOCTITE® 5398™ becomes tack free on exposure to atmospheric moisture within 8 minutes at 23±2°C / 50±5%RH.

TYPICAL PROPERTIES OF CURED MATERIAL

After 14 days @ 25 °C

Physical Properties:

Shore Hardness, ASTM D 2240, Durometer A		35
Elongation, at break, ASTM D 412, %		200
Tensile Strength, ASTM D 412	N/mm²	2
	(psi)	(290)

Electrical Properties:

Dielectric Breakdown Strength, ASTM D 149, kV/mm	23.3
Volume Resistivity, IEC 60093, Ω·cm	7.3×10^{15}
Dielectric Constant , IEC 60250:	
1 MHz	2.4

TYPICAL PERFORMANCE OF CURED MATERIAL

Adhesive Properties

Cured for 14 days @ 25 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

AG3 Aluminum test pieces(1 mm thick bondline)	N/mm²	0.7
	(psi)	(100)

Cured for 14 days @ 25 °C followed by 72 hours @ 250 °C

Lap Shear Strength, ISO 4587:

AG3 Aluminum test pieces(1 mm thick bondline)	N/mm²	0.8
	(psi)	(115)

Cured for 14 days @ 25 °C followed by 72 hours @ 50 °C / 95 % RH

Lap Shear Strength, ISO 4587:

AG3 Aluminum test pieces(1 mm thick bondline)	N/mm²	0.7
	(psi)	(100)

GENERAL INFORMATION

This product is not recommended for use in pure oxygen and/or oxygen rich systems and should not be selected as a sealant for chlorine or other strong oxidizing materials.

For safe handling information on this product, consult the Material Safety Data Sheet (MSDS).

Directions for use

1. For best performance bond surfaces should be clean and free from grease.
2. Moisture curing begins immediately after the product is exposed to the atmosphere, therefore parts to be assembled should be mated within a few minutes after the product is dispensed.
3. When joint is assembled pressure should be applied to spread the adhesive out and fill the joint completely.
4. The bond should be allowed to cure (e.g. seven days), before subjecting to heavy service loads.

Not for product specifications

The technical data contained herein are intended as reference only. Please contact your local quality department for assistance and recommendations on specifications for this product.

Storage

Store product in the unopened container in a dry location. Storage information may be indicated on the product container labeling.
Optimal Storage: 8 °C to 21 °C. Storage below 8 °C or greater than 28 °C can adversely affect product properties. Material removed from containers may be contaminated during use. Do not return product to the original container. Henkel Corporation cannot assume responsibility for product which has been contaminated or stored under conditions other than those previously indicated. If additional information is required, please contact your local Technical Service Center or Customer Service Representative.

Conversions

(°C x 1.8) + 32 = °F
kV/mm x 25.4 = V/mil
mm / 25.4 = inches
N x 0.225 = lb
N/mm x 5.71 = lb/in
N/mm² x 145 = psi
MPa x 145 = psi
N·m x 8.851 = lb·in
N·mm x 0.142 = oz·in
mPa·s = cP

Note

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Henkel Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Henkel Corporation's products. Henkel Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Henkel Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more United States or foreign patents or patent applications.

Trademark usage

Except as otherwise noted, all trademarks in this document are trademarks of Henkel Corporation in the U.S. and elsewhere. ® denotes a trademark registered in the U.S. Patent and Trademark Office.

Reference 1

METACRILATO

Es un material acrílico, que procede del ácido acrílico y de la polimerización de éste último. El polimetacrilato de metilo es un plástico (Termoplástico) duro, resistente, transparente, de excelentes propiedades ópticas con alto índice de refracción, buena resistencia al envejecimiento y a la intemperie.

Su resistencia a la rotura es siete veces superior a la del cristal a igualdad de espesores, por lo que resulta más resistente a los golpes. En horticultura esto significa reducción de gastos por rotura y menores costes de mantenimiento en invernaderos.

Es un material ligero con una densidad de 1.19 kg/m^3. Presenta buena resistencia mecánica y estabilidad. A pesar de su ligereza puede soportar una sobrecarga de 70 kg/m^2, lo cuál es importante para aquellas zonas con riesgo de nevadas.

La transparencia de este plástico está comprendida entre el 85 y el 92%, por lo que deja pasar casi todos los rayos UV y su poder de difusión es casi nulo.Tiene una gran opacidad a las radiaciones nocturnas del suelo.

El coeficiente de conductividad térmica del polimetacrilato de metilo es 0,16 KCal/m.h.ºC mientras que el del vidrio es de 0,64 KCal/m.h.ºC, lo que impide en el caso de los invernaderos su enfriamiento nocturno .

Su duración es mayor que la del poliéster.

En cuánto a sus inconvenientes el principal de ellos es su elevado coste, que junto al tipo de estructura requerida hacen que las construcciones con este material sean de costes elevados. El metacrilato es fácil de rallar con cualquier instrumento, con lo que habrá que considerar este aspecto como factor negativo.

PROPIEDADES METACRILATO
(Valores tipo a 23ºC y 50% de humedad relativa)

PROPIEDADES MECANICAS	Norma	Unidad	Colada	Extrusión
Densidad	DIN53479	g/c m^3	1.19	1.19
Resistencia al impacto Charpy	ISO 179 1/D	kJ/ m^2	15	15
Resistencia al impacto con entalladura (Izod)	ISO 180 1/A	kJ/ m^2	1.6	1.6
Resistencia a la tracción (-40 ^{0}C)	DIN53455	Mpa	110	100
Resistencia a la tracción (+23 ^{0}C)	DIN53455	Mpa	80	72
Resistencia a la tracción (+70 ^{0}C)	DIN53455	Mpa	40	35
Estiramiento a rotura	DIN53455	%	5.5	4.5
Coeficiente de Poisson	-	-	0.45	0.45
Resistencia a la flexión Probeta standard (80x10x4mm)	DIN53452	Mpa	115	105
Tensión por compresión	DIN53454	Mpa	110	103
Tensión de seguridad max. (hasta 40º C)	-	Mpa	5...10	5...10
Módulo de elasticidad E (Corto/largo plazo)	DIN 53457	Mpa	3300/3200	3300/3200
Módulo de torsión G en 10 Hz	DIN53445	Mpa	1700	1700
Resistencia a la fatiga en test de doblado alternativo aprx. a 10 ciclos (probeta con entalladura/sin entallad)	-	Mpa	40 / 20	30 / 10
Dureza brinell H961/30	ISO 2039-1	Mpa	200	190
Resistencia a la abrasión con 1.600 gr. de abrasivo	Similar ASTM-D673 44	%	98	98
Coeficiente de fricción plástico sobre plástico	-		0.80	0.80
Coeficiente de fricción plástico sobre acero	-		0.50	0.50
Coeficiente de fricción acero sobre plástico	-		0.45	0.45

PROPIEDADES ELECTRICAS	Norma	Unidad	Colada	Extrusión
Resistencia de paso específica	DINVDE 0303,Part3	Ohm.cm	>10e15	>10e15
Resistencia eléctrica de superficie	DINVDE 0303,Part3	Ohm	5x10e13	5x10e13
Rigidez dieléctrica (probeta de 1 mm. de espesor)	DIN VDE 0303,Part2	Kv./mm	30	30
Constante dieléctrica a 50 Hz	DIN VDE 0303,Part4	–	3.60	3.70
Constante dieléctrica a 0,1 Hz	DIN VDE 0303,Part4	–	2.70	2.80
Pérdida dieléctrica en 50 Hz	DIN VDE 0303,Part4	–	0.06	0.06
Pérdida dieléctrica en 0,1 Hz	DIN VDE 0303,Part4	–	0.02	0.03
Resistencia a descargas eléctricas	DIN VDE 0303,Part1	–	KC>600	KC>600

PROPIEDADES TERMICAS	Norma	Unidad	Colada	Extrusión
Coeficiente de dilatación lineal 0...50ºC	DIN 53752-A	1/K mm/mºC	0.07	0.07
Conductividad térmica	DIN 52612	W/ mK	0.19	0.19
Coeficiente trnsmisión term. 1 mm de espesor	DIN 4701	W/ m^2K	5.8	5.8
Coeficiente trnsmisión term. 3 mm de espesor	DIN 4701	W/ m^2K	5.6	5.6
Coeficiente trnsmisión term. 5 mm de espesor	DIN 4701	W/ m^2K	5.3	5.3

Coeficiente trnsmisión term. 10 mm de espesor	DIN 4701	W/ m^2K	4.4	4.4
Calor específico	-	J/g K	1.47	1.47
Temperatura aprox. de moldeo (temp.horno)	-	^{0}C	160...175	150...160
Temperatura máxima en superficie (radiador IR)	-	^{0}C	200	180
Temperatura permanente maxima de servicio	-	^{0}C	80	70
Temperatura de recontracción	-	^{0}C	>80	>80
Temperatura de ignición	DIN 51794	^{0}C	425	430
Comportamiento al fuego (espesr >1,5 mm)	DIN 4102	–	B2	B2
Indice VICAT (método B)	DIN ISO 306	^{0}C	115	102
Estabilidad dimensional al calor (Método Martens)	DIN 53458	^{0}C	95	85
Termoresistencia de forma ISO 75 tensión aflexión 1.8 MPa	DIN 53461	^{0}C	105	90
Termoresistencia de forma ISO 75 tensión aflexión 0.45 MPa	DIN 53461	^{0}C	113	95

PROPIEDADES OPTICAS (de tipos incoloros)	Norma	Unidad	Colada	Extrusión
Transmisión del material en 3 mm, campo visible (380...780mm) Iluminación standard D65	DIN 5036	%	92	92
Pérdida por reflexión en el campo visible (para cada superficie límite)	-	%	4	4
Transmisión total de energía (Espesor 3 mm)	DIN67507	%	85	85
Grado de absorción en el campo visible (Esp. 3 mm)	-	%	<0.05	<0.05
Indice de refracción n 20/D	DIN53491	-	1.491	1.491

PROPIEDADES ACUSTICAS	Norma	Unidad	Colada	Extrusión
Velocidad de transmisión del sonido (temp. ambiente)	-	m/s	2700..2800	2700..2800
Indice RW de atenuación acústica 4 mm	-	dB	26	26
Indice RW de atenuación acústica 6 mm	-	dB	30	30
Indice RW de atenuación acústica 10 mm	-	dB	32	32

COMPORTAMIENTO AL AGUA	Norma	Unidad	Colada	Extrusión
Absorción de agua (desde estado seco) 24 h probeta de 50x50x4 mm	DIN 53495	mg	30	30
Peso máximo obtenido durante la inmersión	DIN 53495	mg	2.1	2.1
Permeabilidad al vapor de agua	-	gcm cm^2Pa	$2.3x10^{-10}$	$2.3x10^{-10}$
Permeabilidad al N2	-	gcm cm^2Pa	$4.5x10^{-15}$	$4.5x10^{-15}$
Permeabilidad al O2	-	gcm cm^2Pa	$2.0x10^{-14}$	$2.0x10^{-14}$
Permeabilidad al CO2	-	gcm cm^2Pa	$1.1x10^{-13}$	$1.1x10^{-13}$
Permeabilidad al aire	-	gcm cm^2Pa	$8.3x10^{-15}$	$8.3x10^{-15}$

ZVL Series *of Zero-volt Programmable*

Why Choose the ZVL Series?

Traditional dc Electronic Load Solutions have inherent limitations for testing single cell fuel cells and PV cells/modules. DC electronic loads use power dissipating components that require a minimum compliance voltage of 0.6Vdc ~ 1.5Vdc for operation. However, single cell fuel cell and PV cells often require the dc electronic load to operate at below 0.1Vdc. To achieve this, an external booster supply connected in series is required. The drawbacks of using an external booster supply are twofold: cost and cumbersome hardware. This is especially the case for single cell fuel cells. Single cells, depending on the active cell area, can range from 10Adc up to 200Adc. The additional cabling can be troublesome and costly. In addition, booster supplies range between $500 ~ $1K+ in cost.

AMREL's ZVL Series of Zero-volt dc Electronic eLoads was designed for Fuel Cell and PV Testing, offering the industry's highest current rating for "0-Volt" operation along with custom-tailored voltage and current ratings to meet diverse applications. All this in a compact fully-integrated rackmount-ready package!

Markets and Applications:

- Fuel Cells
  - ➢ Single Cell and Short Stack Fuel Cell Characterization, Break-in and Testing Applications
  - ➢ Gstat Impedance Measurement (EIS & AC Modulation)
  - ➢ Polarization Curve Data Capture (CV & CC Control)
  - ➢ Durability
  - ➢ Lifetime Tests
  - ➢ Performance/Design Characterization
- Battery Testing
  - ➢ Dynamic Profiling
  - ➢ Battery Characterization
  - ➢ Charge/Discharge and Lifetime/Cycle Tests
- Power Electronics Testing
  - ➢ dc-dc Converters
  - ➢ ac-dc Power Supplies
  - ➢ Switching Power Supplies
  - ➢ POL (Point of Load)
- Power Electronic Components Testing
- Battery Chargers & Load Profile Simulation
- Battery Testing and Characterization
- Laboratories, Universities and R&D
- Defense/Aerospace/Avionics/Industrial ATE and Integrated Test Systems
- Portable Applications

ZVL SELECTOR GUIDE

ZVL XXX - YY - ZZZ

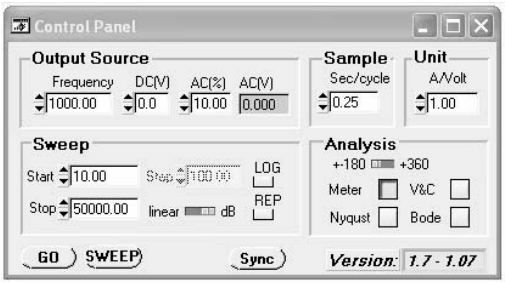
XXX -POWER | YY - VOLTAGE | ZZZ - CURRENT

Series	Model #	Power (W)	Voltage (Vdc)	Current (Adc)	V_{MIN} at I_{MAX}(Vdc)	Size (Height, Width)
ZVL	ZVL60-10-20L	60	10	20	0	4U, ½Rack
ZVL	ZVL100-10-20L	100	10	40	0	4U, ½Rack
ZVL	ZVL100-10-40L	100	10	40	0	4U, ¾Rack
ZVL	ZVL100-10-80L	100	10	80	0	4U, ½Rack
ZVL	ZVL100-150-20L	100	150	20	0	4U, ½Rack
ZVL	ZVL150-10-100L	150	10	100	0	4U, ½Rack
ZVL	ZVL200-10-40L	200	10	40	0	4U, ½Rack
ZVL	ZVL200-150-40L	200	150	40	0	4U, ½Rack
ZVL	ZVL300-10-100L	300	10	100	0	4U, ¾Rack
ZVL	ZVL300-150-40L	300	150	40	0	4U, ¾Rack
Custom-tailored Ranges Available		Voltage Range: 10Vdc ~ 150Vdc Rating Current Range: 5Adc ~ 100Adc Rating Power Range: 60W ~ 300W Rating				

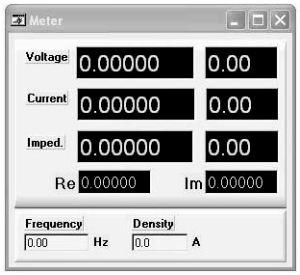
AMREL's Frequency Response Analyzer

Technical Features:

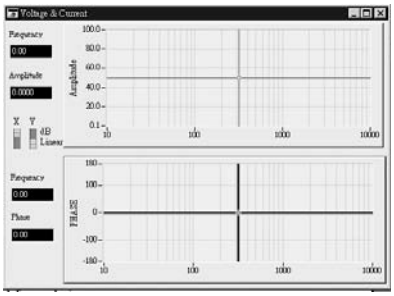
- Key Frequency Response Analyzer, Lock-in Amplifier, and Impedance Meter features packed into a single 1U box.
- Selective level meter for measuring small signals in noisy environments with micro-volt sensitivity..
- Simultaneous V/I measurement to ensure exact impedance and phase information.
- DDS Sine-wave generation, yielding frequency errors less than 0.02Hz.
- Customizable sample interval, providing tradeoff between measurement throughput and resolution.
- Dual Independent Signal Analyzers provide single channel impedance measurements or both channels to measure transfer functions, transconductance, impedance, signal analysis (FRA) data and other important parameters in polar/rectangular format.
- User-friendly features include: auto-gain, quick-set ac amplitude, signal overload (signal saturation) protection, and single entry sample interval without the complicated calculations. The above features allow the user to leapfrog application startup time and minimize errors.
- Auto-Gain Control and Flexible ranges to obtain maximum signal sensitivity and precision.
- Universal ac + dc output signals critical for Impedance Measurement/AC Modulation applications in the battery/fuel cell/electronic components & devices R&D, Testing and Production sectors.
- Auto noise/harmonic rejection to accurately measure signals in the micro-ohm range.
- GPIB/RS-232 and Optional USB//Ethernet provide state-of-the-art connectivity while satisfying diverse throughput/network security requirements (Ethernet option is field upgradeable).
- Embedded multi-channel controller (MCU-1) for simple instrument network expansion, control and troubleshooting.
- System-level Multi-channel Impedance Measurement can be achieved using the integrated MCU-1 capability and a switch matrix.
- Comprehensive application program with premium features - Nyquist, Bode, V/I, real-time display of impedance measurements and operating conditions, frequency sweeps with adjustable amplitude in log/linear format and auto-save for logged data to establish the FRA as the ultimate diagnostic tool.



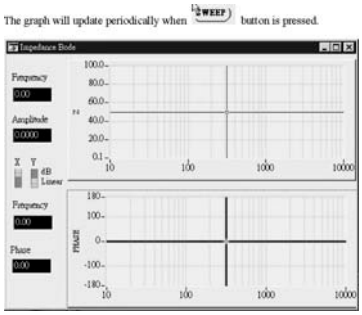
Control Panel



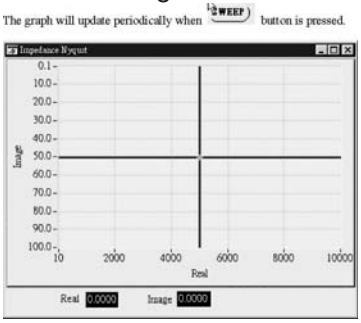
Real Time Monitoring



V/I Graph



Bode Plots



Nyquist Plots

Frequency Response Analyzer Specifications:

Generator

Waveform:	Sine Wave
Frequency Range:	0.1 Hz ~ 20 KHz
Frequency Resolution:	0.01Hz
Amplitude:	Up to 20% of DC Bias Setting or 1Vrms
Amplitude Resolution:	5mVPP
Distortion:	< 0.1%
Sweep Types:	Frequency – logarithmic and linear Amplitude – logarithmic and linear

FREQUENCY RANGE	AMPLITUDE RANGE	AC AMPLITUDE ACCURACY
0.1Hz ~ 10KHz	≤ 0.05Vrms 0.2Vrms ~ 0.8Vrms >0.8Vrms	2% 0.50% 2%
10KHz ~ 20KHz	≤ 0.05Vrms 0.2Vrms ~ 0.8Vrms >0.8Vrms	2% 0.50% 2%

dc Bias

Range:	10mV ~ 5V
Resolution:	10mV
Accuracy:	0.1%
Output Impedance:	50Ω

Analyzers - Two independent analyzers operate in parallel.

Range:	Auto
Sensitivity:	1μV
Dynamic Range:	90dB
Common Mode Rejection:	>80dB @ 100Hz
Cross Channel Isolation:	>90dB @ 10kHz
Coupling:	ac (- 3dB @ 2Hz)
DC Blocking Voltage:	250Vdc Common Mode/500Vdc Differential Mode
Differential Input Impedance:	>200KΩ
Maximum Input:	2Vp-p
ADC (Per Channel):	16 bit, 400K samples/second
Sample Interval:	10ms ~ 10s; Default Setting: 0.25s
Phase Accuracy:	1.0 degree

Magnitude Accuracy:

FREQUENCY RANGE	PEAK VRMS RANGE	VRMS ACCURACY	FREQUENCY RANGE	PEAK VRMS RANGE	VRMS ACCURACY
0.1Hz ~ 20KHz	.0036Vrms	2.00%	100Hz ~ 20 KHz	.8Vrms	0.20%
< 100Hz	.8Vrms	0.50%		.16Vrms	0.20%
	.16Vrms	0.50%		.054Vrms	0.20%
	.054Vrms	0.50%		0.50%	0.20%
	.027Vrms	0.50%	.011Vrms	0.50%	0.50%
	.018Vrms	0.50%	.0054Vrms		
	.011Vrms	2.00%			
	.0054Vrms	2.00%			

Pliego de Condiciones

Índice

Capítulo 1 Condiciones generales **3**

Capítulo 2 Condiciones económicas **6**

Capítulo 1 CONDICIONES GENERALES

Ya que el producto final no tiene interés comercial, debido a que se trata de un prototipo, sino mas bien interés científico, de desarrollo y divulgativo, se hará un pliego de condiciones general en el caso de querer replicar el producto con fines no comerciales.

Las condiciones y cláusulas que se establecen en este documento tratan de la contratación, por parte de persona física o jurídica, del hardware que ha sido desarrollado en este proyecto.

El cumplimiento de estas condiciones obliga a ambas partes, y son las que a continuación se exponen:

1. Las dos partes se comprometen desde la fecha de la firma del contrato, a cumplir todo lo que a continuación se estipula.

2. En el caso de reclamación o discrepancia en lo concerniente al cumplimiento por cualquiera de las dos partes, una vez agotada la vía del entendimiento, se tramitará el asunto por vía legal.

3. El suministrador se compromete a cumplir fielmente las condiciones técnicas, de diseño, fabricación y capacidad que se estipulen en la lista de materiales y especificaciones indicadas en el proyecto, a comprobar por el comprador desde la recepción del mismo.

4. La conformidad de los inspectores del comprador no exime al proveedor de la responsabilidad que le atañe en los defectos de diseño y construcción que se mostrasen con posterioridad. El suministrador garantiza igualmente, que el suministro efectuado está dotado de todas las medidas de seguridad exigidas por las Condiciones Generales y Económicas.

5. El plazo de entrega será de cinco semanas a partir de la fecha de la firma del contrato.

6. Si la entrega se retrasara más de las cinco semanas acordadas, el comprador podrá rescindir el contrato, siéndole retribuidas todas las cantidades abonadas.

7. El equipo está garantizado por 1 año a partir de la fecha de puesta en servicio del mismo, cubriendo la reparación de fallo interno o defecto de fabricación y excluyendo cualquier mal uso que se haga del equipo.

8. El plazo de puesta en servicio no será superior a seis meses a partir de la fecha de entrega del equipo.

9. La garantía sólo será válida siempre que se lleve a cabo una correcta instalación del equipo, así como un correcto uso del mismo. La garantía cesa por manipulaciones efectuadas por personal no autorizado expresamente por el suministrador.

10. El suministrador no asumirá ninguna responsabilidad superior a las aquí definidas, y en ningún caso pagará indemnizaciones por

cualquier otro daño o perjuicio directo o indirecto a personas o cosas por lucro cesante.

Capítulo 2 CONDICIONES ECONÓMICAS

Los precios indicados en este proyecto son firmes y sin revisión por ningún concepto, siempre y cuando se acepten dentro del período de validez posteriormente indicado. El período de validez del presupuesto es hasta el mes de diciembre de 2010.

La forma de pago del presente proyecto será:

- 15% a la recepción del pedido.
- 15% a la entrega de planos y documentación técnica.
- 50% a la entrega del equipo.
- 20% a la puesta en marcha del sistema, siempre y cuando este plazo no exceda los 90 días a contar desde la fecha de entrega del equipo. En caso de que se exceda este tiempo, este 20% se abonará transcurridos 90 días desde la entrega del equipo.

Presupuesto

Índice

Capítulo 1 Gastos directos **4**

Capítulo 2 Gastos indirectos **5**

Capítulo 3 Honorarios **7**

Capítulo 4 Coste total **9**

Índice de tablas

Tabla 1: Gastos directos *4*

Tabla 2: Coste total del producto terminado *9*

En este capítulo se calculará el precio unitario que alcanzará el producto final en función de tres partes:

- ✓ Honorarios (número de horas trabajadas por el Ingeniero Industrial con su correspondiente salario).
- ✓ Gastos directos (que englobará todos los gastos relacionados con el desarrollo del producto).
- ✓ Gastos indirectos (agrupa a aquellos gastos que no están relacionados directamente con la producción, pero que son necesarios para el desarrollo o ensayo del producto, como pueden ser la iluminación, el equipamiento, etc.).

Capítulo 1 GASTOS DIRECTOS

A continuación se detallan los materiales usados para la construcción de la pila de combustible de sección circular así como su coste unitario y su coste global total.

Lista de materiales	Unidades	Coste unidad	TOTAL
Electrodos	2	7,2	14,4
Nafion	1	7,2	7,2
Tapa de metacrilato	2	0,75	1,5
Tapa de plástico	2	0,5	1
Cilindro de hierro interno	1	2	2
Cilindro de hierro externo	1	2,3	2,3
Racor 1/8 de pulgadaX	2	1,7	3,4
Racor M5	1	0,1	0,1
Cinta de doble cara	2	0,05	0,1
Sellante Loctite 5398	1	3	3
Tornillos	2	0,05	0,1
Tuercas	2	0,05	0,1
Cable de cobre	1	0,05	0,05
Cubierta termorretráctil	1	0,05	0,05
Juntas tóricas	2	0,05	0,1
Arandela	1	0,05	0,05
		TOTAL	35,45

Tabla 1: Gastos directos

Todos los precios anteriores se han obtenido en función del coste unitario de cada producto o en función del peso del segmento o porción usada en proporción al coste de adquirir todo el producto.

Capítulo 2 GASTOS INDIRECTOS

Los gastos indirectos son aquellos gastos que no están relacionados con la fabricación y construcción, pero que de alguna manera son necesarios de forma implícita para desarrollar el producto. Estos gastos incluirían:

- Gastos de servicios generales:
  - Luz y equipos: 30 €

- Costes por amortización y utilización de los equipos: se debe tomar en cuenta el coste que aparece por la amortización tanto de los equipos usados como del software manejado para la realización de pruebas y ensayos sobre el producto. Los siguientes son los gastos por amortización y utilización de equipos:

  - Equipo informático de antigüedad aproximada 3 años.

    Tiempo de amortización de 5 años: 200 €/año.

    Tiempo de uso durante el proyecto: 3 meses

    $$\text{Coste} = 200\,{}^{€}\!/_{año} \times \frac{3}{12} = 50\ €$$

  - Programa LabView 8.5.

    Tiempo de amortización de 2 años: $45\,{}^{€}\!/_{año}$.

    Tiempo de uso durante el proyecto: 3 meses

    $$\text{Coste} = 45\,{}^{€}\!/_{año} \times \frac{3}{12} = 11{,}25\ €$$

- Carga electrónica.

  Tiempo de amortización de 20 años: 500 €/año.

  Tiempo de uso durante el proyecto: 3 meses

  $$\text{Coste} = 500\,{}^{€}\!/_{año} \times \frac{3}{12} = 125\ €$$

- Estación de trabajo.

  Tiempo de amortización de 20 años: 1000 €/año.

  Tiempo de uso durante el proyecto: 3 meses

  $$\text{Coste} = 1000\,{}^{€}\!/_{año} \times \frac{3}{12} = 250\ €$$

- Analizador de Respuesta en frecuencia.

  Tiempo de amortización de 20 años: 500 €/año.

  Tiempo de uso durante el proyecto: 3 meses

  $$\text{Coste} = 500\,{}^{€}\!/_{año} \times \frac{3}{12} = 125\ €$$

- Consumo de gases.

Luego el montante total de los gastos indirectos asciende a 591,25 €. Estos gastos pueden reducirse notablemente, ya que aunque en este caso los equipos fueron usados durante estos tres meses sólo para este proyecto, podrían haber sido usados también, durante este tiempo, para otros cinco o diez proyectos que necesitasen una cantidad similar de tiempo de uso de los equipos.

Capítulo 3 HONORARIOS

Los honorarios se calculan en función de las horas trabajadas por el Ingeniero Industrial para realizar tanto el desarrollo, supervisión, montaje, etc. del proyecto. Se establecerá el precio de hora trabajada por el ingeniero (incluyendo las horas extras y las horas dedicadas a la documentación) en 28€. También mencionar que aunque las horas trabajadas al día son 6 horas, se han tenido en cuenta la hora de ida al centro de trabajo y la hora de vuelta del centro de trabajo. Seguidamente se procederá a la descripción detallada del número de horas trabajadas:

- El período de aclimatación al nuevo entorno se prolongó durante 2 meses a razón de 1 día por semana, 4 horas al día:

  6 horas/día x 8 semanas = 48 horas
- El período de desarrollo y montaje de la pila de combustible se prolongó durante 6 meses, a razón de 2 días por semana y 4 horas al día:

  6 horas/día x 2 días/semana x 24 semanas = 288 horas
- 20 horas extra por resolución de problemas y redacción de informes.

El total de horas trabajadas para desarrollar completamente la pila de combustible de sección circular será finalmente de:

Nº total de horas trabajadas = 356 horas

Siendo 356 el número de horas trabajadas por el ingeniero el coste de sus honorarios ascenderá a 9968 €.

Si se realizan otras pilas similares, se esperan unos honorarios bastante menores, ya que la experiencia adquirida hará que se necesite un menor número de horas por pila producida.

Capítulo 4 COSTE TOTAL

Para calcular el coste total del producto ya sólo falta sumar los distintos gastos calculados anteriormente. Una vez realizada esta cuenta habrá que añadir el 16% de IVA y se obtendrá el precio total del desarrollo y fabricación de la pila de combustible de sección cilíndrica.

Concepto	Coste (€)
Gastos directos	35,45 €
Gastos indirectos	591,25 €
Honorarios	9.968 €
Coste total (sin IVA)	10.594,7 €
Coste total (incluyendo el 16% IVA)	12.289,85 €

Tabla 2: Coste total del producto terminado