

Trabajo Fin de Máster

Diseño e implementación de los sistemas electrónicos de control para refrigeración y humidificación por cortocircuitos en una pila PEM de cátodo abierto

Autor

Jorge Almingol Estrada

Directores

Félix Barreras Toledo

Antonio Lozano Fantoba

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Zaragoza, 2021



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

D./D^a. Jorge Almingol Estrada ,en
aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de
septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el
Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,
Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Máster (Título del Trabajo)

Diseño e implementación de los sistemas electrónicos de control para refrigeración y
humidificación por cortocircuitos en una pila PEM de cátodo abierto

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser
citada debidamente.

Zaragoza, 3 de junio de 2021

Firmado digitalmente por ALMINGOL ESTRADA JORGE -
73008775J
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES,
serialNumber=IDCES-73008775J, givenName=JORGE,
sn=ALMINGOL ESTRADA, cn=ALMINGOL ESTRADA JORGE -
73008775J
Fecha: 2021.06.03 12:34:22 +02'00'

Fdo: Jorge Almingol Estrada

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría dedicar este trabajo a mis padres Gloria y Fernando y a mi hermano Sergio por todo el apoyo y energía que me han dado desde que comencé mi formación en estudios superiores. Sin vosotros esto no sería posible.

Asimismo, me gustaría añadir mi más sincero agradecimiento a mis directores, el Dr. Félix Barreras y el Dr. Antonio Lozano, así como mi ponente el Dr. Bonifacio Martín por la confianza depositada en mi desde el comienzo de este proyecto además de haberme proporcionado una excelente dirección completa de enseñanzas y consejos que me hacen mejorar exponencialmente en el ámbito de la investigación científica, así como en el laboral.

Para terminar, me gustaría también agradecer a todo el personal del LIFTEC el apoyo recibido y su constante disposición a proporcionarme la ayuda y consejo necesaria para superar las diferentes dificultades que han surgido durante la realización de este trabajo. En especial al Dr. Manuel Montiel, a Alberto Campos, a Luis Ojeda y a Álvaro Ibáñez.

¡MUCHAS GRACIAS!

Resumen

Las pilas de combustible son dispositivos de generación de energía eléctrica que cuentan con un gran número de aplicaciones en diversas áreas tecnológicas. Aunque su principio de funcionamiento se conoce desde el siglo XIX, aún existen aspectos que mejorar para optimizar su funcionamiento.

Este trabajo de fin de master tiene como objetivo el desarrollo de métodos de optimización del funcionamiento de una pila de combustible de tipo PEM (pilas de membrana de intercambio de protones, también llamadas pilas poliméricas) de cátodo abierto. El trabajo incluye un estudio detallado del sistema de suministro de aire a las zonas catódicas de la pila, así como del efecto de aplicar cortocircuitos para optimizar el funcionamiento general de la pila. En particular, se ha analizado el control del suministro de aire mediante ventiladores axiales, fundamental tanto para proveer el gas necesario para la reacción electroquímica, como para refrigerar la pila. Una vez realizado el estudio teórico, se han desarrollado los elementos necesarios para el control de los ventiladores y del sistema de cortocircuito, adaptados a las características de la pila. Para el control por computador de los diferentes periféricos se ha utilizado el entorno software LabVIEW y tarjetas de National Instruments, mientras que para la adquisición de datos en el estudio de las técnicas de cortocircuito se ha utilizado una placa con microcontrolador y MATLAB. Tanto los diferentes circuitos electrónicos como los programas de control se han incorporado al banco de ensayos de pilas PEM que tiene el LIFTEC, centro de investigación mixto CSIC-Universidad de Zaragoza.

Tras comprobar el correcto funcionamiento de los sistemas, se ha realizado una calibración de los ventiladores para obtener la relación tensión-caudal. El caudal de aire se ha determinado mediante velocimetría de imágenes de partículas y, posteriormente, con la pila en funcionamiento se ha analizado la relación entre el caudal circulante y la temperatura de trabajo, determinándose el punto óptimo de operación. Finalmente se han realizado los ensayos de cortocircuito, ajustando el tiempo de duración y la frecuencia para conseguir la configuración óptima. Con los resultados obtenidos, se presentan las principales conclusiones y se proponen una serie de tareas para llevar a cabo en las pilas de mayor potencia.

Índice

1.	Motivación y objetivos.....	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Objetivos y tareas.....	1
1.3.	Organización del documento y cronograma del trabajo.....	2
2.	La pila de combustible	5
2.1.	Funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM.....	5
2.2.	Revisión del estado del arte del diseño y uso de la pila de combustible PEM de cátodo abierto.....	8
2.3.	Sistema de optimización de potencia por cortocircuitos	17
3.	Diseño y desarrollo de sistemas	19
3.1.	Sistema de ventilación.....	19
3.1.1	Sistema de control de los ventiladores	20
3.1.2	Calibración de ventiladores mediante velocimetría de imágenes de partículas (PIV)	23
3.2.	Sistema de cortocircuito.....	29
3.2.1	Sistema de control	29
3.2.2	Adquisición de Datos	33
4.	Ensayos y Resultados	35
4.1.	Sistema térmico	35
4.2.	Sistema de optimización por cortocircuitos	39
5.	Conclusiones, trabajo futuro y consideraciones finales	45
5.1.	Conclusiones	45
5.2.	Trabajo Futuro.....	46
5.3.	Consideraciones finales.....	46
6.	Bibliografía	49
ANEXOS.....		53
Anexo I.	Código para Arduino de lectura de tensión.....	55
Anexo II.	Script de Matlab de lectura, muestra y almacenaje de datos procedentes del Arduino	57

1. Motivación y objetivos

1.1. Motivación

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que emplean hidrógeno y oxígeno para generar electricidad, generando como subproductos únicamente calor y agua. Sin duda, son una buena opción como solución a la necesidad de contar con sistemas de generación de energía limpia que ayuden a mitigar el cambio climático causado por la emisión de gases de efecto invernadero, especialmente debido a la combustión de combustibles fósiles.

El desarrollo de las pilas de combustible tipo PEM (*Polymeric-Exchange Membrane*, pilas de membrana de intercambio de protones, también llamadas poliméricas) presenta un marcado carácter multidisciplinar ya que requiere conocimientos de diferentes campos. Uno de ellos es la electrónica, presente tanto en el control y en la monitorización de los diferentes procesos típicos de su funcionamiento, como en el desarrollo de los sistemas auxiliares asimismo necesarios. Son éstos los principales aspectos que han hecho que la optimización del funcionamiento de estos dispositivos mediante sistemas de control avanzados sea mi principal línea de trabajo en los últimos años desde la realización de mi trabajo de fin de grado.

1.2. Objetivos y tareas

El objetivo general propuesto para este proyecto es desarrollar dos sistemas de control para pilas de combustible de tipo PEM de baja temperatura y cátodo abierto. Esta tecnología es particularmente útil como fuente de energía en aplicaciones móviles, por ejemplo, motos, coches ligeros o vehículos ligeros tripulados de forma remota.

El primer sistema consiste en un sistema de suministro de aire y refrigeración mediante ventiladores axiales que proporcionará el caudal necesario para el funcionamiento óptimo de la pila, y mantendrá la temperatura de trabajo en el rango definido por los fabricantes de los sistemas membrana electrodos (*Membrane Exchange Assembly*, MEAs). El segundo, es un método de humidificación de los MEAs mediante cortocircuitos periódicos en los bornes de la pila para mejorar el rendimiento y evitar la necesidad de humidificar los gases reactantes antes de entrar a la pila.

Para cumplir estos objetivos, se han desarrollado sistemas capaces de realizar las tareas especificadas, y se han llevado a cabo diferentes procedimientos para evaluar los métodos de mejora. Para los ventiladores se ha desarrollado un sistema electrónico que permite, mediante una salida analógica de una tarjeta de *National Instruments* (NI), controlar la tensión que se les aplica. Estos circuitos y los ventiladores se sitúan en una estructura diseñada y fabricada con una impresora 3D que permite su acoplamiento a la pila. El caudal se ha medido mediante la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (*Particle Image Velocimetry*, PIV), lo que ha permitido obtener una relación entre el caudal y la tensión aplicada.

En el caso de los cortocircuitos, se ha diseñado y construido un circuito electrónico que se aplica a los bornes de la pila de combustible. Este sistema, controlado por las salidas digitales de la tarjeta de NI, interrumpe periódicamente el paso de la corriente entre la pila y la carga (o consumidor) y a su vez realiza un cortocircuito en bornes de la pila de la duración y frecuencia

deseadas. La frecuencia y duración con que se aplican estos cortocircuitos ha sido optimizada en este proyecto.

Tanto los diferentes circuitos electrónicos como los programas de control se han incorporado al banco de ensayos de pilas PEM que tiene el LIFTEC (Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión), centro mixto en el que participan el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y la Universidad de Zaragoza. El banco cuenta con un programa dedicado desarrollado en el entorno software LabVIEW en el que se han incluido los diferentes sistemas de control necesarios para estas tareas.

Para poder alcanzar los objetivos propuestos es necesario partir de unos conocimientos previos del funcionamiento de una pila de combustible además de tener experiencia tanto en el montaje como en la realización de ensayos con estos dispositivos. Una vez diseñados y montados ambos sistemas, se han realizado ensayos para comprobar el correcto funcionamiento y optimizar los parámetros necesarios. Se ha relacionado el caudal de los ventiladores con la temperatura de la pila para diferentes potencias entregadas, tratando de optimizar la eficiencia. También se han realizado pruebas con diferentes configuraciones de cortocircuito variando la duración y la frecuencia de éstos para diferentes demandas de corriente a la pila buscando optimizar el rendimiento.

Para estos ensayos se ha contado con un *stack* de pila de combustible PEM de 3 celdas de baja temperatura y cátodo abierto. La pila ha sido diseñada, desarrollada y ensamblada en el LIFTEC en el marco de un proyecto RETOS Investigación financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

1.3. Organización del documento y cronograma del trabajo

La estructura del documento queda organizada de la misma manera en que se han realizado las diferentes tareas, comenzando con una breve explicación teórica del funcionamiento de las pilas de combustible de tipo PEM. Tras la introducción, se realiza una revisión del estado del arte de las pilas de combustible PEM de cátodo abierto, discutiendo aspectos referentes a sus características térmicas, de humedad y los efectos que provocan los diferentes sistemas de ventilación. Para acabar la parte teórica, se incluye también una revisión del sistema de optimización energética basado en cortocircuitos.

El segundo bloque del trabajo se corresponde con la descripción de los dos sistemas diseñados e implementados durante la realización de éste. En primer lugar, se realiza una descripción del sistema de ventilación, además de los sistemas electrónicos y de control que lo complementan. También se describe la calibración de los ventiladores mediante PIV. En segundo lugar, se realiza igualmente una descripción del sistema de cortocircuitos incluyendo circuitos y descripción de los sistemas de control y, además, se describe el sistema utilizado para la adquisición de los datos durante las pruebas. En el apartado siguiente se describen las pruebas y ensayos realizados para los dos sistemas incluyendo un análisis de los resultados obtenidos. Para acabar el documento se discuten las conclusiones, el trabajo futuro y las consideraciones finales, donde se hace una valoración personal del trabajo realizado.

En la Tabla 1, expuesta a continuación, se muestra el cronograma que expone la distribución de tiempo dedicada a cada tarea desde el comienzo de este trabajo.

	AÑO 2020				AÑO 2021					
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Revisión bibliográfica										
Implementación y montaje de la pila										
Pruebas de acondicionamiento de la pila										
Realización de los sistemas electrónicos y de control										
Calibración de los ventiladores con PIV										
Ensayos térmicos con La pila										
Ensayos de optimización por cortocircuito										
Análisis de datos y obtención de conclusiones										
Redacción de la memoria										

Tabla 1 Cronograma temporal del trabajo realizado

2. La pila de combustible

Históricamente la producción energética ha estado basada en el uso de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural [1], [2]. Debido al aumento de la población mundial, así como a la creciente mejora del nivel de vida, el consumo de estos combustibles se ha incrementado de forma alarmante. Las reservas de combustibles fósiles son limitadas y cada vez se acerca más el día en el que puedan llegar a agotarse. Desde el punto de vista medioambiental, el mayor consumo de estos combustibles provoca un aumento de emisiones contaminantes a la atmósfera, tal y como se ve en las Figura 1 y Figura 2 y las consecuencias se traducen en la aparición de fenómenos como el efecto invernadero o la lluvia ácida, graves problemas medioambientales e incluso de salud pública.

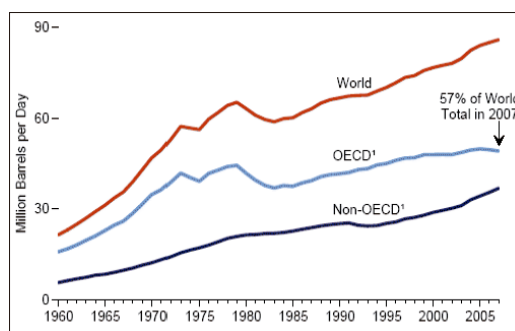


Figura 1 Evolución del consumo de petróleo mundial desde 1960 hasta 2005.

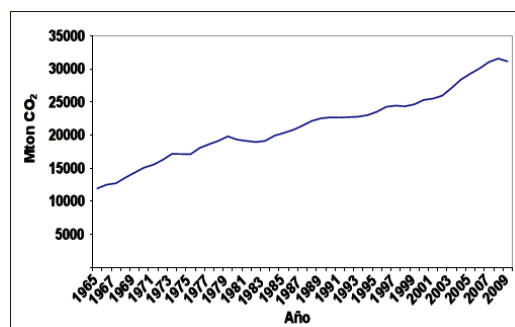


Figura 2 Evolución de las emisiones mundiales de CO2 entre 1965 y 2009.

Para reducir el impacto medioambiental, se hace necesario promover el ahorro, mejorar la eficiencia energética y aumentar la producción de energía limpia. Entre otras alternativas, una solución para resolver estos problemas es el uso de pilas de combustible como sistemas de almacenamiento y producción de energía sobre todo si se combinan con energías renovables.

2.1. Funcionamiento de una pila de combustible tipo PEM

Una pila de combustible es un sistema electroquímico que convierte la energía química directamente en energía eléctrica obteniendo como únicos subproductos de la reacción agua y calor. A diferencia de otros métodos de generación, la pila de combustible no necesita procesos térmicos o mecánicos intermedios, ya que la conversión es directa mediante la reacción electroquímica del hidrogeno y el oxígeno. Esto permite que haya mejores rendimientos.

Existen diferentes tipos de pilas de combustible en función del electrolito utilizado, el cual les confiere diferentes pautas de funcionamiento y características (temperatura de operación, tipos de reactantes, materiales utilizados para la construcción, vida útil y ámbito de aplicación). En la Tabla 2 se resumen los diferentes tipos de pilas de combustible y sus principales características.

	PEMFC / DMFC Pilas de intercambio protónico y pilas de metanol	AFC Pilas alcalinas	PAFC Pilas de ácido fosfórico	MCFC Pilas de carbonato fundido	SOFC Pilas de óxido sólido	ZAFC Pilas de Zinc-aire
Electrolito	Polímero sólido perfluorosulfonado	KOH	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃	KOH, LiOH, NaOH
Electrodos						
Ánodo	Pt/C	Ni, Ag, MeO	Pt/C	Ni poroso	Co-ZrO ₂ /Ni-ZrO ₂	Zn
Cátodo	Pt/C	Ni, Ag, MeO	Pt/C	NiO poroso	LaMnO ₃ + Si	MnO ₂
Matriz		Asbestos	SiC	LiAlO ₂		
Reacciones						
Ánodo	2H ₂ → 4H ⁺ + 4e ⁻	2H ₂ +4OH ⁻ →4H ₂ O+4e ⁻	2H ₂ → 4H ⁺ + 4e ⁻	CO ₃ ²⁻ +H ₂ →H ₂ O+CO ₂ +2e ⁻	2H ₂ +2O ²⁻ →2H ₂ O+4e ⁻	Zn+4OH ⁻ →Zn(OH) ₄ ²⁻ +2e ⁻
Cátodo	O ₂ +4H ⁺ +4e ⁻ →H ₂ O	O ₂ +2H ₂ O+4e ⁻ →4OH ⁻	O ₂ +4H ⁺ +4e ⁻ →2H ₂ O	CO ₂ +1/2O ₂ +2e ⁻ →CO ₃ ²⁻	O ₂ +4e ⁻ →2O ²⁻	O ₂ +2H ₂ O+4e ⁻ →4OH ⁻
Global	2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	H ₂ +1/2O ₂ +CO ₂ →H ₂ O+CO ₂	2H ₂ +O ₂ →2H ₂ O	2Zn+O ₂ →2ZnO
T [°C]	60-80	65-220	200	650	600-1000	0-60
Potencia	0-250 kW	10-100 kW	50 kW – 1 MW	0-1 MW	0-3 MW	90 W/kg
Eficiencia [%]	53-58% transporte 25-35%estacionario	60	>40	45-47	35-43	
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Back up ▪ Transporte ▪ Pequeñas aplicaciones móviles y domésticas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Militar ▪ Aeroespacial 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Domésticas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plantas de generación energética 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plantas de generación energética ▪ Sistemas auxiliares 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Móviles y estacionarias

Tabla 2 Tipos de pilas de combustible y sus características principales.

Entre todos los tipos de pilas de combustible, las de membrana de intercambio de protones (PEM), también llamadas pilas poliméricas, son actualmente la opción más prometedora para un gran número de aplicaciones entre las que desatan las móviles debido a su alta eficiencia, densidad de corriente y baja temperatura de operación. Es para este tipo de pila para el que se van a realizar los sistemas de mejora energética y por tanto es en el que nos vamos a centrar.

Básicamente, una celda de una pila de combustible está compuesta por tres zonas: un electrodo negativo (ánodo), un electrodo positivo (cátodo) y, entre ambos, una membrana polimérica que actúa como electrolito y separa los gases a cada lado. Esta membrana es un conductor protónico que permite el paso de los iones H⁺ a través de ella, pero es impermeable a los electrones y los gases reactantes. Un elemento fundamental de estos dispositivos son los llamados sistemas membrana-electrodos (MEAs). Para formarlos, una de las varias estrategias que se emplean consiste en depositar sobre cada una de las caras de la membrana poliméricas un catalizador, compuesto de nanopartículas de platino impregnadas en un soporte carbonoso. Sobre cada capa catalítica se sitúa una capa difusora, de material poroso y conductor (normalmente papel o tela carbonosa) que son conductores eléctricos que, además, ayudan a homogeneizar la concentración de los gases reactantes sobre la superficie del catalizador y a darle resistencia mecánica al polímero. Finalmente, todos estos elementos se colocan entre dos placas bipolares, rígidas y también conductoras de la electricidad, en cuya superficie se mecanizan una serie de canales con la geometría adecuada para conducir los gases reactantes hasta las capas difusoras. Las placas bipolares le dan también la rigidez mecánica necesaria a la celda durante el apilamiento y ayudan a extraer el agua y el calor que se generan por reacción química.

El funcionamiento de una celda de estos dispositivos se resume en la Figura 3. El combustible empleado (hidrógeno) se distribuye a través de los canales mecanizados en la placa bipolar por el lado del ánodo y pasa a través de la capa difusora hasta la capa catalítica, donde tiene lugar la

reacción de oxidación que separa la molécula en electrones y protones gracias al catalizador de platino. Los protones atraviesan la membrana polimérica de intercambio protónico, mientras los electrones no pueden cruzarla porque no es conductora eléctrica. Por el contrario, éstos buscan el equilibrio a través de un circuito alternativo: el formado por las capas difusoras y las placas, generando una corriente eléctrica disponible para la realización de un trabajo. Por el otro lado de la pila entra el oxígeno (o el aire) y se distribuye a través de los canales de la placa bipolar del cátodo, atraviesa la capa difusora y el oxígeno se combina en la capa catalítica con los protones que pasan a través de la membrana y los electrones del circuito exterior, generando agua y calor. Estos dos subproductos se eliminan evacuando el agua a través del flujo de gases en el cátodo y disipando el calor por convección (natural o forzada) con el medio que rodea la pila.

Las reacciones electroquímicas descritas anteriormente pueden formularse como:

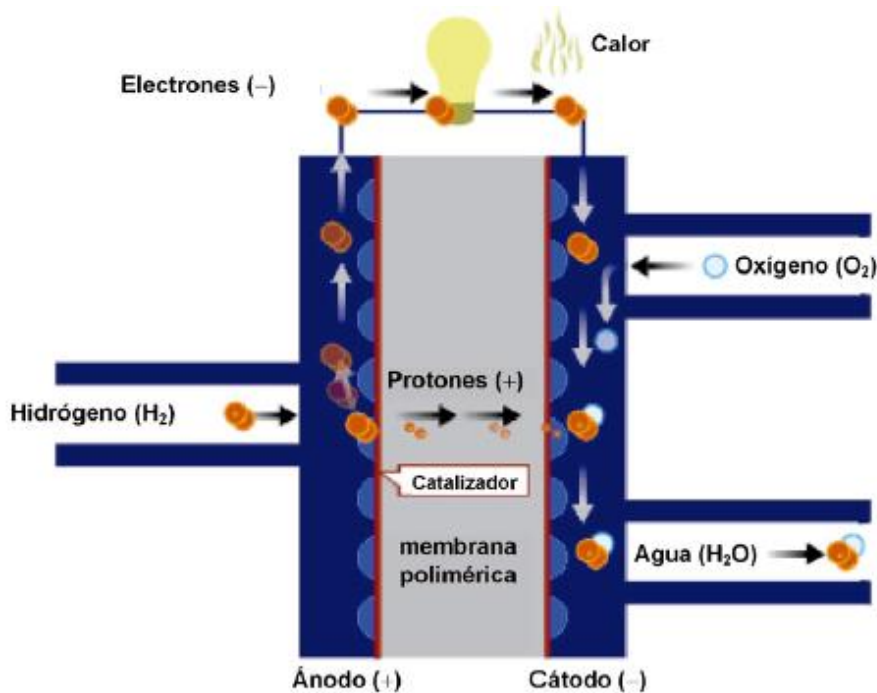
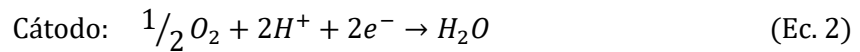


Figura 3 Esquema simplificado del funcionamiento de una pila de H₂ de tipo PEM

Un dispositivo completo está normalmente constituido por una serie de celdas elementales (o monoceldas) apiladas en serie. En esta configuración, que es la estructura común de una pila de combustible, 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 celda adyacente. Es el proceso continuo de generación y recombinación en celdas consecutivas lo que provoca una circulación electrónica global a través del sistema. Como en cualquier batería, para extraer la corriente de la pila, se conectan cables a las placas ánodo y cátodo de los extremos (placas colectoras de corriente).

2.2. Revisión del estado del arte del diseño y uso de la pila de combustible PEM de cátodo abierto.

Un tipo particular de la pila de combustible PEM es la de cátodo abierto (OC) (Figura 4). La característica esencial de estas pilas de combustible es la arquitectura empleada para el suministro de gases en los cátodos. Este suministro se realiza mediante canales mecanizados de lado a lado de las placas (abiertos) por los que se introduce directamente el aire del ambiente.



Figura 4 Pila de combustible PEM de cátodo abierto del LIFTEC

Una de las ventajas de las pilas de cátodo abierto es que se evita la necesidad de disponer de depósitos de almacenamiento de oxígeno y el sistema resulta más ligero. Por otro lado, se pueden utilizar los propios canales que atraviesan la pila como canales de refrigeración, por lo que el dispositivo es mucho más compacto. Es importante garantizar una distribución homogénea del aire a través de los todos canales ya que así se evitan distribuciones no uniformes de la temperatura y la humedad[3].

Tanto en las pilas OC como en las de cátodo cerrado (CC), para tener una distribución uniforme de los gases resulta esencial tener un diseño eficiente de las geometrías de flujo (canales) en ambas caras de la placa bipolar. Existen geometrías muy diversas, como las de canales paralelos, serpentín simple, serpentín-paralelo, interdigitadas o de canales en espiral. El diseño de las geometrías de flujo resulta crucial en la distribución de los gases pero, además, también influye en la capacidad conductora de corriente, la función de soporte mecánico con el MEA, la gestión del agua y del calor y la correcta estanqueidad de la pila [4]. En la Figura 5 y la Figura 6 puede observarse la disposición de los canales correspondientes a la cara ánodo y cátodo de la placa bipolar diseñada para esta pila por el LIFTEC que permite tanto el paso de gases, como un correcto contacto mecánico, térmico y eléctrico. Se observan los sistemas de juntas que garantizan la estanqueidad del hidrógeno, evitando fugas hacia el exterior y cruces hacia el cátodo que provocarían la destrucción de la membrana.

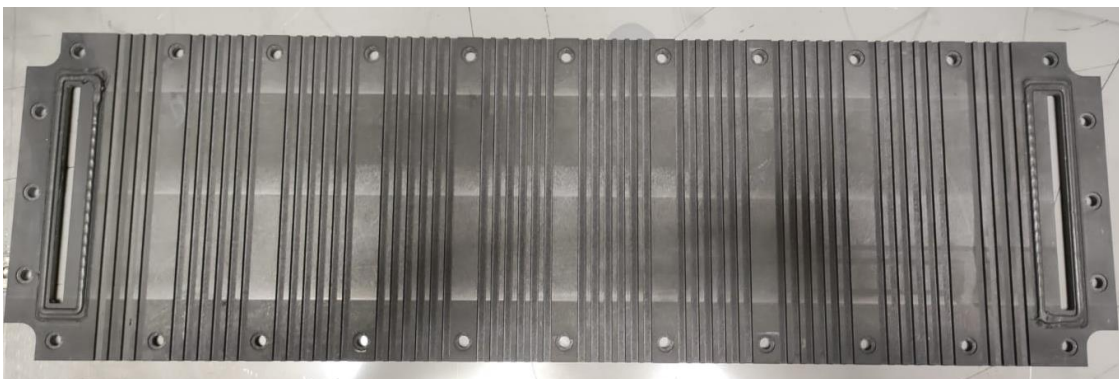


Figura 5 Cara ánodo placa bipolar

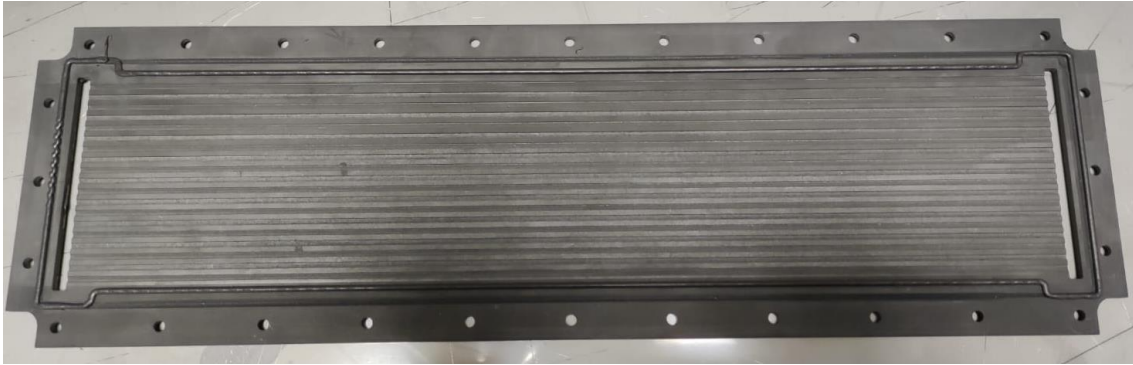


Figura 6 Cara cátodo placa bipolar

Para garantizar el correcto funcionamiento y una vida útil larga de las pilas de combustible, es necesario realizar el acondicionamiento de los MEAs mediante un protocolo establecido. Para ello, se deben mantener las condiciones adecuadas de temperatura, presión y humedad de los gases reactantes. Normalmente, el aire entra a la pila a temperatura ambiente, pero en entornos fríos, la baja temperatura del gas puede causar la degradación prematura del dispositivo [5]. La humedad es esencial principalmente en el cátodo, un aumento tiende a provocar una mejora en la potencia de la pila [6]. Esto, aunque resulte realmente beneficioso en las pilas CC en las que el aire puede circularse por un humidificador, resulta un problema en las pilas OC puesto que, al trabajar con aire del ambiente, no pueden recibir más humedad por esta vía.

Centrándonos en las pilas OC, al trabajar el sistema a presión atmosférica se evita el uso de elementos auxiliares para almacenamiento externo y suministro del gas como compresores o botellas de oxígeno, por lo que el sistema resulta más ligero. En cuanto al sistema de suministro de oxígeno/aire, dentro de las pilas OC, existen esencialmente dos tipos: de suministro pasivo (*free breathing*) y de suministro forzado. El método de suministro pasivo se fundamenta en la convección natural, siendo las necesidades de la pila y los gradientes térmicos los que aseguran la cantidad de gas necesario sin consumo de energía extra. En el caso del sistema de suministro forzado se utilizan elementos externos, principalmente ventiladores, para hacer circular el aire por los canales, lo que permite regular el caudal de aire a la demanda de la pila en cada punto de operación específico [7]. Las pilas con sistemas de suministro pasivo pueden tener limitaciones de caudal de aire, por lo que suelen emplearse en aplicaciones de muy baja potencia.

En la Figura 7 puede observarse una distribución térmica para diferentes configuraciones de pilas y se aprecia como con una sola monocelda la refrigeración por convección natural resulta suficiente. En cambio, en el *stack*, la gestión térmica por convección natural es insuficiente, y es evidente la necesidad de un sistema más eficiente [8]. En la Figura 8 se comparan las diferentes curvas de polarización resultado de realizar ensayos con una pila con sistema pasivo y con otra con un sistema forzado [9]. Es evidente que el sistema pasivo de gestión de aire no es capaz de suministrar el volumen necesario para la reacción haciendo que la densidad de corriente se vea limitada drásticamente a valores menores de 50 mA/cm^2 . Por todo ello, vamos a centrar el desarrollo de esta revisión en las pilas OC de convección forzada.

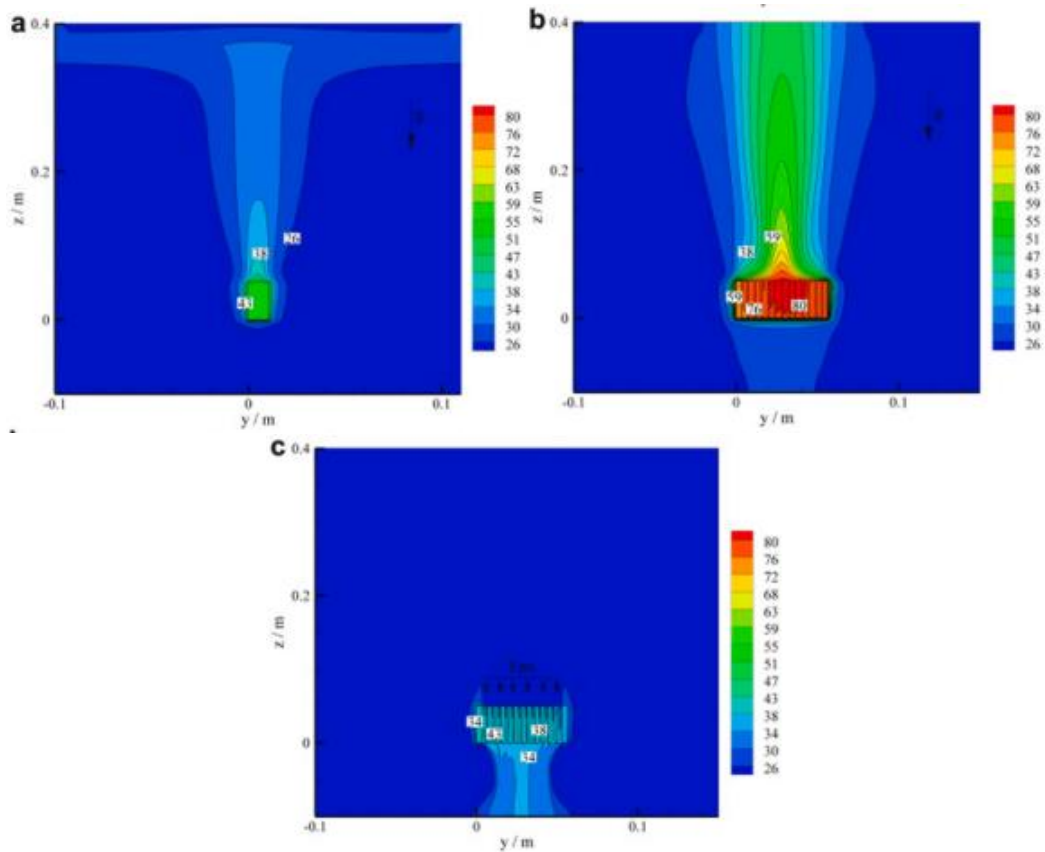


Figura 7 Distribución térmica en a) Monocelda con convección natural; b) Stack con convección natural, c) Stack con convección forzada [8]

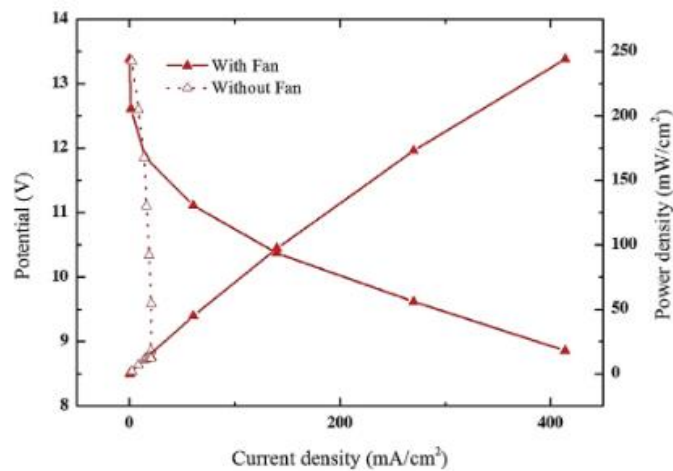


Figura 8 Comparación de la curva de polarización de una pila con convección forzada y convección natural [9]

La gestión del agua, la temperatura y el flujo de los gases resulta muy importante para garantizar el correcto funcionamiento de una pila de combustible. Se ha demostrado que detalles como poner la pila en una posición determinada ayudan a eliminar excesos de agua (*flooding*). Asimismo, la temperatura tiene un papel muy significativo en la distribución de agua en la pila [10], existiendo diversos métodos gestión. Un sistema muy utilizado en este caso es el uso de ciclos de purga [11], [12], que consiste en añadir a la salida de gases del ánodo un condensador seguido de una válvula. El condensador se encargaría de deshumidificar el hidrógeno, que recircularía de nuevo al interior de la pila mediante sistemas activos (bomba) o pasivos (Venturi). Durante el funcionamiento, se establece una frecuencia y un tiempo de apertura para la electroválvula de

purga creando gradientes de presión que arrastraran el agua al exterior. Otro fenómeno asociado al purgado es la expulsión de impurezas arrastradas por el agua. En la Figura 9 se observa la variación de la tensión producida por los ciclos de purga en un *stack* de 10 celdas. De igual forma, en la Figura 10 se seleccionan 3 celdas que muestran las 3 situaciones más habituales que se dan en la pila, encharcamiento, deshidratación y agua en un nivel moderado, y cómo afecta este problema su funcionamiento.

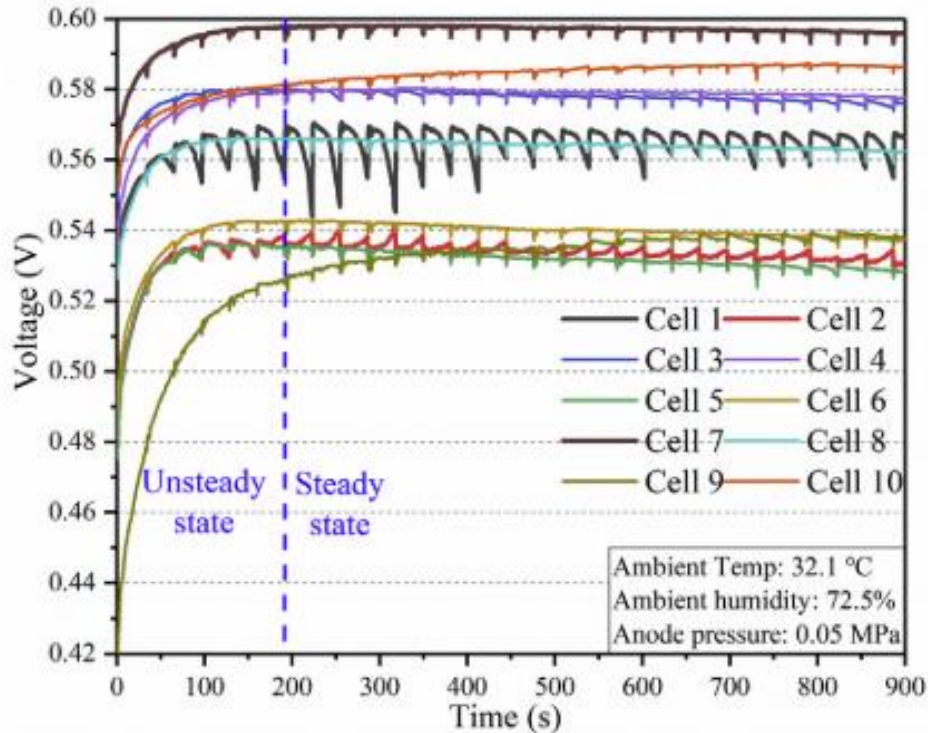


Figura 9 Tensión en las diferentes celdas de una pila PEM durante un ciclo de funcionamiento con purgas de hidrógeno [11]

En el caso de la celda 1 se tiene un encharcamiento (*flooding*). Se puede observar como el exceso de agua hace que el potencial caiga. La purga elimina parte del agua y, como se aprecia en la gráfica, la tensión vuelve al punto inicial y comienza a caer con una pendiente menor. En un estado de régimen permanente este efecto llegaría a reducirse considerablemente. Si los purgados son insuficientes, es habitual que las celdas próximas a la salida, como es el caso de la celda 1, reciban más agua al depositarse en ellas el exceso de líquido. Conforme la pila se estabiliza este fenómeno se va paliando.

En la segunda celda ocurre lo contrario que en la celda 1. La celda tiene problemas de deshidratación, probablemente causados por la proximidad de una celda encharcada. El efecto de la celda contigua se traduce en un aumento del caudal en la celda 2 provocando una reacción más pobre debido al mayor drenaje y un aumento de la resistencia óhmica. El efecto de la purga provoca picos negativos en el voltaje debido a una deshidratación intensa que se revierte durante el funcionamiento normal. Como este fenómeno es provocado por el funcionamiento de la celda contigua, al mejorar ésta se establece un suministro más estable de gases a ambas celdas. En el caso de la celda 7, que se encuentra en una posición intermedia en el *stack*, el efecto del purgado garantiza una humedad correcta, que se traduce en una tensión estable y óptima.

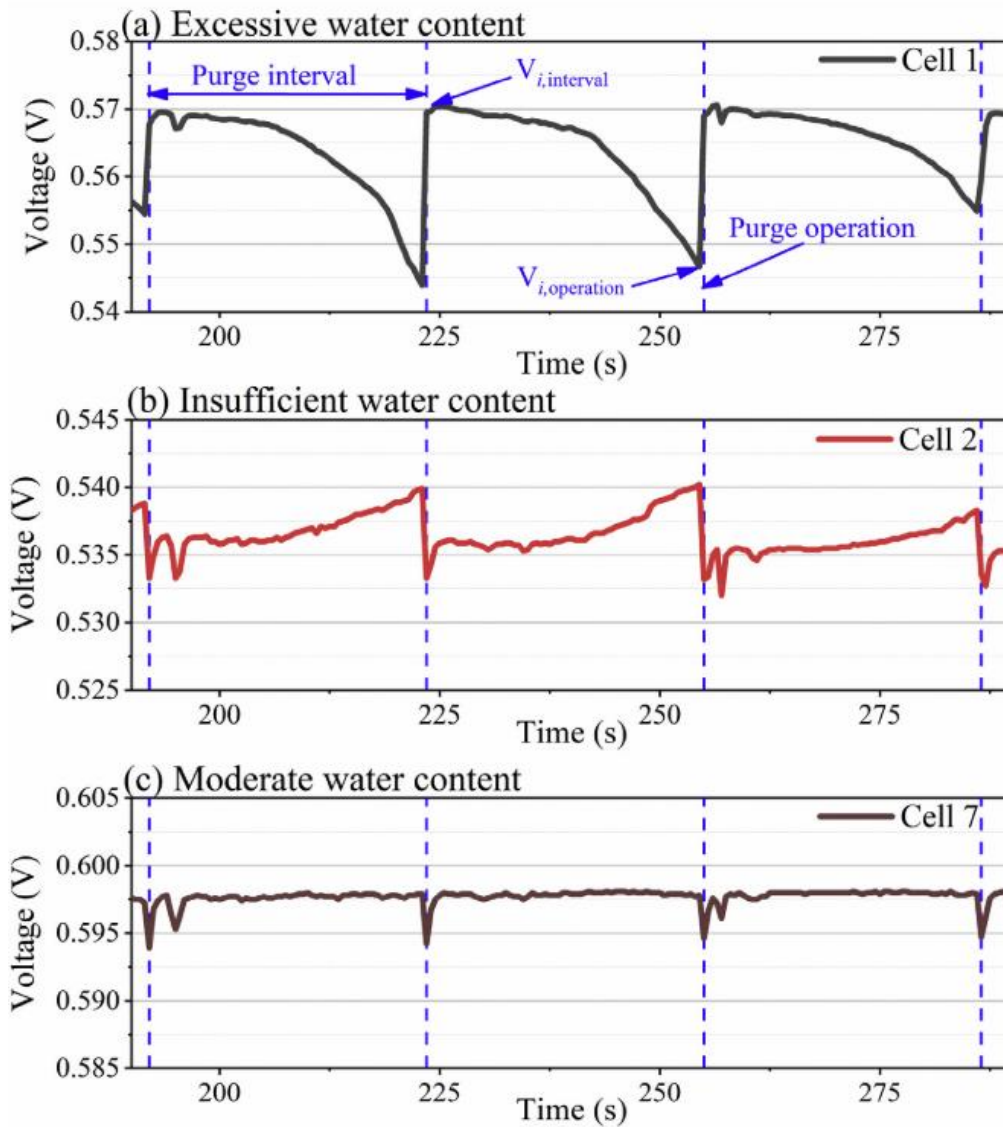


Figura 10 Dinámicas típicas de voltaje en celdas con a) excesiva agua; b) agua insuficiente; c) nivel moderado [11]

Otra característica determinante en la realización de purgas en las pilas es la duración y la frecuencia del ciclo. Idealmente, durante el purgado se debería renovar todo el hidrógeno contenido en la pila, por lo que la duración dependerá del caudal y del volumen de gas. A mayor corriente demandada, mayor consumo de hidrógeno y por tanto mayor caudal, lo que permite programar purgas más rápidas porque el tiempo requerido para renovar el gas es menor. Por último, hay que tener en cuenta la relación entre los intervalos de las purgas y la duración de éstas. Corrientes más altas generan más agua, por lo que es necesaria una mayor frecuencia de las purgas, pero con una menor duración para evitar el *flooding*. A corrientes bajas ocurre lo contrario, es decir, hay una menor producción de agua por lo que la frecuencia de las purgas deberá ser más baja debido al bajo caudal. En la Figura 11 puede observarse la relación de las diferentes duraciones de los purgados para cada corriente [11]. Las figuras a) y b) muestran el efecto de un purgado de duración insuficiente.

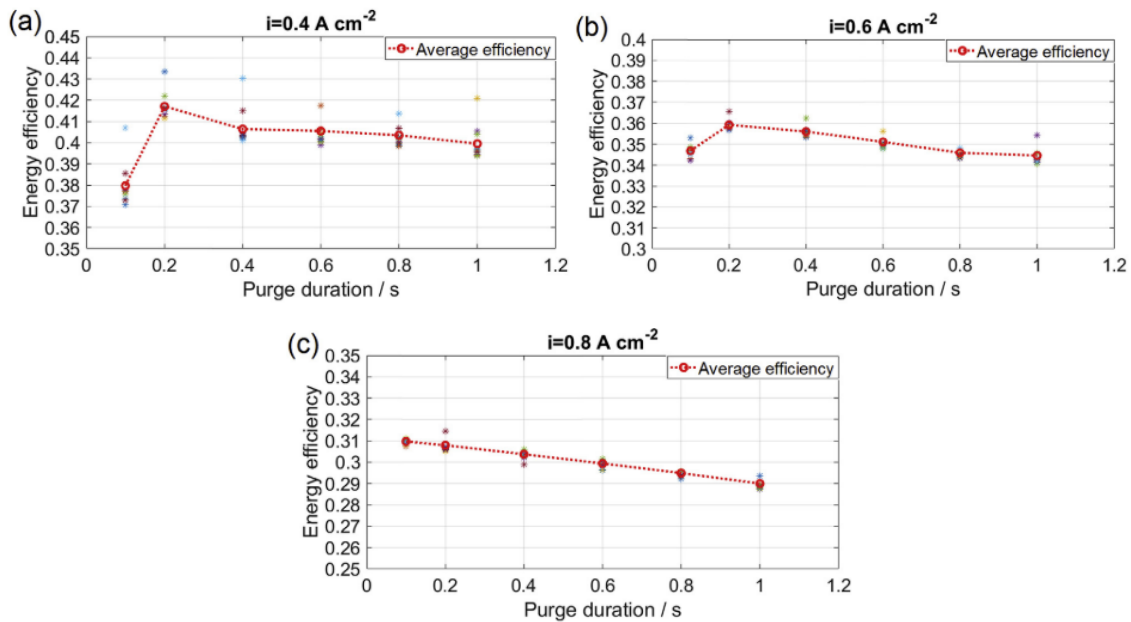


Figura 11 Relación del tiempo de purgado con para diferentes corrientes de: a) $0.4A/cm^2$; b) $0.6A/cm^2$; c) $0.8A/cm^2$ [12]

El control de la humedad y de la temperatura está directamente relacionado con la gestión del suministro de gases. La distribución del flujo de aire es una característica crítica que altera el funcionamiento de la pila. Un parámetro importante de la geometría de flujo en los cátodos es la anchura de los canales. En general, una mayor anchura del canal provoca una peor distribución de oxígeno y peor contacto eléctrico, causando la pérdida de rendimiento de la pila de combustible [13]. Sin embargo, una anchura demasiado pequeña aumenta la caída de presión. En la Figura 12 a) se observan los resultados de una simulación numérica sobre la influencia del ancho del canal y la resistencia de contacto en la tensión de la pila para una corriente de $600\text{ mA}/\text{cm}^2$. Al aumentar el ancho del canal disminuye el voltaje de salida porque aumenta la resistencia, puesto que se reduce el área de contacto entre la placa bipolar y el MEA. En la Figura 12 b) puede verse cómo influye la relación entre el ancho del canal y la zona de contacto en el voltaje de la celda, pudiendo existir un valor óptimo de la relación de aspecto que logre el equilibrio entre las pérdidas óhmicas y las producidas por la resistencia de contacto. Para densidades de corriente inferiores a $0,2\text{ A}/\text{cm}^2$ se ha determinado una relación directamente proporcional entre la potencia y el ancho de los canales por la disminución de la caída de presión [14].

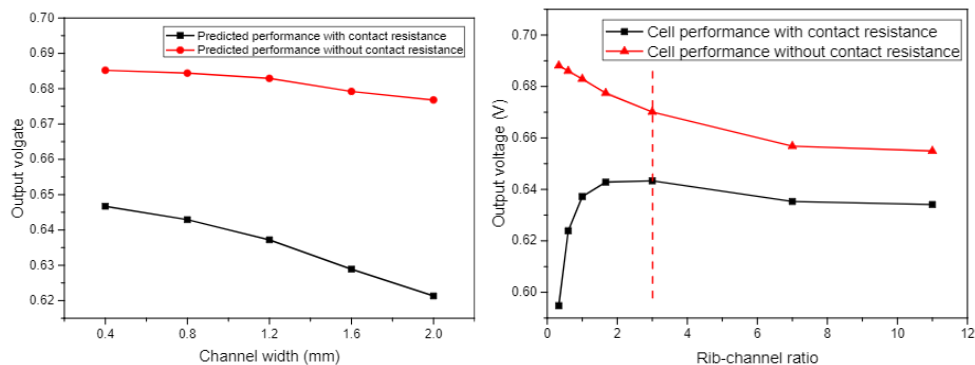


Figura 12 Efectos en el voltaje de la pila para una corriente de $600\text{ mA}/\text{cm}^2$ de: a) la anchura del canal; b) relación entre el ancho del canal respecto a zona de contacto [13]

Otro aspecto importante es la selección del sistema encargado de suministrar el flujo de aire. Este sistema resulta esencial para el funcionamiento de las pilas OC puesto que además de suministrar

el aire para la reacción electroquímica permite también la refrigeración del dispositivo. En este caso, se ha demostrado que para pilas de media potencia, el sistema más indicado es el de ventiladores axiales en modo de succión porque tiene efectos positivos en la distribución uniforme del aire y de la temperatura, además de un aumento en la potencia[15].

A la hora de seleccionar los ventiladores es recomendable elegir los que tengan su rango de trabajo alrededor del punto óptimo (o de diseño) de operación de la pila asegurando un funcionamiento estable. Los parámetros que afectan al funcionamiento son el área de flujo de aire, la potencia de los ventiladores y su configuración (uno o más de uno puestos en serie o en paralelo) [16]. En la Figura 13 a) puede verse el punto de operación de la pila que se desplaza según la potencia entregada. Por tanto, para demandas de potencia altas, será necesario un mayor flujo de aire que requerirá ventiladores más grandes y, por ende, de mayor potencia. Una potencia insuficiente del ventilador no garantizaría el flujo de aire necesario, pero un exceso de potencia conlleva el aumento de las pérdidas parásitas. Otro parámetro importante es la longitud de los canales. Se ha determinado que con canales más cortos se disminuye la caída de presión (Figura 13 b), favoreciendo la distribución de oxígeno en toda el área activa y una mejor tasa de enfriamiento, lo que produce un aumento de la eficiencia de la pila. Por último, un aumento de la potencia del ventilador conlleva un aumento de potencia tanto bruta como neta de la pila (Figura 13 c) al garantizarse el volumen de gas suficiente para la reacción y la refrigeración. Sin embargo, se llega a un valor en el que al seguir aumentado la potencia consumida por los ventiladores la pendiente de mejora de la potencia bruta de la pila se reduce notablemente, mientras que la potencia neta disminuye debido al aumento de las pérdidas parásitas.

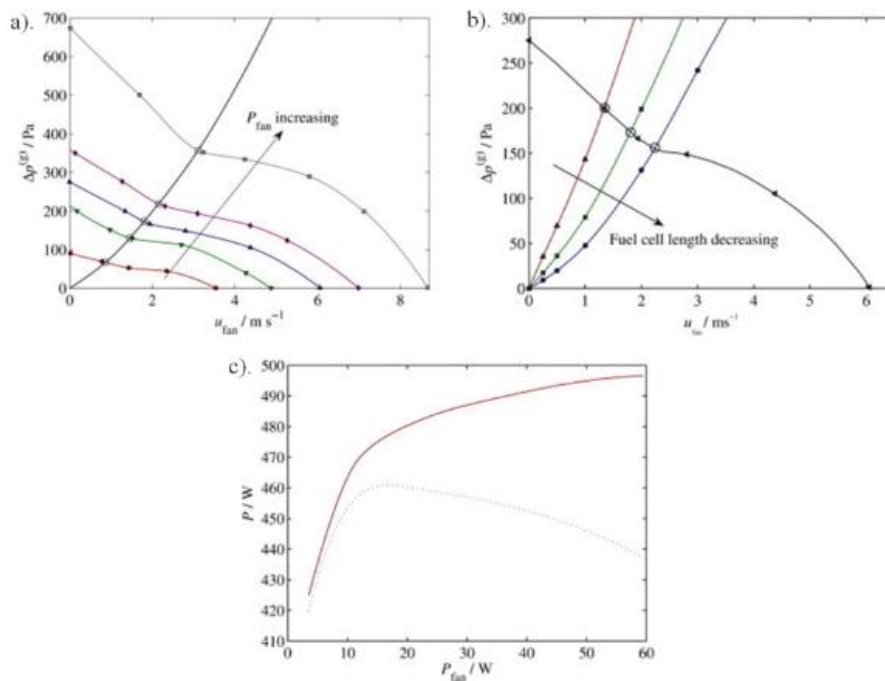


Figura 13 a) Puntos de operación de la pila con diferentes ventiladores; b) variación de la potencia con las diferentes longitudes de los canales de la pila; c) variación de la potencia bruta (línea roja) y neta (línea gris) de la pila con relación a la potencia del ventilador [16]

Lo anterior se establece para un punto de operación concreto, pero, puesto que las pilas de combustible no trabajan a potencia constante, las necesidades de aire tampoco lo son. Estas variaciones de caudal se suplen modificando la velocidad del ventilador, habitualmente mediante pulsos PWM. Además, esta variación de velocidad permite a su vez un mayor control térmico. En la Figura 14 se observa una gráfica que relaciona la temperatura de la pila para cada potencia en función del *duty cycle* del PWM del ventilador [17].

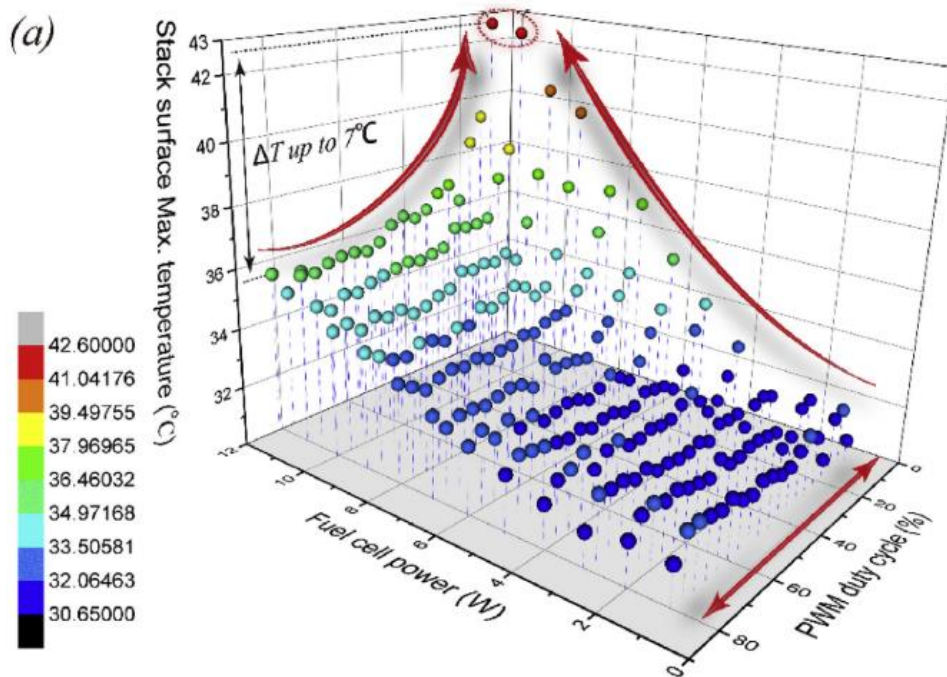


Figura 14 Temperatura en función de la potencia y el duty cycle del PWM [17]

En la gráfica se observa la diferencia de comportamiento en potencias altas y bajas. Para potencias más bajas, un aumento del ciclo PWM provoca aumentos de temperatura por favorecer la humidificación y del flujo de gases. En cambio, para potencias altas el aumento del caudal provoca un enfriamiento de la pila que afecta negativamente al funcionamiento de la membrana. Este comportamiento se observa en las Figura 15, que muestra la variación de la tensión para las diferentes demandas de potencia para ciclos bajos y altos de PWM.

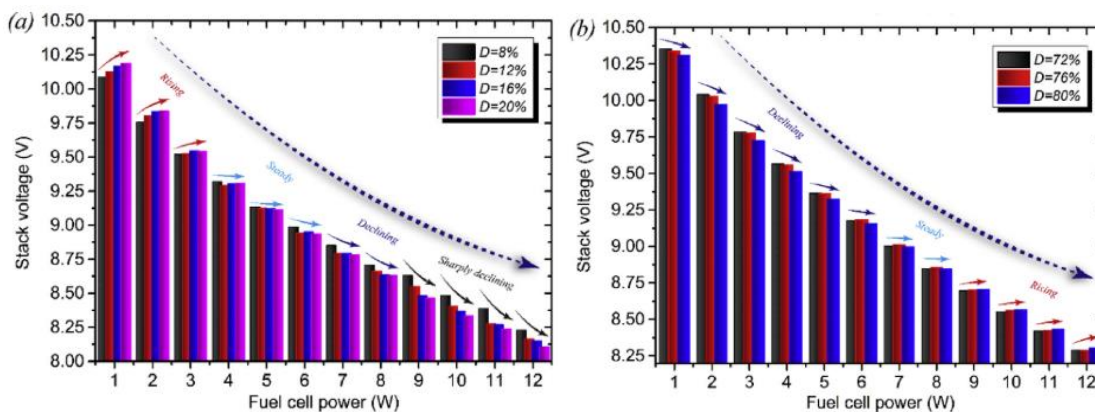


Figura 15 Variación de la tensión con la potencia de los ventiladores para diferentes puntos de operación de la pila en a) ciclos de duty entre el 8 y el 20%; b) ciclos de duty entre el 72 y el 80%. [17]

En la Figura 15 a) se observa como para velocidades bajas del ventilador, la potencia aumenta con el duty cycle en puntos de baja demanda de potencia. Al aumentar la potencia de la pila, la mejora de eficiencia se pierde hasta que llega un punto en que empieza a ser perjudicial. En cambio, en la Figura 15 b) ocurre lo contrario. El aumento excesivo del caudal de aire es perjudicial a potencias bajas porque la pila se enfría demasiado, pasando a ser beneficioso con un aumento de la potencia.

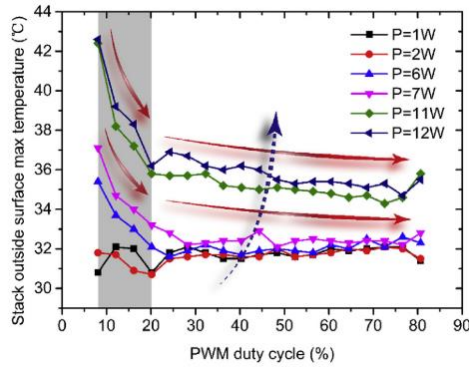


Figura 16 Temperatura superficial máxima de la pila en función de la potencia y del duty cycle del PWM [17]

En la Figura 16 se muestra el punto de máxima temperatura de la pila para las diferentes potencias de la velocidad de los ventiladores. Para entender este gráfico es necesario saber cómo y por qué se producen estos cambios térmicos en la pila, los cuales van directamente ligados a la potencia demandada. Básicamente existen 4 fuentes de calor en una pila de combustible tipo PEM: los cambios de entropía de la reacción, las pérdidas propias de la reacción electroquímica, las debidas a las pérdidas óhmicas provocadas por el paso de la corriente y la condensación del vapor de agua producido (efecto más notorio en pilas PEM de baja temperatura). El calor producido por el cambio de entropía, pérdidas irreversibles y pérdidas óhmicas es similar a la potencia de salida de la pila y representa unas pérdidas térmicas aproximadas del 55%, 35% y 10% de todo el calor producido [18]. Por tanto, una mayor potencia de la pila conlleva mayores pérdidas asociadas a, en primer lugar, un aumento de la corriente el cual se asocia a un aumento de las pérdidas óhmicas. A su vez, al aumentar la potencia también lo hace el consumo de gases, con lo que aumentan las reacciones electroquímicas y la generación de calor. Este calor se disipa principalmente mediante 3 vías: por convección natural al medio ambiente, por convección forzada de la que se encargan los ventiladores axiales y es la que disipa la mayor parte del calor, y, por último, el calor que se lleva el agua al ser extraída de la pila.

Existe una aproximación teórica de estas pérdidas realizada mediante un modelo eléctrico que las simula como si se tratase de resistencias. Este circuito no es realista, ya que las resistencias varían en función del punto de operación y del tiempo que la pila lleva funcionando, por lo que resulta necesario añadir algún condensador en paralelo que ajuste esa dependencia temporal durante la fase de arranque. Aun así, como se observa en la Figura 17, es un modelo que, aunque sencillo ha demostrado ser útil.

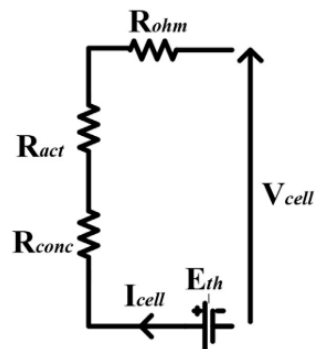


Figura 17 Modelo eléctrico de la pila de combustible con las diferentes pérdidas de rendimiento ajustadas como resistencias [18]

2.3. Sistema de optimización de potencia por cortocircuitos

Otro método de optimización de la potencia de la pila de combustible sería realizar cortocircuitos en bornes de la pila de combustible. Estos cortocircuitos tienen 2 parámetros esenciales: la duración y su frecuencia.

Existen dos teorías extendidas sobre el efecto que estos cortocircuitos producen en la pila. La primera de ellas se basa en el aumento de la producción de agua y el aumento de la temperatura debido al aumento repentino del valor de la corriente [19]. Esta agua que se produce en la interfase membrana/electrodo mejora el transporte iónico mientras que el aumento de la temperatura favorece la evaporación del agua de la GDL. Por otro lado, los óxidos e hidróxidos de platino, intermedios generados durante la reacción de reducción del oxígeno (ORR), son especies que ocupan sitios activos limitando por tanto la propia ORR [20]. Los cortocircuitos favorecen el desplazamiento de los equilibrios hacia la formación de agua, liberando sitios activos favoreciendo así la adsorción de más oxígeno. Ambas teorías son aceptadas por lo que es de esperar que durante el cortocircuito se combinen ambos efectos.

Una de las cuestiones que rodean el cortocircuito es qué frecuencia y qué duración es más adecuada. Los valores óptimos dependerán, en primer lugar, de la pila sobre la que se aplican y además de la potencia del dispositivo. En la Figura 18 se muestran los resultados para un sistema que realiza cortos de 100 ms de duración [19], observándose en la imagen una relación entre el voltaje y la potencia que la pila entrega para cada corriente con medidas hechas en sistemas con diferentes frecuencias. Una conclusión importante que puede extraerse de estos resultados es que para corrientes bajas tienen mejores comportamientos los cortocircuitos cuyas frecuencias son menores. Esta relación se va invirtiendo hasta que, pasado un valor de corriente, (en este estudio 2,8 A) comienza a ser más efectivo aumentar la frecuencia.

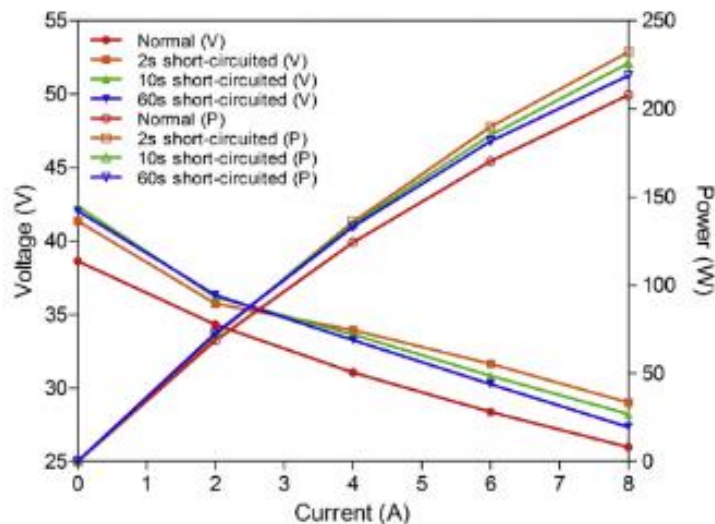


Figura 18 Relación entre tensión/potencia y corriente para diferentes frecuencias de un cortocircuito de 100ms de duración. [19]

La duración del cortocircuito tiene también importancia en el efecto que produce. Hay que tener en cuenta que en el momento del cortocircuito la pila no entrega potencia, por tanto, una mejora en la energía producida por la pila puede verse anulada por la pérdida durante el corto. Por otro lado, un cortocircuito más largo no siempre es estable y puede revertirse más rápido que uno más corto. En los resultados que se muestran en la Figura 19 se pueden ver los resultados de aplicar cortocircuitos de duraciones variadas a una pila PEM con una densidad de corriente de 69,4 mA/cm²[20]. Se puede apreciar que la caída de la tensión es más rápida en picos más anchos, así

como también que la caída de la tensión es mayor para estos casos. En la Figura 19 b) se observa mejor el cambio de la tensión y se puede comprobar como para tiempos intermedios (50-200ms) se alcanza una respuesta más estable.

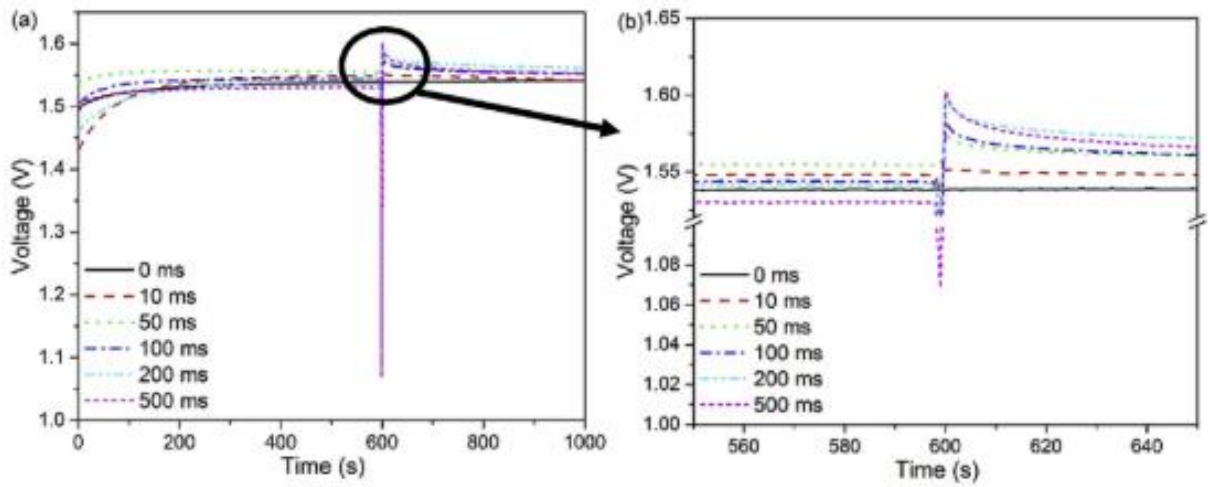


Figura 19 Comparación entre potencial respecto al tiempo para diferentes configuraciones de cortocircuito en una pila trabajando a $69.4\text{mA}/\text{cm}^2$ [20]

3. Diseño y desarrollo de sistemas

En este apartado se va a detallar la selección y diseño de los elementos que intervienen tanto en el sistema de ventilación de la pila como en el de cortocircuito

3.1. Sistema de ventilación

En el LIFTEC se desarrolló un modelo térmico específico [21] del comportamiento de una pila de combustible de cátodo abierto formada por 25 y 5 celdas. Estos estudios sirvieron para diseñar los sistemas de ventilación que se van a acoplar a las pilas en su montaje. Este modelo relaciona la temperatura superficial de la pila con el caudal de aire que mueve el sistema de ventilación. Además, también se describen las pérdidas de carga que tendrá que vencer el sistema de ventiladores para diferentes corrientes en función de la temperatura óptima de operación (50-70°C). Los resultados obtenidos para la pila de 5 celdas se resumen en la Tabla 3.

$I [A]$	$Pot_{pila} [W]$	$\dot{m}_{aire,pila} [kg/s]$	$q_{aire,pila} [m^3/h]$	$\Delta P [Pa]$
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 3 Refrigeración necesaria del modelo de 5 celdas para cada densidad de corriente [21]

Con ellos, se decidió desarrollar un sistema de ventilación formado por tres ventiladores en modo succión capaces de mover el caudal especificado teniendo en cuenta la pérdida de carga en los canales de la pila. El ventilador elegido es el modelo 422JH de Ebmpapst que, para la corriente nominal, podrá vencer las pérdidas de carga impuestas. En la Figura 20 se muestra su curva de funcionamiento. Los resultados obtenidos en un estudio similar permitieron seleccionar el modelo 8212 JH4 de Embpapst para la pila formada por 25 celdas (Figura 21). Finalmente, los ventiladores se posicionan en una estructura diseñada para su montaje en la pila con una distribución optimizada para maximizar la homogeneidad del flujo de aire (Figura 22).

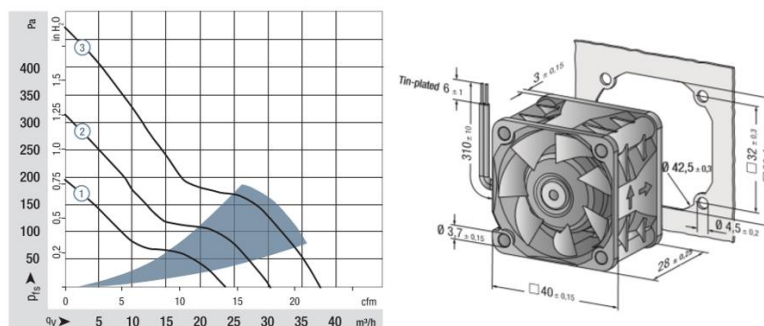


Figura 20 Curva de funcionamiento y dimensiones del ventilador de Ebmpapst modelo 422JH [22]

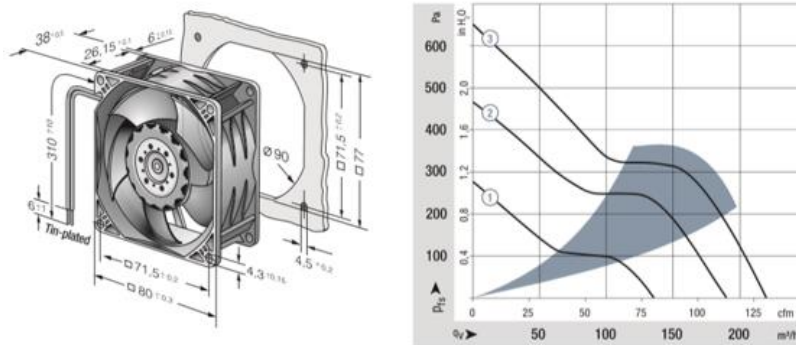


Figura 21 Curva de funcionamiento del ventilador modelo 8212 JH4

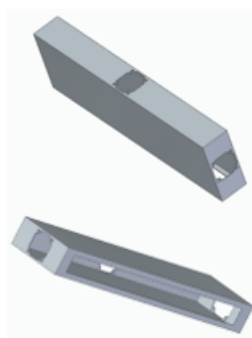


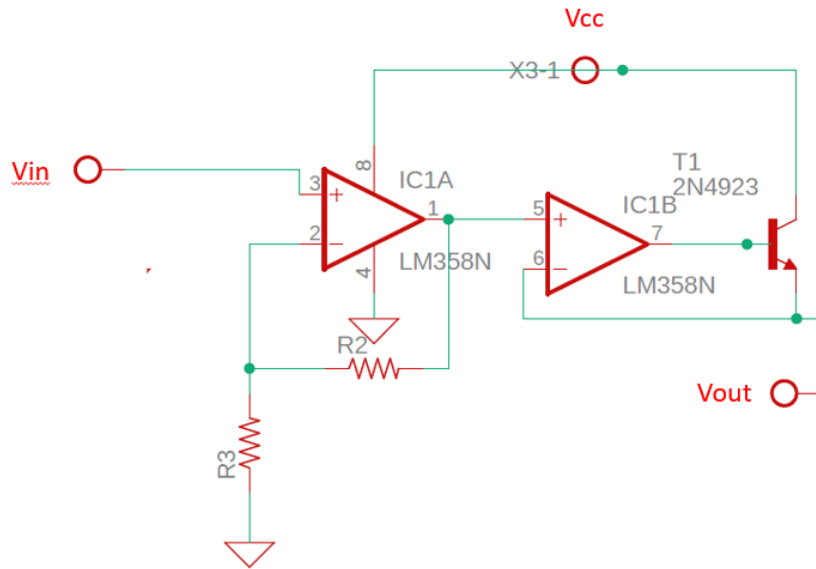
Figura 22 Pieza de acople de los ventiladores a la pila de combustible de 5 celdas. [21]

3.1.1 Sistema de control de los ventiladores

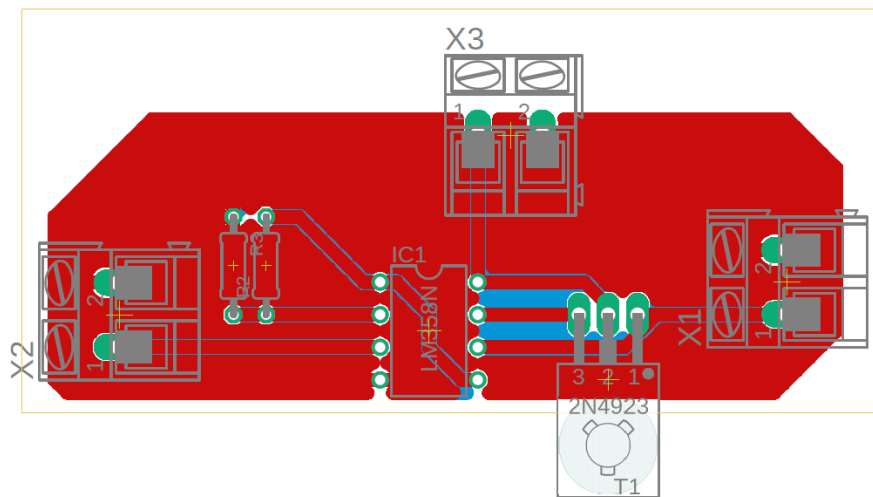
Para el control del sistema de ventilación se ha decidido que el ventilador central sea independiente de los laterales, mientras que estos últimos siempre trabajarán de forma simultánea. Esta disposición sirve para ajustar los caudales a 3 regímenes de operación definidos para garantizar tanto el caudal de aire necesario para la reacción como el de refrigeración.

El sistema de ventilación se controla mediante una tensión analógica variable. Esta tensión se regula con un programa realizado en entorno LabView, el cual ajusta las salidas analógicas de una tarjeta de adquisición de datos de National Instruments (USB-6008), como su valor máximo está limitado, se añade una etapa amplificadora de ganancia $G=3$. De esta forma, la tensión de salida se ajustará a la tensión de alimentación del ventilador (12 V), derivando a su vez el consumo de corriente a una fuente externa. En la Figura 23 puede observarse el esquema eléctrico del amplificador diseñado y su PCB correspondiente, en el que V_{in} es la tensión de control procedente de las tarjetas de NI, V_{out} la tensión de salida de los ventiladores y V_{cc} la tensión de alimentación de la fuente. Para el ajuste de la ganancia se ha tenido en cuenta que los valores de R_2 y R_3 son 2 k Ω y 1 k Ω respectivamente quedando la siguiente ecuación (Ec. 1).

$$G = \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) = 3 \quad (1)$$



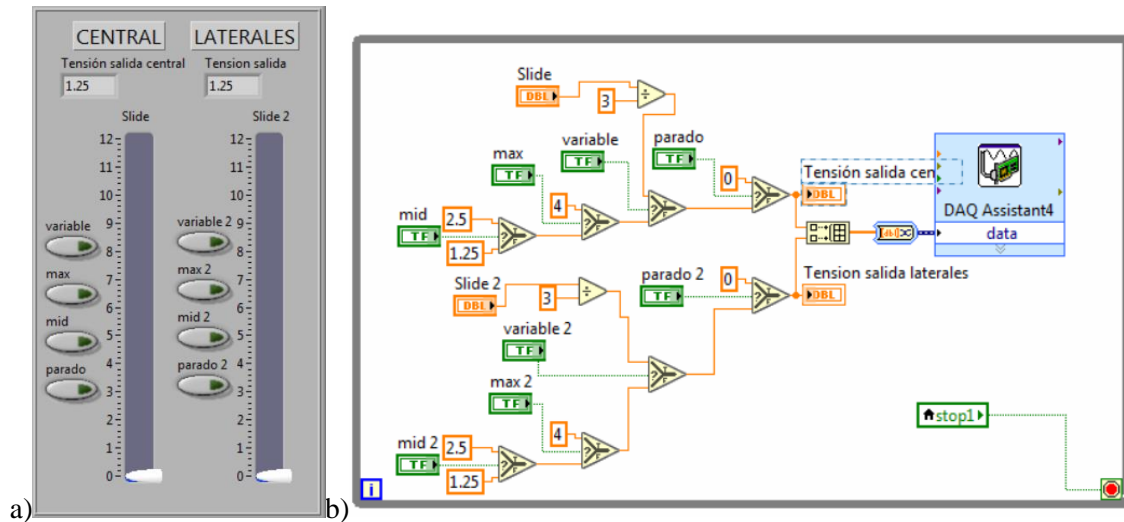
a)



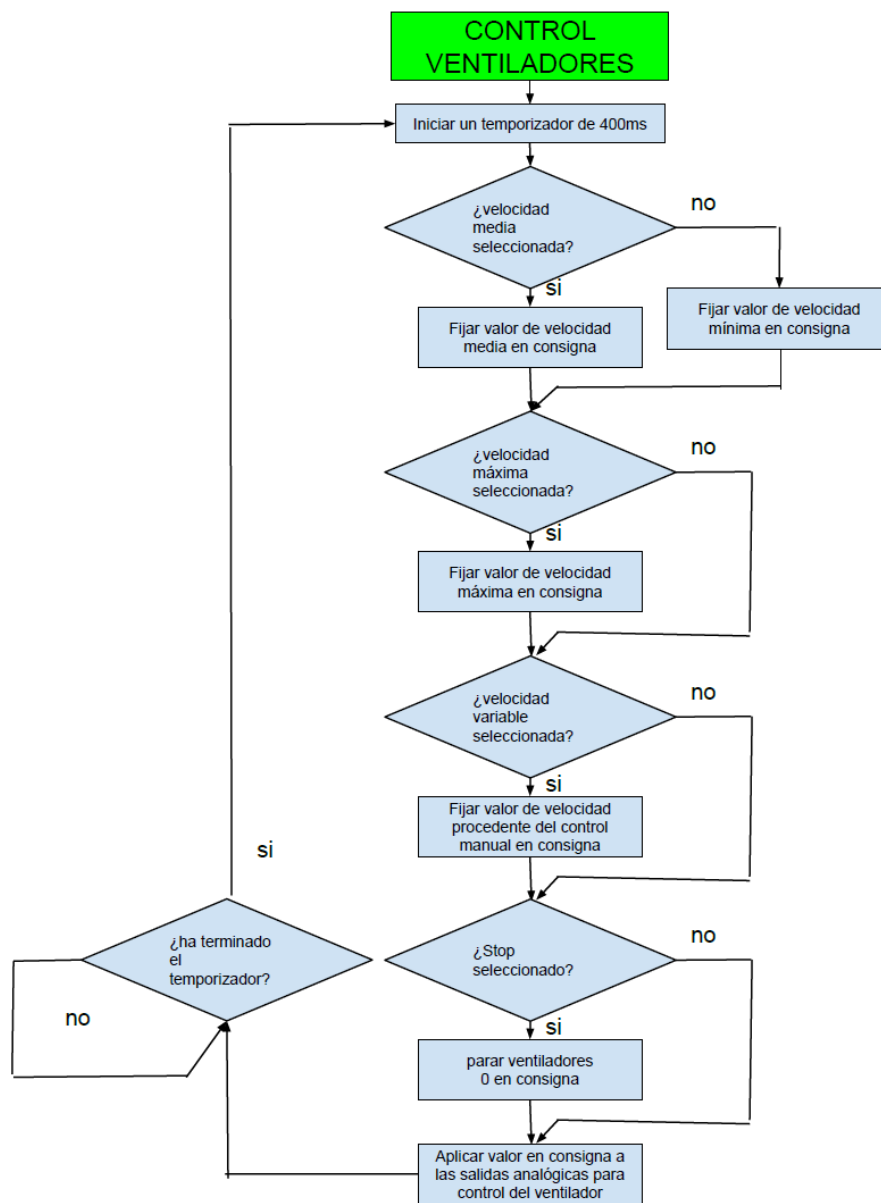
b)

Figura 23 Circuito electrónico del sistema de amplificación de la señal de control del ventilador: a) esquema eléctrico, b) diseño PCB

El programa de control desarrollado en LabVIEW se ha integrado en el programa de control del banco de ensayos de pilas de combustible tipo PEM del LIFTEC. Este programa ajusta dos salidas analógicas de la tarjeta de NI en valores entre 0 y 4V que, tras ser amplificados por la etapa de amplificación descrita quedarán entre 0 y 12V. Este programa permite ajustar la tensión manualmente y además incluye 3 puntos de operación fijos: tensión máxima, 50% de la tensión y tensión mínima (Figura 24). El objetivo de este programa es determinar los caudales de los ventiladores para los diferentes voltajes, tal y como se describe en el siguiente apartado.



a) b)



c)

Figura 24 Control de los ventiladores en LabVIEW: a) control manual en el (panel frontal de LabVIEW), b) bucle de control (diagrama de bloques de LabVIEW), c) diagrama de flujo del programa de control

3.1.2 Calibración de ventiladores mediante velocimetría de imágenes de partículas (PIV)

El caudal de los ventiladores se ha determinado integrando la velocidad del aire sobre el área de salida. La velocidad se ha medido mediante la técnica de velocimetría de imagen de partículas, conocida como PIV (*Particle Image Velocimetry*). En la configuración de estos experimentos, esta técnica permite medir dos componentes de la velocidad en un plano del flujo. En este caso, se ha medido en un plano longitudinal y se ha supuesto flujo axisimétrico [23].

La velocimetría de imágenes de partículas estima el movimiento del fluido a partir de la evolución temporal de unas partículas trazadoras, bien que aparezcan de forma natural en el flujo o bien introducidas en él. Se basa en observar el desplazamiento de los marcadores entre dos imágenes separadas un intervalo de tiempo Δt conocido, calculando la velocidad local como

$$\vec{u}(x, t) = \frac{\Delta \vec{x}(\vec{x}, t)}{\Delta t} \quad (2)$$

donde $\Delta \vec{x} = \vec{x}_2 - \vec{x}_1$ es el desplazamiento del marcador localizado en la posición \vec{x} en el tiempo t . La técnica supone que las partículas siguen fielmente el movimiento del fluido, de forma que las velocidades de ambos coinciden y que el intervalo entre las exposiciones es suficientemente pequeño para que los posibles efectos de aceleración en las partículas sean despreciables.

En general, en PIV el flujo es iluminado por un plano de luz delgado, proveniente de un láser, y la luz dispersada por las partículas trazadoras se registra en un detector de superficie, casi siempre una cámara digital, colocada perpendicular a dicho plano para evitar distorsiones geométricas, como puede observarse en la Figura 25 [24] y la Figura 26. De este modo puede medirse la proyección en el plano de la velocidad instantánea de las partículas en campo extenso.

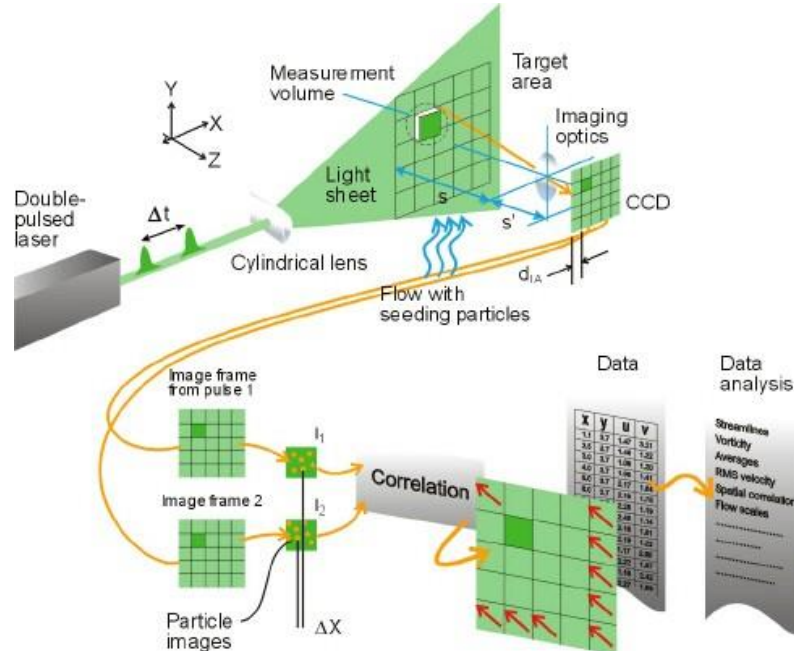


Figura 25 Esquema de funcionamiento y posicionamiento de dispositivos para los ensayos de PIV [24]

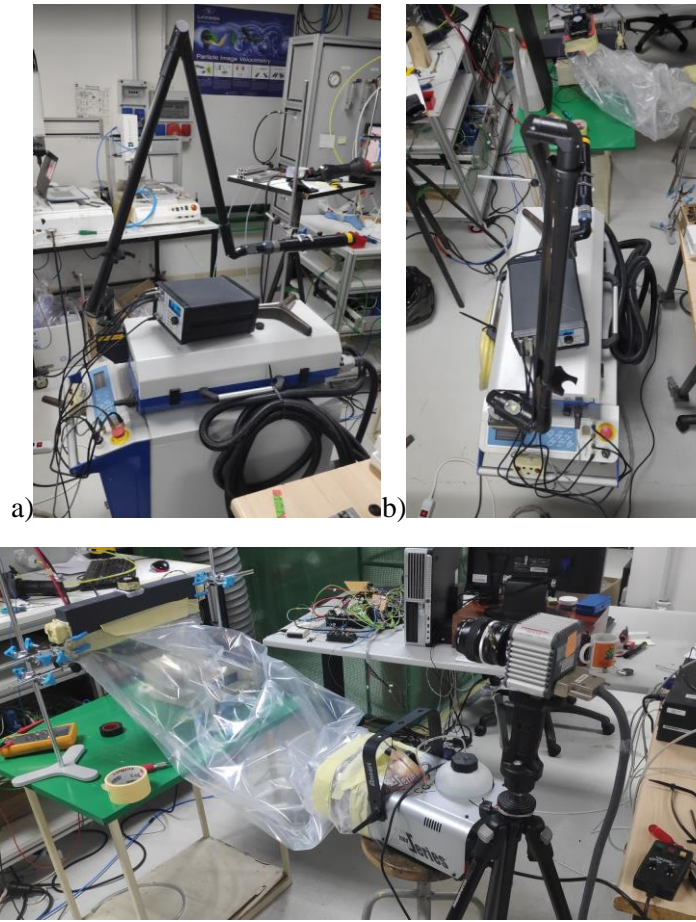


Figura 26 a) laser de perfil, b) laser orientado al ventilador, c) cámara enfocada perpendicularmente al plano de luz

Para realizar las medidas necesarias en este trabajo fin de máster, el aire se ha “sembrado” con una máquina de humo Antari Z1000 (Antari Lighting and effects Ltd., Taoyuan County, Taiwan), que genera partículas en un rango micrónico-submicrónico. Para congelar el movimiento de las partículas, el flujo se ha iluminado con un plano de luz generado por un láser pulsante doble de Nd:YAG Quanta System modelo PILS (Quanta System, S.p.A., Milan, Italia) capaz de producir pulsos de 6 ns con una energía aproximada de 80 mJ y con intervalo temporal variable. Las imágenes se han registrado con una cámara de CCD Hamamatsu C4742-95-12 ORCA-ER (Hamamatsu Photonics, Shizuoka, Japón) con matriz de 1,024 x 1,344 píxeles y convertidor A/D de 12-bits. A la cámara se le acopló un objetivo Nikon (Nikon Corporation, Tokio, Japón) de 50 mm y número f 1.2, con el que se ha obtenido una resolución espacial de 125 $\mu\text{m}/\text{pixel}$. Los intervalos entre imágenes de cada par se han ajustado entre 50 μm y 20 μm dependiendo de la velocidad del flujo. Los pares de imágenes (Figura 27) se han procesado con el programa CCDPIV desarrollado en el *Laboratory for Turbulence Research in Aerospace and Combustion* (LTRAC) de la Universidad de Monash, en Melbourne, Australia, descrito en [25]. El análisis se ha realizado en ventanas de 32 x 32 píxeles, con solapamiento del 50%, con lo que se han obtenido mapas de 82 x 62 vectores (Figura 28). Para cada voltaje de los ventiladores se han registrado series de 100 medidas instantáneas de la velocidad. Una vez procesadas, se han promediado para obtener la velocidad media. Se ha medido para un rango de voltajes comprendido entre 3 V y 12 V. Tanto para el ventilador grande como para el pequeño, se ha medido dejando libre la totalidad del área de entrada, o limitándola con una rendija de cartón para simular el área de paso de una pila de 3 celdas (Figura 29).

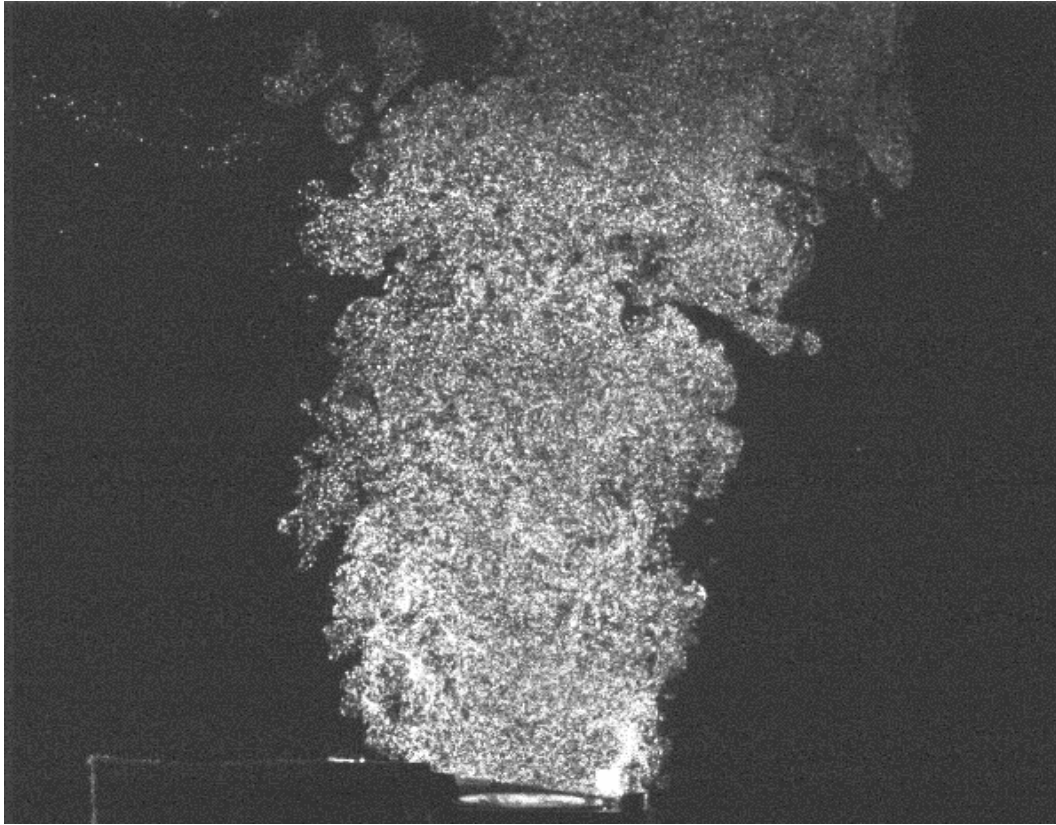
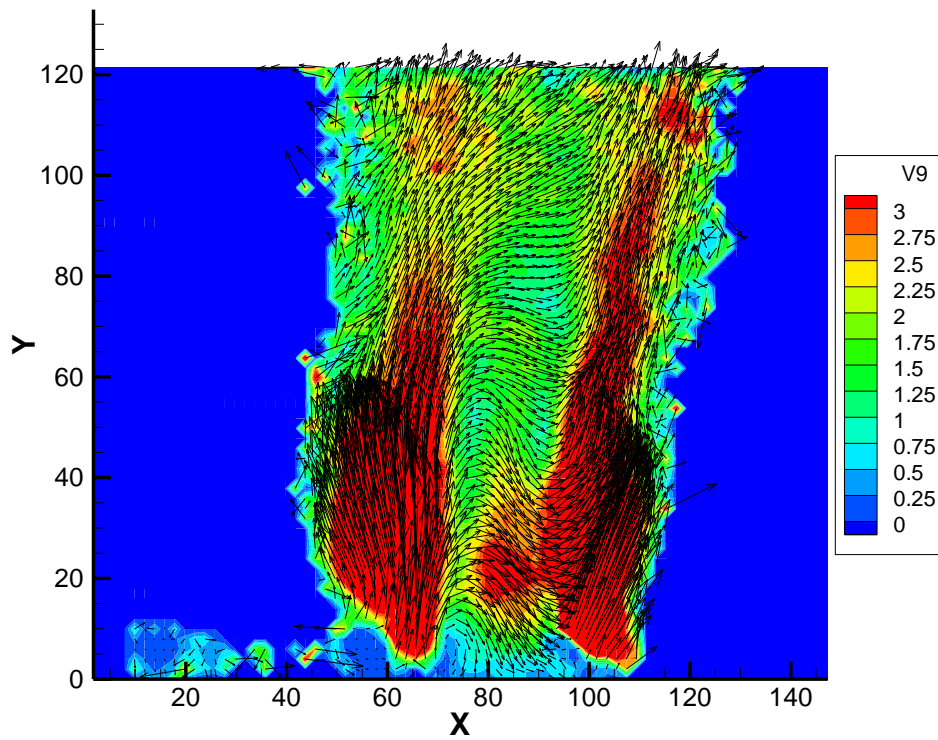
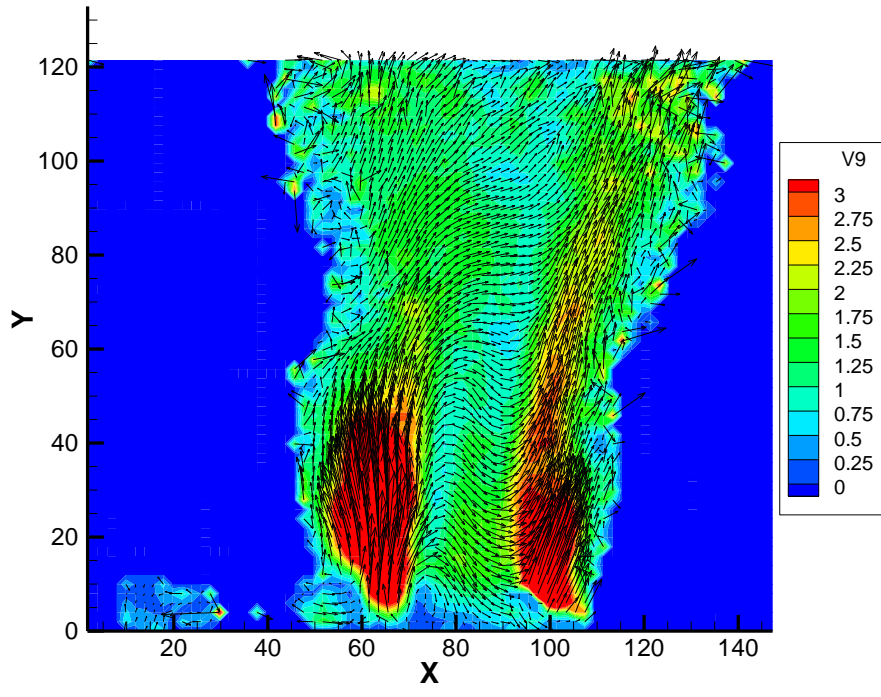


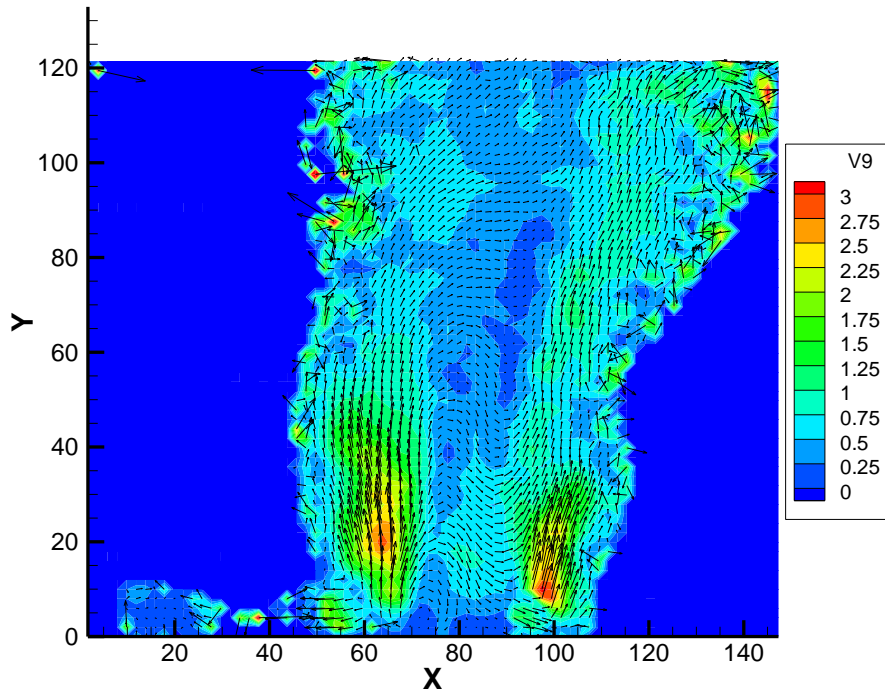
Figura 27 Imagen del flujo de aire sembrado con partículas e iluminado por el plano láser movido por el ventilador con una tensión de 4V



a)



b)



c)

Figura 28 Mapas de los vectores de la velocidad del flujo obtenidos del tratamiento de las imágenes obtenidas en los ensayos. a) caudal correspondiente a una tensión de 12V, b) caudal correspondiente a una tensión de 6V c) caudal correspondiente a una tensión de 3,5V. La barra de colores indica el módulo de la velocidad.

Para medir los caudales de los ventiladores que se emplearán en las pilas de 25 celdas, se realizó el montaje que se muestra en la Figura 29. Para simular la misma pérdida de carga que impone el sistema de canales de las placas por la zona cátodo de estas pilas, el área de flujo de la cara de entrada se obturó convenientemente.

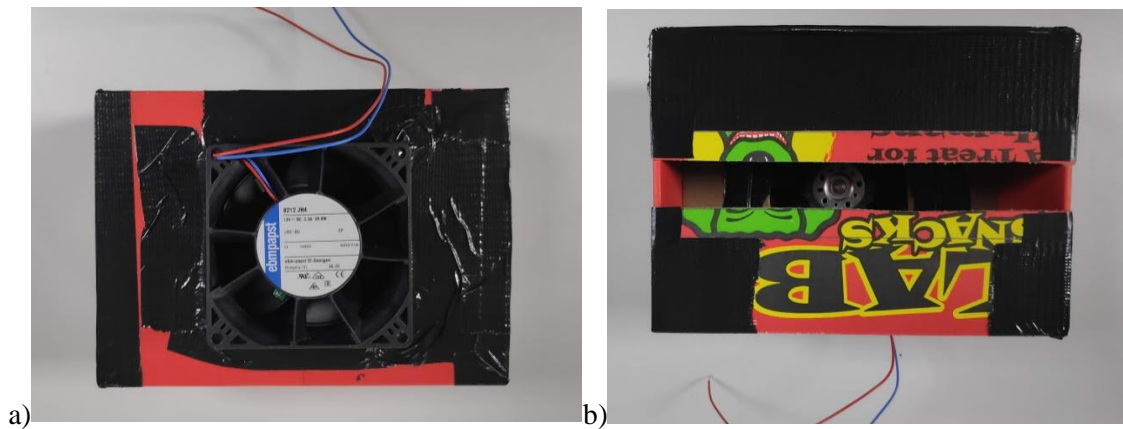


Figura 29 Acoplamiento para medición de caudal del ventilador de mayor potencia con entrada ajustada para simular la pérdida de carga impuesta por el sistema de canales de la pila real (25 celdas). a) salida de gases y ventilador, b) ranura de entrada

Los caudales obtenidos para los ventiladores mediante el tratamiento de las imágenes descrito se recogen en la Figura 30, para diferentes tensiones de alimentación y dos aperturas de entrada diferentes para cada ventilador, una grande y otra pequeña. Con estos resultados se pueden extrapolar los valores de caudales mediante un ajuste de la línea de tendencia de los puntos obteniendo las tablas de caudales. En la Tabla 4 se muestra la relación tensión-caudal obtenida para el ventilador pequeño mediante el método descrito.

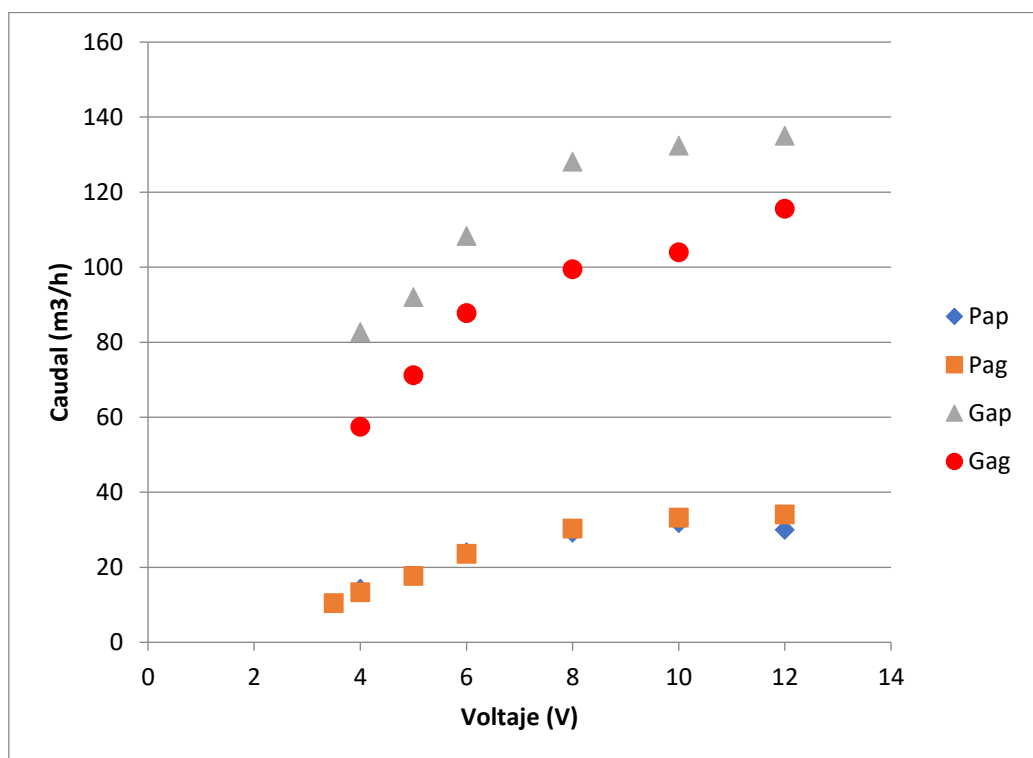


Figura 30 Tabla que recoge los caudales obtenidos en los diferentes puntos de tensión evaluados tanto para el ventilador grande como para el pequeño

Ventiladores 422 JH				
Voltaje (V)	Caudal (m3 /h)	Q₁ vent. (l/min)	Q₂ vent. (l/min)	Q₃ vent. (l /min)
3,00	7,02	117,02	234,04	351,06
3,50	10,20	170,06	340,12	510,18
4,00	13,19	219,80	439,6	659,4
4,50	15,97	266,24	532,48	798,72
5,00	18,56	309,38	618,76	928,14
5,50	20,95	349,21	698,42	1047,63
6,00	23,15	385,75	771,5	1157,25
6,50	25,14	418,99	837,98	1256,97
7,00	26,94	448,92	897,84	1346,76
7,50	28,53	475,56	951,12	1426,68
8,00	29,93	498,89	997,78	1496,67
8,50	31,14	518,92	1037,84	1556,76
9,00	32,14	535,66	1071,32	1606,98
9,50	32,95	549,09	1098,18	1647,27
10,00	33,55	559,22	1118,44	1677,66
10,50	33,96	566,05	1132,1	1698,15
11,00	34,17	569,58	1139,16	1708,74
11,50	34,19	569,80	1139,6	1709,4
12,00	34,00	566,73	1133,46	1700,19

Tabla 4 Relación entre voltajes y caudales medida para el ventilador pequeño (422 JH)

3.2. Sistema de cortocircuito

Para realizar los cortocircuitos periódicos en los bornes de la pila son necesarios dos “interruptores”. Uno se encarga de abrir y cerrar el circuito en los bornes “SC” y el otro cortará el paso de corriente de la pila de combustible a la carga “LS” (ver Figura 31). Estos interruptores serán controlados electrónicamente y su accionamiento será siempre opuesto. En álgebra de Boole (Ec. 3) seguiría esta igualdad.

$$LS = \overline{SC} \quad (3)$$

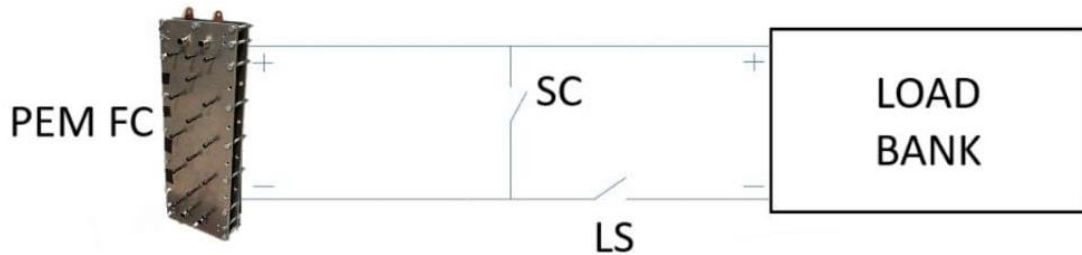


Figura 31 Esquema simplificado de cortocircuito

3.2.1 Sistema de control

Puesto que las pilas de combustible son dispositivos que suelen generar corrientes elevadas, la selección de los “interruptores” debe ser cuidadosa. Para ambos casos se han buscado y seleccionado transistores de características adecuadas para las condiciones de trabajo.

En el caso del interruptor de cortocircuito “SC”, se ha seleccionado un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) (Figura 32). Este dispositivo posee las características de las señales de puerta de los transistores de campo con elevada corriente y un bajo voltaje de saturación, típicos de los transistores bipolares. Estas características resultan beneficiosas porque se puede ajustar el rango del voltaje entre 1,2 y 3V y corriente de hasta 80 A, que son los valores esperados para la pila utilizada en los experimentos. Como se aprecia en la Figura 33, por encima de 1,2 V de tensión entre colector y emisor (V_{CE}) el transistor satura, permitiendo el paso de la corriente por el colector (I_C) cuando la tensión de puerta (V_G) es superior a 8V. Por tanto, cubrimos las necesidades propias de la pila.

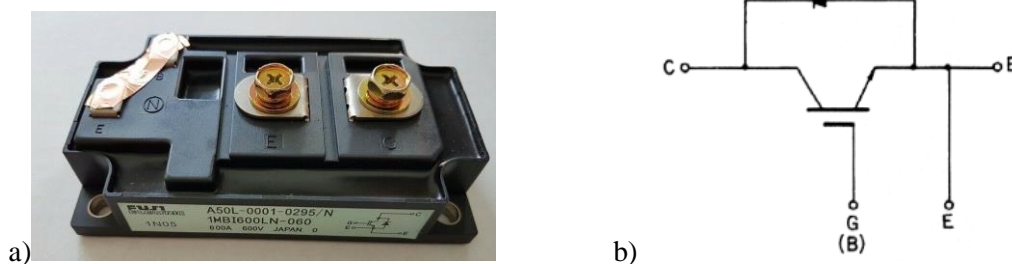


Figura 32 Transistor IGBT: a) imagen del componente, b) esquema eléctrico [26]

La tensión de control de este transistor proviene de la tarjeta de adquisición NI (USB 6008), cuya tensión digital varía entre 0 y 5V. Como la tensión de la tarjeta no supera los 8V necesarios, se ha diseñado y construido una etapa de amplificación no inversora con ganancia $G=2$, elevando esta tensión de control hasta los 10V, teniendo por tanto aseguradas todas las necesidades de operación del transistor.

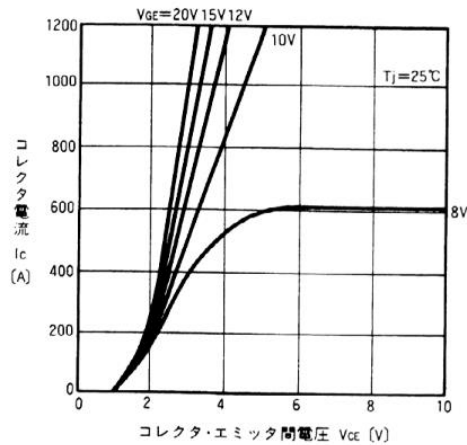


Figura 33 Relación entre tensión de colector- emisor y corriente de colector para diferentes tensiones de puerta [26]

Para el caso del “interruptor” para la carga “LS” utilizamos en paralelo varios transistores MOSFET de canal N (ver Figura 34). Este transistor permite corrientes de hasta 70 A que, al estar en paralelo, permiten sin problemas el paso de la corriente de la pila a la carga. La característica destacable de estos transistores es su baja tensión de activación y, a su vez, la relación entre la corriente de colector y la tensión de puerta, lo cual asegura que, en las condiciones de trabajo, el comportamiento del sistema va a ser muy cercano a un cortocircuito (Figura 35). El transistor se coloca en la línea de retorno de corriente de la carga a la pila para que de esta forma el terminal fuente esté conectado a masa.

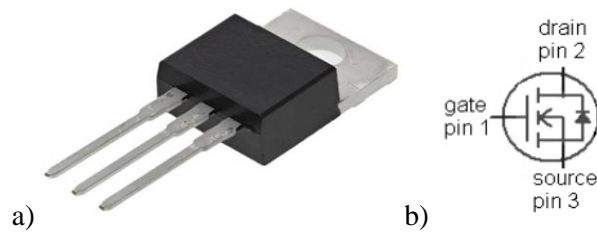


Figura 34 Transistor Mosfet de canal N utilizado como interruptor en "LS": a) Dispositivo, b) Esquema del dispositivo [27]

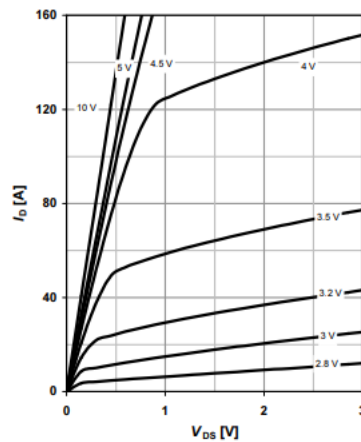


Figura 35 Relación entre Corriente de Drenador y tensión Drenador-Fuente para diferentes tensiones de Puerta [27]

El circuito que representa el sistema completo de control de los cortocircuitos (Figura 36) muestra el transistor IGBT, el cual se conectaría entre el borne positivo de la pila (PIN J3) y el borne negativo (masa), siendo controlado por la señal digital proveniente de la señal ya amplificada. Por otro lado, tenemos los transistores en paralelo correspondientes a “LS” conectados entre el borne negativo de la carga (PIN J1) y el borne negativo de la pila (masa), controlado en este caso por otra señal booleana de control, esta vez sin amplificar. Este circuito está dividido en dos, por un lado, tenemos el transistor IGBT realizando la tarea de interruptor “SC” y, por otro, una PCB diseñada para albergar los MOSFET-N (Figura 37).

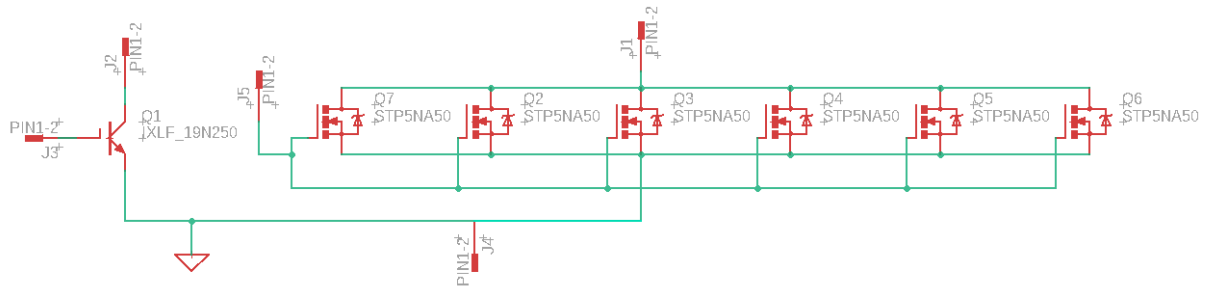


Figura 36 Esquema eléctrico del circuito de control del cortocircuito

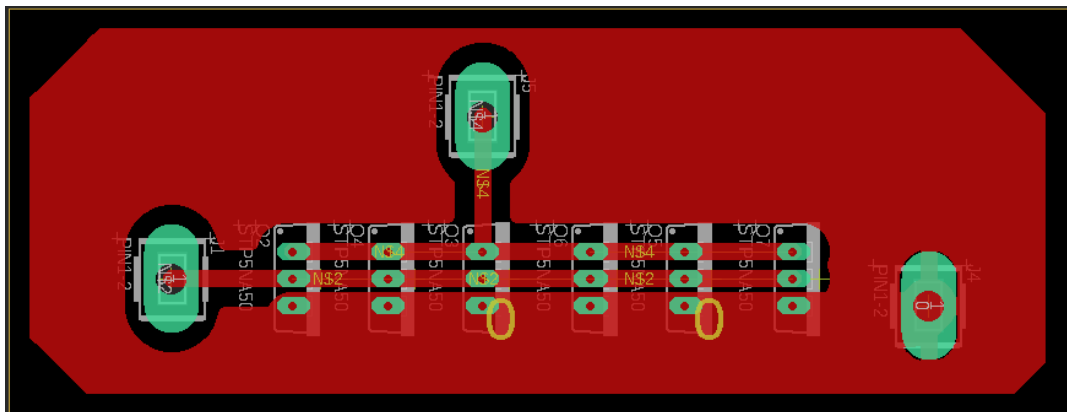


Figura 37 PCB Diseñada para realizar la función de interruptor "LS"

Para el desarrollo del trabajo fin de máster se ha construido físicamente “a mano” el prototipo de este circuito que se muestra en la Figura 38, haciendo uso de una placa matriz para prototipado de circuitos. Debido a la elevada corriente a gestionar, se aseguró que las líneas drenador y fuente fuesen de dimensiones suficientes. Además, los cables de conexión son de 10 mm de diámetro.

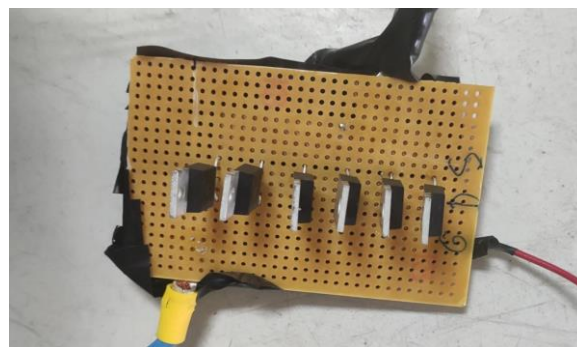


Figura 38 Circuito implementado para interruptor "LS"

El control por computador de ambos interruptores (Figura 39) se realiza haciendo uso de LabVIEW. El programa realizado consiste en un bucle que alterna entre el estado de cortocircuito y el de funcionamiento típico (Figura 40) ajustando los tiempos de duración de cada estado mediante temporizadores. Estos temporizadores se pueden modificar manualmente durante el funcionamiento del programa (Figura 39), y permiten también detener o activar el cortocircuito cuando se desee. Por todo esto, el programa posee una elevada versatilidad, orientada a la realización de diferentes ensayos experimentales. Las salidas de control son salidas digitales cuyos valores son inversos uno respecto del otro, como se mostraba en la Ec. 3. La figura Figura 41 incluye el diagrama de flujo que describe el funcionamiento de este programa.

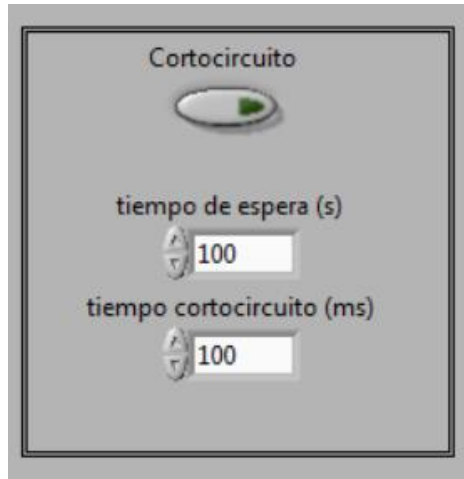


Figura 39 Bloque de ajuste del cortocircuito en el panel frontal en el programa de control de LabVIEW

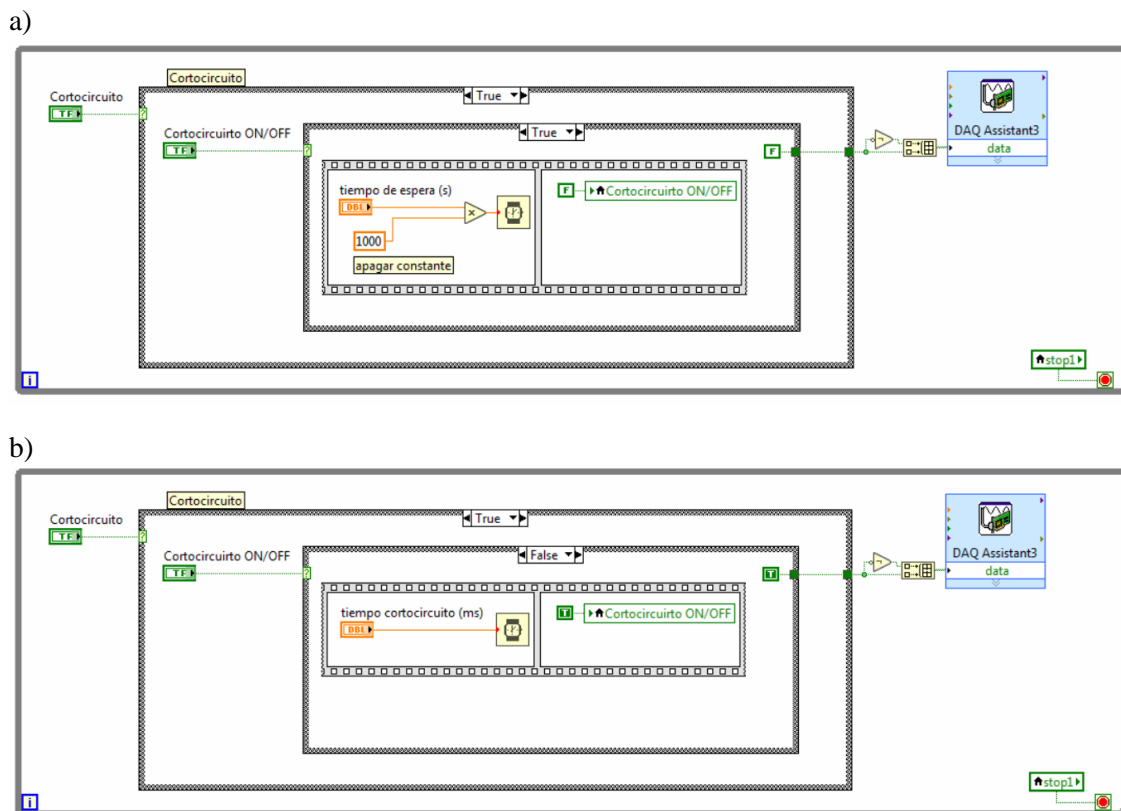


Figura 40 Bucle de control del cortocircuito en el diagrama de bloques de LabVIEW en modo: a) funcionamiento normal b) cortocircuito activado

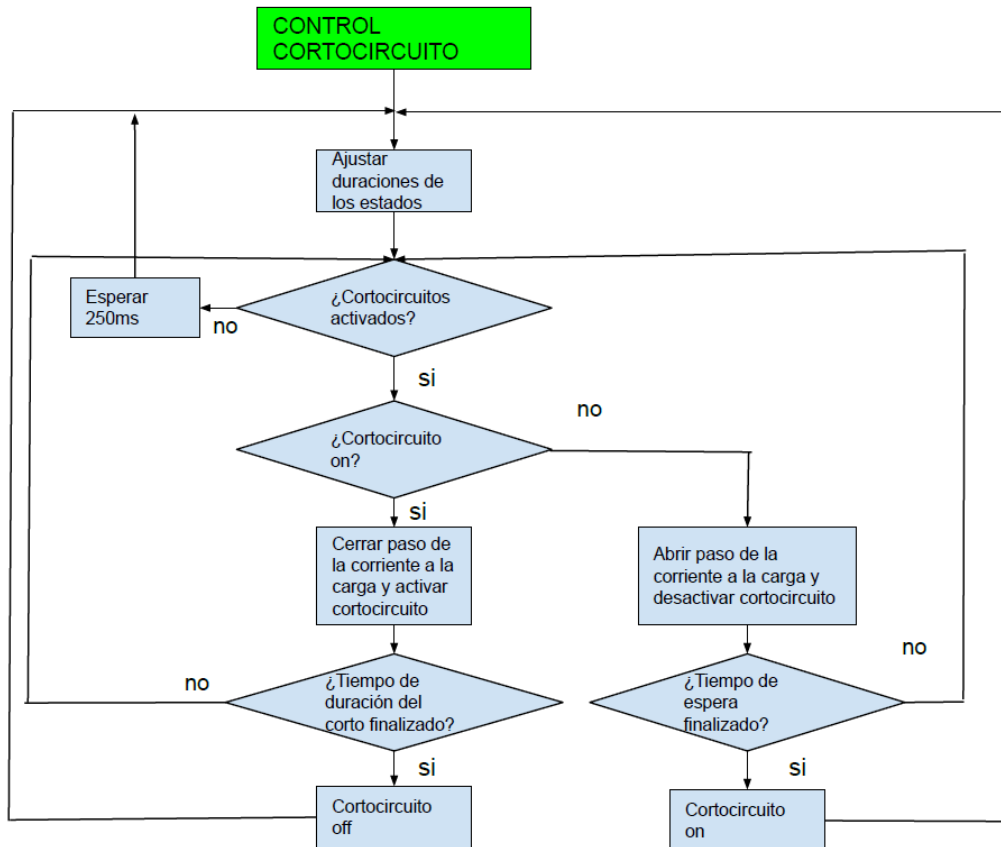


Figura 41 Diagrama de flujo del programa de control del cortocircuito de LabVIEW

3.2.2 Adquisición de Datos

Un punto importante para el estudio de la técnica de cortocircuitos es la adquisición de datos, lo que permitirá estudiar los efectos que esta técnica produce en la pila. Para ello, analizando los requisitos del problema, se ha decidido utilizar una tarjeta Arduino Uno (Figura 42) que, por un precio muy reducido, cumple perfectamente con las especificaciones. Mediante esta tarjeta se registra la tensión en los bornes de la pila, el convertor ADC de 10 bits que integra el microcontrolador ATmega de la placa convierte la tensión a un entero entre 0 y 1023, el cual convertimos por programa a un número en formato de coma flotante, que mostrará este valor en el rango de 0.0 a 5.0 voltios, coincidente con el rango de medida de tensiones de la tarjeta Arduino, enviándolo finalmente al ordenador por puerto serie en formato “char” (el programa puede verse en el Anexo XX).



Figura 42 Arduino Uno utilizado en la adquisición de datos

Este ordenador, haciendo uso de MATLAB, recibe los valores que le envía la tarjeta Arduino, almacenándolos en una matriz y mostrándolos por pantalla (Figura 43). Una vez finalizada la lectura, almacena los datos en un archivo Excel para su posterior tratamiento y estudio.

Es importante destacar que, inicialmente, para adquirir los datos se pensó usar el mismo ordenador que controla actualmente la instalación, la misma tarjeta de adquisición de datos ya disponible y el mismo programa desarrollado en LabVIEW, pero esta opción se descartó debido a que todo ello está integrado en un hardware y un gran programa de control encargado de controlar todos los periféricos relacionados con los ensayos en la pila de combustible. Este programa, por tanto, demanda mucha potencia del procesador del ordenador de control de la instalación, por lo que éste trabaja siempre a máximo rendimiento. Por lo tanto, y con el fin de evitar lecturas erróneas debido a eventuales saturaciones del procesador del ordenador principal (ya que las medidas se realizan cada 20ms), para el estudio de las técnicas de cortocircuitos se decidió utilizar un ordenador portátil adjunto al banco de ensayos, usando una tarjeta Arduino como tarjeta de adquisición y MATLAB como software de adquisición y control.

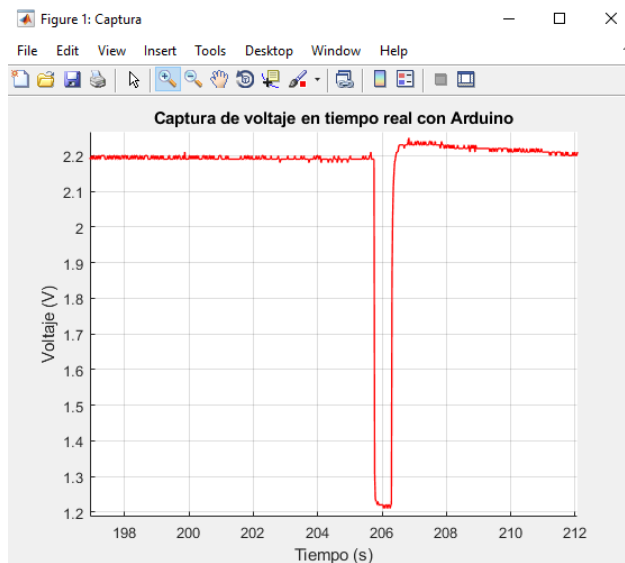
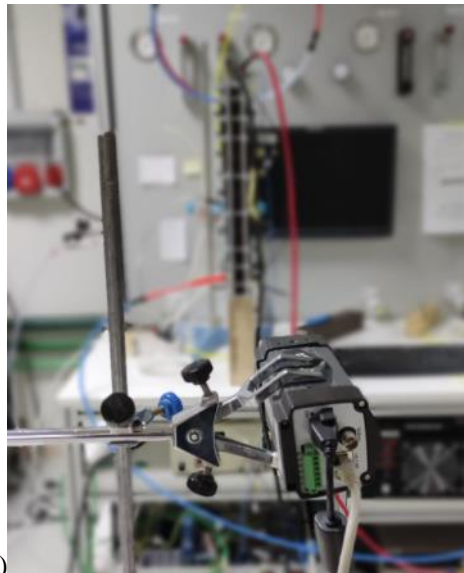


Figura 43 Datos del cortocircuito mostrados por pantalla con Matlab

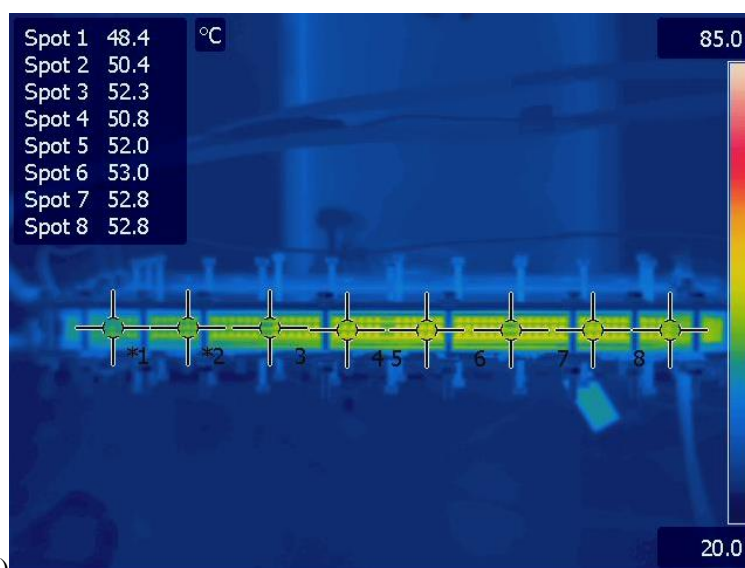
4. Ensayos y Resultados

4.1. Sistema térmico

Tras simular el comportamiento térmico de la pila con el modelo comentado en el apartado 3.1, se procedió a comprobar si realmente el sistema de ventiladores seleccionado es válido como método de refrigeración. Estos ensayos se han realizado para diferentes demandas de corriente a la pila. Manteniendo la corriente constante se varían las velocidades de los ventiladores y se alterna el uso entre ellos trabajando con los laterales, el central o los 3 simultáneamente. Para medir la temperatura de la pila se introduce un termopar tipo K por un canal catódico de la pila y, además, se mide la temperatura superficial de la pila con una cámara termográfica Flir A310 (Figura 44); esta cámara permite localizar puntos en la imagen mostrando por pantalla sus temperaturas. En estos ensayos se han posicionado 8 puntos de medida en una línea que coincide con la celda central de la pila (la imagen esta girada 90°).



a)



b)

Figura 44 a) Cámara termográfica usada para medir la temperatura superficial de la pila; b) imagen térmica de la pila PEM

Una vez puesta en funcionamiento la pila y tras un ciclo de arranque, se le ha demandado una corriente de 35A y posteriormente de 40A. El objetivo de estos ensayos es encontrar un punto óptimo de operación de la pila para cada corriente, con el fin de optimizar el sistema de control del caudal de aire. Para ello, se evalúa el uso del ventilador central, los laterales o todos a la vez, buscando obtener una relación entre el caudal de aire y la temperatura. La temperatura usada en las mediciones es el valor promedio entre la temperatura superficial de la pila (medida con cámara termográfica) y la temperatura medida por el termopar, como se muestra en la Figura 45.

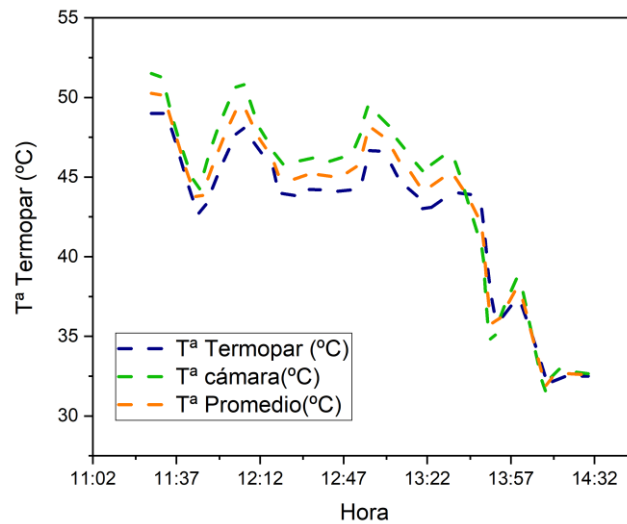
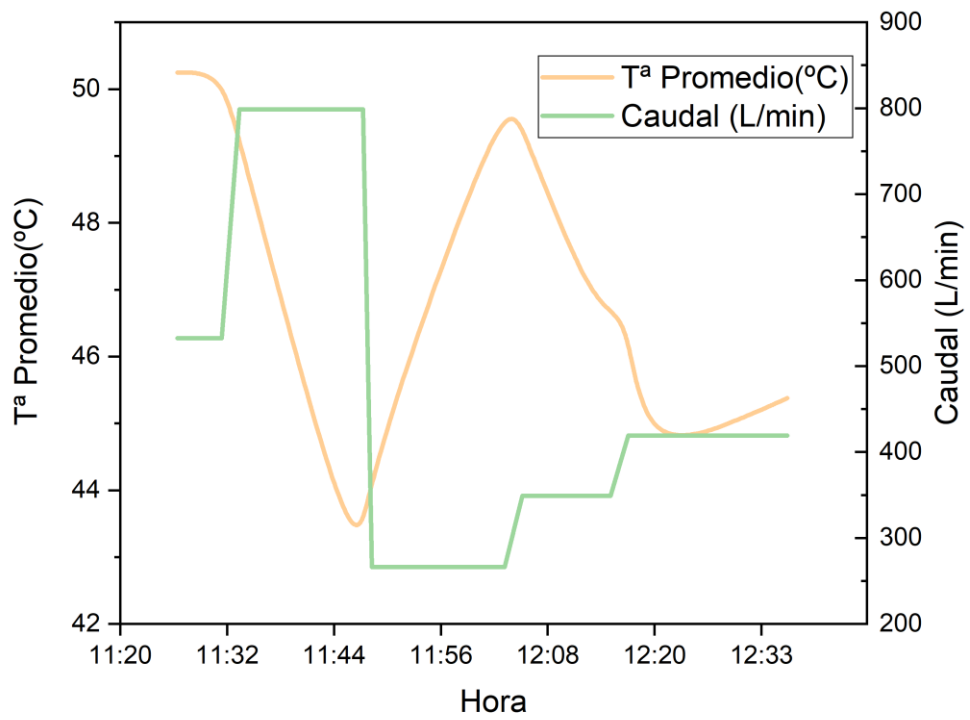
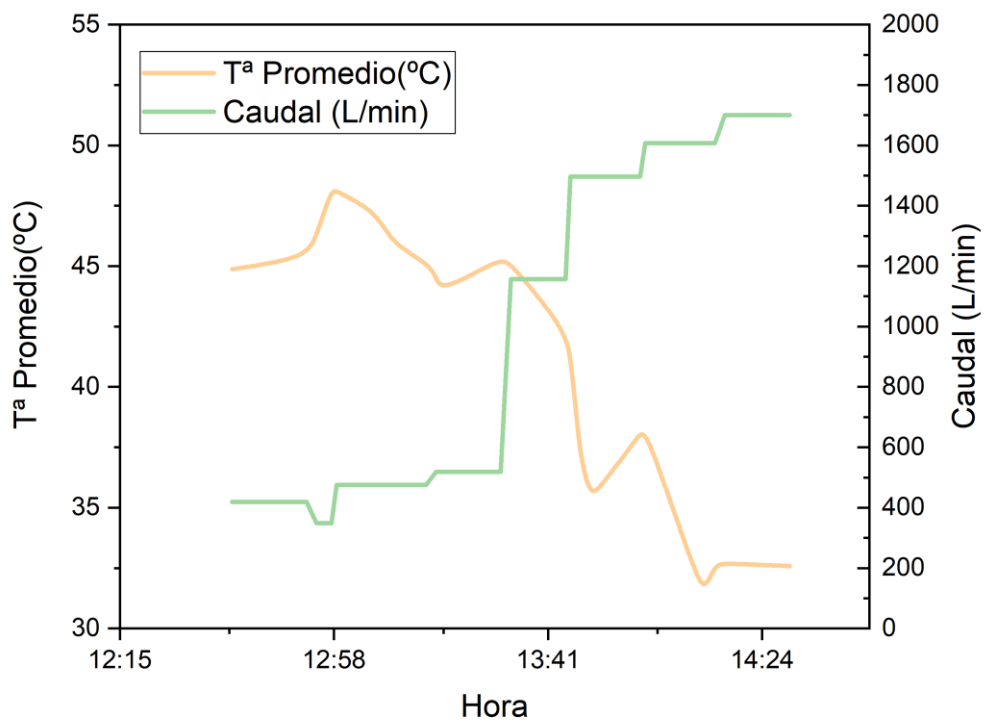


Figura 45 Temperatura de la pila de combustible según la cámara superficial y un termopar y el punto intermedio calculado

La Figura 46 muestra los resultados obtenidos para las corrientes de 35 y 40A. Como ya se predijo con el estudio de simulación numérica, a medida que aumenta el caudal de aire disminuye la temperatura de la pila. Para la corriente de 35 A, se comienza utilizando los ventiladores laterales a media potencia con un caudal de 530 l/min. Puesto que la temperatura es superior a 50°C, se aumenta el caudal utilizando los 3 ventiladores a media potencia, obteniendo un caudal de 798 l/min. Se observa una disminución abrupta de la temperatura debida a este aumento del caudal, por lo que se procede a realizar un ajuste más fino de la temperatura. Para ello, se desconectan los laterales, dejando en funcionamiento solo el central, fijando un caudal de aire de 265 l/min. Con este caudal la temperatura de la pila aumenta bruscamente, acercándose a los 50°C. Al aumentar el caudal hasta los 350 l/min se observa un descenso del valor de la temperatura, estabilizándose en los 46,5°C. A continuación, el valor del caudal se fija en 420 l/min haciendo que la temperatura disminuya hasta los 45°C. Sin embargo, al transcurrir el tiempo, la temperatura comienza a aumentar porque la pila está cerca del punto de operación, donde el rendimiento energético es mayor y, por tanto, se genera más calor. Esto demuestra la posibilidad de determinar el punto de óptimo de operación ajustando las condiciones de funcionamiento de las pilas en las aplicaciones específicas.



a)

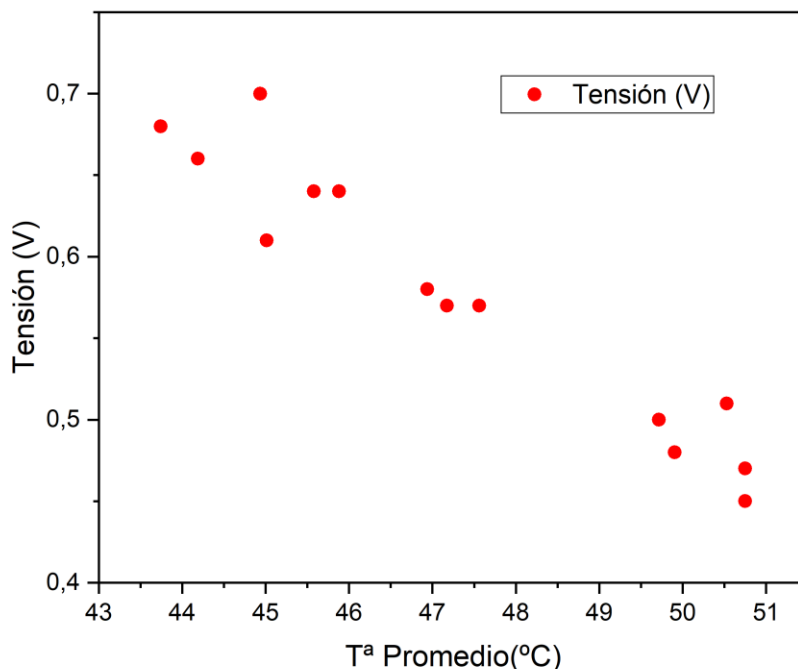


b)

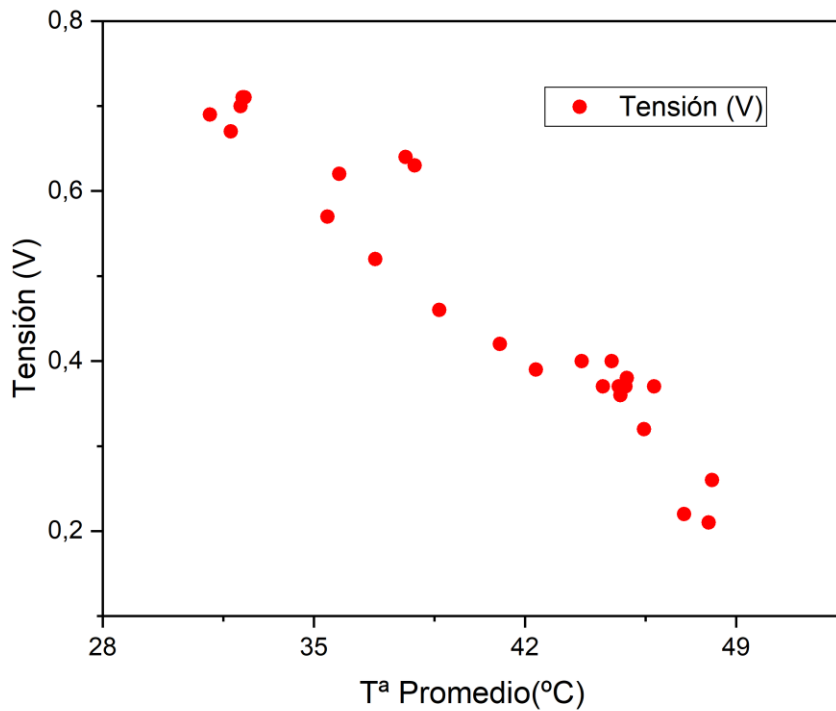
Figura 46 Variación de la temperatura con el caudal para a) 35A y b) 40A

Cuando la demanda de corriente a la pila PEM sube a 40 A, tenemos el mismo objetivo: determinar el punto óptimo de operación (Figura 46 b). Inicialmente se trabaja únicamente con el ventilador central y un caudal de 350 l/min. Como se observa, la temperatura de la pila sufre un aumento brusco desde su valor inicial de 45°C hasta 48,2°C. A partir de este momento se aumenta el caudal de 475 l/min a 520 l/min, observándose una reducción de la temperatura, llegando a estabilizarse entorno a los 44°C. Es en este punto en el que se comienza a utilizar los 3 ventiladores. Tras un primer aumento brusco de caudal duplicándolo hasta los 1157 l/min, la temperatura disminuye de forma suave hasta los 41°C. Un segundo aumento hasta los 1495 l/min conlleva una reducción mucho más abrupta, llegando a los 35,5°C, seguido de un aumento de temperatura por el aumento de rendimiento, quedándose en 38°C. Para continuar ajustando el punto de operación se aumenta el caudal a 1610 l/min, repitiéndose el mismo efecto, una reducción brusca seguida de un pico quedándose a 32°C. Se realiza un último aumento hasta los 1700 l/min, observándose que para este caudal se obtiene un equilibrio entre la refrigeración producida por los ventiladores y el aumento en el calor generado debido al aumento de rendimiento, por lo que se puede considerar éste como el punto óptimo de operación.

La relación entre la temperatura y la potencia se determina directamente relacionándolo con la variación del potencial de la pila, ya que la corriente es constante, como se muestra en la Figura 47. Es importante hacer notar que el tiempo de la variación térmica durante los ensayos no siempre fue constante. Esto permite asegurar que existe una relación lineal entre la temperatura y la tensión, que se mantiene constante independientemente del comportamiento térmico que tenga la pila.



a)



b)

Figura 47 Relación entre temperatura y tensión para corrientes de a) 35A y b) 40ª

4.2. Sistema de optimización por cortocircuitos

Para comprobar la funcionalidad del sistema de optimización energética mediante cortocircuitos se han realizado ensayos para diversas corrientes, en concreto, 2.5 A, 5 A, 7.5 A y 10 A. Para cada valor de corriente se han probado diferentes tiempos de duración y frecuencias de los cortocircuitos. Es de esperar que los valores del tiempo de duración y la frecuencia varíen en función de la corriente demandada a la pila. Puesto que tras cada ensayo de cortocircuito la tensión de la pila se ve alterada, es necesario esperar un tiempo para que el valor se estabilice, lo que hace que el punto de partida varíe ligeramente. Es por ello que a la hora de analizar los resultados estos se normalizan respecto al punto estable de partida. Para el *stack* de 3 celdas estudiado, la tensión en circuito abierto ronda los 2,5 V.

Una vez normalizados los datos, se calcula la tensión media de todos los valores adquiridos por la tarjeta Arduino y se calcula el porcentaje de mejora. Aunque este método siempre muestra una elevación de la tensión tras el cortocircuito, hay que tener en cuenta el valle producido por éste, teniendo una tensión muy reducida durante periodos que no resultan despreciables y que pueden llegar a reducir el valor de la tensión media por debajo del valor inicial (ver Figura 48). Es por ello que, además de evaluar la tensión media, se realiza un análisis de ésta descontando los valles de tensión. Los ensayos se realizan en ciclos de 500 s, como se observa en la Figura 49, porque en pruebas previas se comprobó que es más que suficiente para llegar a un régimen de trabajo estable. A continuación presentamos los resultados obtenidos.

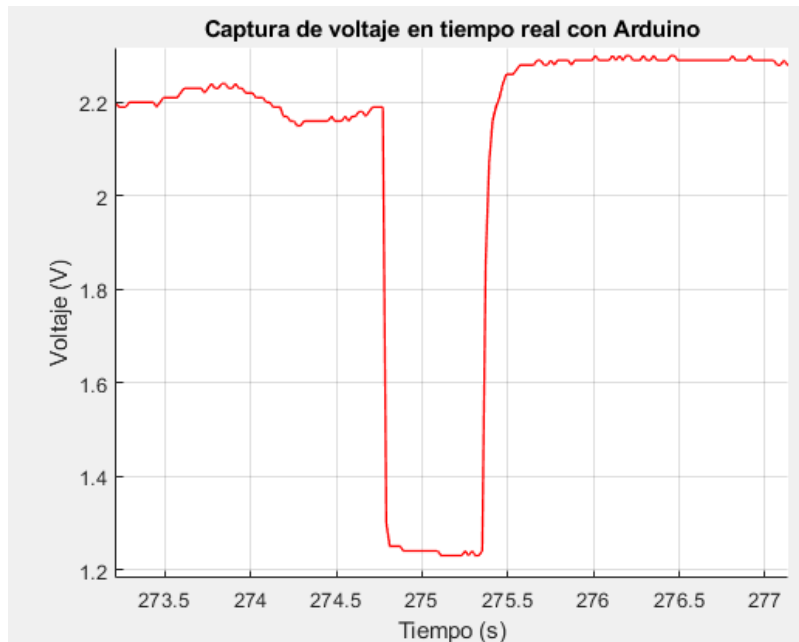


Figura 48 Captura de la tensión durante un cortocircuito con una corriente de 2,5A y un cortocircuito de 200ms cada 100s

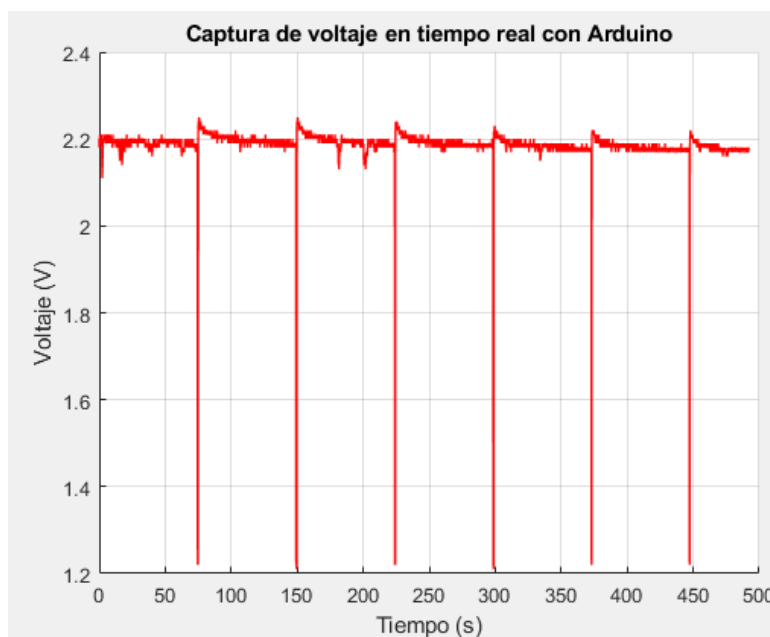


Figura 49 Ciclo completo de 500 s de cortocircuito (300 ms de duración con un periodo de 75 s)

Los resultados obtenidos para 2,5 A, con una tensión inicial de 2,15 V, son los mostrados en la Figura 50, y muestran que la mejor configuración es la de cortocircuitos de 300 ms cada 25s. La gráfica permite ver además que, al ser cortocircuitos de duración prolongada con periodos breves, la caída de tensión en los valles (diferencia de altura entre columnas) es más elevada, aunque se compensa con la fuerte mejora mostrada. En el caso de los cortocircuitos de 300 ms cada 100 s se observa que la menor frecuencia hace que las pérdidas en los valles sean despreciables. En la última columna se incluye un ciclo de funcionamiento en el que no se han realizado cortocircuitos y, como se puede ver, la eficiencia pila disminuye si no se le aplica ningún sistema que lo evite.

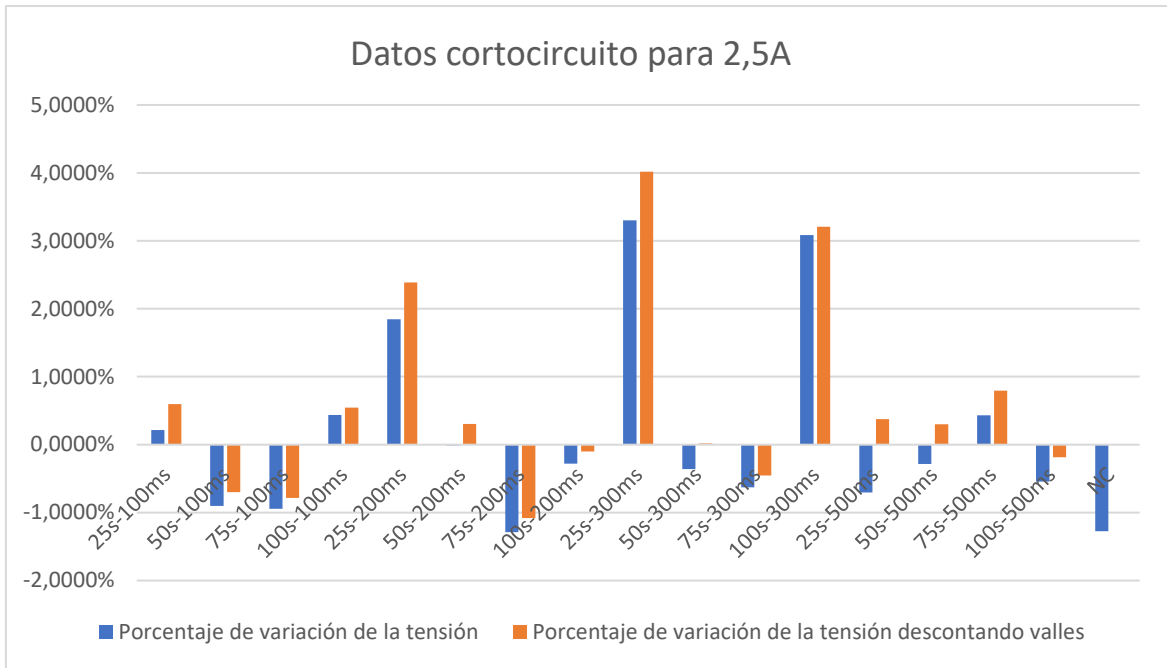


Figura 50 Resultados ensayos de cortocircuito para 2.5 A

Para la corriente de 5A, con tensión inicial 1,83 V, se han despreciado las medidas menos significativas mostrando solamente las que muestran datos de interés. En la Figura 51 se puede ver que para las configuraciones evaluadas la más eficiente es la de 300 ms con una frecuencia de 25 s puesto que proporciona mayor tensión y menores pérdidas que los valores obtenidos en experimentos con frecuencias menores y tiempos mayores. También se añade en la primera columna los resultados de un ciclo sin aplicar cortocircuitos mostrándose las pérdidas propias de la pila.

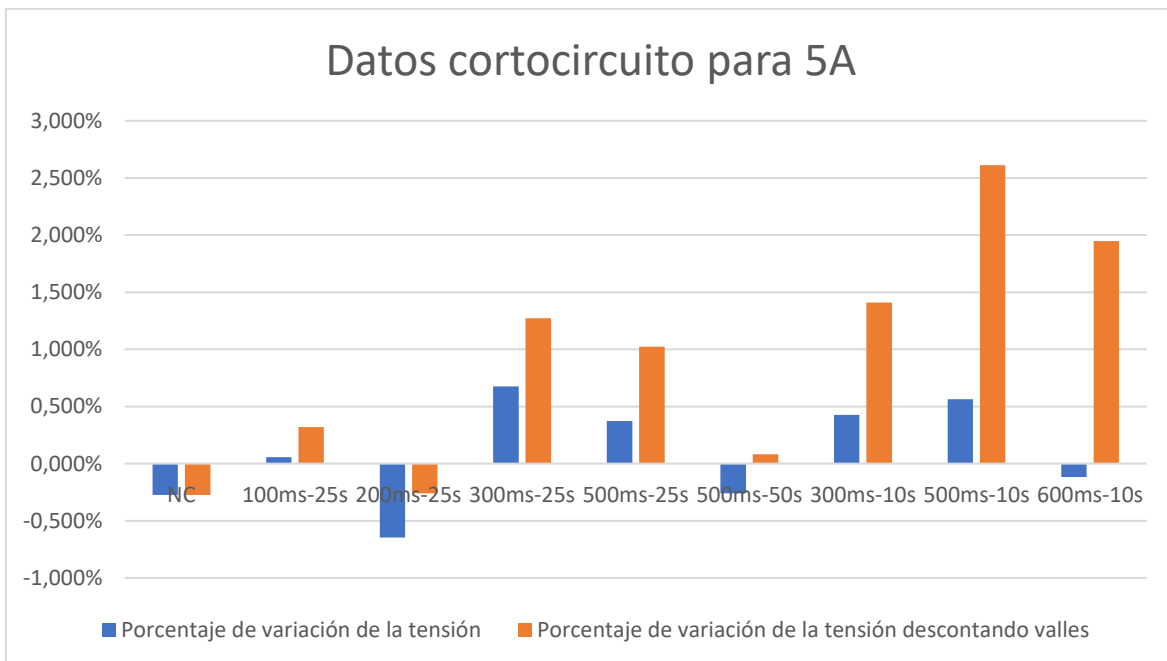


Figura 51 Resultados ensayos de cortocircuito para 5 A

Se puede ver que el porcentaje de mejora es más reducido que en el caso de los experimentos con 2,5 A (3,3% respecto a 0,6). Cuanto más aumenta la corriente de la pila, la tensión es menor, siendo menos abrupta la caída de tensión en el cortocircuito. Esta menor caída se debe a que, por razones físicas, la tensión mínima de esta pila se fijó en 1,25V aproximadamente y, por tanto, la corriente máxima también queda limitada (aproximadamente a unos 40A). Este comportamiento comienza a ser más evidente en el estudio para una corriente de 7,5 A (ver Figura 52) cuya tensión base es 1.75 V. El mejor caso es de nuevo el de 300 ms y 25 s, con en el que se evitan las pérdidas por degradación debidas al tiempo de uso. En el resto de medidas se observa que, para frecuencias elevadas y tiempos de cortocircuito de mayor duración, las pérdidas resultantes anulan las mejoras producidas. Finalmente, analizando la Figura 53 se concluye que para la corriente de 10 A se mantiene la misma dinámica, teniendo una tensión de 1,6 V.

Aparentemente, los resultados obtenidos apuntan a que cuanto mayor es la corriente de la pila, menos efectivo resulta el cortocircuito. Por tanto, para conseguir resultados apropiados es posible que se deba modificar la estrategia, imponiendo mayores frecuencias y cortocircuitos de mayor duración. Esta forma de hacer los cortocircuitos puede inducir pérdidas energéticas mayores, debido a que el tiempo en que la pila se ve expuesta al cortocircuito es mayor.

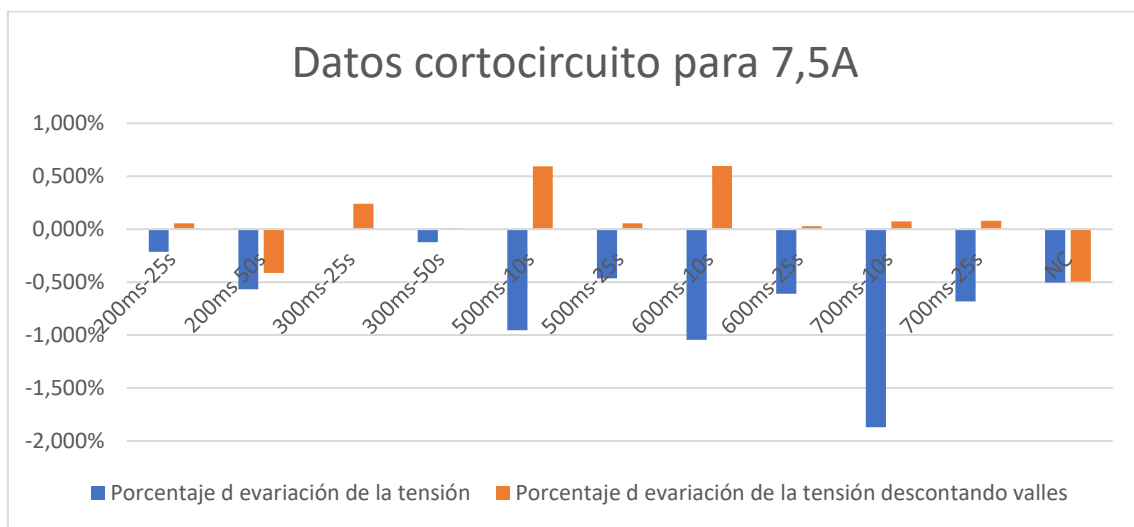


Figura 52 Resultados ensayos de cortocircuito para 7,5 A

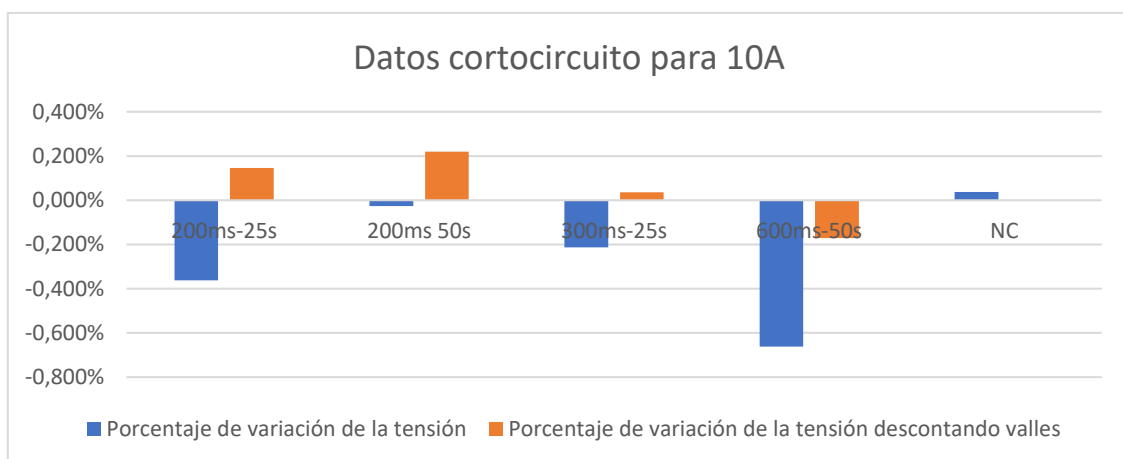


Figura 53 Resultados ensayos de cortocircuito para 10 A

Para finalizar, se ha comprobado que la mejora por cortocircuitos existe y que, además de evitar la pérdida de eficiencia de la pila por degradaciones reversibles generadas durante el funcionamiento normal, provoca un mejor funcionamiento desde el punto de vista energético

porque eleva en algunos casos la tensión del dispositivo hasta un 4%. También se ha observado que cuando la tensión se aproxima al umbral mínimo se reduce la capacidad de mejora. Puesto que esta pila está formada solamente por 3 celdas, las pérdidas óhmicas limitan drásticamente la tensión mínima. Para *stacks* con un mayor número de celdas, este efecto se minimiza permitiendo aumentar la corriente. Por tanto, aunque en los resultados obtenidos para un *stack* pequeño la corriente se vea fuertemente limitada, para *stacks* de mayores dimensiones tendrá un rango de influencia mucho mayor.

5. Conclusiones, trabajo futuro y consideraciones finales

5.1. Conclusiones

Una vez finalizado el trabajo, se han obtenido las siguientes conclusiones:

1. Con la revisión del estado del arte realizada, se comprobó el elevado interés de la optimización del sistema de ventilación y su influencia en los valores de la humedad y la temperatura de trabajo de las pilas de combustible PEM de cátodo abierto en función del punto de operación. Asimismo, se comprobó la importancia del sistema de optimización del funcionamiento energético de estas pilas basado en cortocircuitos. La revisión del estado del arte permitió establecer los conocimientos básicos para desarrollar los sistemas necesarios para el desarrollo del proyecto y, a su vez, comprender los fenómenos observados durante los ensayos posteriores.
2. Se ha realizado el diseño de un sistema de ventilación basado en un estudio numérico del problema térmico. Este diseño incluye, además de la selección de los ventiladores, su posicionamiento en la pila, así como el modo de funcionamiento. Para el funcionamiento de este sistema de ventilación se ha diseñado un sistema eléctrico de alimentación que suministra energía a los ventiladores, permitiendo a su vez controlarlos de forma externa. Este control se realiza mediante un programa implementado en LabVIEW, integrado en el programa de control del banco de ensayos de pilas de combustible. Gracias a este control se puede ajustar el caudal de ventilación con una elevada precisión.
3. Se ha calculado el valor del caudal de aire en función de la tensión empleando la técnica de velocimetría de imágenes de partículas (PIV). Para la medida, el valor de la pérdida de carga inducida por los canales de las dos pilas de estudio (25 y 5 celdas) se ha ajustado obstruyendo el área de la zona de entrada. Este cálculo, conjuntamente con el sistema de control implementado, permite establecer el valor del caudal de aire de forma precisa.
4. Se ha desarrollado un sistema que provoca cortocircuitos en bornes de la pila con diferentes transistores. Asimismo, se ha desarrollado también un “interruptor” que corta la comunicación con la carga eléctrica para evitar derivaciones de corriente hacia este equipo. Este sistema se ha diseñado teniendo en cuenta las características de la pila, asegurando un funcionamiento sin fallos. También se ha realizado un sistema de control con LabVIEW que ajusta los tiempos y frecuencias de los cortocircuitos. Este programa también queda integrado en el sistema de control del banco de ensayos.
5. Se ha desarrollado un sistema de adquisición de datos basado en una tarjeta Arduino, que se encarga de recoger los valores de tensión de la pila y exportarlos a un PC, el cual, y haciendo uso de MATLAB mostrará los datos en tiempo real y los almacenará. Este sistema ha resultado esencial para estudiar el comportamiento de la pila durante los experimentos ya que exporta los datos a Excel y permite trabajar con ellos sin limitaciones.
6. Se han realizado ensayos experimentales para evaluar el comportamiento térmico de la pila con el caudal del sistema de ventiladores, obteniendo el punto óptimo de trabajo. Además, se ha comprobado que cuanto mayor es la potencia demandada, mayor es el caudal necesario para mantener la temperatura en el nivel adecuado. Todo esto permite realizar un control térmico preciso, ajustando la temperatura de la pila a su valor óptimo para cada corriente.

7. Se ha evaluado el sistema de cortocircuitos realizando ensayos a diferentes frecuencias y tiempos de duración. Se comprobó que este sistema evita la degradación producida en la pila por el tiempo y las condiciones de funcionamiento, mejorando su potencia hasta un 4%. Aunque los experimentos se han visto limitados por la baja tensión de la pila, los resultados son alentadores y permiten esperar mayores mejoras cuando estos métodos se apliquen a pilas de mayor número de celdas.

5.2. Trabajo Futuro

Tras haber realizado el Trabajo fin de Master quedan algunas tareas pendientes. Estas tareas serán:

- Realizar el diseño de un sistema térmico de mayores dimensiones con ventiladores de mayor potencia para una pila de combustible PEM de cátodo abierto formada por 25 celdas. Esta pila se encuentra ya en proceso de montaje en el LIFTEC. El sistema se acoplará de manera similar a la realizada para este modelo y estará formado por tres ventiladores axiales en modo succión. Las medidas de caudal de estos ventiladores ya han sido establecidas en el apartado 3.1.2 de este trabajo. Una vez diseñado, se determinará de forma análoga los valores de temperatura óptimos según la corriente de la pila y esto será incorporado en el sistema de control específico.
- Incorporar un sistema de optimización por cortocircuitos similar al desarrollado en este proyecto en la pila de combustible PEM de cátodo abierto formada por 25 celdas. Estos ensayos tendrán como objetivo evaluar los efectos que producen en la pila cortocircuitos más agresivos pudiendo trabajar con corrientes mayores y obtener resultados más generales.
- Realizar un sistema compacto que incluya todos los prototipos de circuitos descritos fabricados de manera profesional en PCBs comerciales para que sea fácilmente acoplable a la pila formada por 25 celdas. Además, se pretende realizar el control automático de los dos sistemas mediante un microcontrolador.
- Continuar estudiando y optimizando el funcionamiento de las pilas de combustible de tipo PEM para extender su uso como fuente de producción de energía limpia. La integración de sistemas energéticos formados por pilas PEM y energías renovables (solar y/o eólica) será el futuro en todos los campos tecnológicos.

5.3. Consideraciones finales

En este apartado final me gustaría dejar constancia de apreciaciones personales que me han surgido durante el desarrollo de este proyecto. En primer lugar, me gustaría destacar que la tarea que más complicaciones me ha supuesto ha sido la de comprender el funcionamiento de las pilas de combustible desde un punto de vista técnico. Es muy diferente realizar ensayos de potencia que podemos denominar típicos, que realizar tareas de investigación en aspectos concretos de la pila como los sistemas térmicos y de humedad. Además, las características propias de estos sistemas electroquímicos hacen que la variación de un parámetro afecte directamente a su

funcionamiento general. Es por ello que, aunque se han intentado describir en este proyecto los efectos de los parámetros analizados de forma independiente, la complejidad es muy alta.

A su vez me gustaría indicar que, aunque el trabajo fin de máster consista en el estudio térmico y de los sistemas de optimización por cortocircuito, me he visto involucrado en el resto de tareas referentes al montaje y diseño del *stack* durante las fases previas del proyecto de investigación. Tareas complejas que requieren mucho entrenamiento y una elevada carga de trabajo porque para que el montaje del *stack*, y por ende su funcionamiento, sea correcto, es necesario que la pila tenga una disposición correcta de las placas, diseño y ajuste de juntas y sellos, y una metodología de trabajo precisa durante el cierre para evitar fugas y cruces de gases entre otros muchos aspectos. Por tanto, el entrenamiento que he adquirido en lo referente al montaje ha complementado a todo el proceso de la búsqueda de los componentes adecuados, el estudio y diseño de los sistemas electrónicos, así como su posterior montaje y la escritura de programas.

Se ha utilizado LabVIEW puesto que éste es el programa base del funcionamiento del banco de ensayos de pilas. Para la adquisición de datos, en cambio, se utiliza MATLAB y una tarjeta Arduino, pienso que en este caso son más adecuados debido a su mayor versatilidad. Además, MATLAB es un programa más usado en investigación y con ello se ha tratado de evitar problemas de fiabilidad del programa principal de control del banco debido a su elevada carga de trabajo.

Para terminar, me gustaría detallar que, de los ensayos realizados con la pila se observa que, aunque parezcan algo directo, las pilas son en realidad dispositivos que necesitan un ajuste muy preciso del punto de operación para obtener datos con cierta repetitividad y que, bajo ciertas condiciones, pueden volverse inestables rápidamente. Es por ello que los datos mostrados son resultado de un número muy elevado de pruebas y ensayos necesarios para ajustar y calibrar la pila.

6. Bibliografía

- [1] J. Almingol Estrada, “Trabajo Fin de Grado,” p. 38, 2018.
- [2] A. M. López, “Gestión térmica y del agua en una pila de combustible tipo PEM. Diseño y fabricación de pilas,” pp. 1–380, 2011, [Online]. Available: <https://zaguan.unizar.es/record/6209?ln=en>.
- [3] J. C. Kurnia, B. A. Chaedir, A. P. Sasmito, and T. Shamim, “Progress on open cathode proton exchange membrane fuel cell: Performance, designs, challenges and future directions,” *Applied Energy*, vol. 283, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116359.
- [4] X. Li and I. Sabir, “Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 4, pp. 359–371, 2005, doi: 10.1016/j.ijhydene.2004.09.019.
- [5] Q. Zhang, L. Xu, J. Li, and M. Ouyang, “Performance prediction of plate-fin radiator for low temperature preheating system of proton exchange membrane fuel cells using CFD simulation,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 38, pp. 24504–24516, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.210.
- [6] S. Kim and I. Hong, “Effects of humidity and temperature on a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) stack,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 14, no. 3, pp. 357–364, 2008, doi: 10.1016/j.jiec.2008.01.007.
- [7] H. Al-Zeyoudi, A. P. Sasmito, and T. Shamim, “Performance evaluation of an open-cathode PEM fuel cell stack under ambient conditions: Case study of United Arab Emirates,” *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 798–809, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.07.082.
- [8] A. P. Sasmito, E. Birgersson, and A. S. Mujumdar, “Numerical evaluation of various thermal management strategies for polymer electrolyte fuel cell stacks,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 20, pp. 12991–13007, 2011, doi: 10.1016/j.ijhydene.2011.07.028.
- [9] W. M. Yan, M. S. Zeng, T. F. Yang, C. Y. Chen, M. Amani, and P. Amani, “Performance improvement of air-breathing proton exchange membrane fuel cell stacks by thermal management,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 42, pp. 22324–22339, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.146.
- [10] O. A. Obeisun *et al.*, “Study of water accumulation dynamics in the channels of an open-cathode fuel cell through electro-thermal characterisation and droplet visualisation,” in *International Journal of Hydrogen Energy*, Dec. 2015, vol. 40, no. 46, pp. 16786–16796, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.07.066.
- [11] Z. Huang, Q. Jian, and J. Zhao, “Experimental study on improving the dynamic characteristics of open-cathode PEMFC stack with dead-end anode by condensation and circulation of hydrogen,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 38, pp. 19858–19868, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.05.108.
- [12] Y. F. Lin and Y. S. Chen, “Experimental study on the optimal purge duration of a proton exchange membrane fuel cell with a dead-ended anode,” *Journal of Power Sources*, vol. 340, pp. 176–182, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.11.039.

- [13] D. Qiu, L. Peng, J. Tang, and X. Lai, “Numerical analysis of air-cooled proton exchange membrane fuel cells with various cathode flow channels,” *Energy*, vol. 198, May 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117334.
- [14] C. Zhao, S. Xing, M. Chen, W. Liu, and H. Wang, “Optimal design of cathode flow channel for air-cooled PEMFC with open cathode,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 35, pp. 17771–17781, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.04.165.
- [15] C. Y. Ling, H. Cao, Y. Chen, M. Han, and E. Birgersson, “Compact open cathode feed system for PEMFCs,” *Applied Energy*, vol. 164, pp. 670–675, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.012.
- [16] A. P. Sasmito, E. Birgersson, K. W. Lum, and A. S. Mujumdar, “Fan selection and stack design for open-cathode polymer electrolyte fuel cell stacks,” *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 325–332, 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.06.037.
- [17] T. Zeng *et al.*, “Experimental investigation on the mechanism of variable fan speed control in Open cathode PEM fuel cell,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 43, pp. 24017–24027, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.119.
- [18] C. Mahjoubi, J. C. Olivier, S. Skander-mustapha, M. Machmoum, and I. Slama-belkhodja, “An improved thermal control of open cathode proton exchange membrane fuel cell,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 22, pp. 11332–11345, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.11.055.
- [19] J. Kim, D. M. Kim, S. Y. Kim, S. W. Nam, and T. Kim, “Humidification of polymer electrolyte membrane fuel cell using short circuit control for unmanned aerial vehicle applications,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 15, pp. 7925–7930, May 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.03.012.
- [20] G. Gupta, B. Wu, S. Mylius, and G. J. Offer, “A systematic study on the use of short circuiting for the improvement of proton exchange membrane fuel cell performance,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 7, pp. 4320–4327, 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.10.080.
- [21] Á. Palacin Vázquez, “Trabajo Fin de Grado,” 2020.
- [22] Ebm-papst, “DC Axial Fan 422JH,” p. 242, 2016, [Online]. Available: <http://img.ebmpapst.com/products/datasheets/DC-axial-fan-8414NG-ENU.pdf>.
- [23] R. Adrian, “Particle-Imaging Techniques For Experimental Fluid-Mechanics,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 23, no. 1, pp. 261–304, 1991, doi: 10.1146/annurev.fluid.23.1.261.
- [24] “Measurement Principles of PIV - Dantec Dynamics | Precision Measurement Systems & Sensors.” <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/measurement-principles-of-piv/> (accessed Jun. 03, 2021).
- [25] J. Soria, “An investigation of the near wake of a circular cylinder using a video-based digital cross-correlation particle image velocimetry technique,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 12, no. 2, pp. 221–233, Feb. 1996, doi: 10.1016/0894-1777(95)00086-0.

- [26] FujiElectric, "IGBT Transistor 1MBI600LN-060." [Online]. Available: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/140196/FujiElectric/1MBI600LN-060/1>.
- [27] Infineon, "Mosfet de Potencia Optimos 3 Tipo N (N-Fet)," [Online]. Available: <https://docs.rs-online.com/4bd5/0900766b81427549.pdf>.

ANEXOS

Anexo I. Código para Arduino de lectura de tensión

```
#include <TimerOne.h>

int flag = 0, tensionADC;
float valorV;
int nDato = 0;
long tiempo1, tiempo2, tiempoD;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Timer1.initialize(20266); // Dispara cada 250 ms
  Timer1.attachInterrupt(ISR_Blink); // Activa la interrupcion y la asocia a ISR_Blink
}
void ISR_Blink() {
  flag = 1 ;
}
void loop() {
  if (flag == 1) {
    flag = 0;
    tensionADC = analogRead(A0);
    valorV = float(tensionADC) * 0.00488758;
    Serial.println(valorV);
    // Líneas utilizadas para comprobar el tiempo de ejecución del programa
    // tiempo2 = micros();
    // tiempoD = tiempo2 - tiempo1;
    // Serial.println(tiempoD);
    // tiempo1 = micros();
    //
  }
}
```


Anexo II. Script de Matlab de lectura, muestra y almacenaje de datos procedentes del Arduino

```
%borrar previos
delete(instrfind({'Port'}, {'COM4'}));
% fclose(s);
% delete(s);
% clear s;

%crear objeto serie
s = serial('COM4', 'BaudRate', 9600);
warning('off', 'MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
%abrir puerto
fopen(s);

% parámetros de medidas 1
tmax = 10000; % tiempo de captura en s

% preparar la figura
figure('Name', 'Captura');
%axes('XLim', [0 tmax], 'YLim', [0 10]);
l1 = line(nan, nan, 'Color', 'r', 'LineWidth', 1);

% parámetros de medidas 2
% for n=1:50
% a = fscanf(s, '%e,%f');
% end
rate = 50; % round(1000000/a(2)) % resultado experimental (comprobar)

xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (V)')
title('Captura de voltaje en tiempo real con Arduino')
grid on
hold on

% inicializar
v1 = zeros(1, tmax*rate);
i = 1;
t = 0;

% ejecutar bucle cronometrado
tic
while t < tmax
    t = toc;
    % leer del puerto serie
    v1(1, i) = fscanf(s, '%G'); % '%G' ajusta el ascii a un double

    % dibujar en la figura
    x = linspace(0, i/rate, i); % desde 0 hasta i/rate (los segundos
    % totales) con el intervalo i.
    set(l1, 'YData', v1(1:i), 'XData', x);
    drawnow
    % seguir
    i = i+1;
    resto = mod(i, 500);
    if resto == 0
```

```
        xlswrite('DatosCorto.xlsx',v1)
    end
    xlim = i + 50;
end
% resultado del cronometro
clc;
fprintf('%g s de captura a %g cap/s \n',t,i/t);

fclose(s);
delete(s);
clear s;
```