



Trabajo Fin de Grado

Diseño del sistema de refrigeración de una pila de combustible de tipo PEM de 1 kW

Design of the cooling system of a 1 kW PEM fuel cell

Autor

Ángela Palacín Vázquez

Directores

Jorge A. Barroso Estébanez
Félix M. Barreras Toledo

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2020

Diseño del sistema de refrigeración de una pila de combustible de tipo PEM de 1 kW

RESUMEN

Debido a la actual crisis medioambiental, se han incrementado las investigaciones sobre fuentes de energía renovables alternativas a los combustibles fósiles. Las pilas de combustible de intercambio protónico (PEM) se han convertido en una opción prometedora debido a sus aplicaciones portátiles.

Este proyecto presenta el diseño del sistema de refrigeración de una pila PEM de 1kW de potencia. Para seleccionar el sistema de ventiladores óptimo se necesita conocer el caudal de aire que deben impulsar y la perdida de carga que hay que vencer. Por ello, se ha analizado la generación y transferencia de calor en la pila y se ha desarrollado un código computacional 1D para diseñar el sistema de refrigeración a partir de parámetros como el voltaje de celda o la temperatura de refrigeración. Finalmente se han establecido diferentes regímenes de trabajo para los ventiladores en función de la temperatura de la pila y se ha diseñado la pieza de acople a la pila, la cual se fabricará mediante impresión 3D.

Además, se ha realizado un experimento de calentamiento de un prototipo a menor escala para comprobar su funcionamiento y validar el código antes de instalar el sistema de refrigeración diseñado en la pila de 1 kW. Para realizar la validación se ha modificado el código de ecuaciones considerando una potencia menor en la pila, lo que modifica el régimen de flujo, por lo que se requieren ecuaciones de transferencia de calor para convección natural en lugar de forzada.

Este proyecto se ha realizado en el Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC), donde se pretende instalar el sistema de refrigeración diseñado y evaluar su rendimiento.

Design of the cooling system of a 1 kW PEM fuel cell

ABSTRACT

Due to the current environmental crisis, research on renewable energy sources alternative to fossil fuels has increased. Proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) have become a promising option on account of their portable applications.

This project describes the design of the cooling system of a 1 kW PEM fuel cell. To select the optimal fan system, it is needed to know the air flow that has to be circulated and the pressure drop to be overcome. Therefore, heat generation and transfer on the fuel cell has been analyzed. A 1D computational code has been developed to design the cooling system according to parameters such as cell voltage or cooling temperature. Finally, different working regimes have been established for the fans depending on the fuel cell temperature. A coupling piece has been designed to attach the fans to the stack. It will be manufactured by 3D printing.

In addition, a heating experiment with a smaller scale prototype has been performed to check its operation and validate the code before mounting the designed cooling system in the 1 kW fuel cell. For the validation test, the code has been modified, considering a lower power. This power reduction modifies the flow regime which then requires the use of the heat transfer coefficient for natural convection instead of forced convection.

This project has been carried out at the Laboratory of Research on Fluid Dynamics and Combustion Technologies (LIFTEC, Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión) where the designed cooling system will be installed and evaluated.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	III
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Alcance y objetivos.....	1
1.2. Estructura	1
2. ESTADO DEL ARTE DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM	3
2.1. Orígenes de la pila de combustible	3
2.2. Principio de funcionamiento	4
2.3. Sistemas de refrigeración.....	5
2.4. Transferencia de calor.....	8
2.5. Ventiladores	9
3. REFRIGERACIÓN DE LA PILA	11
3.1. Balance de energía	11
3.2. Transferencia de calor.....	12
3.2.1. Conducción.....	12
3.2.2. Convección	12
3.2.3. Radiación.....	13
3.3. Modelo térmico.....	13
3.3.1. Consumo y exceso de aire.....	15
3.4. Propiedades del sistema de ventiladores	16
3.5 Conclusiones.....	17
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	18
4.1 Datos de partida y primeros resultados.....	18
4.2 Variación de parámetros	19
4.2.1. Variación de temperatura de pared.....	20
4.2.2. Variación del voltaje de celda y de la densidad de corriente	21
4.3. Selección del sistema de ventiladores para la pila de cátodo abierto	22
4.4. Conclusiones.....	30
5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LA PILA	31
5.1. Elementos que conforman la pila	31
5.1.1. Placas terminales.....	31
5.1.2. Placas aislantes.....	31
5.1.3. Colectores de corriente.....	32
5.1.4. Placas monopolares y bipolares	32

5.1.5. MEA (Membrane Electrode Assembly)	33
5.2. Montaje del prototipo de 5 celdas.....	33
6. ESTUDIO EXPERIMENTAL	35
6.1. Descripción del experimento y resultados.....	35
6.2. Código computacional.....	36
7. CONCLUSIONES	39
8. BIBLIOGRAFÍA.....	41
ANEXOS	A1
ANEXO I. CÓDIGOS EN EES	A2
A-I-1. Código 1: Cálculos para el diseño del sistema de refrigeración	A2
A-I-2. Código 2: Reproducción del experimento de calentamiento.....	A9
ANEXO II. TABLAS DE RESULTADOS.....	A12
ANEXO III. PLANOS	A19
1. Plano de la placa bipolar	A20
2. Plano de la pieza de acople del prototipo de 5 celdas.....	A21
3. Plano de la pieza de acople del prototipo de 20 celda	A22

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Alcance y objetivos

En el presente proyecto se estudia la transferencia de calor de una pila de combustible de tipo PEM (según su denominación en inglés *Proton Exchange Membrane*) de baja temperatura y 1kW de potencia, y se diseña su sistema de refrigeración.

Se analiza el rango de temperaturas más adecuado para su funcionamiento, así como la influencia de los parámetros densidad de corriente y voltaje de celda.

El objetivo principal de este proyecto es diseñar un sistema de refrigeración óptimo considerando diferentes regímenes de operación de los ventiladores comerciales que se han seleccionado. Para ello se ha confeccionado un código computacional 1D que permite simular la transferencia de calor en diferentes condiciones de operación. Tras analizar los resultados, se eligen los valores de los parámetros influyentes más apropiados y se obtienen los datos de flujo de aire y pérdida de presión necesarios para la selección de los ventiladores. Una vez seleccionados los ventiladores, se diseñan las piezas de acoplamiento a la pila, las cuales se fabricarán mediante impresión 3D.

Antes de la instalación del sistema de refrigeración diseñado se realiza una prueba experimental de calentamiento de un prototipo de $\frac{1}{4}$ kW para observar su comportamiento. Mediante ajustes en el código de ecuaciones confeccionado para el cálculo de la refrigeración, se replican los resultados experimentales de forma teórica.

Todos los códigos computacionales han sido implementados en el software EES (Engineering Equation Solver), que permite tanto la resolución de grandes sistemas de ecuaciones con iteraciones, como la realización de estudios paramétricos mediante tablas. Por otra parte, las gráficas presentes en esta memoria se han realizado en el programa Excel de Microsoft Office, los modelos estadísticos se han obtenido con el software Curve Expert y los diseños en 3D de piezas se han confeccionado con el programa de CAD 3D de Siemens Solid Edge.

El proyecto se ha realizado en el Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC), centro mixto del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y colaborador de la Universidad de Zaragoza.

1.2. Estructura

La memoria de este Trabajo Fin de Grado se organiza en diferentes capítulos, incluyendo este como introducción:

- En el capítulo 2 se muestran los orígenes de las pilas de combustible, su funcionamiento de forma esquemática y el estado del arte en el que se encuentran los métodos de refrigeración de estos dispositivos.
- El capítulo 3 expone los fundamentos teóricos de transferencia de calor y su aplicación en el diseño del sistema de refrigeración, junto con las ecuaciones utilizadas para ello.
- El capítulo 4 está dedicado al análisis de los resultados obtenidos para el diseño del sistema de refrigeración. Se analiza la influencia de una serie de

parámetros en el comportamiento de la pila y, tras seleccionar los valores más adecuados de estos, se obtienen los resultados finales y se eligen los ventiladores comerciales más apropiados. Finalmente se establecen los regímenes de trabajo a los que deben operar estos dispositivos y se diseñan las piezas de acoplamiento a la pila.

- El capítulo 5 se dedica a la descripción de los elementos y el montaje de un prototipo de 5 celdas que genera $\frac{1}{4}$ kW de potencia.
- En el capítulo 6 se describe el experimento del calentamiento realizado con el prototipo de 5 celdas y, tras analizar los resultados obtenidos, se crea un nuevo código computacional que simula los resultados de forma teórica.
- El capítulo 7 expone las conclusiones y trabajos futuros a realizar.
- Finalmente, el capítulo 8 recopila la bibliografía y se aportan también tres anexos que incluyen los códigos de ecuaciones, las tablas de resultados y los planos del diseño de la pila.

2. ESTADO DEL ARTE DE LAS PILAS DE COMBUSTIBLE TIPO PEM

En este capítulo se define el estado actual de las investigaciones sobre el diseño y fabricación de pilas de combustible de tipo PEM.

2.1. Orígenes de la pila de combustible

Las pilas de combustible aparecen como concepto en el siglo XIX. El físico y jurista inglés William Robert Grove demostró su funcionamiento en 1839 y obtuvo electricidad a partir de la reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno [1], [2]. Grove quería demostrar que el proceso de electrolisis del agua era reversible, creando así lo que denominó como batería voltaica de gas.

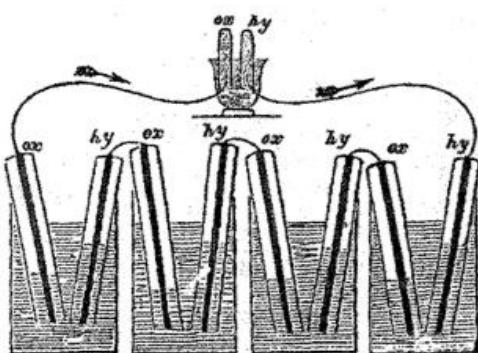


Figura 2.1. Experimento de Grove. Cuatro celdas electroquímicas conectadas en serie con dos electrodos de platino sumergidos en ácido sulfúrico alimentados con hidrógeno y oxígeno. [2]

Sin embargo, esta demostración quedó como una simple curiosidad científica hasta que un siglo más tarde Francis Bacon, ingeniero inglés, retomó los trabajos sobre estos dispositivos y a finales de la década de 1950 desarrolló y construyó una pila de 5 kW. No obstante, la primera aplicación práctica de las pilas de combustible tuvo lugar en programas espaciales de Estados Unidos como el alunizaje en la Luna de 1969. La empresa General Electric, que trabajaba para la NASA, compró las patentes de Bacon y desarrolló la primera pila PEM (Proton Exchange Membrane), mucho más ligera y duradera, la cual fue utilizada en el programa Gemini. De esta forma, además de proporcionar electricidad a los vehículos espaciales, se abastecía de agua a los astronautas [3].

A pesar de todo, el desarrollo de pilas de combustible para aplicaciones terrestres no se produjo hasta la década de 1990. Debido a la crisis de combustible de la década de 1970 y la guerra del golfo de 1990 los gobiernos se plantearon buscar alternativas al uso de combustibles fósiles y financiaron proyectos de I+D sobre pilas de combustible.

En las últimas décadas las pilas de combustible se han convertido en un tema de interés debido a los problemas de cambio climático y a la búsqueda de fuentes de energía limpias, sobre todo las pilas de tipo PEM, ya que ofrecen mejores perspectivas de futuro. Actualmente se usan tanto en automoción, como una alternativa a los

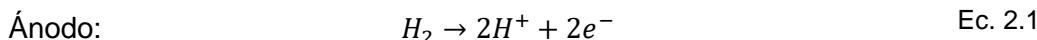
motores de combustión interna, como en aplicaciones estacionarias de baja y media potencia.

2.2. Principio de funcionamiento

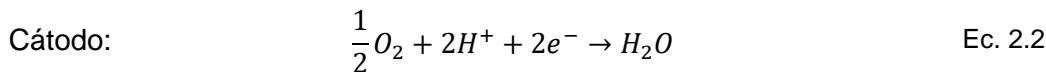
Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte directamente la energía química de un combustible en electricidad y como subproductos se obtienen agua y calor.

Existen diferentes tipos de pila según el tipo de electrolito. Las pilas de membrana de intercambio de protones (PEM) o pilas poliméricas, se caracterizan por la presencia de una membrana polimérica que separa el ánodo y el cátodo de cada celda. Esta membrana tiene la característica de ser conductora protónica, de forma que permite el paso de iones H^+ , pero es impermeable al resto de sustancias. Al conjunto de membrana, capas catalíticas y capas difusoras se le denomina MEA, del inglés *Membrane Electrode Assembly*.

El combustible, en la mayoría de los casos hidrógeno, se suministra por el lado ánodo de las placas bipolares. El combustible atraviesa las capas difusoras, las cuales están formadas por una capa muy porosa de carbón. Para favorecer las reacciones se necesita una capa catalítica (electrodo) de platino ya que se opera a temperaturas relativamente bajas. En la capa catalítica es donde se produce la oxidación del hidrógeno. La reacción electroquímica en el ánodo es,



Los protones generados atraviesan la membrana polimérica, mientras que los electrones viajan a través de las placas bipolares y los electrodos por un circuito eléctrico externo. Cuando electrones y protones llegan al cátodo reaccionan con el oxígeno que entra por los canales de las placas bipolares, generando agua, electricidad y calor,



La reacción electroquímica global es:



En la figura 2.3 se muestran de forma esquemática las reacciones que tiene lugar en una pila PEM que trabaja con hidrógeno y oxígeno.

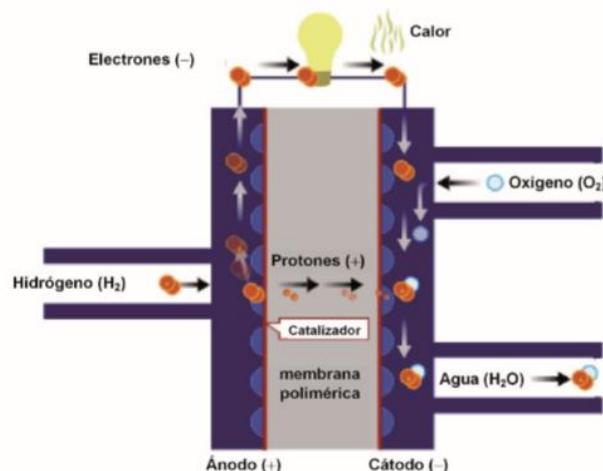


Figura 2.3. Esquema básico del funcionamiento de una monocelda de una pila de hidrógeno de tipo PEM [4].

Se ha descrito el funcionamiento de una monocelda de una pila de combustible PEM de forma simplificada. El apilamiento de varias celdas elementales o monoceldas es lo que caracteriza una pila de combustible propiamente o “stack”. En esta configuración, la circulación electrónica varía, ya que los electrones generados en el ánodo de una celda no se recombinan en la reacción catódica de la misma celda, sino en el cátodo de la adyacente. Es el proceso continuo de generación y recombinación en celdas consecutivas lo que provoca una circulación electrónica global a través del sistema [5].

Dependiendo del tamaño y de la aplicación que se le dé a la pila, ésta debe contar con un conjunto de sistemas auxiliares, como pueden ser los sistemas de suministro del combustible (con o sin tanque), de control automático, o de refrigeración.

2.3. Sistemas de refrigeración

Actualmente la gestión del calor y del agua son los principales problemas que presentan las pilas de combustible tipo PEM de baja temperatura. La operación en un rango de temperatura óptimo es crucial para el rendimiento de la pila. El exceso o defecto de calor afecta negativamente las propiedades de la membrana, perjudicando el funcionamiento global de la pila, por lo que es vital implementar un sistema de refrigeración efectivo.

Existen numerosos estudios donde se analizan los diferentes métodos de refrigeración [6]–[10]. La elección de uno u otro depende de la configuración de diseño de las celdas, de la potencia de salida, del tamaño de la pila y de sus futuras aplicaciones.

Las pilas de combustible pueden diseñarse según dos configuraciones diferentes de cátodo:

- Cátodo cerrado: Los canales de las placas catódicas están aislados del medio que les rodea. Esto implica que el suministro de oxígeno de reacción y el aire de refrigeración circulan por canales independientes y cerrados. Por lo general también puede emplearse un líquido refrigerante, suministrado a través de una línea independiente.

- Cátodo abierto: Los canales del cátodo de cada celda están conectados al medio ambiente directamente. De esta forma, el aire del ambiente proporciona el oxígeno necesario para que se lleve a cabo la reacción química y, a su vez, refrigerera el sistema a su paso por los canales y el área activa catódica. Este diseño reduce el coste de fabricación ya que permite un único diseño de placa bipolar y no necesita tantos sistemas auxiliares de refrigeración.

Los métodos de refrigeración más empleados son:

- **Refrigeración por convección natural:** Válida para pilas de cátodo cerrado menores de 50 W o de cátodo abierto menores de 100 W. Consiste en la refrigeración por los fenómenos de convección natural y radiación a través de las paredes externas de las placas bipolares y, en caso de estructura de cátodo abierto, de las paredes de sus canales. En esta última configuración, el rendimiento es mayor al minimizarse los gradientes térmicos ya que el área en contacto con el aire es mayor. Se trata del método de refrigeración más sencillo, pero está restringido a pilas de baja potencia, ya que el área de intercambio necesaria para las pilas de alta potencia sería muy grande, incrementando el volumen de la pila por unidad de potencia a niveles prácticamente inviables. En ocasiones se añaden aletas al diseño para aumentar el área de transferencia. En la figura 2.4 se muestran imágenes fotográficas de este tipo de pila.

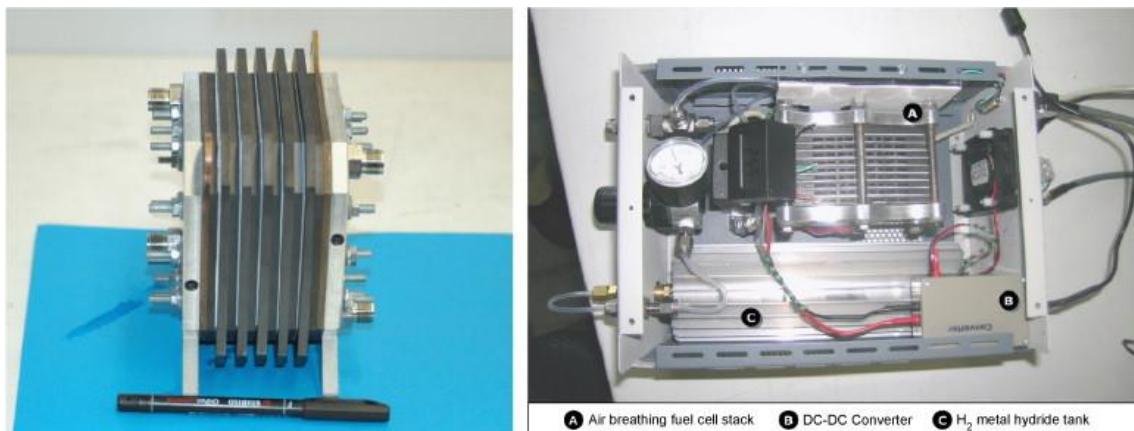


Figura 2.4. Pila de cátodo abierto con refrigeración por convección natural [11].

- **Refrigeración por convección forzada en cátodo abierto:** Se utiliza en pilas de potencia de entre 100 W y 1-2 kW. En estos casos la convección natural es insuficiente, por lo que la convección forzada se convierte en una necesidad para controlar la distribución de calor en el interior de la pila. Lo más común es el uso de ventiladores axiales compactos para forzar la entrada de aire al cátodo. Este tipo de ventiladores tienen un consumo muy bajo de potencia y, debido a su tamaño, este sistema de refrigeración se puede acoplar formando una única unidad con la pila. En la figura 2.5 se muestran imágenes de este tipo de pila.

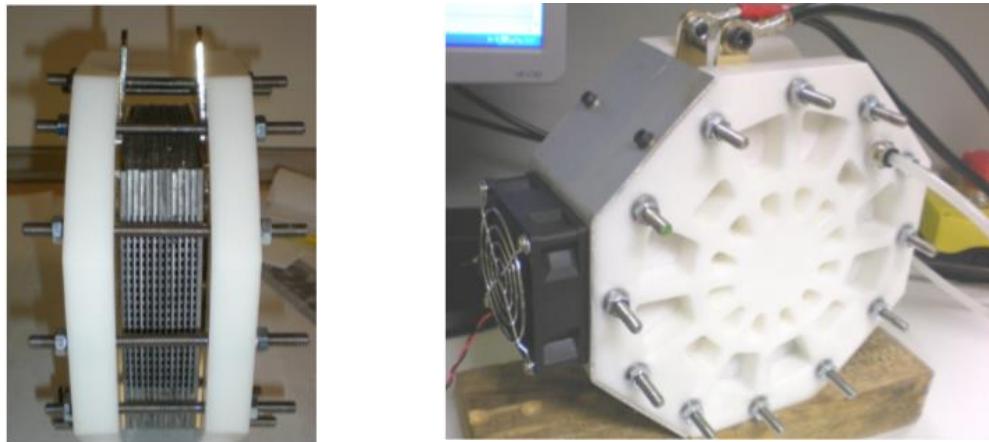


Figura 2.5. Pila de cátodo abierto con refrigeración por convección forzada [5].

- **Refrigeración por convección forzada por aire en cátodo cerrado:** Los canales de refrigeración son independientes a los de los reactivos, por lo que desaparece el problema de exceso de aire que puede secar y dañar las membranas; sin embargo, el diseño es más complejo y caro. El uso de este método se extiende a pilas de hasta 2 kW.
- **Refrigeración con líquidos en cátodo cerrado:** Se trata de un sistema similar al explicado anteriormente, pero sustituyendo el aire por agua desionizada o incluso anticongelante, dependiendo de las condiciones ambientales. El uso de líquido como refrigerante es más efectivo que el aire, ya que la temperatura dentro de la pila es más uniforme; sin embargo, la arquitectura es más compleja: la temperatura y la presión del agua de refrigeración deben ser monitorizadas y el flujo de agua debe suministrarse a través de una bomba sin aceite lubricante. Este es el método de refrigeración más extendido para pilas de potencia superior a 2 kW (ver esquema de funcionamiento en figura 2.6).

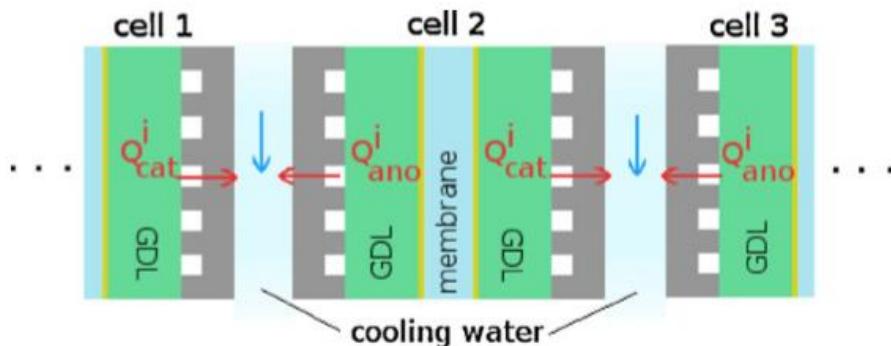


Figura 2.6. Esquema de refrigeración con agua en cátodo cerrado [12].

- **Refrigeración con refrigerante con cambio de fase:** El refrigerante puede ser agua u otro medio que cambie de fase. El uso de agua simplifica el diseño de la pila debido a que aparece en la humidificación de la membrana y como producto de la reacción electroquímica. Este método tiene la ventaja frente a la refrigeración con líquido convencional de que se reduce el flujo de refrigerante, se simplifica el diseño del sistema y no se necesitan bombas para impulsar el refrigerante. Existen dos enfoques, enfriamiento evaporativo y enfriamiento a



través de ebullición. Ambos se diferencian por la temperatura de ebullición del refrigerante, la cual es mayor que la temperatura de la pila en el enfriamiento evaporativo y menor en el enfriamiento a través de ebullición.

En este proyecto se ha diseñado una pila con estructura de cátodo abierto y potencia de 1 kW, por lo que la refrigeración será por convección forzada de aire succionado mediante ventiladores compactos de tipo axial.

2.4. Transferencia de calor

Aunque se han hecho grandes avances de investigación en tecnología de refrigeración en pilas PEM, sigue habiendo cuestiones por resolver. Esto incluye el desarrollo de su fabricación a bajo coste, obtención de alto rendimiento y durabilidad, y técnicas de enfriamiento confiables para poder promover su comercialización en un amplio rango de condiciones ambientales.

La comprensión de la transferencia de calor a través de los componentes de las pilas PEM es fundamental para solventar los problemas nombrados. De ahí la importancia de realizar investigaciones *in situ* y *ex situ*. Numerosos estudios tratan el comportamiento de pilas PEM de cátodo abierto. Algunos de ellos [8], [13]–[15] implementan modelos numéricos 2D y 3D complejos con alto coste computacional y largos tiempos de procesamiento basados en las ecuaciones de continuidad, conservación de masa, energía y especies, con las que simulan la transferencia de calor y la gestión del agua. Por otro lado, Falcão et al [16] desarrollaron un modelo 1D reducido que consigue reproducir de forma realista las temperaturas y concentraciones de las especies a lo largo de las celdas, así como el contenido de agua en la membrana, ya que este modelo integra también la gestión del agua. Falcão se basa en una serie de simplificaciones: se desprecian los gradientes de presión y las pérdidas por efecto Joule en las celdas, el modelo de energía térmica se basa en la ley de Fourier, las reacciones en la capa catalítica se consideran homogéneas, el agua a la salida de la pila se encuentra en forma de vapor y la composición del flujo y la temperatura dentro de los canales son uniformes.

En este proyecto se ha reproducido el modelo teórico térmico 1D usado en varios estudios realizados en el LIFTEC [5], [17], [18], basado en los submodelos de transferencia de masa, electroquímico y térmico.

El principal problema de cálculo de la transferencia de calor es la determinación del coeficiente de transferencia de calor para convección forzada, o para la convección natural según sea el caso. Existen numerosos modelos empíricos para la obtención del número adimensional Nusselt (Nu) en la literatura. La dificultad está en seleccionar el más adecuado para que se reproduzcan con mayor exactitud las condiciones que se presentan en este proyecto: un flujo que puede ser tanto laminar como de transición-turbulento que circula por un canal prismático con área transversal reducida y cuya longitud es mucho mayor a la anchura y altura. Algunas de las ecuaciones planteadas que se podrían aproximar a las características de la pila analizada son:

- Flujo laminar isotermo sobre placa plana: Válido para todo Pr [19].

$$Nu = \frac{0.3387 \cdot Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33}}{\left[1 + \left(\frac{0.0468}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{1/4}} \quad \text{Ec. 2.4}$$

- Flujo de transición-turbulento para $0.5 < Pr < 2000$; $10^4 < Re < 5 \cdot 10^6$ [20].

$$Nu = \frac{\frac{f}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1.07 + 12.7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad \text{Ec. 2.5}$$

donde $f = (0.79 \cdot \ln(Re) - 1.64)^{-2}$.

- Flujo turbulento en superficies lisas para $Re > 10^4$; $0.7 < Pr < 160$ [21].

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{4/5} \cdot Pr^{0.4} \quad \text{Ec. 2.6}$$

En las ecuaciones anteriores Re y Pr son los números adimensionales de Reynolds y Prandtl, respectivamente.

En uno de los artículos de referencia [17] se utilizan fórmulas para el cálculo del Nusselt obtenidas de un estudio experimental (ver Ec. 2.7 y 2.8) [22]. En este artículo, Nu depende de Re , del factor de forma D_h/L (donde D_h es el diámetro hidráulico equivalente y L es la longitud característica) y del número Pr , el cual oscila entre 0.72 y 0.73.

$$Nu = 0.6155 \cdot Re^{2/3} \cdot \left(\frac{D_h}{L}\right)^{3/4} Pr^{1/3} \quad \text{para } Re \cdot \left(\frac{D_h}{L}\right) \geq 640 \quad \text{Ec. 2.7}$$

$$Nu = 0.002149 \cdot Re^{3/2} \cdot \left(\frac{D_h}{L}\right)^{4/3} Pr^{1/3} \quad \text{para } Re \cdot \left(\frac{D_h}{L}\right) \leq 560 \quad \text{Ec. 2.8}$$

Sin embargo, en este proyecto se utiliza la ecuación de Nusselt 2.9, presente en los otros dos estudios realizados en el LIFTEC [5], [18], ya que aproxima con suficiente exactitud todos los regímenes de flujo para $Re > 10$ y $L/D_h > 10$.

$$Nu = 1.4 \cdot \left(Re \cdot \frac{D_h}{L}\right)^{0.4} \cdot Pr^{0.33} \quad \text{Ec. 2.9}$$

2.5. Ventiladores

Existe unanimidad en la literatura sobre el tipo de ventiladores que se deben utilizar en pilas de tipo PEM de baja temperatura. En general, se recomiendan ventiladores axiales compactos por sus bajos consumos de potencia, lo que garantiza la mayor potencia neta del sistema, y por su reducido tamaño.

Los ventiladores pueden trabajar en régimen de impulsión o de succión. Según A. Sasmito et al [13] cuando un ventilador trabaja a impulsión, el aire se ve obligado a

pasar por el motor del ventilador, que lo calienta antes de que entre a la pila. Este problema se soluciona colocando los ventiladores trabajando a succión. Sin embargo, Sasmito asegura que el lugar de colocación de los ventiladores no afecta al rendimiento global de la pila, ya que la caída de presión y el resto de variables dependientes en ambos modos de trabajo se pueden considerar similares. A pesar de esto, trabajar en succión minimiza el ruido y en general tienen mayor eficiencia, por lo que se elige este método.

Cuando se necesita más de un ventilador, el acoplamiento se puede hacer en serie o en paralelo:

- En serie: Consiste en la conexión de los ventiladores uno a continuación del otro. La nueva curva característica corresponde con la suma de las presiones individuales a igualdad de caudal menos la pérdida de carga en la conexión entre ventiladores. Por tanto, este acoplamiento se utiliza cuando se necesita vencer una pérdida de carga mayor a la que puede vencer un solo ventilador.
- En paralelo: Los ventiladores se colocan uno al lado del otro de forma que el aire es succionado e impulsado a zonas contiguas. El cálculo de la nueva curva característica es la suma de los caudales individuales de cada ventilador en puntos de igual presión. Se utiliza en los casos que se necesita disponer de un caudal mayor manteniendo la pérdida de carga.

A pesar de que las necesidades de caudal y presión determinan el uso de un tipo de acoplamiento u otro, la configuración en paralelo es la más común en pilas de combustible de cátodo abierto. Es una conexión preferible debido a que el acoplamiento en serie tiene como desventaja unas pérdidas que sólo se pueden medir in situ, ya que el fabricante no las proporciona.

3. REFRIGERACIÓN DE LA PILA

En las pilas de combustible tipo PEM de baja temperatura, la temperatura de trabajo debe ser inferior a 80°C, ya que de lo contrario podrían presentarse problemas en la membrana polimérica por pérdida de humedad, lo que empeora el paso de los protones a través de la misma, disminuyendo así el rendimiento de la pila. Por ello es necesario instalar un sistema de refrigeración que se encargue de mantener la temperatura de trabajo en el rango ideal.

En este proyecto, como se ha comentado en el capítulo anterior, se trabaja con una pila PEM de cátodo abierto, por lo que el aire se toma y se descarga directamente del medio ambiente que rodea la pila. Esta configuración favorece el diseño del sistema global de aireación ya que permite el uso de ventiladores axiales compactos, los cuales tienen consumos de potencia muy bajos respecto a otros equipos, con dimensiones lo suficientemente reducidas para que su integración en la pila no incremente demasiado sus dimensiones exteriores.

A continuación, se describen las ecuaciones utilizadas en el diseño del sistema de refrigeración de una pila PEM de baja temperatura con cátodo abierto de 1 kW de potencia.

3.1. Balance de energía

En una pila de combustible la energía se conserva, es decir, la diferencia entre la energía de entrada (E_{ent}) y la de salida (E_{sal}) es igual a la potencia eléctrica (W_{el}) más el calor generado (Q_{gen}).

$$E_{ent} - E_{sal} = W_{el} + Q_{gen} \quad \text{Ec. 3.1}$$

La potencia eléctrica (potencia generada por la pila, Pot_{pila}) depende de la tensión y de la intensidad de corriente,

$$W_{el} = V_{cel} \cdot I \cdot n_{cel} \quad \text{Ec. 3.2}$$

siendo V_{cel} el voltaje de una celda [V], n_{cel} el número de celdas de la pila (20 en este trabajo) e I la intensidad de corriente [A], la cual depende de la densidad de corriente (i) y del área activa de una celda ($A_{celda} = 256.9 \text{ cm}^2$).

$$I = i \cdot A_{celda} \quad \text{Ec. 3.3}$$

El calor generado (Q_{gen}) cuando el agua producida sale en estado líquido a 25°C se calcula mediante la siguiente expresión [23]:

$$Q_{gen} = (1.482 - V_{cel}) \cdot I \cdot n_{cel} \quad \text{Ec. 3.4}$$

Los cálculos de transferencia de calor se realizan para cada uno de los canales de la pila, por lo que:

$$Q_{gen,canal} = \frac{Q_{gen}}{n_{cel} \cdot N_{canales}} \quad \text{Ec. 3.5}$$



Donde $Q_{gen,canal}$ es el calor generado en un único canal [W/canal] y $N_{canales}$ es el número de canales en cada celda, que es igual a 50.

El calor generado en la pila debe ser transferido para que la temperatura de la pila se mantenga en el rango de trabajo. Considerando que el calor generado debe evacuarse utilizando el aire como fluido refrigerante:

$$Q_{gen,canal} = Q_{aire} = \dot{m}_{aire} \cdot Cp_{aire} \cdot (Taire_{sal} - Taire_{ent}) \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde Q_{aire} es el calor evacuado de la pila por el aire [W], \dot{m}_{aire} es el flujo másico de aire [kg/s], Cp_{aire} es el calor específico del aire a temperatura media [kJ/(kg·K)], $Taire_{sal}$ y $Taire_{ent}$ son la temperatura del aire a la salida y a la entrada, respectivamente, en [K].

3.2. Transferencia de calor

En el interior de la pila se producen fenómenos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

3.2.1. Conducción

El calor se transfiere a través de cuerpos sólidos en contacto desde las zonas de alta temperatura a las de baja sin intercambio de materia. Sólo actúa la difusión molecular. Este fenómeno está determinado por la Ley de Fourier, que relaciona el gradiente de temperaturas con el flujo de calor en una superficie en dirección x ,

$$\dot{q}_{cond} = k \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{Ec. 3.7}$$

donde k es la conductividad térmica del material [W/(m·K)], \dot{q}_{cond} es el flujo de calor por unidad de área en un punto [W/m²] y $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperaturas en la dirección espacial correspondiente [T/m]. [20]

3.2.2. Convección

La transferencia de energía se produce entre una superficie sólida y el fluido adyacente que está en movimiento. Engloba los efectos combinados de la conducción y el movimiento de los fluidos. Existen diferentes tipos de convección según el movimiento del fluido: natural o forzada.

La convección es natural cuando el fluido se mueve por causas naturales. Éstas son debidas a diferencias de densidades producidas por la variación de temperatura del fluido. Por otro lado, la convección forzada se da cuando el fluido es impulsado por un agente externo (bomba, compresor o ventilador).

A principios del siglo XVIII, Isaac Newton estudia empíricamente la velocidad a la que se enfriá un cuerpo caliente expuesto al aire ambiente.

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad \text{Ec. 3.8}$$



Donde \dot{Q}_{conv} es el flujo de calor intercambiado por convección [W], h es el coeficiente de transferencia de calor por convección [W/(m²·K)], A es el área de transferencia de calor [m²], T_s es la temperatura de la pared [K] y T_f la del fluido [K].

En la determinación del parámetro h es donde se encuentra la complejidad del problema. Depende de muchas variables (régimen de flujo, geometría de la superficie, propiedades del fluido, condiciones de contorno, etc.). Por lo general, h se determina experimentalmente, o mediante programas de cálculo por ordenador. El número de variables independientes se reduce apreciablemente mediante la aplicación del análisis dimensional. En concreto se utiliza el número Nusselt (Nu), que relaciona la conducción y la convección mediante,

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \quad \text{Ec. 3.9}$$

Donde L es la longitud característica del canal [m].

La determinación del número Nu se realiza a través de correlaciones empíricas o semiempíricas que dependen de otros números adimensionales (Reynolds, Prandtl y Grashof).

3.2.3. Radiación

La radiación térmica es un mecanismo de transporte de calor que consiste en la transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas generadas en la actividad térmica de la materia. [20]

Todo cuerpo emite energía por radiación si está por encima del cero absoluto de temperatura. En el caso de las pilas de tipo PEM la radiación se considera despreciable, ya que las temperaturas de operación son bajas y cercanas a la del medio ambiente, siendo muy poco relevante en comparación con la conducción y la convección. Sin embargo, Barbir [23] propone la siguiente ecuación para su cálculo.

$$Q_{rad} = \sigma \cdot F_f \cdot A \cdot (T_s + T_{amb}) \cdot (T_s^2 + T_{amb}^2) \cdot (T_s - T_{amb}) \quad \text{Ec. 3.10}$$

Donde σ es la constante de Stefan-Boltzman [W/(m²·K⁴)], F_f es un factor de forma relacionado con la pila y que en una primera aproximación se asume igual a la unidad, A es el área de la superficie expuesta al ambiente [m²], T_s es la temperatura de la pared de la pila [K] y T_{amb} es la temperatura ambiente [K].

3.3. Modelo térmico

Se ha confeccionado un código de computación 1D en el programa EES (Engineering Equation Solver) para estudiar la transferencia de calor en la pila. Este código permite, además de obtener los resultados de flujo másico de aire necesarios, estudiar la influencia de los parámetros de diseño en el funcionamiento global de la pila. En el apartado A-I-1 del Anexo I se puede consultar el código completo.

Se supone que la pila de combustible genera una cierta cantidad de calor de forma continua que debe extraerse para que su temperatura se mantenga alrededor de un valor durante el tiempo de operación. Para lograr eliminar el calor sobrante se impulsa un flujo de aire con un ventilador a través de la pila. Este flujo de aire de refrigeración

se suministra por los canales del cátodo en adición al aire cuyo oxígeno se usa como oxidante en la reacción electroquímica.

Las simplificaciones consideradas son:

- La temperatura de la pared de la pila se mantiene uniforme a lo largo de todas las celdas.
- La transferencia de calor por radiación es despreciable.
- Las especies gaseosas siguen la ley de los gases ideales.
- Se considera que el agua generada en el cátodo sale de la pila en fase líquida, ya que la temperatura de operación (y la temperatura de salida de los productos formados) es lo suficientemente baja, para que los vapores de agua condensen dentro de la pila.

El aire de refrigeración está en contacto con la placa a través de tres paredes del canal y con la membrana polimérica a través de la cuarta. Por ello el calor transmitido total por convección forzada (Q_{tc}) es la suma del transmitido a través de la cara del canal con la MEA (Q_{MEA}) y del que sale a través de las placas (Q_{placa}).

$$Q_{tc} = Q_{MEA} + Q_{placa} \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$Q_{MEA} = U_{MEA} \cdot A_{MEA\&aire} \cdot \Delta T_{log} \quad \text{Ec. 3.12}$$

$$A_{MEA\&aire} = L_{ancho} \cdot L_{canal} \quad \text{Ec. 3.13}$$

$$Q_{placa} = U_{placa} \cdot A_{placa\&aire} \cdot \Delta T_{log} \quad \text{Ec. 3.14}$$

$$A_{placa\&aire} = (2 \cdot L_{prof} + L_{ancho}) \cdot L_{canal} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde U_{MEA} y U_{placa} son los coeficientes de convección globales de la MEA y la placa respectivamente [W/(m²·K)], $A_{MEA\&aire}$ y $A_{placa\&aire}$ son las áreas de contacto entre el aire y la MEA y el aire y la placa respectivamente [m²], L_{ancho} es la anchura de un canal ($3 \cdot 10^{-3}$ m), L_{canal} es la longitud de un canal ($120 \cdot 10^{-3}$ m), L_{prof} es la profundidad del canal ($2 \cdot 10^{-3}$ m) y ΔT_{log} es la temperatura media logarítmica [K].

La temperatura media logarítmica, ΔT_{log} , se define como,

$$\Delta T_{log} = \frac{\Delta T_{entrada} - \Delta T_{salida}}{\frac{\Delta T_{entrada}}{\Delta T_{salida}}} \quad \text{Ec. 3.16}$$

siendo

$$\Delta T_{entrada} = T_s - T_{aire_{ent}} \quad \text{Ec. 3.17}$$

$$\Delta T_{salida} = T_s - T_{aire_{sal}} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Para el cálculo del coeficiente de convección global de cada superficie, U_{ref} , se tienen en cuenta tanto la convección con el aire impulsado por el ventilador como factores relacionados con la conducción a través de los materiales.

$$U_{ref} = \frac{1}{\frac{1}{h_{aire}} + \frac{Espesor_{ref}}{k_{ref}}} \quad \text{Ec. 3.19}$$

El coeficiente de convección del aire, h_{aire} , viene dado en función del número Nusselt, el cual se ha calculado a partir de una correlación válida para $Re > 10$ y $L/d > 10$; y adecuada para la geometría estudiada.

$$h_{aire} = Nu \cdot \frac{k_{aire}}{Dh} \quad \text{Ec. 3.20}$$

$$Nu = 1.4 \cdot \left(Re \cdot \frac{Dh}{L_{canal}} \right)^{0.4} \cdot Pr^{0.33} \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$Re = \frac{\rho_{aire} \cdot u_{aire} \cdot Dh}{\mu_{aire}} \quad \text{Ec. 3.22}$$

$$u_{aire} = \frac{m_{aire}}{\rho_{aire} \cdot A_{paso}} \quad \text{Ec. 3.23}$$

$$Dh = 4 \cdot \left(\frac{A_{paso}}{2 \cdot L_{prof} + 2 \cdot L_{ancho}} \right) \quad \text{Ec. 3.24}$$

Donde las propiedades del aire ρ_{aire} [kg/m³], μ_{aire} [kg/(m·s)], k_{aire} [W/(m·K)] y el número Pr se calculan a la temperatura media del aire, Re es el número Reynolds, A_{paso} es el área de la sección transversal del canal por donde circula el aire [m²], u_{aire} es la velocidad de circulación del aire en el interior del canal [m/s] y Dh es el diámetro hidráulico equivalente de los canales [m].

Finalmente se debe calcular el error de cálculo, que debe minimizarse con el flujo másico de aire, para lograr un cierre satisfactorio del balance de calor.

$$ERROR = \left| \frac{Q_{tc} - \frac{Q_{gen}}{n_{cel} \cdot N_{canal}}}{\frac{Q_{gen}}{n_{cel} \cdot N_{canal}}} \right| \cdot 100 \quad \text{Ec. 3.25}$$

3.3.1. Consumo y exceso de aire

Se desea conocer la cantidad de aire que se necesita para proporcionar oxígeno requerido en la reacción electroquímica, y el exceso de aire necesario para refrigerar la pila.

Cada molécula de hidrógeno libera dos electrones al reaccionar con los núcleos de platino de la capa catalítica anódica y se necesitan 2 átomos de H₂ por cada átomo de O₂ que reaccione. Para poder calcular el consumo total de oxígeno para obtener una

corriente eléctrica hay que calcular previamente el índice de consumo específico de oxígeno (ICE_{O_2}). Este se define como la masa de oxígeno estequiométrica por unidad de tiempo necesaria para producir una corriente de 1A. De esta forma, el número de moles de oxígeno se calcula como,

$$n_{O_2} = \left(1 \frac{C}{s}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ eq. } e^-}{96487 \text{ C}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ g mol}_{O_2}}{4 \text{ eq. } e^-}\right) = 2.591 \cdot 10^{-6} \frac{\text{g mol}_{O_2}}{\text{s} \cdot \text{A}} \quad \text{Ec. 3.26}$$

por lo que el índice de consumo específico es:

$$ICE_{O_2} = \left(2.591 \cdot 10^{-6} \frac{\text{g mol}_{O_2}}{\text{s} \cdot \text{A}}\right) \cdot \left(\frac{32 \text{ g}}{1 \text{ g mol}_{O_2}}\right) = 8.291 \cdot 10^{-5} \frac{g_{O_2}}{\text{s} \cdot \text{A}} \quad \text{Ec. 3.27}$$

Así, la masa estequiométrica por unidad de tiempo que consumirá la pila es,

$$\dot{m}_{O_2,estq} = ICE_{O_2} \cdot I \cdot n_{cel} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \quad \text{Ec. 3.28}$$

A su vez esta masa estequiométrica y la masa de N_2 están relacionadas con la masa de aire de oxidación, $\dot{m}_{aire,oxidación}$, que es la cantidad de aire que reacciona con el hidrógeno, mediante las siguientes ecuaciones.

$$\dot{m}_{O_2,estq} = (1 - 0.77) \cdot \dot{m}_{aire,oxidación} \quad \text{Ec. 3.29}$$

$$\dot{m}_{N_2} = 0.77 \cdot \dot{m}_{aire,oxidación} \quad \text{Ec. 3.30}$$

En este caso el nitrógeno, que se usa para el purgado y limpieza de los circuitos, se puede relacionar de esta forma con el aire ya que ambos tienen propiedades similares.

Finalmente, el aire total introducido en la pila es:

$$\dot{m}_{aire,pila} = \dot{m}_{aire,exceso} + \dot{m}_{N_2} \quad \text{Ec. 3.31}$$

3.4. Propiedades del sistema de ventiladores

Para la elección del sistema de ventiladores es necesario calcular las pérdidas de carga en los canales (suma de las pérdidas de carga por fricción, ΔP_f , y las locales, ΔP_l); así como la potencia necesaria del ventilador.

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_l \quad \text{Ec. 3.32}$$

$$\Delta P_f = f \cdot \frac{L_{canal}}{Dh} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot u_{aire}^2 \quad \text{Ec. 3.33}$$

$$\Delta P_l = (K_{ent} + K_{sal}) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot u_{aire}^2 \quad \text{Ec. 3.34}$$

Donde K_{ent} y K_{sal} son los coeficientes locales de pérdida de carga, ambos con valor de 1; y f es el factor de fricción de Darcy.

La determinación de este factor de fricción depende del tipo de flujo. Según un estudio sobre pilas de cátodo abierto con canales rectangulares [22] y flujo laminar ($Re < 500$), el factor de fricción se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{58.91 + 50.66 \cdot \exp\left(\frac{-3.4}{\frac{L_{ancho}}{L_{prof}}}\right)}{Re} \quad \text{Ec. 3.35}$$

En caso de que el régimen del flujo sea de transición-turbulento ($Re > 500$) se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -10 \cdot \log\left(0.218 + \frac{65.6}{Re \sqrt{f}}\right) \quad \text{Ec. 3.36}$$

Por otro lado, la potencia mínima del ventilador ($W_{ventilador}$) depende de las pérdidas de carga en los canales, el caudal de aire que circula por la pila y el rendimiento del propio ventilador (η).

$$W_{ventilador} = \frac{\frac{\dot{m}_{aire} \cdot N_{canales} \cdot n_{cel} \cdot \Delta P}{\rho_{aire}}}{\eta} \quad \text{Ec. 3.37}$$

Los valores de los rendimientos de ventiladores oscilan entre 0.6 y 0.9 por lo que se escoge el más restrictivo.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se ha elaborado una metodología para diseñar el sistema de refrigeración de una pila PEM de cátodo abierto de 1kW de potencia en función de las condiciones de trabajo con la ayuda de la teoría de transferencia de calor. Se ha empleado el programa EES para la resolución de las ecuaciones, cuyo código se encuentra en el Anexo I.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez explicada la teoría de transferencia de calor y elaborado el código 1D mediante el programa EES, se han obtenido los resultados de diseño de la pila para diferentes condiciones de operación. Los resultados más relevantes son el flujo de aire que tiene que circular por los canales catódicos de la pila, las pérdidas de carga en los canales; y, consecuentemente, la potencia mínima que necesita el ventilador para vencer dicha pérdida de carga.

En este capítulo se muestran los datos de partida para unas condiciones concretas y los resultados obtenidos. Seguidamente se realiza un estudio sobre la influencia de algunos parámetros en el funcionamiento de la pila, seleccionando las mejores opciones. Con los mejores parámetros se ha realizado el diseño final para un prototipo de pila de 5 celdas, y para la pila completa de 20 celdas. Finalmente se han seleccionado una serie de ventiladores axiales comerciales para ambos prototipos.

4.1 Datos de partida y primeros resultados

El personal del LIFTEC ha diseñado las placas bipolares de la pila de combustible. En el plano generado, disponible en el Anexo III, se encuentran todas las medidas del cátodo necesarias para el análisis de la transferencia de calor y el cálculo de la refrigeración. Cada placa catódica cuenta con 10 bloques de 5 canales por donde circula el aire, cada uno de los cuales tiene una longitud (L_{canal}) de 120 mm, un ancho (L_{ancho}) de 3 mm y una profundidad (L_{prof}) de 2 mm.

La pila está formada por 20 celdas, cada una de las cuales posee un área de 256.88 cm². En base a recomendaciones del personal del LIFTEC se ha seleccionado un voltaje de 0.6 V y una densidad de corriente de 0.35 A/cm². El voltaje de celda y la densidad de corriente están relacionados entre sí por la curva de polarización. La corriente generada por la pila (I) es de 89.91 A y, por consiguiente, su potencia es de 1079 W.

Las propiedades del aire a la entrada de la pila se corresponden con las del medio ambiente. Se ha considerado para los cálculos que la temperatura del aire $T_{aire_{ent}}$ es 25°C y la presión es 1 bar. Por otro lado, la temperatura mínima a la que se quiere refrigerar la pila (T_s) es de 70°C.

Las placas son de aluminio, con conductividad térmica a $T_s = 70^\circ\text{C}$ de 238.3 W/(m·K). Por otra parte, la MEA cuenta con un espesor de 0.6 mm y una conductividad térmica aproximada de 1.3 W/(m·K).

Se ha comprobado que la transferencia de calor por radiación se puede depreciar, ya que la fracción de calor transferida por esta vía sólo supone un 0.6% del total, debido a que la temperatura de operación es baja.

Con estos datos, utilizando el código EES confeccionado, se han obtenido los resultados que se muestran en la Tabla 4.1, donde se aprecia que se necesita un flujo másico de aire total, $\dot{m}_{aire,pila}$, de 0.0532 kg/s y una potencia de ventilador, $W_{ventilador}$, de 16.24W para el funcionamiento correcto de la pila.

Tabla 4.1. Resultados obtenidos con los datos de partida.

$A_{MEA\&aire}$ [m ²]	3.6 E-4	$\dot{m}_{aire,oxidación}$ [kg/s]	0.0006482
$A_{placa\&aire}$ [m ²]	8.4 E-4	\dot{m}_{N2} [kg/s]	0.0004991
$Caudal_{airecel}$ [m ³ /(s*celda)]	2.383 E-3	$\dot{m}_{O2,estq}$ [kg/s]	0.0001491
Cp_{aire} [J/(kg·K)]	1007	$Nusselt$	4.353
ΔP [Pa]	204	n_{O2} [g molO ₂ /(s·A)]	2.591 E-6
ΔP_f [Pa]	133.4	Pot_{cel} [W]	53.94
ΔP_l [Pa]	70.59	Pot_{pila} [W]	1079
Dh_{aire} [m]	0.0024	Pr	0.7256
DT_{ent} [K]	45	Q_{gen} [W]	1586
DT_{log} [K]	27.6	Q_{aire} [W/canal]	1.586
DT_{sal} [K]	15.39	$Q_{gen,canal}$ [W/canal]	1.586
$Error$ [%]	0.01381	Q_{MEA} [W/canal]	0.4688
f	0.07561	Q_{placa} [W/canal]	1.117
h_{aire} [W/(m ² ·K)]	48.23	Q_{tc} [W/canal]	1.586
ICE_{O2} [g_O ₂ /(s·A)]	0.00008291	Re	1110
I_{pila} [A]	89.91	ρ_{aire} [kg/m ³]	1.114
K_{aire} [W/(m·K)]	0.02659	$Taire_{sal}$ [K]	327.6
μ_{aire} [kg/(m·s)]	1.917 E-5	u_{aire} [m/s]	7.943
\dot{m}_{aire} [kg/(s·canal)]	0.0000532	U_{MEA} [W/(m ² K)]	47.18
$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	0.0532	U_{placa} [W/(m ² K)]	48.2
$\dot{m}_{aire,exceso}$ [kg/s]	0.0527	$W_{ventilador}$ [W]	16.24

Los resultados obtenidos se han comparado con los de otros estudios y se ha comprobado que se encuentran en un rango normal. Por ejemplo, en la tesis de López Sabirón [5] se necesita un flujo de aire de 0.222 kg/s para mantener una pila PEM de 2 kW a una temperatura de pared de 45°C. Teniendo en cuenta la diferencia de potencia y de temperatura de pared, es lógico pensar que en la pila de este estudio se necesite menos aire para la refrigeración. Por otro lado, la temperatura de salida del aire obtenida es de 327.6 K, mientras que en la tesis referenciada es de 310 K. Ambos resultados son muy similares y su pequeña diferencia se debe, entre otras cosas, a la diferencia en la temperatura de pared con la que operan las pilas comparadas.

4.2 Variación de parámetros

Se ha estudiado el funcionamiento teórico de la pila modificando la temperatura de pared, el voltaje de celda y la densidad de corriente para comprobar su influencia en el funcionamiento de la pila.

4.2.1. Variación de temperatura de pared

Se analiza la variación de los parámetros de la pila en función de la temperatura de pared, T_s , manteniendo $V_{cel} = 0.6 V$ e $i = 0.35 A/cm^2$ (ver Tabla 4.2). En todos los casos, el error de cierre de los cálculos iterativos es menor del 0.015%, por lo que se puede asegurar que la convergencia es adecuada. Por otro lado, se observa que hay una dependencia lineal creciente entre la temperatura de pared y la temperatura del aire de salida (Figura 4.1) y, una dependencia exponencial decreciente con el flujo de aire (Figura 4.2) y con la potencia necesaria del ventilador (Figura 4.3). Estos análisis demuestran que la T_s tiene una gran influencia sobre el caudal de aire necesario y, sobre todo, sobre la potencia del ventilador, que aumenta de manera marcada cuanto menor es la temperatura de pared.

Tabla 4.2. Resultados en función de la temperatura de pared.

T_s [K]	T_{aire_sal} [K]	$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	Re	ΔP [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]
323	309	0.1429	3040	1008	209
325.5	311.1	0.1203	2554	747.8	131
328	313.3	0.1032	2187	577.4	87.14
330.5	315.5	0.08998	1901	460.1	60.76
333	317.8	0.07948	1674	376.5	44.07
335.5	320.2	0.07097	1491	314.9	33.04
338	322.6	0.06394	1339	268.1	25.45
340.5	325.1	0.05813	1214	232.3	20.13
343	327.6	0.0532	1108	204	16.24
345.5	330.2	0.04898	1017	181.3	13.34
348	332.7	0.04534	938.4	162.8	11.13
350.5	335.3	0.04219	870.5	147.6	9.43
353	338	0.03942	810.7	134.8	8.085

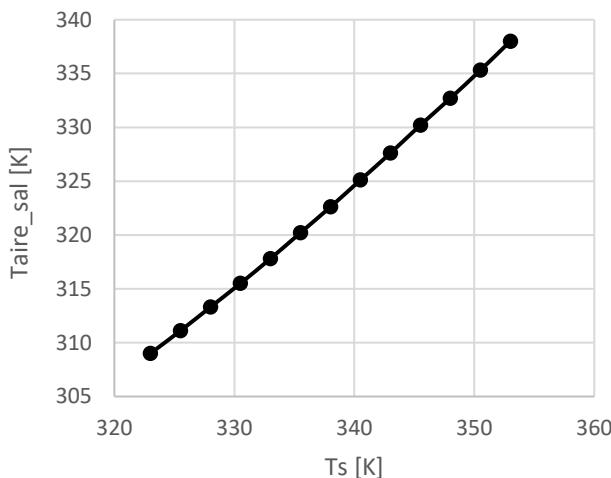


Figura 4.1. Comportamiento de la temperatura del aire a la salida con la temperatura de pared.

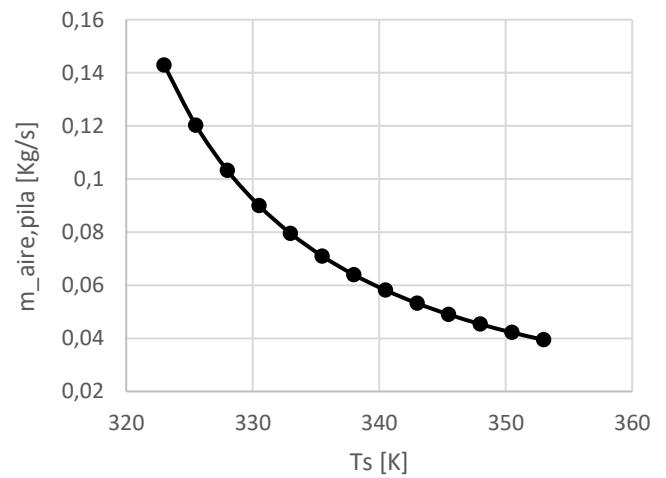


Figura 4.2. Comportamiento del flujo de aire con la temperatura de pared.

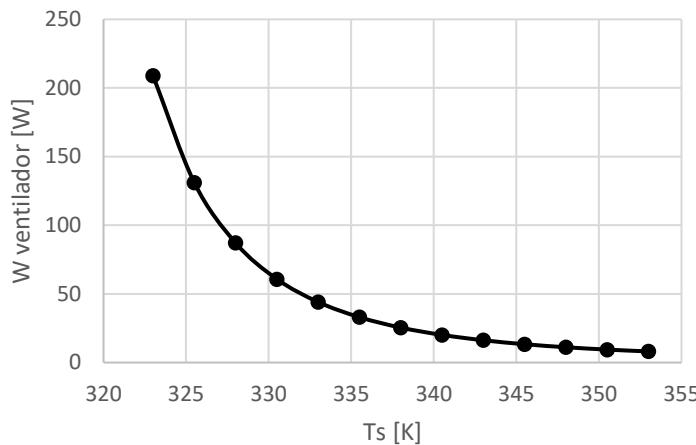


Figura 4.3. Comportamiento de la potencia del ventilador con la temperatura de pared.

4.2.2. Variación del voltaje de celda y de la densidad de corriente

Las pilas de combustible pueden diseñarse con diferentes voltajes de celda, siendo los más comunes en las pilas comerciales entre 0.5 V y 0.6 V. Se ha variado el valor de voltaje de celda entre 0.4 y 0.7 V y el de densidad de corriente entre 1 y 0.3 A/cm². Ambos parámetros están relacionados entre sí mediante las curvas de polarización.

En la Tabla 4.3 se muestran para los diferentes voltajes de celda los resultados a una temperatura de pared de 70°C. En las Tablas A-II-1, A-II-2, A-II-3, A-II-4 y A-II-5 disponibles en el Anexo II, se pueden consultar los resultados más desglosados para cada voltaje de celda en función de la T_s .

Tabla 4.3. Resultados en función del voltaje de celda para $T_s = 70^\circ\text{C}$.

V_{cel} [V]	i [A/cm ²]	$T_{aire_{sal}}$ [K]	$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	Re	ΔP [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]
0.4	1	308.4	0.5307	11262	11576	8911
0.45	0.75	312.9	0.2654	5603	3133	1215
0.5	0.5	320.1	0.1134	2378	687.3	115.2
0.6	0.35	327.6	0.0532	1108	204	16.24
0.7	0.3	331.6	0.03567	739.7	115.7	6.214

A menor voltaje de celda, mayor es la cantidad de flujo de aire necesaria para refrigerar la pila, por lo que la potencia del ventilador aumenta. En algunos casos (ver Figura 4.4), esta potencia compromete la construcción y el funcionamiento de la pila ya que se llega a sobrepasar la potencia generada por la misma. De esta forma, queda automáticamente descartado el uso de los voltajes de celda de 0.4 V y 0.45 V. Finalmente, como los dispositivos que se comercializan trabajan con valores de 0.5-0.6 V, se escoge el voltaje de celda de 0.6 V ya que, en caso de que en el futuro se quiera trabajar con una temperatura de pared menor a 70°C, existe un margen de potencia en los ventiladores seleccionados.

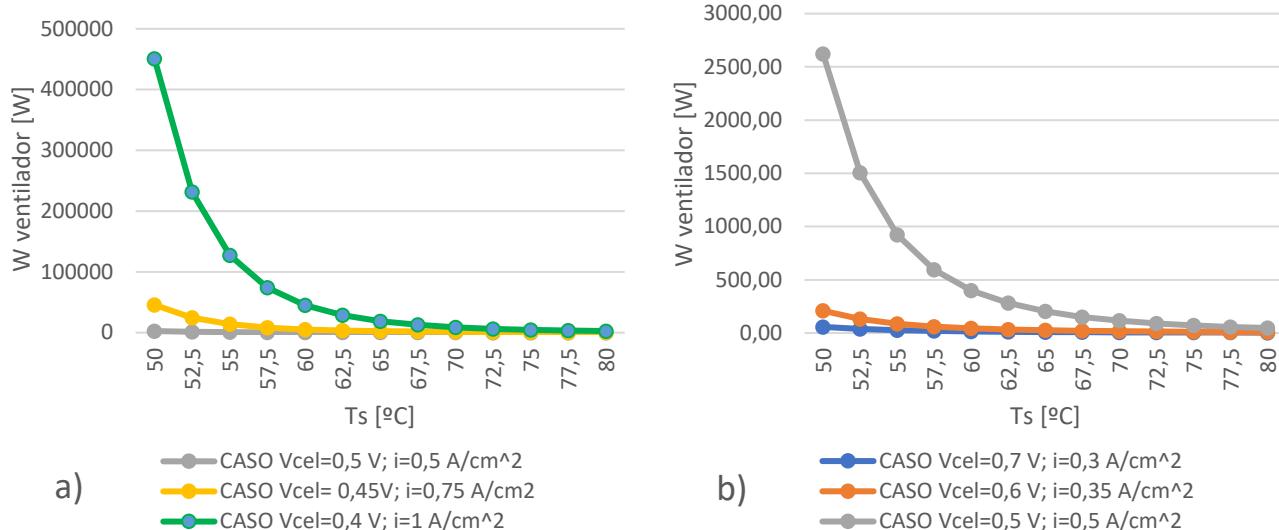


Figura 4.4 Potencia necesaria del ventilador en función de la temperatura de pared y para voltajes de celda entre: a) 0.4-0.5V y b) 0.5-0.7 V.

Se ha desarrollado un modelo estadístico con el programa Curve Expert para obtener el valor del flujo mÁsico de aire (en kg/s) y la potencia del ventilador o sistema de ventiladores en funciÁn de las variables independientes T_s (en °C) y V_{cel} . Ambos se ajustan a diferentes funciones potenciales:

$$\dot{m}_{aire,pila} = a \cdot T_s^b \cdot V_{cel}^c \quad \text{Ec. 4.1}$$

$$W_{ventilador} = a + T_s^b \cdot V_{cel}^c \quad \text{Ec. 4.2}$$

El error estÁndar, el coeficiente de determinaciÁn (R^2) y los valores de los coeficientes a-c se especifican en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Coeficientes de las Ecs. 4.1 y 4.2 y datos de los modelos estadísticos para $\dot{m}_{aire,pila}$ y $W_{ventilador}$.

	$\dot{m}_{aire,pila}$	$W_{ventilador}$
a	16245.302329	2419.152575
b	-3.8886	-13.245533
c	-6.74277	-70.748282
Error estÁndar	0.029946	6717.48334
R^2	0.9994416	0.989465

4.3. Selección del sistema de ventiladores para la pila de cÁtodo abierto

En pilas PEM de cÁtodo abierto es comÚn la utilizaciÁn de ventiladores axiales, debido a su reducido tamaÁo, bajo consumo y la opciÁn de funcionar con diferentes rangos de operaciÁn. Estos se colocan de forma perpendicular al ´rea de flujo de los canales del

cátodo, por lo que se integran en la propia pila sin necesidad de un equipo auxiliar externo, reduciendo el volumen final.

Todo ventilador se caracteriza por su curva de diseño, descrita por una gráfica caudal-pérdida de carga según unas determinadas condiciones de giro. Esa curva de diseño se cruza con la curva de pérdidas de carga del sistema en el punto de operación. Por ello, es muy importante la elección correcta del ventilador o conjunto de ventiladores, cuya curva de diseño se puede modificar variando la velocidad de giro del rotor según la teoría de ventiladores [24] para obtener el punto de operación deseado. Las relaciones entre la velocidad de giro (RPM), la presión (ΔP), el caudal (Q) y la potencia ($W_{ventilador}$) se expresan a través de las Ecs. 4.3, 4.4 y 4.5.

$$Q_2 = Q_1 * \frac{RPM_2}{RMP_1} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_1 * \left(\frac{RPM_2}{RMP_1} \right)^2 \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$W_{ventilador2} = W_{ventilador1} * \left(\frac{RPM_2}{RMP_1} \right)^3 \quad \text{Ec. 4.5}$$

En este caso se requieren varios ventiladores, ya que de esta forma se podrán alcanzar las condiciones de trabajo deseadas y, además, en caso de fallo de uno de ellos, el resto podría seguir operando sin comprometer excesivamente el funcionamiento de la pila. Existen dos tipos de acoplamientos de ventiladores tal y como se explicó en el capítulo 2: en serie y en paralelo. Se va a utilizar la configuración en paralelo, donde el aire se aspira y se expulsa a zonas contiguas, y se consigue un caudal de aire mayor con un valor de pérdida de carga fija (ver Figura 4.5).

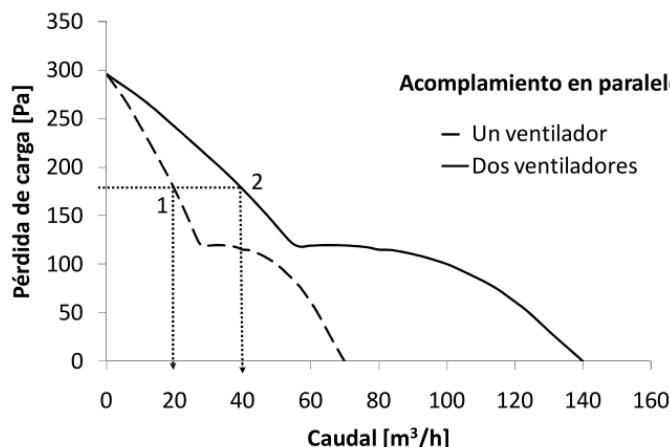


Figura 4.5. [5] Ejemplo de acoplamiento en paralelo de dos ventiladores.

Para ambos prototipos de pila, 5 y 20 celdas, se quiere mantener una temperatura de pared de entre 50 y 70°C, ya que la temperatura máxima que soportan las MEAs es de 80°C y se desea disponer de un margen de seguridad. Por ello se han buscado los ventiladores axiales comerciales que mejor se adaptaban a los requerimientos y a las características de la pila dentro de ese rango de temperatura. Los resultados de esos

requerimientos se encuentran en las Tablas A-II-6 y A-II-7 del Anexo II para una pila de 20 y 5 celdas respectivamente.

Se han seleccionado para cada prototipo tres ventiladores iguales, todos ellos de la empresa Embapast. En el caso del prototipo de 20 celdas corresponden al modelo 8212 JH4, con los cuales se puede refrigerar la pila hasta 60°C; mientras que para el prototipo de 5 celdas se ha elegido el modelo 422 JH, que puede refrigerar hasta una temperatura de 67°C. Las principales características de ambos modelos se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Principales características de los ventiladores modelo 422 JH y 8212JH4.

	422 JH	8212 JH4
Voltaje nominal	12 V	12 V
Velocidad de giro nominal	17250 rpm	14000 rpm
Potencia de entrada	6.9 W	39 W
Caudal máximo	37 m³/h	222 m³/h
Ruido	54 dB (A)	71 dB (A)
Dimensiones	40x40x28 mm	80x80x38 mm

Las necesidades de refrigeración para las temperaturas estipuladas en cada prototipo se muestran en las Tablas 4.6 y 4.7 en función de la densidad de corriente, para los prototipos de 5 ($\frac{1}{4}$ kW) y 20 celdas (1 kW), respectivamente. Como puede apreciarse, para potencias nominales de $\frac{1}{4}$ de kW y 1 kW, los dos prototipos diseñados tienen que producir una corriente de 89.91 A. Para ello, es necesario que el sistema de ventiladores impulse un flujo volumétrico de 47.62 m³/h en la pila de $\frac{1}{4}$ kW de potencia, venciendo una pérdida de presión de 238.9 Pa, y de 252.9 m³/h en la de 1 kW, para una carga de presión de 376.5 Pa.

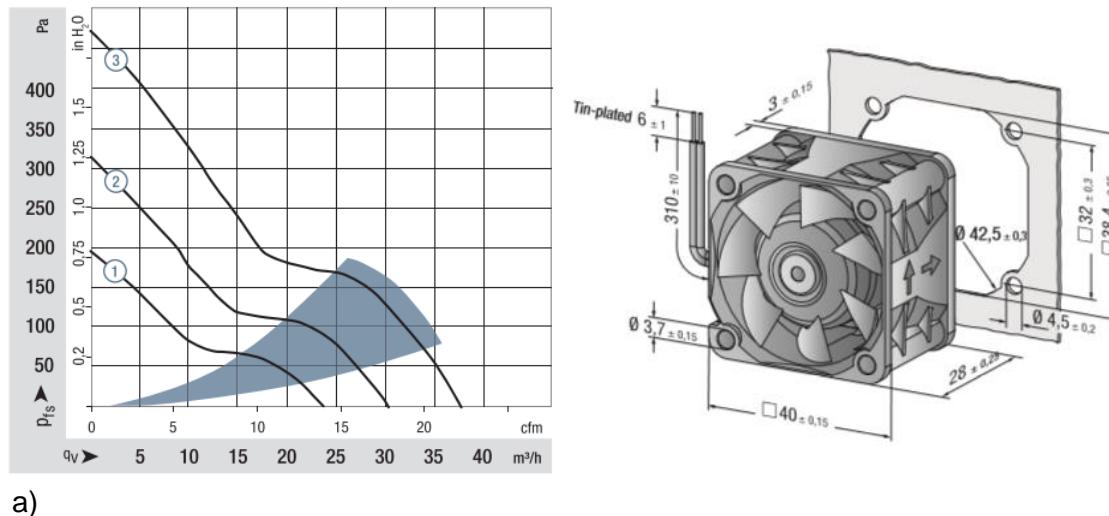
Tabla 4.6. Necesidades de refrigeración del prototipo de pila de 5 celdas ($\frac{1}{4}$ kW) en función de la densidad de corriente para $T_s = 67^\circ C$.

$I [A]$	$Pot_{pila} [W]$	$\dot{m}_{aire,pila} [kg/s]$	$q_{aire,pila} [m^3/h]$	$\Delta P [Pa]$
5	15	0.0005297	1.744	13.95
10	30	0.00105	3.459	17.67
15	45	0.001597	5.258	21.91
20	60	0.002172	7.141	26.77
30	90	0.003425	11.23	38.81
40	120	0.004836	15.8	54.77
50	150	0.006424	20.91	75.74
60	180	0.008204	26.62	103
70	210	0.01019	32.96	138.2
89.91	269.7	0.01481	47.62	238.9

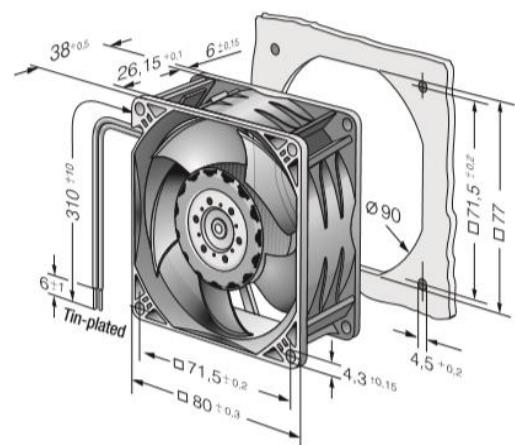
Tabla 4.7. Necesidades de refrigeración del prototipo de pila de 20 celdas (1 kW) en función de la densidad de corriente para $T_s = 60^\circ C$.

$I [A]$	$Pot_{pila} [W]$	$\dot{m}_{aire,pila} [kg/s]$	$q_{aire,pila} [m^3/h]$	$\Delta P [Pa]$
5	60	0.002505	8.168	14.28
10	120	0.005066	16.5	18.86
15	180	0.00776	25.25	24.24
20	240	0.01064	34.56	30.6
30	360	0.01704	55.18	47.13
40	480	0.02443	78.83	70.25
50	600	0.03291	105.9	102.1
60	720	0.04258	136.6	145.3
70	840	0.05353	171.2	203
89.91	1079	0.07948	252.9	376.5

Una vez conocidas las necesidades de caudal y presión se ha podido establecer el punto de operación óptimo del sistema pila-ventiladores. En la figura 4.6 se pueden observar las curvas de funcionamiento de cada modelo de ventilador a régimen nominal, mientras que en las Tablas 4.8 y 4.9 se muestran los valores de las pérdidas de carga totales asociadas a los canales catódicos para diferentes valores de flujo máscico de aire para ambos prototipos. Con estos datos se representan las curvas de operación del sistema de la pila.



a)



b)

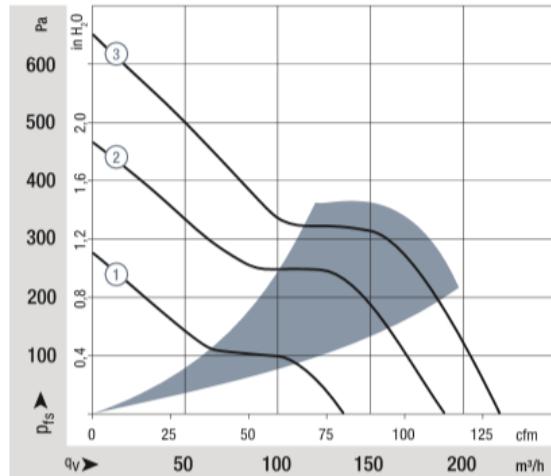


Figura 4.6. Curvas de funcionamiento de los ventiladores empleados como sistema de refrigeración en los prototipos diseñados: a) Modelo 422 JH b) Modelo 8212 JH4 (corresponden a las curvas nº 3).

Tabla 4.8. Cálculo de la curva de operación a través de los canales catódicos del prototipo de 5 celdas.

$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	$q_{aire,pila}$ [m³/h]	u_{aire} [m/s]	Re	f	ΔP_f [Pa]	ΔP_l [Pa]	ΔP [Pa]
0.001579	7	1.296	115.7	0.5547	18.93	1.365	20.29
0.002588	10	1.852	189.6	0.3384	27.03	3.195	30.23
0.003886	14	2.593	299.5	0.2142	35.97	6.717	42.69
0.00551	19	3.519	438.4	0.1463	47.28	12.92	60.21
0.006484	22	4.074	522.1	0.1457	64.17	17.61	81.78
0.008108	27	5	662	0.1161	78.46	27.03	105.5
0.009082	30	5.556	746	0.1043	87.73	33.64	121.4
0.01038	34	6.296	858.1	0.0926	100.9	43.57	144.4
0.01136	37	6.852	942.3	0.08581	111.3	51.87	163.1
0.01623	52	9.63	1363	0.06534	170.2	104.2	274.3
0.01753	56	10.37	1476	0.06198	187.7	121.2	308.9
0.02402	76	14.07	2038	0.05096	287.2	225.4	512.5

Tabla 4.9. Cálculo de la curva de operación a través de los canales catódicos del prototipo de 20 celdas.

$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	$q_{aire,pila}$ [m ³ /h]	u_{aire} [m/s]	Re	f	ΔP_f [Pa]	ΔP_l [Pa]	ΔP [Pa]
0.007711	32	1.481	141.2	0.4544	21.63	1.904	23.53
0.02983	100	4.63	606	0.1261	72.56	23.02	95.58
0.04932	160	7.407	1026	0.08025	122.2	60.89	183
0.06036	194	8.981	1265	0.06881	155.4	90.35	245.8
0.06231	200	9.259	1307	0.06725	161.7	96.15	257.8
0.0688	220	10.19	1448	0.06276	183.3	116.8	300.1
0.07205	230	10.65	1518	0.06085	194.5	127.9	322.4
0.08829	280	12.96	1869	0.05354	255.3	190.7	446.1
0.09478	300	13.89	2010	0.05136	281.7	219.4	501.1
0.1013	320	14.81	2150	0.04948	309.3	250.1	559.4
0.1078	340	15.74	2291	0.04783	338.1	282.7	620.8
0.1182	372	17.22	2515	0.04559	386.6	339.2	725.8
0.1305	410	18.98	2782	0.04341	448.1	412.9	860.9

Para el acoplamiento de los ventiladores a la pila se han diseñado piezas específicas. En el prototipo de 5 celdas se colocará un ventilador en cada lateral para favorecer la homogeneidad de flujo y el tercero irá paralelo a la cara frontal de los canales catódicos, como se muestra en la figura 4.7 (izquierda). Por otra parte, en el prototipo de 20 celdas los tres ventiladores se colocarán en la cara frontal con dirección paralela a los canales, como se muestra en la figura 4.7 (derecha). Los planos de estos acoplamientos se incluyen en el Anexo III.

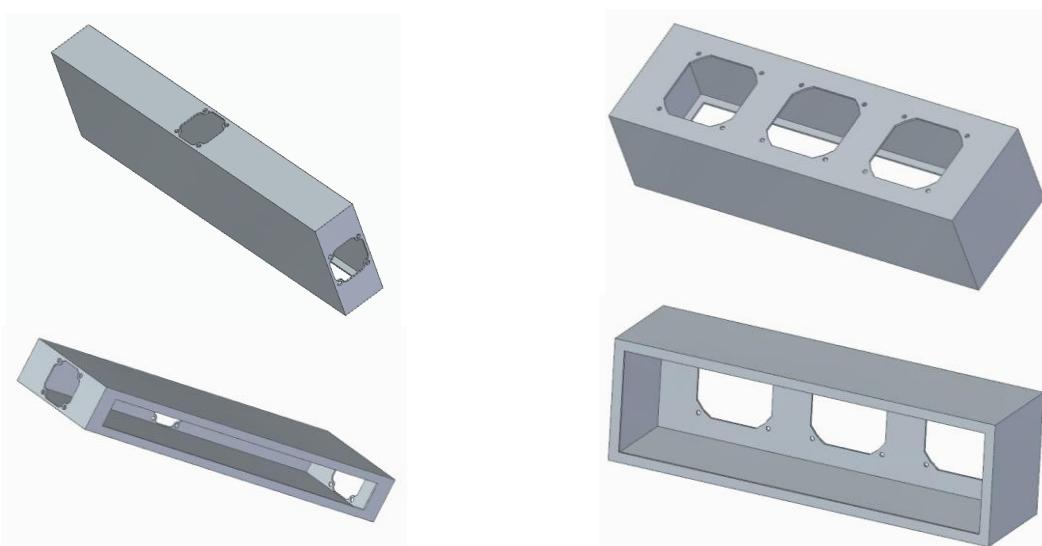


Figura 4.7. Piezas de acople de los ventiladores para prototipo de 5 (izquierda) y 20 celdas (derecha).

Las pilas de combustible trabajan a régimen variable, por lo que se deberá establecer varios regímenes de trabajo del sistema de ventiladores variando la velocidad de giro mediante la teoría de ventiladores. Se ha optado por 3 regímenes de trabajo:

- Régimen 1. Se utiliza desde el inicio del arranque de la pila, ya que este sistema se encarga tanto de la refrigeración como del suministro de oxígeno necesario para la reacción. En este régimen de operación se pondrán en funcionamiento los dos ventiladores laterales para el modelo de 5 celdas y todos los ventiladores para el modelo de 20 celdas a la velocidad que garantice el suministro mínimo de $\dot{m}_{aire,oxidación}$.
- Régimen 2. Se acciona cuando las paredes de la pila alcanzan 40°C y los ventiladores accionados en el régimen 1 aumentan su velocidad de giro al 60% del total. De esta forma la temperatura de la pila no aumenta de forma brusca.
- Régimen 3. Se pone en funcionamiento cuando se alcanza la temperatura deseada de refrigeración y todos los ventiladores aumentan su velocidad hasta las revoluciones que garanticen mantener constante la temperatura de la pila.

En la Tabla 4.10. se muestra un resumen de los regímenes con los datos de las velocidades de giro y los caudales de aire en cada caso. Mientras que en las figuras 4.8 y 4.9 se muestran los puntos de operación para los diferentes regímenes y para cada prototipo.

Tabla 4.10. Regímenes de trabajo del sistema de refrigeración para el prototipo de 5 y 20 celdas.

RÉGIMEN	VENTILADORES		$T_s [^{\circ}\text{C}]$	
	5 celdas	20 celdas	5 celdas	20 celdas
1	Sólo los 2 ventiladores laterales	3 ventiladores	$T_{amb} \leq T_s < 40$	$T_{amb} \leq T_s < 40$
	$RPM_1 = 1035 \text{ rpm}$	$RPM_1 = 700 \text{ rpm}$		
	$q_{aire,pila\ 1} = 0.52 \text{ m}^3/\text{h}$	$q_{aire,pila\ 1} = 2.1 \text{ m}^3/\text{h}$		
2	Sólo los 2 ventiladores laterales	3 ventiladores	$40 \leq T_s < 67$	$40 \leq T_s < 60$
	$RPM_2 = 10350 \text{ rpm}$	$RPM_2 = 8400 \text{ rpm}$		
	$q_{aire,pila\ 2} = 22.2 \text{ m}^3/\text{h}$	$q_{aire,pila\ 2} = 122 \text{ m}^3/\text{h}$		
3	3 ventiladores	3 ventiladores	$T_s \leq 67$	$T_s \leq 60$
	$RPM_3 = 17250 \text{ rpm}$	$RPM_3 = 13850 \text{ rpm}$		
	$q_{aire,pila\ 3} = 47.5 \text{ m}^3/\text{h}$	$q_{aire,pila\ 3} = 252.3 \text{ m}^3/\text{h}$		

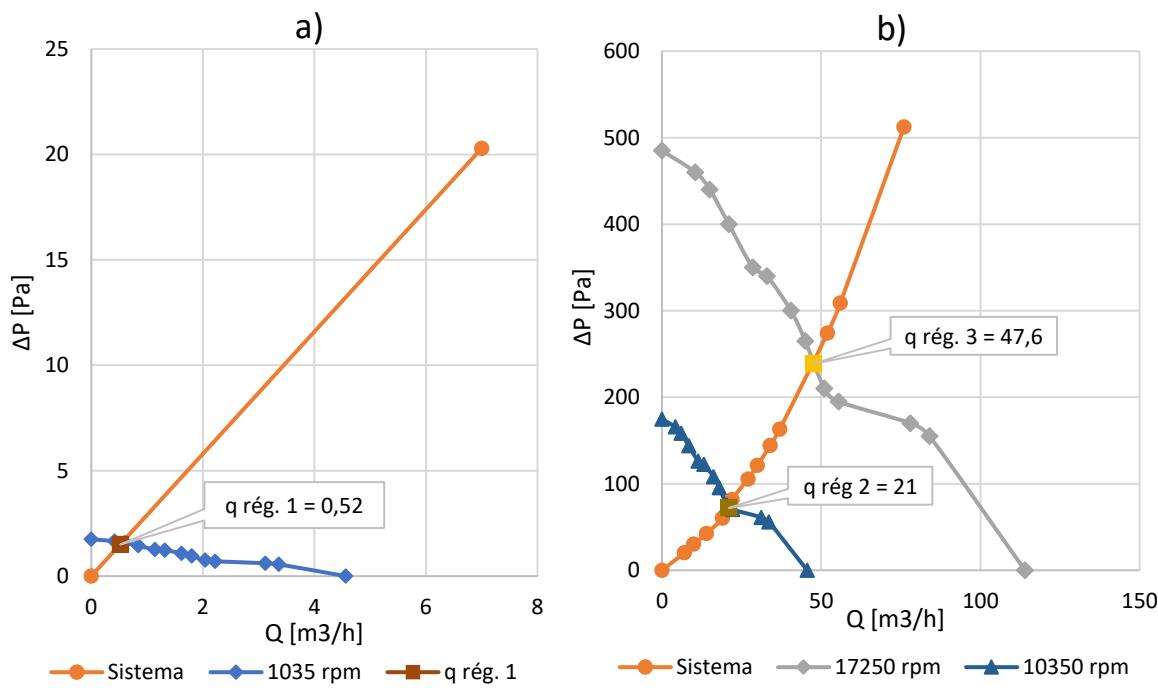


Figura 4.8. Curvas de operación del prototipo de 5 celdas para a) Régimen 1 y b) Regímenes 2 y 3.

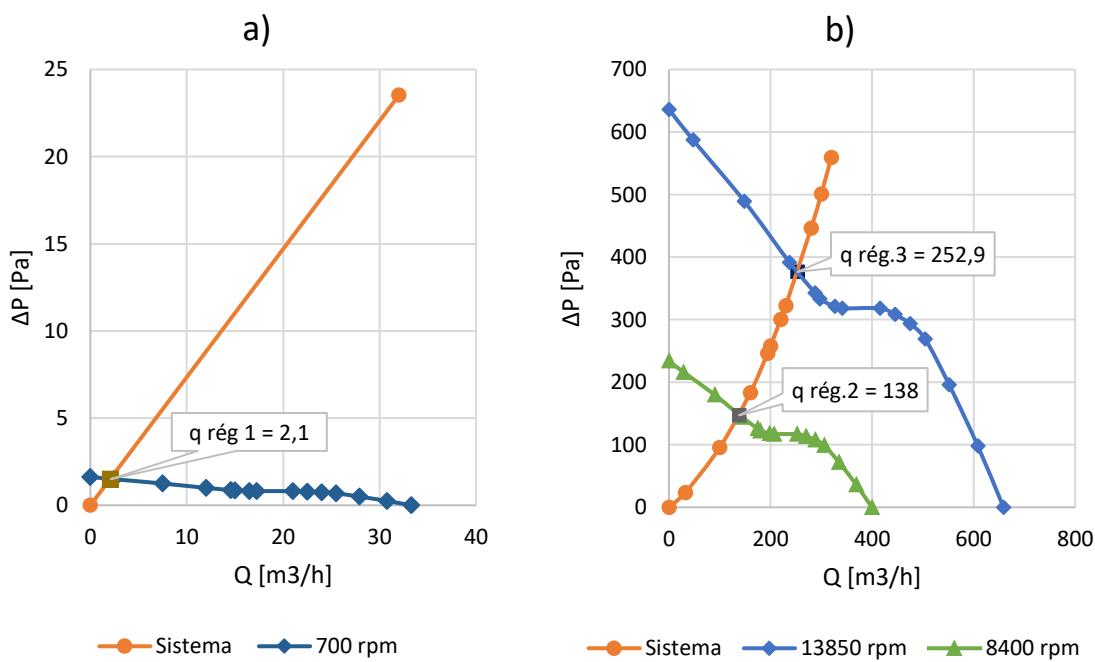


Figura 4.9. Curvas de operación del prototipo de 20 celdas para a) Régimen 1 y b) Regímenes 2 y 3.

4.4. Conclusiones

En este capítulo se han analizado los resultados obtenidos variando la temperatura de pared de la pila, el voltaje de celda y la densidad de corriente; escogiendo los valores más adecuados para el futuro montaje de la pila. Con los resultados obtenidos mediante el código se han seleccionado los ventiladores que formarán el sistema de refrigeración: 3 ventiladores acoplados en paralelo modelo 422 JH para el prototipo de 5 celdas y otros 3 ventiladores modelo 8212JH4 para el de 20 celdas. Para su acoplamiento en la pila se han diseñado con el programa Solid Edge dos piezas que serán fabricadas mediante impresión 3D. En el modelo de 5 celdas dos de los ventiladores irán colocados en los laterales de la pieza y estarán siempre en funcionamiento para garantizar la distribución homogénea de aire, mientras que para el prototipo de 20 celdas los tres ventiladores se sitúan en la cara frontal a los canales catódicos. Finalmente, mediante la teoría de ventiladores se han establecido 3 regímenes de trabajo para cada prototipo.

5. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE LA PILA

El objetivo final es la fabricación de una pila PEM con una potencia eléctrica de 1 kW, pero para ello antes se van a realizar pruebas de funcionamiento con un prototipo de $\frac{1}{4}$ kW conformado con 5 celdas.

En este capítulo se muestran y describen los elementos que forman el prototipo de 5 celdas, así como su montaje. Los elementos se presentan en orden secuencial empezando desde el exterior de la pila.

5.1. Elementos que conforman la pila

5.1.1. Placas terminales

Mecanizadas en aluminio con un espesor de 5 mm. Ambas caras son lisas e incluyen 12 agujeros en disposición rectangular necesarios para el sistema de cierre de la pila, así como 4 conectores para el suministro de hidrógeno (entrada y/o salida) fijados por rosca como se muestra en la figura 5.1 y un asiento en la cara interior para el sellado.



Figura 5.1. Foto de la placa terminal del prototipo de 5 celdas.

5.1.2. Placas aislantes

Se trata de unas placas de baquelita que sirven como aislante eléctrico, ya que van colocadas seguidas de los colectores de corriente, permitiendo manipular las placas terminales sin riesgo eléctrico. Contiene, además de los agujeros para los tornillos de apriete, dos ranuras que permiten el paso del hidrógeno con un alojamiento alrededor de cada una destinado a las juntas en la cara interior.



Figura 5.2. Foto de la placa aislante del prototipo de 5 celdas.

5.1.3. Colectores de corriente

Se encargan, como su nombre indica, de colectar la corriente de todas las celdas. Están hechas de cobre y poseen una pestaña para permitir una fácil colocación de los bornes eléctricos. Al igual que las placas aislantes, contienen los agujeros para los tornillos de apriete y las ranuras de suministro de hidrógeno (ver Figura 5.3).



Figura 5.3. Foto del colector de corriente del prototipo de 5 celdas tras su uso.

5.1.4. Placas monopolares y bipolares

El uso de dos placas monopolares es necesario al inicio y al final del “stack” debido a que los colectores son placas independientes de las terminales. Se denominan así ya que únicamente cuentan con canales en una cara, mientras que en la adyacente al colector de corriente es totalmente plana.

Ambos tipos de placa están fabricados de aluminio recubierto de una capa de níquel para evitar la corrosión. Ambas placas tienen también sus correspondientes agujeros para los tornillos de cierre y sujeción y alojamientos para juntas alrededor del suministro de hidrógeno en la cara catódica y de la cara exterior de las placas monopolares, así como alrededor del área exterior de los canales en la cara anódica como puede verse en la figura 5.4. Además, las placas bipolares tienen 8 muescas para introducir varillas centradoras, que se utilizan durante el montaje y se retiran una vez concluido el mismo.

Las geometrías de flujo de las placas monopolares son idénticas a las bipolares. Los canales del ánodo son paralelos, con una anchura de 349 mm. Tienen una anchura de 2 mm y una profundidad de 0,5 mm, separados por nervios de una anchura de 2 mm. Los canales del cátodo son también rectos y paralelos. Se agrupan en 10 bloques de 5 canales de 120 mm de longitud, 3 mm de anchura y 2 mm de profundidad, separados por nervios de 2 mm de anchura.



Figura 5.4. Fotos de una placa monopolar (izquierda) con lado ánodo y de una placa bipolar (derecha) por sus dos caras.

5.1.5. MEA (Membrane Electrode Assembly)

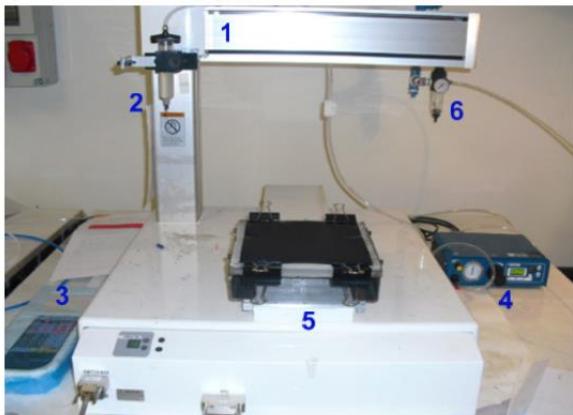
Está formada por el conjunto de una membrana cubierta de una capa catalizadora (electrodo) y una capa difusora a cada lado:

- La membrana polimérica utilizada es de Nafión, que es el electrolito comercial más común en pilas PEM de baja temperatura. Posee un alto grado de conducción protónica, es impermeable a los gases y aislante eléctrico. Estas características se pierden si no se logra una correcta humectación.
- Las capas catalíticas son de un material carbonoso altamente poroso y conductor eléctrico (platino soportado por carbón); y es donde se produce las reacciones electroquímicas de ánodo y cátodo.
- Las capas difusoras están formadas por materiales porosos y altos conductores de electricidad (en este caso una tela carbonosa) de forma que facilitan la difusión del gas hasta los electrodos, conducen los electrones a través de las placas bipolares, extraen el agua producida en el cátodo y, además, soportan mecánicamente los electrodos.

5.2. Montaje del prototipo de 5 celdas

El montaje comienza aplicando las juntas de silicona a las placas para evitar escapes de hidrógeno y cruces de gases entre placas, así como aislar eléctricamente cátodo y ánodo de las placas bipolares de una celda. La aplicación se realiza mediante un robot programable con control de movimiento en tres ejes. La plataforma de sujeción inferior permite el movimiento en el eje Y, mientras que el brazo mecánico que sujetta el dosificador del sellante se mueve en los ejes X y Z. La figura 5.5 muestra una foto del automata.

Durante la aplicación de la silicona, es importante que los cordones sean uniformes, sin roturas, para lo cual hay que realizar antes un proceso de optimización para regular la presión, la velocidad de movimientos, el tiempo de trabajo y el tamaño de la aguja.



1. Brazo mecánico
2. Dosificador del sellante
3. Cuadro de control y programación
4. Regulador de presión para la inyección
5. Plataforma de sujeción
6. Línea de aire comprimido

Figura 5.5. Fotografía del robot I&J 2500N-CE220SET de la firma I&J Fisnar.

Tras el tiempo de fraguado de 15 días, se procede a la superposición de los elementos. Es común el uso de unas varillas que hagan de guía de posicionamiento de todas las placas.

El conjunto de placa terminal, placa aislante y colector de corriente van dispuestos en ese orden y atornillados entre sí. A estos se atornilla el módulo de 5 celdas formado por una placa terminal, 3 placas bipolares y la otra placa terminal; siguiendo el patrón ánodo-cátodo e intercalando una MEA entre cada placa. Despues se cierra la pila con otro conjunto colector de corriente, placa aislante y placa terminal. Con este diseño de montaje, en el futuro cuando se cuente con varios módulos de 5 celdas, se podrá extraer uno de la pila sin necesidad de desmontar el resto.

El ensamblaje se realiza en una prensa vertical manual para facilitar el apriete de los tornillos. Una vez convenientemente apretados, se retira la pila de la prensa. Al comprimirse las juntas, es posible que durante unos días sea necesario comprobar el apriete de los tornillos y reajustarlos.

Una vez montada la estructura se procederá a la instalación del sistema de refrigeración. Los ventiladores se atornillarán a la pieza de acople, que se pegará con silicona a la salida de los canales catódicos. Finalmente se conectarán su sistema electrónico.

6. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Se ha realizado una prueba de calentamiento del prototipo de 5 celdas con mediciones en estado semi-estacionario. Con ello se pueden observar las temperaturas y potencia alcanzadas a medida que se aumenta la intensidad de corriente. A partir de estos resultados se ha replicado el comportamiento del prototipo mediante la modificación del código computacional de EES diseñado para el cálculo de la refrigeración.

6.1. Descripción del experimento y resultados

A la pila montada según la descripción del capítulo anterior de este proyecto se le ha añadido una pieza con forma de prisma triangular por la cual se suministra el oxígeno a las placas catódicas, ya que no se ha instalado el sistema de refrigeración. Con esta modificación la pila pasa a ser de cátodo cerrado.

El “stack” se conecta al banco de ensayos, el cual cuenta con sistemas de medida, control, purgado y seguridad. El banco controla el caudal de los gases reactantes, la presión y monitoriza la temperatura de la pila en tres partes diferentes (zona superior, inferior y central) mediante termopares. En caso de fallo, cuenta con botón de emergencia, sistema de detección de fugas de hidrógeno, válvulas de retención y un circuito de nitrógeno independiente que permite cortar el paso de gases.

El experimento consiste en la puesta en marcha de la pila, realizando mediciones cada 5 minutos de la temperatura y el voltaje de cada celda, así como de su potencia. Durante la transición se cambia la intensidad de corriente cuatro veces (0.01, 0.05, 5 y 10 A). El experimento finaliza al alcanzar una temperatura próxima a 80°C para evitar daños en las MEAs. Los resultados obtenidos pueden verse numéricamente en la Tabla A-II-8 del Anexo II y gráficamente en la figura 6.1.

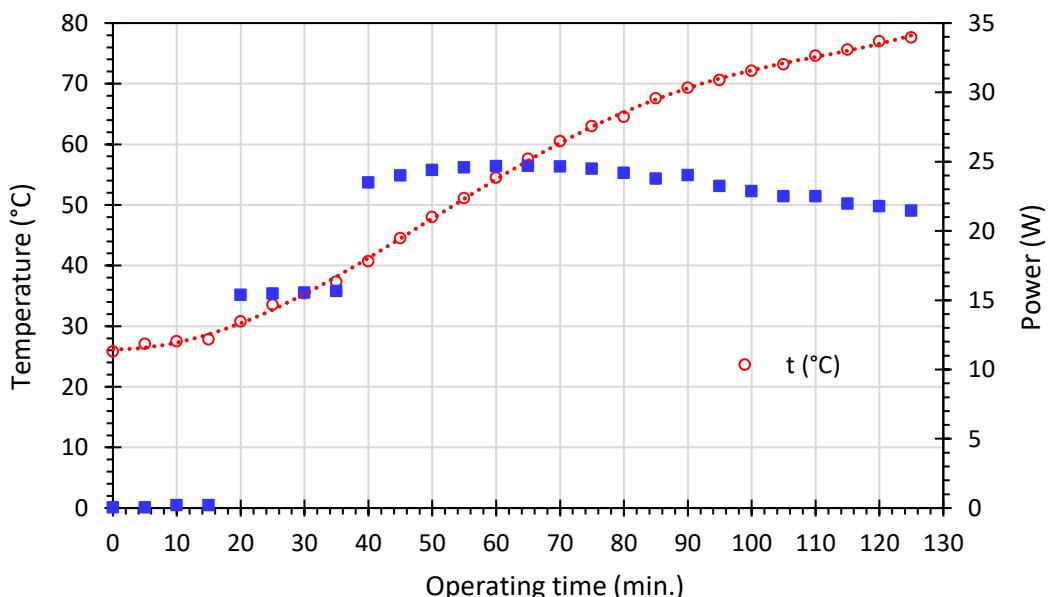


Figura 6.1. Gráfico temperatura y potencia del “stack” respecto al tiempo obtenidos experimentalmente.

A medida que se aumenta la intensidad de corriente, la temperatura y la potencia también aumentan. Sin embargo, cuando la temperatura es mayor a 65°C aproximadamente, la potencia disminuye. Esto se debe a que existe un rango de temperaturas de operación dentro del cual la pila puede funcionar correctamente y si se sobrepasa, la eficiencia disminuye debido a la influencia sobre el potencial termodinámico reversible y las pérdidas de activación y de concentración. En esa zona de descenso de la potencia existen dos incrementos de ella debido a la realización de purgado de hidrógeno.

6.2. Código computacional

Modificando el código diseñado inicialmente, se pretende reproducir el comportamiento de la pila de forma teórica. El nuevo sistema de ecuaciones se encuentra en el apartado A-I-2 del Anexo I. Como el “stack” se considera un bloque compacto, está sometido a convección natural a través de sus caras exteriores.

El modelo electroquímico se mantiene sin modificar y el dato de la intensidad de corriente es un valor conocido que se aumenta con el tiempo.

$$Pot_{cel} = I_{pila} \cdot V_{cel} \quad \text{Ec. 6.1}$$

$$Pot_{pila} = Pot_{cel} \cdot n_{cel} \quad \text{Ec. 6.2}$$

$$I_{pila} = i \cdot A_{celda} \quad \text{Ec. 6.3}$$

El calor generado por el “stack” se calcula con la misma ecuación de Barbir utilizada en el código original.

$$Q_{gen} = (1.482 - V_{cel}) \cdot I_{pila} \cdot n_{cel} \quad \text{Ec. 6.4}$$

La transmisión de calor se produce a través de la convección natural (Q_{conv}), del calor que se lleva el agua generada en la reacción ($Q_{aguagen}$) y del calor transitorio del metal (Q_{trans}).

$$Q_{tc} = Q_{conv} + Q_{aguagen} + Q_{trans} \quad \text{Ec. 6.5}$$

El calor por convección natural se determina a partir de la Ec. 6.6, donde T_{metal_ext} es la temperatura externa de la pila (se puede aproximar a la temperatura global del “stack”), T_{aire} es la temperatura del aire ambiente y R_{conv} es la resistencia convectiva.

$$Q_{conv} = \frac{T_{metal_ext} - T_{aire}}{R_{conv}} \quad \text{Ec. 6.6}$$

Para calcular R_{conv} se necesita determinar el coeficiente de convección natural, h_{nat} , el cual depende del número adimensional Nusselt, NuL . Donde A_{ext} es el área exterior de la pila en contacto con el aire, L_{altura} es la altura de la pila y k_{aire} es la conductividad térmica del fluido.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{nat} \cdot A_{ext}} \quad \text{Ec. 6.7}$$

$$h_{nat} = \frac{k_{aire}}{Laltura * NuL} \quad \text{Ec. 6.8}$$

Para el cálculo de NuL se han probado diferentes fórmulas para placas verticales, cilindros verticales y otros cuerpos sumergidos. Finalmente, el mejor resultado se ha obtenido con las ecuaciones 6.9 y 6.10 de Pavlov [25], que dependen del rango en el que se encuentre el producto entre los números adimensionales Prandtl (Pr) y Grashof (Gr).

$$NuL = 0.76 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad 10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9 \quad \text{Ec. 6.9}$$

$$NuL = 0.15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0.33} \quad Gr \cdot Pr > 10^9 \quad \text{Ec. 6.10}$$

Donde Gr se calcula,

$$Gr = 9.81 \cdot \frac{L^3}{\left(\frac{\mu_{aire}}{\rho_{aire}}\right)^2} \cdot \frac{1}{273} \cdot (T_{metal_{ext}} - T_{aire}) \quad \text{Ec. 6.11}$$

Todas las propiedades del aire se calculan a la temperatura de película, T_p .

$$T_p = \frac{T_{metal_{ext}} - T_{aire}}{2} \quad \text{Ec. 6.12}$$

El calor que se lleva el agua generada en la reacción se obtiene a partir de la ecuación 6.13. Los términos \dot{m}_{agua} , cp_{agua} y PM_{agua} son respectivamente el flujo mísico, el calor específico y el peso molecular del agua; y F es la constante de Faraday.

$$Q_{aguagen} = \dot{m}_{agua} \cdot cp_{agua} \cdot T_{metal_{ext}} \quad \text{Ec. 6.13}$$

$$\dot{m}_{agua} = \frac{PM_{agua} \cdot I_{pila} \cdot n_{cel}}{2 \cdot F \cdot 1000} \quad \text{Ec. 6.14}$$

Por último, el calor transitorio se obtiene mediante la ec. 6.15, donde ρ_{metal} , cp_{metal} son la densidad y el calor específico de la pila; *Volumen* es el volumen del "stack" considerándolo un bloque macizo y $\frac{dT}{dt}$ es la derivada de la temperatura respecto al tiempo. Este último dato se saca de los valores medidos experimentalmente.

$$Q_{trans} = \rho_{metal} \cdot Volumen \cdot cp_{metal} \cdot \frac{dT}{dt} \quad \text{Ec. 6.15}$$

Finalmente se cierra el balance de calor con el error de cálculo (*ERROR*), el cual se debe minimizar en función de la temperatura exterior del metal.

$$ERROR = \left| \frac{Q_{tc} - Q_{gen}}{Q_{gen}} \right| \cdot 100 \quad \text{Ec. 6.16}$$

Los resultados obtenidos con el código pueden verse en la Tabla A-II-9 del Anexo II. El valor de $\frac{dT}{dt}$ se ha escogido como la diferencia entre la temperatura media medida en el

último tiempo y esta misma temperatura a los 5 minutos de comenzar la puesta en marcha, dividido por el tiempo transcurrido en el experimento.

La temperatura final de pared obtenida mediante es código fue de 346.5 K, es decir, 73.5°C, mientras que la temperatura media final medida experimentalmente es de 74.06°C.

La reducida diferencia entre la temperatura de pared medida en los experimentos y la calculada mediante el código computacional, permite asegurar que las ecuaciones implementadas describen bastante lo ocurrido durante el funcionamiento de la pila, por lo que el código queda validado, en el rango de operación analizado.

7. CONCLUSIONES

Durante la realización del proyecto se ha llegado a una serie de conclusiones.

Tras analizar la bibliografía, se ha comprendido el funcionamiento de una pila de tipo PEM, así como los elementos que la conforman y sus geometrías. Además, se han analizado los posibles sistemas de refrigeración que se podrían diseñar para un dispositivo con unas determinadas características.

Una vez estudiada la transferencia de calor, desarrollado el código computacional y comprobado la influencia de la temperatura, densidad de corriente y voltaje de celda sobre el funcionamiento de la pila, se ha llegado a la conclusión de que el rango de temperatura de operación ideal está entre 50-70°C. De este modo la MEA no se deteriora al tener un margen de seguridad hasta llegar a los 80°C. Por otro lado se ha decidido establecer el voltaje de celda en 0.6 V, siendo 0.5-0.6 V lo común en las pilas comerciales, ya que para valores menores la potencia necesaria de los ventiladores para refrigerar la pila comprometía la fabricación y el funcionamiento general al requerirse una potencia de insumo en los ventiladores mayor que la producida en la pila.

Con los parámetros ya fijados, se han calculado las necesidades de refrigeración para dos “stacks” diferentes: el de 1kW de 20 celdas y un prototipo a menor escalar que se desea construir previamente con 5 celdas y ¼ kW. Es necesario que el sistema de ventiladores impulse un caudal de 47.62 m³/h en la pila de ¼ kW de potencia, venciendo una pérdida de presión de 238.9 Pa, y de 252.9 m³/h en la de 1 kW, para una carga de presión de 376.5 Pa.

Dentro de los catálogos comerciales de ventiladores axiales compactos se han buscado los que más se ajustan a los requerimientos. Se han escogido 3 ventiladores iguales para cada pila, que se conectarán en paralelo, todos de la empresa Embpapst: modelo 442 JH para el “stack” de 5 celdas y modelo 8212 JH4 para el de 20 celdas. En ambos casos los ventiladores trabajarán a succión.

Tras esto se han establecido los puntos de operación para tres regímenes de trabajo diferentes en función de la temperatura que la pila vaya alcanzando. Para ello se regulará la velocidad de giro de los ventiladores, la cual es calculada mediante la teoría de ventiladores. El régimen 1 se utiliza desde el inicio del arranque de la pila, donde se podrán encender los ventiladores de los extremos en el caso de la pila de ¼ kW, suministrando 0.52 m³/h a 1035 rpm; mientras que en el “stack” de 1kW operarán los tres ventiladores a 700 rpm, succionando un flujo volumétrico de 2.1 m³/h. Cuando la pila alcance 40°C se pasará al régimen 2. En este caso los ventiladores en funcionamiento durante el régimen 1 aumentarán su velocidad de giro al 60% del total. Con ello los ventiladores girarán a 10350 rpm y 8400 rpm, y suministrarán 22.2 m³/h y 122 m³/h para las pilas de ¼ kW y 1 kW respectivamente. Finalmente, el régimen 3, tiene lugar cuando se alcanza la temperatura de refrigeración establecida, donde todos los ventiladores se pondrán en funcionamiento girando a 17250 rpm y moviendo 47.5 m³/h para la pila de ¼ kW y a 13850 rpm suministrando 252.3 m³/h para la de 1 kW.

Para el acople de los ventiladores a la pila se ha diseñado una pieza para cada prototipo. Tras la impresión en 3D de la pieza para el “stack” de 5 celdas, se ha decidido hacer un rediseño. En él el espesor de la pieza será de 2 mm para que durante la fabricación se asegure la correcta unión de las capas del material. Además se añadirá un alojamiento para las tuercas de forma que se facilite su montaje.

Se ha montado en el LIFTEC el prototipo de 5 celdas para realizar un experimento de calentamiento sin la instalación del sistema de refrigeración diseñado. En él se ha comprobado que la pila se calienta más por la parte central.

Atendiendo a las características del prototipo de pila probado experimentalmente, se ha confeccionado un nuevo código de ecuaciones donde se replican los resultados de forma teórica. Considerando un estado semi-estacionario, se ha calculado la temperatura para el último tiempo, obteniendo un resultado de temperatura de pared de la pila que se diferencia de la medida en tan solo 0.5°C , por lo que se puede asegurar que el código 1-D confeccionado, describe con suficiente exactitud lo que ocurre en la pila.

Como trabajo futuro se montará el prototipo de 5 celdas con el sistema de refrigeración diseñado en este proyecto y se comprobará su eficiencia. En caso de ser satisfactorio, se procederá a la fabricación del “stack” de 20 celdas, cuyo diseño de ensamblaje será reforzado mediante la colocación de más tornillos de apriete alrededor de los suministros de hidrógeno y de las zonas medianas de las placas para evitar el pandeo; así como la colocación de una placa terminal más gruesa con tornillos de apriete en la zona central.

8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Barbir, "PEM Fuel Cells: Theory and Practice," in *PEM Fuel Cells*, 2nd ed., Elsevier, 2013.
- [2] P. Grimes, "Historical pathways for fuel cells. The new electric century," *Proc. Annu. Batter. Conf. Appl. Adv.*, vol. January, pp. 41–45, 2000, doi: 10.1109/BCAA.2000.838369.
- [3] S. Srinivasan, *Fuel Cells: From Fundamentals to Applications*, vol. 1. Boston, MA: Springer US, 2006.
- [4] F. Barreras and A. Lozano, "Hidrógeno. Pilas de combustibles de tipo PEM," *Año Int. la energía Sosten. para todos*, p. 19, 2012.
- [5] A. M. López Sabirón, "Gestión térmica y del agua en una pila de combustible tipo PEM. Diseño y fabricación de pilas.," Zaragoza, 2011.
- [6] G. Zhang and S. G. Kandlikar, "A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 3, pp. 2412–2429, 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.11.010.
- [7] S. Asghari, H. Akhgar, and B. F. Imani, "Design of thermal management subsystem for a 5 kW polymer electrolyte membrane fuel cell system," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 6, pp. 3141–3148, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.077.
- [8] S. Shahsavari, A. Desouza, M. Bahrami, and E. Kjeang, "Thermal analysis of air-cooled PEM fuel cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 23, pp. 18261–18271, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.075>.
- [9] A. Faghri and Z. Guo, "Challenges and opportunities of thermal management issues related to fuel cell technology and modeling," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 19–20, pp. 3891–3920, 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.014.
- [10] M. Matian, A. Marquis, and N. Brandon, "Model based design and test of cooling plates for an air-cooled polymer electrolyte fuel cell stack," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 10, pp. 6051–6066, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.01.026.
- [11] G. Squadrito, O. Barbera, G. Giacoppo, F. Urbani, and E. Passalacqua, "Polymer electrolyte fuel cell stack research and development," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1941–1946, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.01.041.
- [12] S. Chupin *et al.*, "Numerical investigation of the impact of gas and cooling flow configurations on current and water distributions in a polymer membrane fuel cell through a pseudo-two-dimensional diphasic model," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 16, pp. 5213–5227, 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.03.027.
- [13] A. P. Sasmito, K. W. Lum, E. Birgersson, and A. S. Mujumdar, "Computational study of forced air-convection in open-cathode polymer electrolyte fuel cell stacks," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 17, pp. 5550–5563, 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.02.083.
- [14] S. Strahl, A. Husar, and M. Serra, "Development and experimental validation of a dynamic thermal and water distribution model of an open cathode proton

- exchange membrane fuel cell," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 9, pp. 4251–4263, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.10.074.
- [15] G. Hu, J. Fan, S. Chen, Y. Liu, and K. Cen, "Three-dimensional numerical analysis of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) with conventional and interdigitated flow fields," *J. Power Sources*, vol. 136, no. 1, pp. 1–9, 2004, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.05.010.
- [16] D. S. Falcão, V. B. Oliveira, C. M. Rangel, C. Pinho, and A. M. F. R. Pinto, "Water transport through a PEM fuel cell: A one-dimensional model with heat transfer effects," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 64, no. 9, pp. 2216–2225, 2009, doi: 10.1016/j.ces.2009.01.049.
- [17] J. Renau *et al.*, "Design and manufacture of a high-temperature PEMFC and its cooling system to power a lightweight UAV for a high altitude mission," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 43, pp. 19702–19712, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.209.
- [18] F. Barreras, A. Lozano, J. Barroso, V. Roda, and M. Maza, "Theoretical model for the optimal design of air cooling systems of polymer electrolyte fuel cells. Application to a high-temperature PEMFC," *Fuel Cells*, vol. 13, no. 2, pp. 227–237, 2013, doi: 10.1002/fuce.201200077.
- [19] J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, "Heat Transfer Textbook," in *Heat Transfer Textbook*, Lienhard IV, John H., 2008.
- [20] J. M. Marín and C. Monné, *Transferencia de calor*, vol. 1, no. 11. Zaragoza, 1998.
- [21] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa*, 4th ed., vol. 91, no. 5. Mc Graw Hill, 2011.
- [22] F. Barreras, A. M. López, A. Lozano, and J. E. Barranco, "Experimental study of the pressure drop in the cathode side of air-forced Open-cathode proton exchange membrane fuel cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 13, pp. 7612–7620, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.03.149.
- [23] Frano Barbir, "6.Stack design, in: F. Barbir (Ed), PEM Fuel Cells: Theory and Practice," in *Elsevier Academic Press*, 2005, pp. 147–206.
- [24] R. Goberna, *Ventilación industrial*, 1^a. 1992.
- [25] K. F. Pavlov, A. A. Noskov, and P. G. Romankov, *Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química*, Traducción. Moscú: MIR, 1981.

ANEXOS

ANEXO I. CÓDIGOS EN EES

En este anexo se presentan dos programas computacionales desarrollados durante el diseño del sistema de refrigeración y tras la realización de la prueba experimental. Los códigos se han programado en EES (Engineering Equation Solver), permitiendo modificar cualquier parámetro de diseño (voltaje de celda, temperatura de pared, densidad de corriente, número de celdas, propiedades físicas, etc.) y resolver de nuevo las ecuaciones de manera instantánea, reduciendo el tiempo de cálculo.

Los programas permiten determinar la cantidad necesaria de aire y la presión que deben suministrar y vencer los ventiladores respectivamente para mantener la pila a una determinada temperatura y, por otro lado, reproducir los resultados obtenidos experimentalmente al realizar la prueba de calentamiento. En ambos códigos se han incluido comentarios con aclaraciones y las expresiones en formato de ecuación para facilitar su lectura.

A-I-1. Código 1: Cálculos para el diseño del sistema de refrigeración

"TEMPERATURAS"

```
Ts=273+70  "[K] Temperatura de pared de pila"  
Taire_ent=273+25  "[K] Temperatura de entrada del aire en los canales"
```

"DIMENSIONES DE LA PILA"

```
Ncanales=50 "Número de canales"  
L_prof=2E-3 [m] "Profundidad del canal de refrigeración en la placa"  
L_ancho=3E-3  [m] "Anchura del canal de refrigeración"  
Lcanal=120E-3  [m] "Longitud total de los canales en una monocelda"  
A_MEA&aire=L_ancho*Lcanal  "[m^2] Área de contacto entre la MEA y el  
aire"  
A_placa&aire=(2*L_prof+L_ancho)*Lcanal  "[m^2] Área de contacto entre  
la placa y el aire. Son tres lados del rectángulo que forma el canal"  
Apaso=L_prof*L_ancho  "[m^2] Área de paso transversal del  
refrigerante en el canal"  
espesor_MEA=0,6E-3  [m] "Espesor de una MEA"  
espesor_placa=3E-3  [m] "Espesor de una placa bipolar"
```

"MODELO ELECTROQUÍMICO"

```
V_cel=0,6  [V] "Voltaje por celda"  
i=0,35  [A/cm^2] "Densidad de corriente"  
A_celda=256,88  [cm^2] "Área activa de una celda"  
n_cel=20  "Número de celdas"  
I_pila=i * A_celda  "[A] Corriente generada por la pila"  
Pot_cel=I_pila * V_cel  "[W] Potencia generada por una celda"  
Pot_pila=Pot_cel * n_cel  "[W] Potencia total de la pila"  
  
Qgen=(1,482-V_cel)*I_pila*n_cel  "[W] Calor generado cuando el agua  
producida sale de la pila en estado líquido a 25°C"
```



$Q_{gen_canal}=Q_{gen}/n_{cel}/N_{canales}$ "[W/canal] Calor generado por unidad de canal"

"*MODELO TÉRMICO*"

$Q_{gen_canal}=Q_{aire}$ "[W/canal] El calor generado tiene que ser eliminado por el aire"

$Q_{tc}=Q_{MEA}+Q_{placa}$ "[W/canal] Balance de energía"
 $Error=100*abs(Q_{tc}-Q_{gen_canal})/Q_{gen_canal}$ "[%]"

"*Convección forzada*"

$Q_{MEA}=U_{MEA}*(A_{MEA}&aire)*DT_{log}$ "[W/canal] Calor transmitido a través de la MEA"

$U_{MEA}=1/(1/h_{aire}+(espesor_{MEA}/k_{MEA}))$ "[W/(m^2*K)] Coeficiente de intercambio global. Tiene en cuenta la convección y la conducción con la MEA"

$k_{MEA}=1,3$ [W/(m*K)] "Conductividad térmica aproximada. Corresponde a Carbon Paper - AvCarb™ P75 tomada a 100°C"

$Q_{placa}=U_{placa}*(A_{placa}&aire)*DT_{log}$ "[W/canal] Calor transmitido a través de una placa bipolar"

$U_{placa}=1/(1/h_{aire}+(espesor_{placa}/k_{placa}))$ "[W/(m^2*K)] Coeficiente de intercambio global. Tiene en cuenta la convección y la conducción con la placa"

$k_{placa}=k_{('Aluminum');Ts}$ "[W/(m*K)] Conductividad térmica de las placas bipolares"

"*Cálculo del coeficiente de convección del aire*"

$h_{aire}=Nusselt*k_{aire}/Dh_{aire}$ "[W/(m^2*k)] Coeficiente de convección forzada"

$Nusselt=1,4*(Re*Dh_{aire}/L_{canal})^{0,4}*Pr^{0,33}$ "Número Nusselt válido para $Re>10$ y $L/d>10$ "

$Pr=prandtl(Air;T=(Taire_{ent}+Taire_{sal})/2)$ "Número Prandtl"

$Re=Rho_{aire}*u_{aire}*Dh_{aire}/mu_{aire}$ "Número Reynold del conducto"

$Rho_{aire}=Density(Air;T=(Taire_{ent}+Taire_{sal})/2;P=1)$ "[kg/m^3]

Densidad del refrigerante"

$mu_{aire}=Viscosity(Air;T=(Taire_{ent}+Taire_{sal})/2)$ "[kg/m*s]

Viscosidad del refrigerante"

$m_{aire}=u_{aire}*Rho_{aire}*Apaso$ "[kg/(s*canal)] Flujo másico máximo de refrigerante en un canal"

$k_{aire}=CONDUCTIVITY(Air;T=(Taire_{ent}+Taire_{sal})/2)$ "[W/m*K]
 Conductividad térmica del fluido"

$Dh_{aire}=4*(Apaso/(2*L_{prof}+2*L_{ancho}))$ "[m] Diámetro hidráulico equivalente"



"Desarrollo de La media Logarítmica de temperaturas"

```
DT_sal=Ts-Taire_sal
DT_ent=Ts-Taire_ent
DT_log=(DT_ent-DT_sal)/ln(Arg)      "Media logarítmica de temperatura"
Arg=(DT_ent/DT_sal)
```

"Balance del aire"

```
Q_aire=m_aire*Cp_aire*(Taire_sal-Taire_ent)      "[W/canal] Calor
evacuado por el aire en un canal"
Cp_aire=CP(Air;T=(Taire_ent+Taire_sal)/2)        "[J/(Kg*K)] Calor
específico del aire"
```

"CONSUMO DE GASES"

```
n_O2=1/(96487*4) "[g mol_O2/s*A] Número de moles de oxígeno por
segundo necesarios para generar 1A"
ICE_O2= n_O2*16*2   "[g_O2/s*A] Índice de consumo específico o
masa de oxígeno por tiempo y amperio"
m_O2_estq= ICE_O2*I_pila*n_cel/1000    "[kg/s] Flujo de oxígeno
estequiométrico consumido por la pila"
```

```
m_O2_estq=(1-0,77)*m_aire_oxidación      "m_aire_oxidación es el flujo
de aire que reacciona con el hidrógeno [Kg/s]"
m_N2=0,77*m_aire_oxidación    "Flujo de N2. Tiene propiedades similares
al aire"
m_aire* Ncanales*n_cel=m_aire_exceso+m_N2    "m_aire_exceso es el
flujo de aire que debemos meter en cada pila de más, para que en
conjunto se pueda realizar la reacción y la refrigeración"
```

```
m_airepila=m_aire*Ncanales*n_cel    "[Kg/s] Flujo másico de aire total
que se mete en la pila"
```

"PÉRDIDA DE CARGA"

```
DELTAP_f=(f*Lcanal/Dh_aire)*1/2*Rho_aire*(u_aire)^2  "[Pa] Pérdida de
carga por fricción en los canales de una placa"
"f=(58,91+50,66*exp(-3,4/(L_ancho/L_prof)))/Re"  "Factor de fricción
para flujo laminar (Re<500)"
1/sqrt(f)=-10*(ln(0,218+(65,6/(Re*sqrt(f)))))/ln(10)  "Factor de
fricción para flujo de transición-turbulento (Re>500)"
```

```
DELTAP_l=(k_ent+k_sal)*1/2*Rho_aire*u_aire^2  "[Pa] Pérdidas de carga
locales en los canales"
k_ent=1    "Coeficiente local de perdida de carga en la entrada"
k_sal=1    "Coeficiente local de perdida de carga en la salida"
```

```
DELTAP=DELTAP_f+DELTAP_l      "[Pa] Pérdidas de carga totales"
```

```
W_ventilador= (Caudal_airecel*n_cel)*(DELTAP)/eta    "[W] Potencia del
ventilador en toda la pila"
```

$\eta = 0,6$ "Rendimiento del ventilador. Nos ponemos en el peor de los casos (0,6-0,9)"
 $Q_{aire} = m_{aire} \cdot N_{canales} / \rho_{aire}$ "[m^3/(s*celda)] Caudal de aire por celda"
 $q_{airepila} = Q_{aire} \cdot n_{cel} \cdot 3600$ "[m^3/h] Caudal de aire en toda la pila"

"Temperaturas"

$T_s = 273 + 70$ "[K] Temperatura de pared de pila"
 $T_{aire_ent} = 273 + 25$ "[K] Temperatura de entrada del aire en los canales"

"DIMENSIONES DE LA PILA"

$N_{canales} = 50$ "Número de canales"
 $L_{prof} = 2 \cdot 10^{-3}$ [m] "Profundidad del canal de refrigeración en la placa"
 $L_{ancho} = 3 \cdot 10^{-3}$ [m] "Anchura del canal de refrigeración"
 $L_{canal} = 120 \cdot 10^{-3}$ [m] "Longitud total de los canales en una monocelda"
 $A_{MEA\&aire} = L_{ancho} \cdot L_{canal}$ "[m^2] Área de contacto entre la MEA y el aire"
 $A_{placa\&aire} = (2 \cdot L_{prof} + L_{ancho}) \cdot L_{canal}$ "[m^2] Área de contacto entre la placa y el aire. Son tres lados del rectángulo que forma el canal"
 $A_{paso} = L_{prof} \cdot L_{ancho}$ "[m^2] Área de paso transversal del refrigerante en el canal"
 $espesor_{MEA} = 0,6 \cdot 10^{-3}$ [m] "Espesor de una MEA"
 $espesor_{placa} = 3 \cdot 10^{-3}$ [m] "Espesor de una placa bipolar"

"MODELO ELECTROQUÍMICO"

$V_{cel} = 0,6$ [V] "Voltaje por celda"
 $i = 0,35$ [A/cm^2] "Densidad de corriente"
 $A_{celda} = 256,88$ [cm^2] "Área activa de una celda"
 $n_{cel} = 20$ "Número de celdas"
 $I_{pila} = i \cdot A_{celda}$ "[A] Corriente generada por la pila"
 $Pot_{cel} = I_{pila} \cdot V_{cel}$ "[W] Potencia generada por una celda"
 $Pot_{pila} = Pot_{cel} \cdot n_{cel}$ "[W] Potencia total de la pila"

$Q_{gen} = (1,482 - V_{cel}) \cdot I_{pila} \cdot n_{cel}$ "[W] Calor generado cuando el agua producida sale de la pila en estado líquido a 25°C"

$$Q_{gen_canal} = \frac{Q_{gen}}{n_{cel} \cdot N_{canales}} \quad ["W/canal] \text{ Calor generado por unidad de canal"}$$

"MODELO TÉRMICO"

$$Q_{gen_canal} = Q_{aire} \quad ["W/canal] \text{ El calor generado tiene que ser eliminado por el aire"}$$

$$Q_{tc} = Q_{MEA} + Q_{placa} \quad ["W/canal] \text{ Balance de energía"}$$

$$Error = 100 \cdot \left| \frac{(Q_{tc} - Q_{gen_canal})}{Q_{gen_canal}} \right| \quad ["\%"]$$

"Convección forzada"

$$Q_{MEA} = U_{MEA} \cdot A_{MEA\&aire} \cdot DT_{log} \quad ["W/canal] \text{ Calor transmitido a través de la MEA"}$$

$$U_{MEA} = \frac{1}{\frac{1}{h_{aire}} + \left(\frac{\text{espesor}_{MEA}}{k_{MEA}} \right)} \quad ["W/(m^2 \cdot K)] \text{ Coeficiente de intercambio global. Tiene en cuenta la convección y la conducción con la MEA"}$$

$$k_{MEA} = 1,3 \quad [W/(m \cdot K)] \text{ "Conductividad térmica aproximada. Corresponde a Carbon Paper - AvCarb™ P75 tomada a 100°C"}$$

$$Q_{placa} = U_{placa} \cdot A_{placa\&aire} \cdot DT_{log} \quad ["W/canal] \text{ Calor transmitido a través de una placa bipolar"}$$

$$U_{placa} = \frac{1}{\frac{1}{h_{aire}} + \left(\frac{\text{espesor}_{placa}}{k_{placa}} \right)} \quad ["W/(m^2 \cdot K)] \text{ Coeficiente de intercambio global. Tiene en cuenta la convección y la conducción con la placa"}$$

$$k_{placa} = k_{Aluminum} \cdot Ts \quad [W/m K] \text{ Conductividad térmica de las placas bipolares"}$$

"Cálculo del coeficiente de convección del aire"

$$h_{aire} = Nusselt \cdot \frac{k_{aire}}{Dh_{aire}} \quad ["W/(m^2 \cdot K)] \text{ Coeficiente de convección forzada"}$$

$$Nusselt = 1,4 \cdot \left(Re \cdot \frac{Dh_{aire}}{L_{canal}} \right)^{0,4} \cdot Pr^{0,33} \quad \text{"Número Nusselt válido para Re>10 y L/d>10"}$$

$$Pr = prandtl(Air; T = \frac{T_{aire_ent} + aire_{sal}}{2}) \quad \text{"Número Prandtl"}$$

$$Re = \rho_{aire} \cdot u_{aire} \cdot \frac{Dh_{aire}}{\mu_{aire}} \quad \text{"Número Reynold del conducto"}$$

$$\rho_{aire} = Density(Air; T = \frac{T_{aire_ent} + T_{aire_sal}}{2}; P = 1) \quad ["kg/m^3] \text{ Densidad del refrigerante"}$$



$$\mu_{aire} = Viscosity(Air; T = \frac{T_{aire_{ent}} + T_{aire_{sal}}}{2}) \quad [\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})] \text{ Viscosidad del refrigerante"}$$

$m_{aire} = u_{aire} \cdot \rho_{aire} \cdot Apaso$ "[kg/(s·canal)] Flujo másico máximo de refrigerante en un canal"

$$k_{aire} = CONDUCTIVITY(Air; T = \frac{T_{aire_{ent}} + T_{aire_{sal}}}{2}) \quad [\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}] \text{ Conductividad térmica del fluido"}$$

$$Dh_{aire} = 4 \cdot \left(\frac{Apaso}{2 \cdot L_{prof} + 2 \cdot L_{ancho}} \right) \quad [\text{m}] \text{ Diámetro hidráulico equivalente"}$$

"Desarrollo de la media logarítmica de temperaturas"

$$DT_{sal} = Ts - T_{aire_{sal}}$$

$$DT_{ent} = Ts - T_{aire_{ent}}$$

$$DT_{log} = \frac{DT_{ent} - DT_{sal}}{\ln(Arg)} \quad \text{"Media logarítmica de temperatura "}$$

$$Arg = \left(\frac{DT_{ent}}{DT_{sal}} \right)$$

"Balance del aire"

$$Q_{aire} = m_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot (T_{aire_{sal}} - T_{aire_{ent}}) \quad [\text{W}/\text{canal}] \text{ Calor evacuado por el aire en un canal"}$$

$$C_{p_{aire}} = CP(Air; T = \frac{T_{aire_{ent}} + T_{aire_{sal}}}{2}) \quad [\text{J}/(\text{Kg}\cdot\text{K})] \text{ Calor específico del aire"}$$

"CONSUMO DE GASES"

$$n_{O_2} = \frac{1}{96487.4} \quad [\text{g mol_O}_2/(\text{s}\cdot\text{A})] \text{ Número de moles de oxígeno por segundo necesarios para generar 1A"}$$

$$ICE_{O_2} = n_{O_2} \cdot 16 \cdot 2 \quad [\text{g_O}_2/\text{s}\cdot\text{A}] \text{ Índice de consumo específico o masa de oxígeno por tiempo y amperio"}$$

$$m_{O_2 estq} = ICE_{O_2} \cdot I_{pila} \cdot \frac{n_{cel}}{1000} \quad [\text{kg}/\text{s}] \text{ Flujo de oxígeno estequiométrico consumido por la pila"}$$

$$m_{O_2 estq} = (1 - 0,77) \cdot m_{aire oxidación} \quad \text{"m_aire_oxidación es el flujo de aire que reacciona con el hidrógeno [Kg/s]"}$$

$$m_{N2} = 0,77 \cdot m_{aire oxidación} \quad \text{"Flujo de N2. Tiene propiedades similares al aire"}$$

$$m_{aire} \cdot N_{canales} \cdot n_{cel} = m_{aire exceso} + m_{N2} \quad \text{"m_aire_exceso es el flujo de aire que debemos meter en cada pila de más, para que en conjunto se pueda realizar la reacción y la refrigeración"}$$

$m_{airepila} = m_{aire} \cdot N_{canales} \cdot n_{cel}$ "[Kg/s] Flujo másico de aire total que se mete en la pila"

"PÉRDIDA DE CARGA"

$$\Delta P_f = \left(f \cdot \frac{L_{canal}}{D_{h_{aire}}} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot (u_{aire})^2 \quad "[\text{Pa}] \text{ Pérdida de carga por fricción en los canales de una placa}"$$

$$f = \frac{58,91 + 50,66 \cdot \exp\left(-\frac{3,4}{\frac{L_{ancho}}{L_{prof}}}\right)}{Re} \quad "\text{Factor de fricción para flujo laminar (Re}<500\text{"}$$

$$\frac{1}{\sqrt(f)} = -10 \cdot \frac{\ln\left(0,218 + \left(\frac{65,6}{Re \cdot (\sqrt(f))}\right)\right)}{\ln(10)} \quad "\text{Factor de fricción para flujo de transición-turbulento (Re}>500\text{"}$$

$$\Delta P_l = (k_{ent} + k_{sal}) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot u_{aire}^2 \quad "[\text{Pa}] \text{ Pérdidas de carga locales en los canales}"$$

$$k_{ent} = 1 \quad "\text{Coeficiente local de perdida de carga en la entrada}"$$

$$k_{sal} = 1 \quad "\text{Coeficiente local de perdida de carga en la salida}"$$

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_l \quad "[\text{Pa}] \text{ Pérdidas de carga totales}"$$

$$W_{ventilador} = (Caudal_{airecel} \cdot n_{cel}) \cdot \frac{\Delta P}{\eta} \quad "[\text{W}] \text{ Potencia del ventilador en toda la pila}"$$

$\eta = 0,6$ "Rendimiento del ventilador. Nos ponemos en el peor de los casos (0,6-0,9)"

$$Caudal_{airecel} = m_{aire} \cdot \frac{N_{canales}}{Rho_{aire}} \quad "[\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{celda})] \text{ Caudal de aire por celda}"$$

$$q_{airepila} = Caudal_{airecel} \cdot n_{cel} \cdot 3600 \quad "[\text{m}^3/\text{h}] \text{ Caudal de aire en toda la pila}"$$

A-I-2. Código 2: Reproducción del experimento de calentamiento.

"TEMPERATURA"

Taire=273+25 "[K] Temperatura del aire del ambiente"

"MODELO ELECTROQUÍMICO"

```
I_pila=10 [A] "Intensidad de corriente"  
n_cel=5 "Número de celdas"  
V_cel=0,43 [V] "Voltaje por celda"  
A_celda= 256,88 [cm^2] "Área activa de una celda"  
I_pila= i*A_celda "[A] Corriente generada por la pila"  
Pot_cel=I_pila*V_cel "[W] Potencia generada por una celda"  
Pot_pila=Pot_cel*n_cel "[W] Potencia total de la pila"
```

Qgen=(1,482-V_cel)*I_pila*n_cel "[W] Calor generado cuando el agua producida sale de la pila en estado líquido a 25°C"

"MODELO TÉRMICO"

Q_tc=Q_conv+Q_aguagen+Q_trans "[W]Calor de transmisión"

Error=100*abs(Q_tc-Qgen)/Qgen "%"

```
Q_aguagen=m_agua*cp_agua*Tmetal_ext "[W] Calor que se lleva el agua producida"  
cp_agua=CP(Water;T=25+273;P=1) "[J/(Kg*K)] A 25°C porque es la T a la que sale el agua, condición de Barbir de la ec. de Qgen"  
m_agua=PM_agua*I_pila*n_cel/(2*F)/1000 "[kg/s]Flujo másico de agua"  
PM_agua=18,015 [g/mol] "Peso molar del agua"  
F=96485 [C/mol] "Constante de Faraday"
```

Q_trans=Rho_metal*Volumen*cp_metal*diferencial "[W] Calor transitorio del metal"

Rho_metal=rho_('Aluminum';Tmetal_ext) "[kg/m^3] Densidad del metal"

```
cp_metal=c_('Aluminum'; Tmetal_ext) "[J/(Kg*K)] Calor específico del metal de la pila"  
Volumen=Laltura*Lanchopila*Lprofila "[m^3]"  
diferencial=(74.06-25,63+273)/(120*60) "dT/dt sacado de los datos experimentales"
```

"CONVECCIÓN NATURAL"

```
Q_conv=(Tmetal_ext-Taire)/R_conv "[W] Calor por convección"  
R_conv=1/(h_nat*Aext) "[K/W] Resistencia convectiva"  
Aext=2*Laltura*Lanchopila+2*Laltura*Lprofila+2*Lanchopila*Lprofila "[m^2] Área externa de la pila en contacto con el aire"  
Lanchopila=0,12 [m] "Anchura de la pila"  
Lprofila =0,043 [m] "Profundidad de la pila"
```

"Cálculo del coeficiente de convección natural"
 $h_{nat} = k_{aire}/Laltura \cdot NuL$ "[W/(m^2*K)]"
 Laltura= 0,39 [m] "Altura de la pila. Se considera como la longitud característica"

 $L=Laltura$ "[m]"
 $GrPr=Gr*Pr$ "Número Grashof por Prandtl"

 $\{NuL=0,15*(Gr*Pr)^0,33$ "Ecuacion de Pavlov para $Gr*Pr>10^9\}$

 $NuL=0,76*(Gr*Pr)^0,25$ "Ecuacion de Pavlov para $10^3 < Gr*Pr < 10^9$ "
 $Gr=(9,81*L^3/(mu_aire/Rho_aire)^2)*(1/273)*(Tmetal_ext-Taire)$
 "Número Grashof"

 $Tp=(Tmetal_ext+Taire)/2$ "[K] Temperatura de película. Todas las propiedades del aire deben ir esta T"
 $Pr=prandtl(Air;T=Tp)$ "Número Prandtl"
 $Rho_aire=Density(Air;T=Tp;P=1)$ "[kg/m^3] Densidad del aire"
 $mu_aire=Viscosity(Air;T=Tp)$ "[kg/(m*s)] Viscosidad del aire"
 $alpha_aire= k_aire/(Rho_aire*Cp_aire)$ "Difusividad térmica [m^2/s]"
 $k_aire=CONDUCTIVITY(O2;T=Tp)$ "[W/(m*K)] Conductividad térmica del fluido"
 $Cp_aire=CP(Air;T=Tp)$ "[J/(Kg*K)] Calor específico del aire"

"TEMPERATURA"

$Taire = 273 + 25$ "[K] Temperatura del aire del ambiente"

"MODELO ELECTROQUÍMICO"

$I_{pila} = 10$ [A] "Intensidad de corriente"
 $n_{cel} = 5$ "Número de celdas"
 $V_{cel} = 0,43$ [V] "Voltaje por celda"
 $A_{celda} = 256,88$ [cm²] "Área activa de una celda"
 $I_{pila} = i \cdot A_{celda}$ "[A] Corriente generada por la pila"
 $Pot_{cel} = I_{pila} \cdot V_{cel}$ "[W] Potencia generada por una celda"
 $Pot_{pila} = Pot_{cel} \cdot n_{cel}$ "[W] Potencia total de la pila"

$Q_{gen} = (1,482 - V_{cel}) \cdot I_{pila} \cdot n_{cel}$ "[W] Calor generado cuando el agua producida sale de la pila en estado líquido a 25°C"

"MODELO TÉRMICO"

$Q_{tc} = Q_{conv} + Q_{aguagen} + Q_{trans}$ "[W] Calor de transmisión"

$$Error = 100 \cdot \left| \frac{(Q_{tc} - Q_{gen_canal})}{Q_{gen_canal}} \right| \quad [\%]$$



$Q_{aguagen} = m_{agua} \cdot cp_{agua} \cdot T_{metal_ext}$ "[W] Calor que se lleva el agua producida"
 $cp_{agua} = CP(Water; T = 25 + 273; P = 1)$ "[J/(Kg·K)] A 25°C porque es la T a la que sale el agua, condición de Barbir de la ec. de Qgen"

$$m_{agua} = \frac{PM_{agua} I_{pila} \cdot n_{cel}}{2 \cdot F \cdot 1000} \quad [\text{kg/s}] \text{ Flujo másico de agua}$$

$$PM_{agua} = 18,015 \quad [\text{g/mol}] \text{ "Peso molar del agua"}$$

$$F = 96485 \quad [\text{C/mol}] \text{ "Constante de Faraday"}$$

$$Q_{trans} = \rho_{metal} \cdot Volumen \cdot cp_{metal} \cdot diferencial \quad [\text{W}] \text{ Calor transitorio del metal}"$$

$$\rho_{metal} = rho_('Aluminum'; T_{metal_ext}) \quad [\text{kg/m}^3] \text{ Densidad del metal"}$$

$$cp_{metal} = c_('Aluminum'; T_{metal_ext}) \quad [\text{J/(kg·K)}] \text{ Calor específico del metal de la pila"}$$

$$Volumen = Laltura \cdot Lanchopila \cdot Lprofila \quad [\text{m}^3]$$

$$diferencial = (74.06 - 25,63 + 273)/(120 * 60) \quad "dT/dt" \text{ sacado de los datos experimentales. Desde } I_{pila}=0,01A"$$

"CONVECCIÓN NATURAL"

$$Q_{conv} = \frac{T_{metal_ext} - T_{aire}}{R_{conv}} \quad [\text{W}] \text{ Calor por convección"}$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{nat} \cdot A_{ext}} \quad [\text{K/W}] \text{ Resistencia convectiva"}$$

$$A_{ext} = 2 \cdot Laltura \cdot Lanchopila + 2 \cdot Laltura \cdot Lprofila + 2 \cdot Lanchopila \cdot Lprofila \quad [\text{m}^2] \text{ Área externa de la pila en contacto con el aire"}$$

$$Lanchopila = 0,12 \quad [\text{m}] \text{ "Anchura de la pila"}$$

$$Lprofila = 0,043 \quad [\text{m}] \text{ "Profundidad de la pila"}$$

"Cálculo del coeficiente de convección natural"

$$h_{nat} = \frac{k_{aire}}{Laltura \cdot NuL} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

$$Laltura = 0,39 \quad [\text{m}] \text{ "Altura de la pila. Se considera como la longitud característica"}$$

$$L = Laltura \quad [\text{m}]$$

$$GrPr = Gr \cdot Pr \quad \text{"Número Grashof por Prandtl"}$$

$$\{NuL = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33} \quad \text{"Ecuacion de Pavlov para } Gr \cdot Pr > 10^9\}$$

$$NuL = 0,76 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad \text{"Ecuacion de Pavlov para } 10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9\}$$

$$Gr = 9,81 \cdot \frac{L^3}{\left(\frac{\mu_{aire}}{\rho_{aire}} \right)^2} \cdot \left(\frac{1}{273} \right) \cdot (T_{metal_ext} - T_{aire}) \quad \text{"Número Grashof"}$$

$$Tp = \frac{T_{metal_ext} + T_{aire}}{2} \quad [\text{K}] \text{ Temperatura de película. Todas las propiedades del aire deben ir esta T"}$$

$$Pr = prandtl(Air; T = Tp) \quad \text{"Número Prandtl"}$$

$$\rho_{aire} = Density(Air; T = Tp; P = 1) \quad [\text{kg/m}^3] \text{ Densidad del aire"}$$

$$\mu_{aire} = Viscosity(Air; T = Tp) \quad [\text{kg/(m·s)}] \text{ Viscosidad del aire"}$$

$$k_{aire} = CONDUCTIVITY(O2; T = Tp) \quad [\text{W/(m·K)}] \text{ Conductividad térmica del fluido"}$$

$$Cp_{aire} = CP(Air; T = Tp) \quad [\text{J/(Kg·K)}] \text{ Calor específico del aire"}$$

ANEXO II. TABLAS DE RESULTADOS

A lo largo de este anexo se mostrarán las tablas de resultados referidas en el capítulo 4. *Análisis de resultados* de la memoria, que permitirán determinar los valores de voltaje de celda, densidad de corriente y temperatura de pared de la pila adecuados; así como seleccionar el conjunto de ventiladores necesario para la refrigeración. Además, también aparecen las tablas de resultados referenciados en el capítulo 6. *Estudio Experimental*.

Tabla A-II-1. Resultados en función de T_s con $V_{cel} = 0.4$ V; $i = 1$ A/cm².

T_s [K]	$T_{aire_{sal}}$ [K]	$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	Re	ΔP [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]
323	300.7	2.018	43320	156039	450961
325.5	301.4	1.612	34570	100252	231752
328	302.2	1.317	28199	67350	127318
330.5	303	1.095	23427	46980	73990
333	304	0.9257	19767	33830	45088
335.5	305	0.7927	16903	25037	28623
338	306	0.6867	14621	18975	18828
340.5	307.2	0.601	12775	14685	12776
343	308.4	0.5307	11262	11576	8911
345.5	309.7	0.4724	10007	9276	6369
348	311	0.4234	8954	7540	4651
350.5	312.5	0.382	8063	6215	3467
353	313.9	0.3466	7302	5182	2629

Tabla A-II-2. Resultados en función de T_s con $V_{cel} = 0.45$ V; $i = 0.75$ A/cm².

T_s [K]	$T_{aire_{sal}}$ [K]	$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	Re	ΔP [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]
323	302.2	0.9315	19969	34151	45674
325.5	303.2	0.7527	16111	22568	24428
328	304.3	0.6221	13280	15618	13998
330.5	305.6	0.5224	11145	11173	8427
333	306.9	0.4459	9497	8265	5332
335.5	308.2	0.3856	8197	6280	3511
338	309.7	0.3372	7155	4884	2394
340.5	311.3	0.2979	6296	3879	1684
343	312.9	0.2654	5603	3133	1215
345.5	314.6	0.2382	5023	2573	897.9
348	316.3	0.2153	4530	2142	677.9
350.5	318.2	0.1958	4110	1807	521.5
353	320.1	0.1791	3750	1542	408.1

Tabla A-II-3. Resultados en función de T_s con $V_{cel} = 0.5$ V; $i = 0.5$ A/cm 2 .

T_s [K]	$T_{aire_{sal}}$ [K]	$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	Re	ΔP [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]
323	305.2	0.3499	7481	5195	2623
325.5	306.7	0.2882	6148	3614	1507
328	308.3	0.2423	5158	2624	922.1
330.5	310.1	0.2072	4402	1974	594.9
333	311.9	0.1797	3810	1528	400.7
335.5	313.9	0.1579	3338	1216	280.9
338	315.9	0.1402	2956	987.2	203.2
340.5	318	0.1256	2641	817	151.1
343	320.1	0.1134	2378	687.3	115.2
345.5	322.3	0.1031	2157	586.6	89.72
348	324.6	0.09432	1968	507	71.21
350.5	326.9	0.08678	1806	443.2	57.49
353	329.2	0.08025	1665	391.5	47.13

Tabla A-II-4. Resultados en función de T_s con $V_{cel} = 0.6$ V; $i = 0.35$ A/cm 2 .

T_s [K]	$T_{aire_{sal}}$ [K]	$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	Re	ΔP [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]
323	309	0.1429	3040	1008	209
325.5	311.1	0.1203	2554	747.8	131
328	313.3	0.1032	2187	577.4	87.14
330.5	315.5	0.08998	1901	460.1	60.76
333	317.8	0.07948	1674	376.5	44.07
335.5	320.2	0.07097	1491	314.9	33.04
338	322.6	0.06394	1339	268.1	25.45
340.5	325.1	0.05813	1214	232.3	20.13
343	327.6	0.0532	1108	204	16.24
345.5	330.2	0.04898	1017	181.3	13.34
348	332.7	0.04534	938.4	162.8	11.13
350.5	335.3	0.04219	870.5	147.6	9.43
353	338	0.03942	810.7	134.8	8.085

Tabla A-II-5. Resultados en función de T_s con $V_{cel} = 0.7$ V; $i = 0.3$ A/cm².

T_s [K]	$T_{aire,sal}$ [K]	$\dot{m}_{aire,pila}$ [kg/s]	Re	ΔP [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]
323	311.5	0.08852	1880	444.1	57.31
325.5	313.8	0.07556	1600	343.8	38.02
328	316.2	0.06564	1386	275.7	26.59
330.5	318.7	0.05786	1218	227.5	19.41
333	321.2	0.05161	1083	192.2	14.69
335.5	323.7	0.0465	973.3	165.5	11.45
338	326.3	0.04227	881.9	145	9.149
340.5	328.9	0.03868	805.1	128.6	7.462
343	331.6	0.03567	739.7	115.7	6.214
345.5	334.2	0.03306	683.4	105.1	5.253
348	336.9	0.03079	634.6	96.31	4.503
350.5	339.6	0.0288	591.8	88.97	3.908
353	342.2	0.02705	554.1	82.76	3.429

Tabla A-II-6. Resultados en función de T_s para prototipo de 20 celdas.

T_s [K]	$q_{aire.pila}$ [m^3/h]	ΔP [Pa]	ΔP_f [Pa]	ΔP_l [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]	$T_{aire_{sal}}$ [K]
323	448.1	1008	513.8	493.9	209	309
324	417.6	889.2	460.8	428.4	171.9	309.8
325	390.7	790.9	416.4	374.6	143.1	310.7
326	362.4	693.5	371.7	321.7	116.4	311.7
327	345.3	637.7	345.9	291.7	101.9	312.4
328	325.9	577.3	317.7	259.6	87.11	313.3
329	308.5	525.5	293.3	232.2	75.04	314.2
330	292.5	480.2	271.7	208.5	65.03	315.1
331	278.2	441.2	253	188.2	56.82	316
332	265	406.8	236.3	170.5	49.9	316.9
333	252.9	376.5	221.4	155.1	44.07	317.8
334	241.7	349.6	208.1	141.5	39.13	318.8
335	231.5	325.8	196.2	129.6	34.92	319.7
336	222	304.5	185.5	119	31.3	320.7
337	213.3	285.5	175.8	109.6	28.18	321.6
338	205.1	268.3	167.1	101.2	25.48	322.6
339	197.5	252.7	159	93.7	23.11	323.6
340	190.4	238.7	151.7	86.97	21.04	324.6
341	183.9	226.1	145.2	80.99	19.25	325.6
342	177.7	214.6	139	75.53	17.66	326.6
343	171.9	204	133.4	70.58	16.24	327.6
344	166.5	194.3	128.2	66.08	14.98	328.6
345	161.4	185.4	123.5	61.99	13.86	329.6
346	156.6	177.3	119	58.26	12.85	330.7
347	152.1	169.8	114.9	54.84	11.95	331.7
348	147.8	162.8	111.1	51.71	11.14	332.7
349	143.7	156.4	107.5	48.83	10.4	333.8
350	139.9	150.4	104.2	46.19	9.739	334.8
351	136.3	144.8	101.1	43.74	9.136	335.9
352	132.8	139.7	98.18	41.48	8.587	336.9
353	129.5	134.8	95.45	39.39	8.085	338
354	126.4	130.3	92.89	37.46	7.628	339
355	122.7	125.2	89.93	35.25	7.113	340.3
356	120.6	122.2	88.2	33.98	6.821	341.1
357	117.4	117.9	85.71	32.16	6.408	342.4
358	114.8	114.3	83.66	30.69	6.077	343.5
359	112.8	111.7	82.13	29.6	5.837	344.3
360	110.5	108.7	80.33	28.33	5.557	345.4
361	108.2	105.7	78.61	27.13	5.298	346.5
362	106	103	76.99	26.02	5.057	347.5
363	104	100.4	75.45	24.96	4.833	348.6

Tabla A-II-7. Resultados en función de T_s para prototipo de 5 celdas.

T_s [K]	$q_{aire.pila}$ [m ³ /h]	ΔP [Pa]	ΔP_f [Pa]	ΔP_l [Pa]	$W_{ventilador}$ [W]	$T_{aire_{sal}}$ [K]
323	112	1008	513.8	493.9	52.26	309
324	104.4	889.2	460.8	428.4	42.97	309.8
325	97.68	790.9	416.4	374.6	35.77	310.7
326	90.6	693.5	371.7	321.7	29.09	311.7
327	86.33	637.7	345.9	291.7	25.49	312.4
328	81.48	577.3	317.7	259.6	21.78	313.3
329	77.12	525.5	293.3	232.2	18.76	314.2
330	73.13	480.2	271.7	208.5	16.26	315.1
331	69.54	441.2	253	188.2	14.2	316
332	66.24	406.8	236.3	170.5	12.47	316.9
333	63.22	376.5	221.4	155.1	11.02	317.8
334	60.44	349.6	208.1	141.5	9.783	318.8
335	57.87	325.8	196.2	129.6	8.729	319.7
336	55.51	304.5	185.5	119	7.826	320.7
337	53.31	285.5	175.8	109.6	7.046	321.6
338	51.28	268.3	167.1	101.2	6.37	322.6
339	49.37	252.7	159	93.7	5.777	323.6
340	47.6	238.7	151.7	86.97	5.261	324.6
341	45.97	226.1	145.2	80.99	4.813	325.6
342	44.43	214.6	139	75.53	4.414	326.6
343	42.99	204	133.4	70.58	4.06	327.6
344	41.63	194.3	128.2	66.08	3.745	328.6
345	40.35	185.4	123.5	61.99	3.464	329.6
346	39.15	177.3	119	58.26	3.213	330.7
347	38.02	169.8	114.9	54.84	2.988	331.7
348	36.94	162.8	111.1	51.71	2.784	332.7
349	35.93	156.4	107.5	48.83	2.601	333.8
350	34.97	150.4	104.2	46.19	2.435	334.8
351	34.06	144.8	101.1	43.74	2.284	335.9
352	33.2	139.7	98.18	41.48	2.147	336.9
353	32.38	134.8	95.45	39.39	2.021	338
354	31.6	130.3	92.89	37.46	1.907	339
355	30.69	125.2	89.93	35.25	1.778	340.3
356	30.15	122.2	88.2	33.98	1.705	341.1
357	29.36	117.9	85.71	32.16	1.602	342.4
358	28.7	114.3	83.66	30.69	1.519	343.5
359	28.21	111.7	82.13	29.6	1.459	344.3
360	27.62	108.7	80.33	28.33	1.389	345.4
361	27.05	105.7	78.61	27.13	1.324	346.5
362	26.51	103	76.99	26.02	1.264	347.5
363	25.99	100.4	75.45	24.96	1.208	348.6

Tabla A-II-8. Resultados del calentamiento experimental del prototipo de 5 celdas.

Hora	I (A)	V1 (V)	V2 (V)	V3 (V)	V4 (V)	V5 (V)	V _{Stack} (V)	P (W)	T _{Sup.} (°C)	T _{Med.} (°C)	T _{Inf.} (°C)
11:05	0,01	0,819	0,83	0,849	0,84	0,798	4,147	0,041	25,5	25,8	25,6
11:10	0,01	0,839	0,856	0,862	0,859	0,813	4,233	0,042	26,5	27,1	25,2
11:15	0,05	0,829	0,853	0,859	0,854	0,811	4,204	0,210	24,7	27,5	25,3
11:20	0,05	0,827	0,856	0,858	0,855	0,808	4,205	0,210	25,8	27,8	26
11:25	5	0,415	0,668	0,696	0,618	0,674	3,077	15,385	29,8	30,8	28,8
11:30	5	0,43	0,67	0,699	0,621	0,678	3,097	15,485	29,7	33,5	29,2
11:35	5	0,435	0,671	0,699	0,621	0,681	3,107	15,535	31	35,4	32,5
11:40	5	0,445	0,676	0,7	0,621	0,686	3,13	15,650	35,2	37,3	34,7
11:45	10	0,193	0,536	0,584	0,443	0,588	2,35	23,500	39,1	40,7	37,8
11:50	10	0,218	0,543	0,589	0,45	0,598	2,399	23,990	40,8	44,5	41,3
11:55	10	0,238	0,55	0,591	0,455	0,606	2,44	24,400	44,4	48	44,9
12:00	10	0,24	0,554	0,593	0,461	0,608	2,457	24,570	47,5	51,1	47,2
12:05	10	0,245	0,555	0,592	0,466	0,61	2,468	24,680	51	54,5	51,4
12:10	10	0,247	0,555	0,591	0,466	0,61	2,469	24,690	52,5	57,6	53,5
12:15	10	0,249	0,552	0,592	0,464	0,608	2,465	24,650	55,7	60,5	56,6
12:20	10	0,249	0,549	0,587	0,458	0,605	2,448	24,480	59,2	63	60
12:25	10	0,244	0,551	0,58	0,446	0,598	2,419	24,190	60	64,5	59
12:30	10	0,237	0,549	0,57	0,434	0,587	2,377	23,770	62	67,6	61,6
12:35	10	0,243	0,556	0,576	0,434	0,594	2,403	24,030	64	69,3	64,1
12:40	10	0,229	0,542	0,556	0,417	0,579	2,323	23,230	66,4	70,6	64,2
12:45	10	0,22	0,541	0,546	0,409	0,571	2,287	22,870	66	72,1	66,5
12:50	10	0,214	0,536	0,537	0,398	0,564	2,249	22,490	68,6	73,2	67,2
12:55	10	0,219	0,538	0,535	0,394	0,564	2,25	22,500	68,6	74,6	69,5
13:00	10	0,21	0,529	0,521	0,382	0,555	2,197	21,970	70,8	75,6	68,2
13:05	10	0,22	0,524	0,512	0,371	0,55	2,177	21,770	72,7	77	72,5
13:10	10	0,214	0,517	0,508	0,364	0,542	2,145	21,450	72,3	77,6	72,3

Apagado AA

Purga H₂

Purga H₂

**Nota: Durante la realización del experimento el aire acondicionado del laboratorio estuvo encendido hasta las 11:55 horas, lo que pudo afectar en pequeña medida a los resultados.

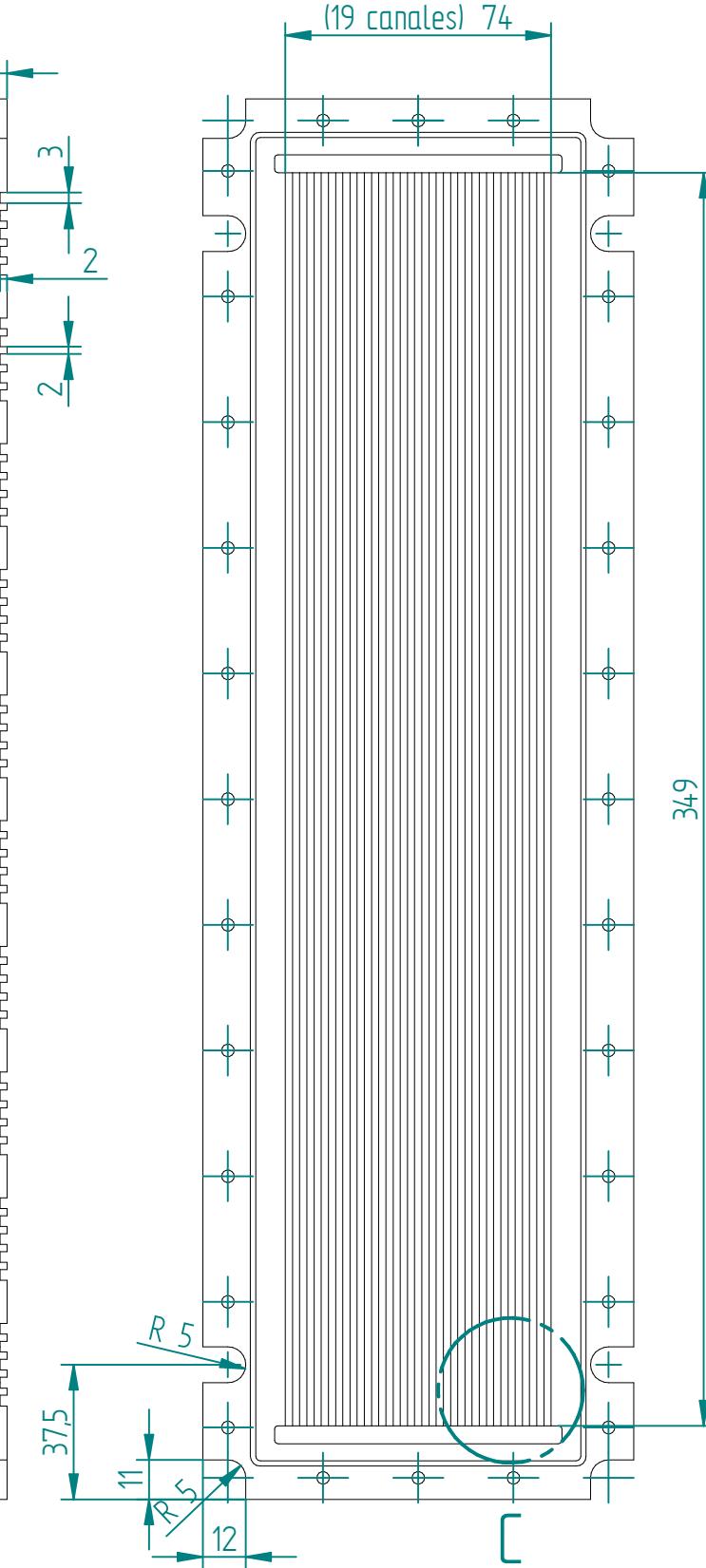
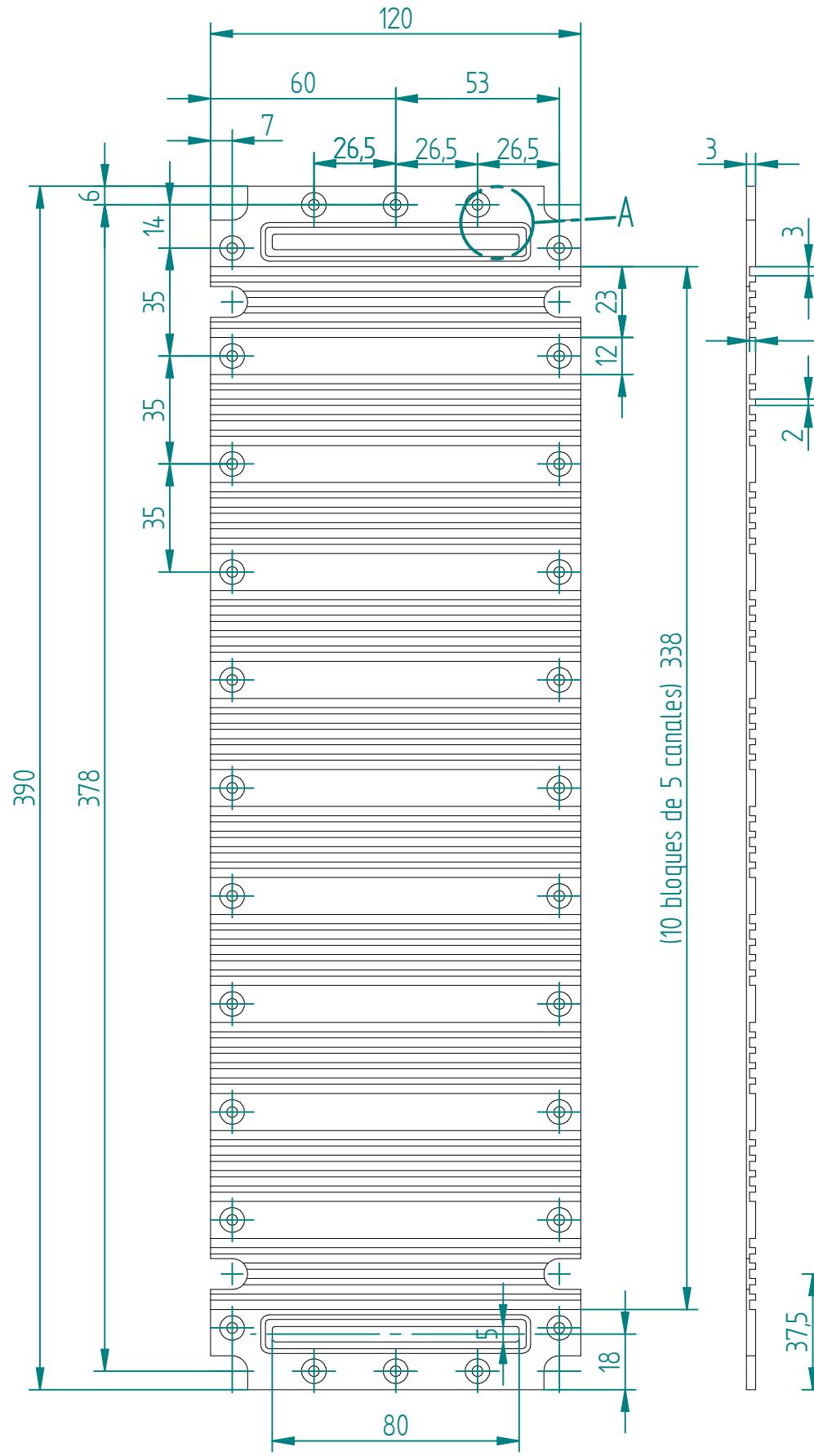
Tabla A-II-9. Resultados código computacional del calentamiento del prototipo de 5 celdas.

$A_{ext} [m^2]$	0.1375	NuL	93.34
$A_{celda} [cm^2]$	256.9	n_{cel}	5
$Cp_{agua} [J/(kg \cdot K)]$	4183	$PM_{agua} [g/mol]$	18.02
$Cp_{aire} [J/(kg \cdot K)]$	1007	$Pot_{cel} [W]$	4.3
$Cp_{metal} [J/(kg \cdot K)]$	0.9244	$Pot_{pila} [W]$	21.5
dT/dt	0.04121	Pr	0.723
$Error [\%]$	0.000007201	$Q_{gen} [W]$	52.6
$F [C/mol]$	96485	$Q_{aguagen} [W]$	6.766
Gr	$3.147 \cdot 10^8$	$Q_{conv} [W]$	45.63
$Gr \cdot Pr$	$2.276 \cdot 10^8$	$Q_{tc} [W]$	52.6
$h_{nat} [W/(m^2 \cdot K)]$	6.844	$Q_{trans} [W]$	0.2064
$i [A/(cm^2)]$	0.03893	$\rho_{aire} [kg/m^3]$	1.081
$I_{pila} [A]$	10	$\rho_{metal} [kg/m^3]$	2693
$k_{aire} [W/(m \cdot K)]$	0.0286	$R_{conv} [K/W]$	1.063
$L [m]$	0.39	$Taire [K]$	298
$Laltura [m]$	0.39	$T_{metal_{ext}} [K]$	346.5
$Lanchopila [m]$	0.12	$Tp [K]$	322.2
$Lprofila [m]$	0.043	$Volumen [m^3]$	0.002012
$\mu_{aire} [kg/(m \cdot s)]$	0.0001959	$V_{cel} [V]$	0.43
$\dot{m}_{agua} [kg/s]$	0.000004668		

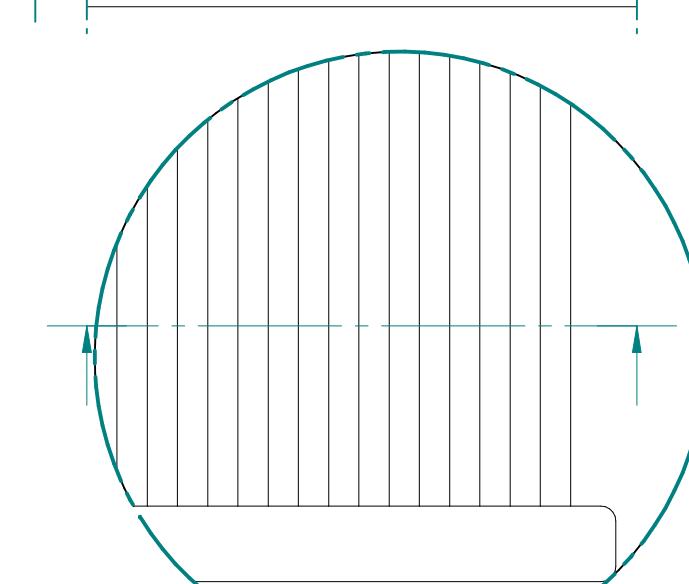
ANEXO III. PLANOS

Para ayudar a la comprensión del proyecto se muestra en este anexo los planos de la placa bipolar diseñada por personal del LIFTEC, así como los planos de las dos piezas diseñadas para en acople de los ventiladores a los dos prototipos de pila.

- 1. Plano de la placa bipolar**
- 2. Plano de la pieza de acople del prototipo de 5 celdas**
- 3. Plano de la pieza de acople del prototipo de 20 celda**

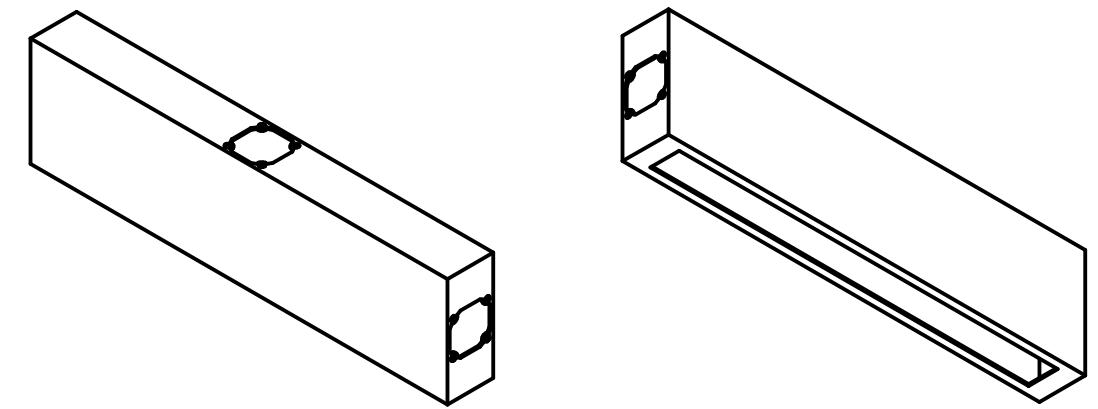
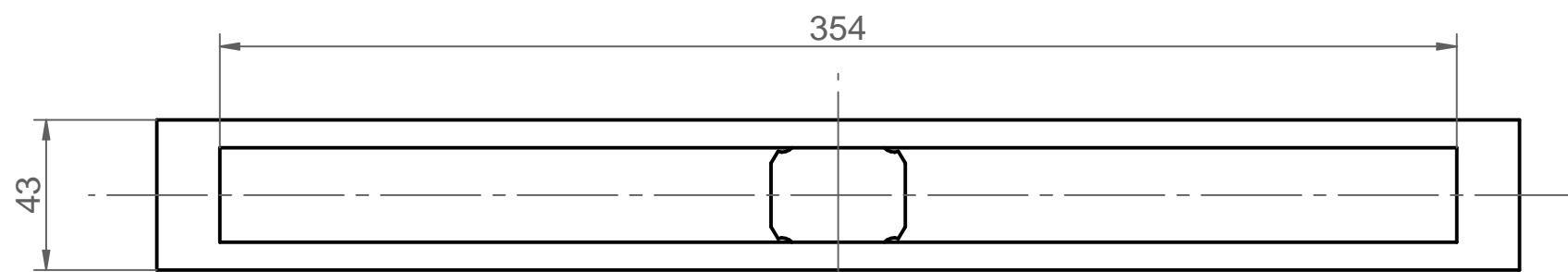


Detalle A. Alojamiento arandelas y ranura para junta

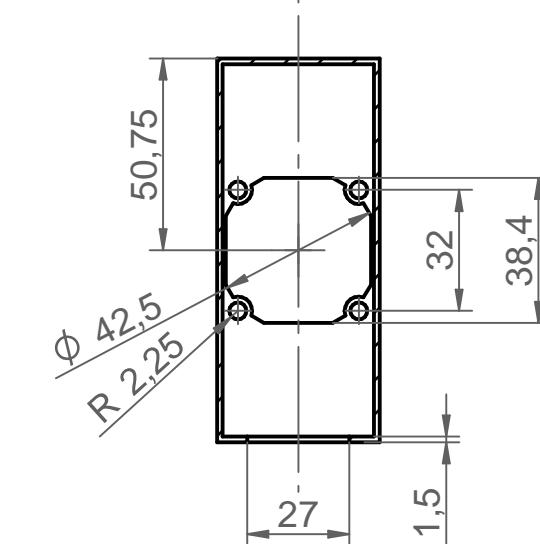
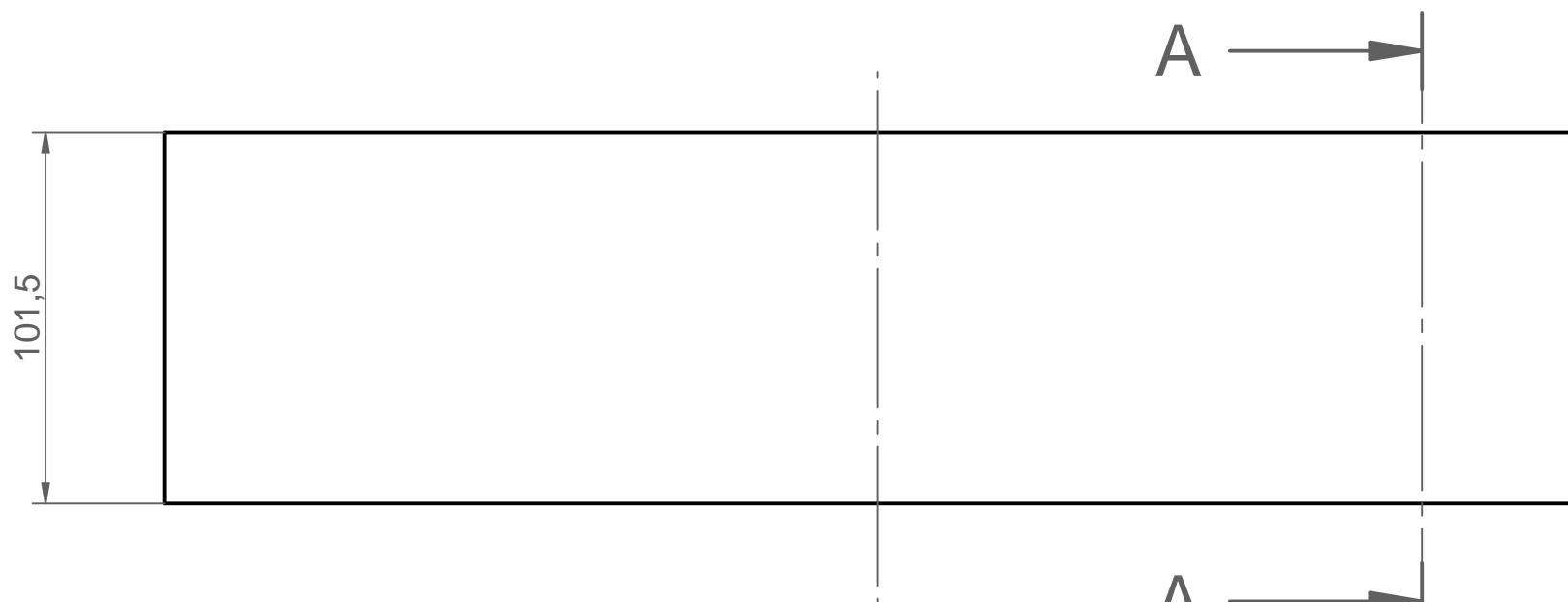


Detalle C. Canales ánode

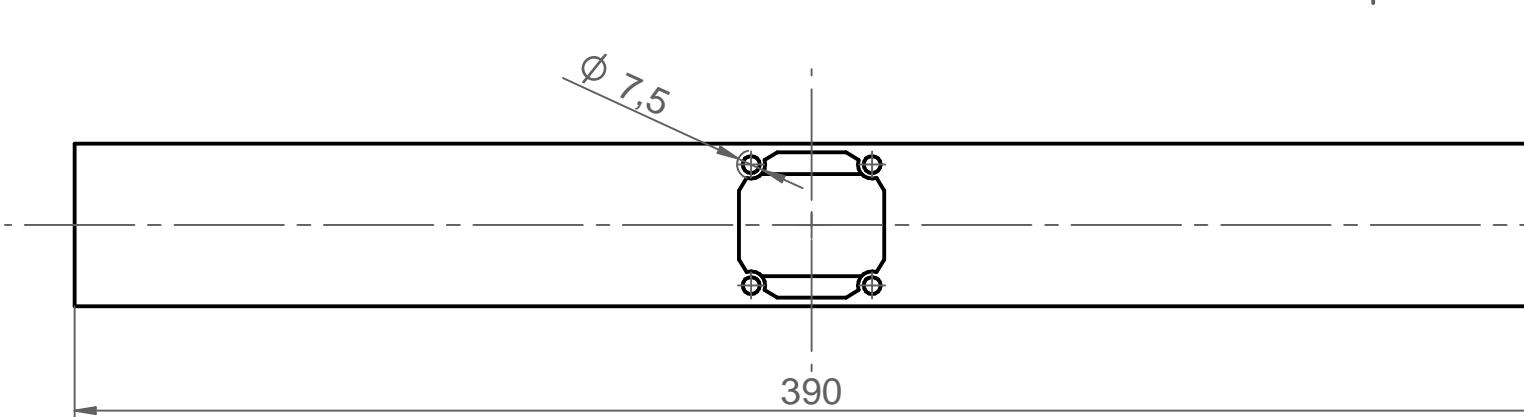
	Nombre	Fecha	Solid Edge Siemens PLM		
Dibujado	Angel	1/10/19			
Comprobado			Título		
Aprobado I					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		A3	Plano	Rev	
Archivo: Bipolar.dft					
		Escala	Peso	Hoja 1 de 1	



**ESCALA
1:5**

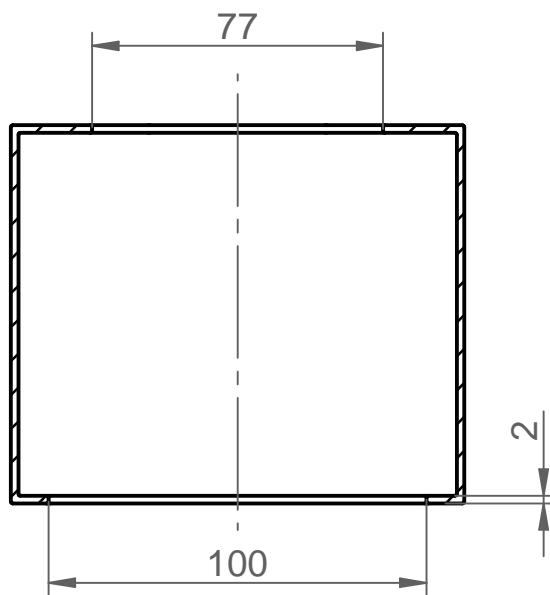
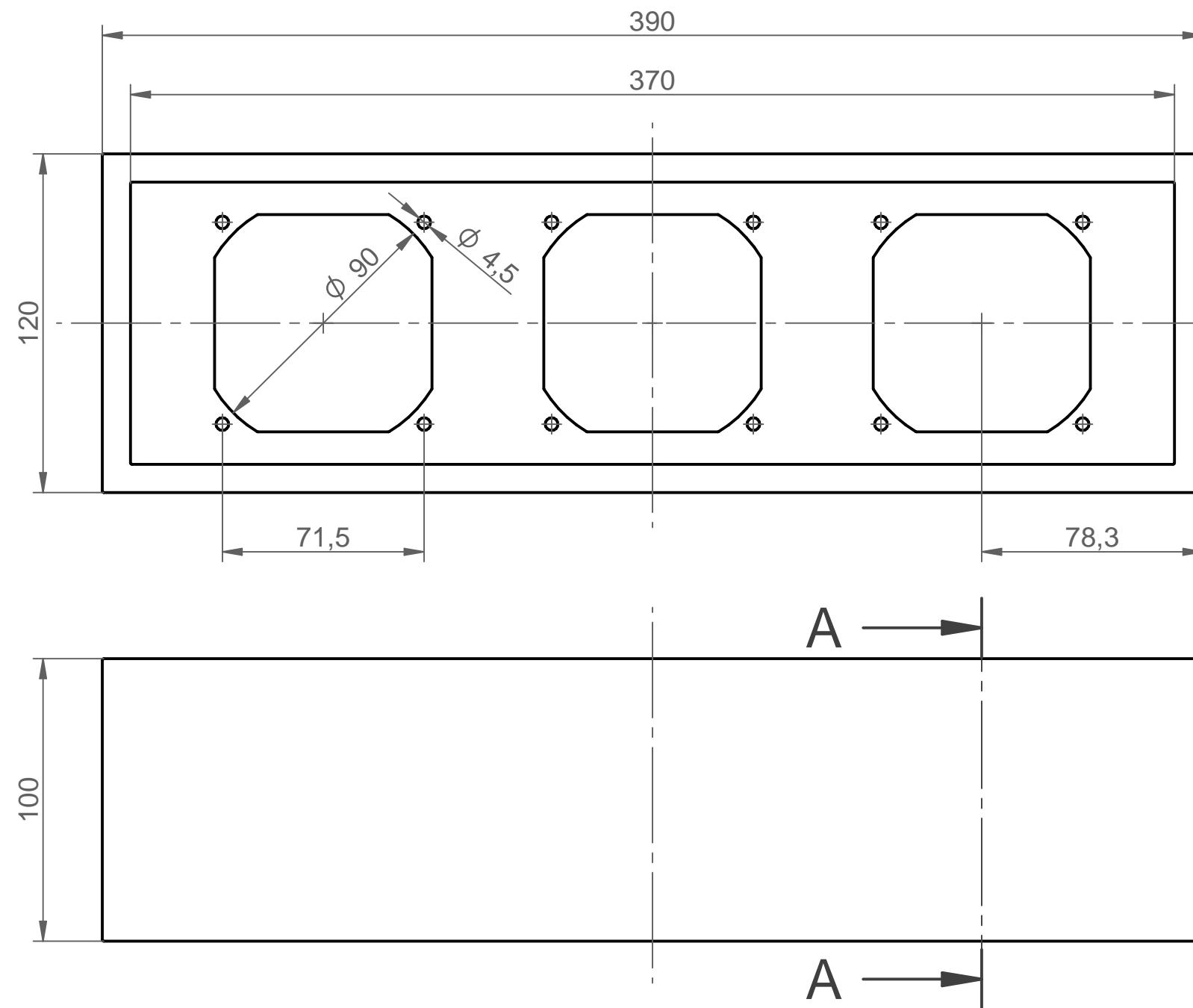


CORTE A-A

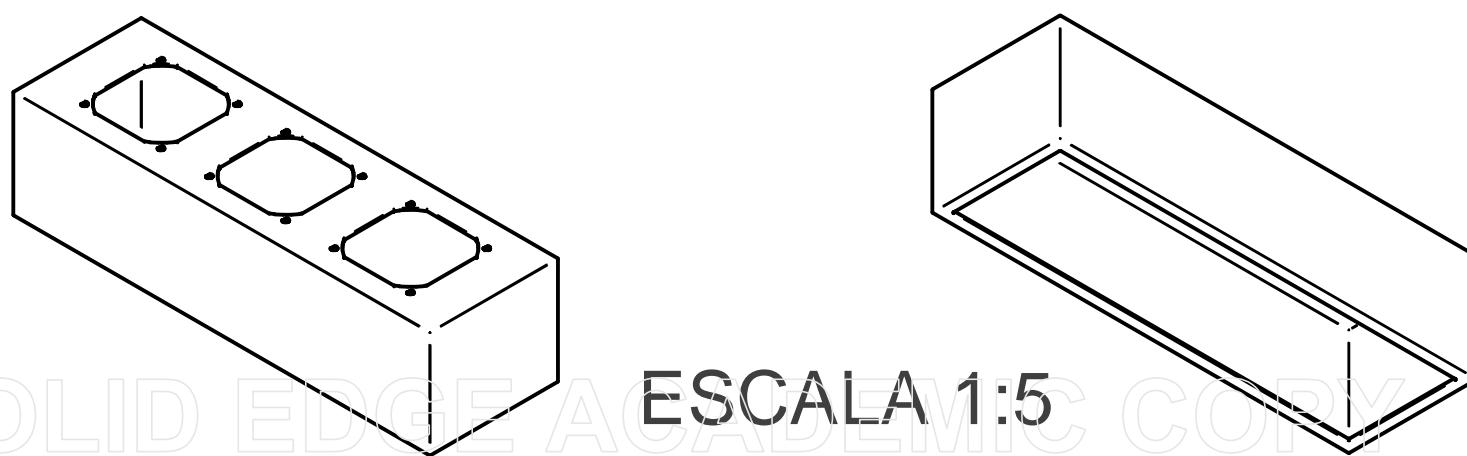


SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Dibujado	Nombre	Fecha	Solid Edge	
Comprobado	Ángela		Siemens PLM	
Aprobado I			Título	
Aprobado 2			Acople ventiladores prototipo 5 celdas	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A3	Nº Plano 2
			Rev	
			Archivo: pieza acople	
			Escala 1:2	Peso
			Hoja 1 de 1	



CORTE A-A



ESCALA 1:5

Solid Edge		
Siemens PLM		
Título		
Acople ventiladores prototipo 20 celdas		
Dibujado	Nombre Angela	Fecha
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Rev
A3	Nº Plano 3	
Archivo: Acople ventilador 20 celdas.dft		
Escala 1:2	Peso	Hoja 1 de 1