



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diseño de una pila de hidrógeno para su aplicación en automoción

Autor: D. Enrique Calleja Ramos

TUTORES:

Tutor 1: D. Ángel Cartón López

Tutor 2: Dña. Susana Lucas Yagüe

DEPARTAMENTO:

Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente

Valladolid, julio, 2018

Resumen

Español

En este proyecto se ha realizado un diseño completo de un sistema de pila de combustible, que incluye equipo y subsistemas, cuyo propósito será utilizarlo en el campo de la automoción para impulsar un vehículo de tamaño medio con una potencia de 90 kW. La tecnología seleccionada ha sido de tipo PEM (Proton Exchange Membrane) debido a que permitirá construir un equipo compacto, con bajo riesgo de utilización, arranque rápido y baja temperatura de funcionamiento. Estas características, entre otras, la convierten en una tecnología especialmente propicia para su uso en aplicaciones móviles. En lo que a cálculos se refiere, se ha seleccionado como base de cálculo la autonomía (600 km), la potencia de salida (90 Kw) y el combustible utilizado (hidrógeno). A partir de estos datos, se han calculado el resto de los parámetros de operación como la tensión de celda real (0,776 V) y la eficiencia total de la pila (44,54 %) entre otros. El equipo comercial que cumple con estos requerimientos instalando 3 equipos en paralelo es el modelo Horizon VL-30. El trabajo se completa con un análisis básico de costes a lo largo de la vida del sistema que incluye los costes de fabricación y de mantenimiento a fin de compararlo con el resto de tecnologías.

Inglés

This project contains a complete design of a fuel cell system, which includes the equipment and necessary subsystems, whose purpose will be to use it in the automotive field to drive a medium-sized vehicle with a power of 90 kW. The selected technology has been PEM (Proton Exchange Membrane) because it allows to build a compact equipment, with low risk of use, quick start and low operating temperature. These characteristics make it a particularly suitable technology for use in mobile applications. As far as calculations are concerned, the autonomy (600 km), the output power (90 Kw) and the fuel used (hydrogen) have been selected as the basis for calculation. From these data, the rest of the operating parameters have been calculated, such as the actual cell voltage (0.776 V) and the total efficiency of the cell (44.54%), among others. The commercial equipment that meets these requirements by installing 3 equipment Horizon VL-30 model located in parallel. The project is completed with a basic analysis of costs throughout the life of the system that includes the costs of manufacturing and maintenance in order to compare it with the rest of technologies.

Palabras clave

Pila de combustible, hidrógeno, tecnología PEM, automoción, transporte

Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es llevar a cabo el diseño de un equipo de pila de combustible que sea capaz de proporcionar la suficiente energía como para desplazar un vehículo ligero de tamaño medio con una potencia de 90 kW. Se ha pretendido presentar una alternativa viable, con una tecnología simple, eficiente, limpia y fiable que pueda hacer frente a los vehículos convencionales en lo que a prestaciones y funcionalidad se refiere.

Para alcanzar dicho objetivo se marcarán los siguientes objetivos parciales:

1. **Estudiar las tecnologías** de pila de combustible existentes en la actualidad de forma exhaustiva con el objetivo de analizar los aspectos positivos y negativos de cada una en lo que a su implantación en un vehículo ligero se refiere (por lo general un coche) y seleccionar así la más adecuada para su producción en serie a día de hoy.
2. **Calcular y diseñar la celda de combustible** marcando como base de cálculo 600 km de autonomía, así como las condiciones de operación y diseño para llevar a cabo los diferentes procedimientos de cálculo que se precisen con el fin de seleccionar el equipo comercial que más se adecúe a las necesidades de la instalación.
3. **Diseñar los sistemas auxiliares** de almacenamiento, control, precalentamiento, hidratación, refrigeración, transmisión de potencia, regulación de presión y gestión de residuos para garantizar unas condiciones óptimas de trabajo en el equipo intentando así mejorar su rendimiento y evitar averías.
4. **Realizar un estudio económico básico** en el cual se incluye un presupuesto para estimar el coste de fabricación del sistema una vez se haya instalado en el vehículo y compararlo con otras tecnologías para comprobar su rentabilidad a lo largo de toda su vida útil.

Índice

Resumen.....	2
Objetivos	3
1. CAPÍTULO 1- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Definición de pila de hidrógeno	1
1.2. Historia.....	2
1.3. Tipos de pilas de combustible	4
1.3.1. AFC (Alcaline Fuel Cell)	5
1.3.2. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	10
1.3.3. HT-PEMFC (High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	19
1.3.4. SOFC (Solid Oxide Fuel Cells).....	25
1.3.5. PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)	30
1.3.6. MCFC (Molten Carbonates Fuel Cells)	33
1.3.7. DMFC (Direct Methanol Fuel Cells/ Pilas de combustible de metanol directo)	38
2. CAPÍTULO 2- SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	41
2.1. Introducción.....	41
2.2. Tabla comparativa	41
2.2.1. PEM-LT.....	42
2.2.2. AFC.....	42
2.2.3. PEM-HT.....	43
2.3. Conclusiones.....	43
3. CAPÍTULO 3- DISEÑO DE EQUIPO	45
3.1. Componentes del sistema	45
Introducción	45
Esquema de funcionamiento	46
Reacciones.....	46
3.1.1. Almacenamiento de combustible	47
3.1.2. Unidad de control.....	52
3.1.3. Celdas de potencia	53
3.1.4. Precalentamiento.....	55
3.1.5. Hidratación de la membrana.....	57
3.1.6. Refrigeración	61
3.1.7. Equipo eléctrico.....	67
3.1.8. Sistema de transmisión	71
3.1.9. Sistemas de regulación de presión a la entrada	71

3.1.10.	Gestión de residuos y subproductos	76
3.2.	Parámetros de operación	78
3.2.1.	Potencia requerida por el sistema	78
3.2.2.	Alimentación de la pila	79
3.2.3.	Aspectos termodinámicos de la reacción (energía libre de Gibbs)	83
3.2.4.	Tensión de trabajo y sobrepotenciales de la celda	85
3.2.5.	Eficiencia y límites de eficiencia	88
3.2.6.	Presión de operación.....	91
3.2.7.	Envejecimiento de la pila	93
3.3.	Diseño de la pila.....	95
3.3.1.	Placas bipolares	95
3.3.2.	Conjunto membrana-electrodos (MEA).....	97
3.3.3.	Juntas.....	102
3.3.4.	Disposición de celdas	102
4.	CAPÍTULO- ESTUDIO ECONÓMICO BÁSICO	105
4.1.	Presupuesto de fabricación	105
4.2.	Estudio de costes a lo largo del ciclo de vida del vehículo	107
5.	CAPÍTULO 5- CONCLUSIONES.....	111
5.1.	Resumen de resultados (alternativamente, una síntesis de la solución tecnológica propuesta).....	111
5.2.	Principales aportaciones del autor del TFM.....	113
5.3.	Sugerencias para trabajos futuro	113
	BIBLIOGRAFÍA	115
	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	121
	ÍNDICE DE GRÁFICOS	123
	ÍNDICE DE ECUACIONES	125
	ÍNDICE DE TABLAS	127
	ANEXOS	129
	Anexo 1- Propiedades del hidrógeno.....	131
	Hoja de seguridad del hidrógeno	132
	Anexo 2- Proceso de montaje HT-PEMFC	133
	Anexo 3- Fabricantes de pilas para el transporte	135
	Anexo 4- Ficha técnica equipos comerciales	137
	Membrana.....	138
	Motor.....	141
	Equipos de pilas de combustible.....	143

Resistencia de precalentamiento	149
Compresores	150
Válvula reguladora de presión	156
Presostato	160
Anexo 5- Planos	165

1. CAPÍTULO 1- INTRODUCCIÓN

1.1. Definición de pila de hidrógeno

La pila de combustible, también llamada célula de combustible o celda de combustible, es un dispositivo electroquímico capaz de convertir energía química en energía eléctrica útil de forma directa mediante un apilamiento de celdas individuales.

A grandes rasgos, su funcionamiento se basa en la transformación electroquímica de un flujo continuo de combustible y un oxidante mediante una reacción química controlada que suministra corriente eléctrica aprovechable a un circuito externo. Además de esto, da lugar a determinados subproductos y produce energía térmica en forma de calor que constituirá la principal fuente de pérdidas energéticas del sistema minorando su rendimiento total. En la **Ilustración 1** se puede ver una figura en la que se resume el funcionamiento de la pila en lo que a corrientes se refiere.

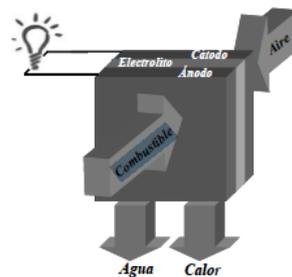


Ilustración 1: Esquema básico de una celda de combustible (Asensio et al. 2011)

La primera ventaja frente a los dispositivos tradicionales se puede encontrar en que las pilas convencionales son dispositivos de almacenamiento de energía mientras que la pila de combustible cuenta con un suministro de reactivos como flujo continuo desde el exterior. Esto le permite generar energía de forma ininterrumpida (siempre y cuando se disponga de combustible) solventando de esta manera el principal problema de las pilas o baterías convencionales que es la capacidad limitada de almacenamiento.

Otra ventaja de gran importancia es que, al no contar con procesos de combustión, su rendimiento no está limitado por las leyes de Carnot. Este hecho permite conseguir eficiencias relativamente altas que en la práctica pueden encontrarse en el entorno al 40% o 50% (en la actualidad) pudiendo llegar hasta un 85% o 90% en cogeneración (si se captura el calor residual para su uso posterior). En consecuencia, la elevada eficiencia puede dar lugar a una elevada energía específica (comparada con otras tecnologías de almacenamiento electroquímico) derivada de la independencia del tamaño de la máquina en lo que a rendimiento se refiere. Esto no ocurre así en los sistemas térmicos, en los cuales el rendimiento mejorará con el aumento de escala. Este hecho beneficiará a la pila de combustible a la hora de plantear su uso para aplicaciones de baja potencia, como se muestra en el **Gráfico 1**. (Cid 2014)

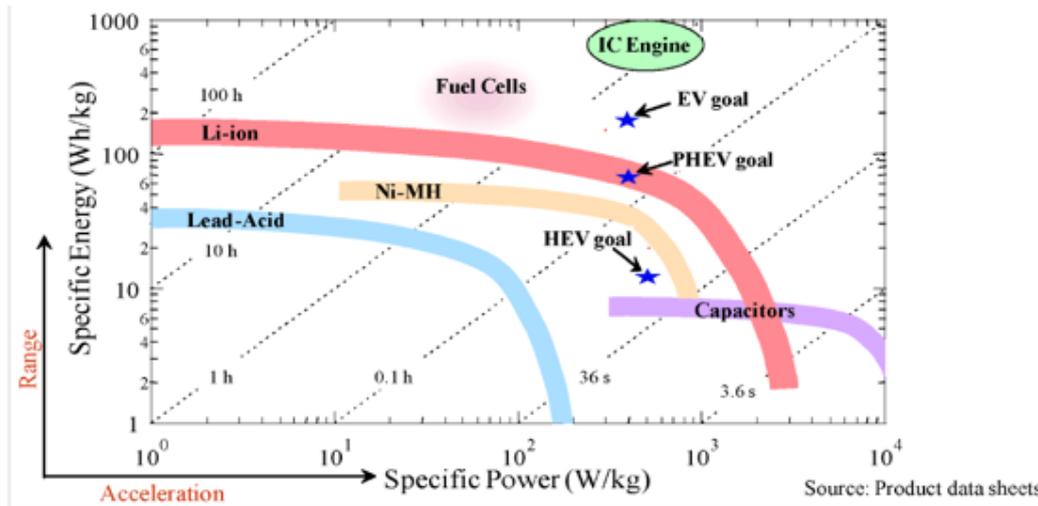


Gráfico 1: Diagrama de Ragone. Comparación entre la energía específica y la potencia específica (Cid 2014)

Otras ventajas de menor trascendencia, pero con bastante peso a la hora de elegir una u otra tecnología son:

- Mínimo impacto ambiental (dado que el proceso no implica la combustión de los reactivos). A pesar de ello, este factor dependerá considerablemente de los procesos de obtención de combustible que se utilicen.
- Sistemas con muy poca inercia, que permiten seguir la curva de demanda prácticamente sin retardo.
- Su carácter modular, aumenta la fiabilidad, reduce los costes, y por otro lado, las plantas pueden aumentar o disminuir la potencia sin cambiar su diseño ni su rendimiento.
- Al carecer de partes móviles, son silenciosas, no producen vibraciones y, en teoría, requieren poco mantenimiento.
- En principio, las pilas de combustible pueden procesar una amplia variedad de reductores y oxidantes, lo cual abre un gran abanico de posibilidades tanto a la hora de obtener los combustibles como a la hora de ponerlo en funcionamiento.

Por estas y por otras características, a día de hoy se presentan como unos sistemas con enorme potencial de aplicación que tienen como objetivos principales reducir el uso de energía, las emisiones contaminantes y dependencia de combustibles fósiles.

1.2. Historia

Inicios

Aunque las pilas de combustible parezcan una tecnología reciente, la realidad es que las primeras investigaciones relacionadas con su funcionamiento comenzaron a mediados del siglo XIX a cargo del científico Christian Friedrich Schönbein en Suiza. En el año 1900 Walther Nernst dedujo la ley termodinámica que rige su funcionamiento y además fue el primer constructor de la célula de combustible de óxidos sólidos o cerámica.

Desarrollo

En 1842, Willian R.Grove desarrolló la primera celda de combustible capaz de producir energía eléctrica combinando hidrógeno y oxígeno utilizando materiales más específicos como el zinc para sus componentes. Por otro lado, los electrodos fabricados en platino se encontrarían expuestos a dos ácidos separados por un material cerámico poroso elevando así la capacidad de intercambio químico. (Grove, Sir William Robert 2001; Grove, Sir William Robert (1811–1896) 2005; M. Becquerel 1839; Mary Bellis 2017) En la **Ilustración 2** se puede ver un esquema realizado a mano en el cual se marca la disposición que utilizó Grove para desarrollar su pila de combustible primigenia.

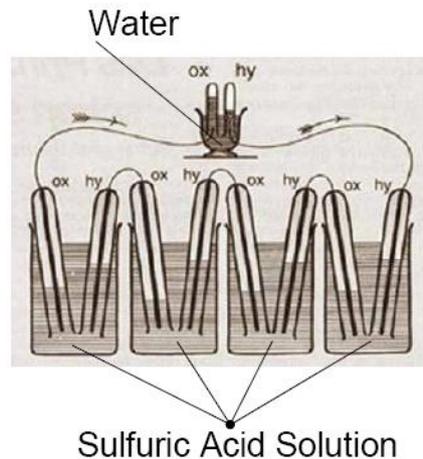


Ilustración 2: Estructura pila de combustible de R. Grove (Grove 1843)

En 1937 el científico inglés Francis T. Bacon desarrolló una pila de 6 kW a finales de la década de 1950 capaz de accionar una máquina de soldadura. En los años 60, las patentes desarrolladas por Bacon se utilizaron en el programa espacial de Estados Unidos denominado Gemini (en la **Ilustración 3** se puede ver el aspecto del equipo utilizado en dicha misión). En él se buscaba proveer a los astronautas de electricidad y de agua potable, una de las primeras aplicaciones prácticas de las células de combustible debido a la sencillez química de su reacción.

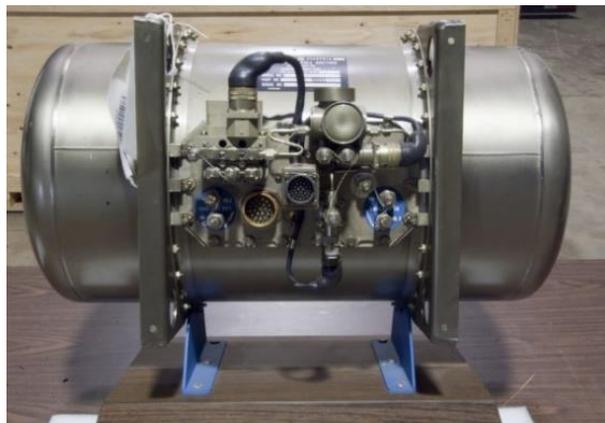


Ilustración 3: Pila de combustible utilizada en la misión Gemini (NASA) (Santiago 2016)

El interés por las células de combustible ha recaído fuertemente en periodos de escasez de recursos energéticos como por ejemplo durante la crisis actual o la crisis del petróleo del 1973 (Anstrom 2016) en los cuales se ha perseguido la reducción en el coste de la tecnología y la mejora de la eficiencia mediante la utilización de nuevos materiales o materias primas. Esto

es debido a que estas células tienen mayor eficiencia energética comparadas con otros dispositivos de transformación suponiendo un ahorro en la compra de materias primas. (Mary Bellis 2017)

En 2008, El fabricante de automóviles japonés Honda obtiene la homologación en Japón y Estados Unidos para poder comercializar su vehículo impulsado mediante una tecnología basada en pila de combustible. Con el Honda FCX Clarity se inicia la comercialización de un vehículo eléctrico basado en pila de combustible demostrando así su rentabilidad en el mundo de la automoción, uno de los ámbitos que más concierne a este proyecto.

Actualidad y futuro

A pesar de que todavía es necesario incluir mejoras en lo que a medidas de seguridad se refiere, el mercado de las pilas de combustible está creciendo en la actualidad y continuamente se están mejorando aspectos relacionados con el espacio, la mejora de eficiencia, la reducción de los precios... con el objetivo de mejorar su aplicabilidad y su rentabilidad económica para así poder utilizarlo en la vida cotidiana teniendo en cuenta que es una energía limpia que podría sustituir a los combustibles fósiles actuales. (Mary Bellis 2017)

Se estima que se necesitarán otros 5-10 años antes del despliegue mundial de las pilas de combustible. Hacia el año 2020 se comercializarán pilas de combustible estacionarias, que alcanzarán los 50 Gw.

En lo referente al mundo de la automoción, actualmente existen modelos comerciales impulsados por pila de hidrógeno como el Toyota Mirai, el Honda FCX o el Hyundai ix35 FCEV entre otros. Estas marcas junto con General Motors son las que se encuentran más inmersas apostando e invirtiendo en esta tecnología, aunque a corto plazo no se plantee como una alternativa segura frente a los coches alimentados con baterías recargables.

Las dificultades más duras a las que se enfrentan están relacionadas con la mejora de la densidad de potencia, el aumento de seguridad del vehículo, la mejora de la autonomía y la ausencia de estaciones de servicio a lo largo de la geografía mundial.

1.3. Tipos de pilas de combustible

En la actualidad existen varias líneas de investigación abiertas relacionadas con las tecnologías de generación. Por ello, se han establecido diferentes métodos de clasificación entre los cuales los más comunes serán: según el tipo de combustible y oxidante (hidrógeno molecular, el metanol... y normalmente oxígeno o aire como oxidante), la temperatura de operación (de alta y de baja), su eficiencia, su aplicación...

A pesar de ello, el criterio que tradicionalmente más se ha utilizado es la clasificación atendiendo al electrolito que utilizan, puesto que su naturaleza le confiere diferentes pautas de funcionamiento. Se pueden entonces establecer siete tipos principales de pilas que de describen en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Tipos de pilas de combustible (Tabla de creación propia)

	AFC	PEM-LT	PEM-HT	SOFC	PAFC	MCFC	DMFC
Nombre	Pila alcalina	Pila de membrana de Intercambio Protónico de baja temperatura	Membrana de Intercambio Protónico de alta temperatura	Pila de óxidos sólidos	Pila de ácido fosfórico	Pila de Carbonatos fundidos	Pila de Metanol Directo
Carga	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	O ²⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	H ⁺
Temperaturas	65 - 250°C	50 - 90°C	100 - 120°C	700 - 1000°C	150 - 200°C	600 - 700°C	50 - 100°C
Eficiencias	60-70%	60%		60%	40%	45-50%	40%
Electrolito	KOH disuelto en agua	Membrana de intercambio protónico	Membrana de intercambio protónico	Óxidos sólidos ZrO ₂ / Y ₂ O ₃	Ácido fosfórico H ₃ PO ₄	Carbonatos fundidos Li ₂ CO ₃ / K ₂ CO ₃	Membrana de polímeros
Combustible	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂	H ₂	H ₂ , CH ₄ , CO ₂	Metanol
Usos	Espaciales	Transporte, portátiles, residencial	Generación estacionaria	Generación eléctrica, cogeneración	Generación eléctrica distribuida. Automoción	Generación eléctrica, cogeneración	Portátiles

1.3.1. AFC (Alcaline Fuel Cell)

Introducción

La pila de combustible alcalina (Alcaline Fuel Cell) fue una de las tecnologías embrionarias y en consecuencia, una de las más desarrolladas actualmente. Sus primeras aplicaciones estaban orientadas a suministrar energía eléctrica y agua en las naves espaciales norteamericanas de los años 60 y es la tecnología que llevó al hombre a la Luna.

Está caracterizada por ser de baja temperatura. Su efectividad es una de las más elevadas en comparación con el resto de sistemas, llegando a alcanzar un rendimiento del 70% debido a que la velocidad de reacción es muy elevada. Además de esto, es una de las más baratas de fabricar entre las pilas de combustible puesto que los catalizadores requeridos por sus electrodos pueden ser de tipos muy variados, encontrándose varios que son realmente baratos en comparación con los que requieren otros tipos de pilas de combustible.

Los diseños más modernos intentan aprovechar la ventaja que ofrecen los medios alcalinos mejorando la cinética de reducción de oxígeno dentro de las pilas. Esto ha dado lugar a una nueva generación de AFC que puede competir directamente con las PEM en un futuro a corto plazo. (Deavin et al. 2012; James Larminie and Dicks 2003; Stölten and Emonts 2012; Varcoe and Slade 2005)

Las pilas AFC han demostrado ser suficientemente estables durante más de 8.000 horas de funcionamiento conservando eficiencias incluso por encima del 50%. Está calculado que, para amortizar la inversión económica deberían trabajar durante más de 40000 horas, lo cual es difícil de conseguir por la degradación de sus componentes internos.

Características generales

Tabla 2: Tabla de características pila AFC (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017)

Magnitud	Valor	Unidades
Parámetros generales		
Eficiencia	60 - 70	%
Vida útil	10.000	h de operación
Amortización	40.000	h de operación
Tiempo de arranque	<0.1	h
Parámetros físicos		
Presión de operación	1	bar
Temperatura de operación	65 - 250 ¹	°C
Parámetros químicos		
Combustible	H ₂ alta pureza	
Agente oxidante	O ₂ alta pureza	
Carga (conductor iónico)	OH ⁻	
Parámetros eléctricos		
Tensión de celda	0.8	V
Densidad de corriente	1500	A/m ²
Potencia de operación	5-150	kW
Densidad de potencia	620	mW/cm ²

¹- Los diseños más modernos de estas pilas funcionan a temperaturas por debajo de los 70°C. No obstante, existen pilas AFC de altas temperaturas pueden funcionar a temperaturas entre 100°C y 250°C pero que no tendrán el mínimo interés para aplicaciones en el campo de la automoción.

Esquema gráfico y componentes

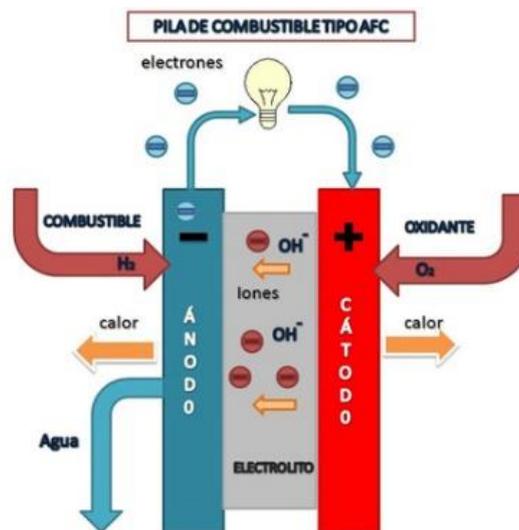


Ilustración 4: Esquema funcionamiento pila AFC (Energías Renovables 2014)

Materias primas de las celdas

Tabla 3: Materiales AFC (Tabla de creación propia)

Materiales	
Ánodo	Ni , Ag, Óxidos Metálicos (MeO)
Cátodo	Ni, Ag, Óxidos Metálicos (MeO)
Matriz	Mineral
Electrolito	KOH
Catalizador	Ni, Ag, Óxidos Metálicos (MeO)

Electrodos

Como se detalla en la **Tabla 3**, los electrodos suelen estar compuestos generalmente por Níquel u óxido de Níquel, pero ocasiones pueden contar con inserciones de plata, óxidos metálicos, espinelas o metales nobles (a pesar de que no es necesario) para mejorar su conductividad ya que actúan como electrocatalizadores. En la actualidad las líneas de investigación se encuentran orientadas a la fabricación de electrodos (en particular el cátodo) con materiales más baratos que permitan reducir el precio de las pilas en conjunto favoreciendo el uso de las pilas AFC de nuevo. (Deavin et al. 2012; Varcoe and Slade 2005).

Electrolito

Esta tecnología basa su funcionamiento en la presencia de un electrolito líquido que, por lo general será hidróxido de potasio (KOH) debido a su coste reducido y su facilidad de obtención. Para aportar una base de permeación será necesaria la utilización de una matriz intermedia porosa que antiguamente estaba construida en amianto, pero que desde su prohibición en el año 2005 se fabrica con materiales alternativos basados en Silicio. La calidad de la membrana garantizará el transporte de la carga entre los electrodos.

Para trabajar a temperaturas de operación inferiores a 120°C, la solución de hidróxido de potasio se encontrará en una concentración comprendida entre el 35 y el 50 % en masa aproximadamente. En caso de que se quisiera trabajar entre 120 °C y 250 °C la concentración debería encontrarse en torno al 85 % en masa. (EG&G Technical Services Inc. 2004) Para el proyecto que se está llevando a cabo en este documento lo más interesante sería contar con una pila de baja temperatura debido principalmente a las facilidades de trabajo que plantea su utilización. En la **Ilustración 6** se puede apreciar la relación que existe entre la temperatura de operación de la pila y la presión de vapor en función de la concentración en la disolución. En el caso de estar por debajo de los 150 °C la presión de vapor estaría por debajo de los 2 bares aproximadamente.

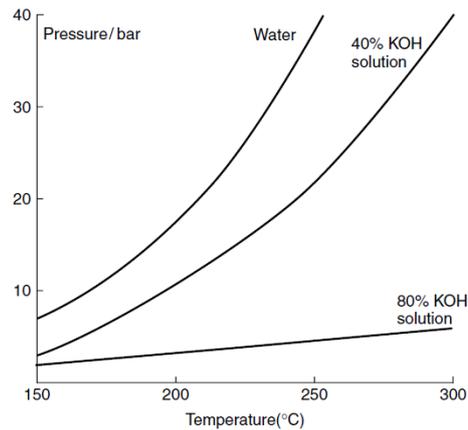


Gráfico 2: Relación presión de vapor-temperatura según las diferentes concentraciones de electrolito (James Larminie and Dicks 2003)

En la actualidad se está investigando la utilización de membranas de intercambio aniónicas (AEM) que sustituyen a los electrolitos de KOH acuosos. A parte de reducir su temperatura de trabajo, éstos AFCs nuevos (Acrylate-Polymer-Based Electrolyte Membrane (AEMFC) o Solid Acid Fuel Cell (SAFC)), han generado gran expectación debido a su capacidad de funcionar directamente con etanol, como combustible. (Asensio et al. 2011)

Alimentación de celdas

Como combustible normalmente se utiliza H_2 , el cual debe de ser de una extremada pureza ya que este tipo de pilas son muy sensibles a la presencia de CO y CO_2 . (Cid 2014) Debido a las bajas temperaturas de operación, el CO puede convertirse en veneno para los catalizadores y en consecuencia desactivarlo hasta el punto de convertir la pila en un sistema no rentable en muy poco tiempo. Por su parte, el CO_2 podrá reaccionar con el electrolito (KOH) dando lugar a carbonato potásico (K_2CO_3), carbonatando el electrolito y en consecuencia reduciendo su capacidad de transporte eléctrico. (Cid 2014)

Todos estos fenómenos supondrían una reducción considerable de la eficiencia del sistema recortando su vida útil. Por lo tanto, las AFCs deben funcionar con la pureza alta de H_2 y O_2 . Como inconveniente, este proceso de purificación incrementa considerablemente el coste del combustible, o en caso de que haya que instalar un sistema de purificación, del equipo completo. (Asociación española de las pilas de combustible 2017; James Larminie and Dicks 2003)

Procesos en la celda

Reacciones

La reacción en el ánodo es la de oxidación del hidrógeno: $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$

Se obtienen como productos agua y electrones, los cuales fluyen a través de un circuito externo y regresan al cátodo reduciendo al oxígeno y produciendo iones hidroxilos según la reacción siguiente: $\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$

Reacción global: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + Calor + Electricidad$

Dirección de electrones y transporte de cargas

En el aspecto eléctrico, este tipo de pilas se benefician de que el voltaje de activación suele ser inferior que las pilas de electrolito ácido permitiendo voltajes de operación altos que llegan a alcanzar hasta los 0.875 V por célula. Por otro lado, las pilas aniónicas no cuentan con platos bipolares, lo cual reduce mucho el coste y el tamaño, pero reduce la densidad de potencia con respecto a las PEMFC por ejemplo.

La dirección del flujo de carga negativa en una pila alcalina circula desde el ánodo hasta el cátodo mientras que la corriente positiva convencional considerada circula del cátodo hasta el ánodo

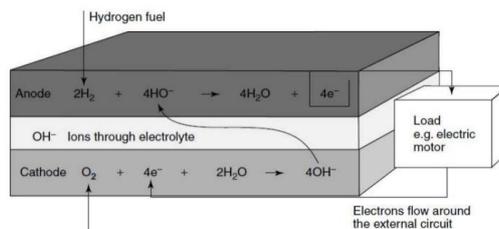


Ilustración 5: Esquema físico-químico del funcionamiento básico de una pila de combustible (J. Larminie and A. Dicks 2003)

Ventajas y aplicaciones

Ventajas

- Tensión de activación reducida
- Electrolito económico y posibilidades muy variadas
- No utiliza placas bipolares (reducción de peso y de resistencia eléctrica)
- Menor complejidad química
- Variedad de electrocatalizadores que se pueden utilizar
- Elevada reactividad sin utilizar metales nobles (bajo precio)
- Alto rendimiento si se trabaja con combustibles puros

Desventajas

- Necesidad de usar hidrógeno muy puro como combustible para evitar problemas de envenenamiento y la consecuente reducción de rendimiento.
- Problemas de corrosión derivados de la alta alcalinidad con la que se trabaja.
- Vida útil más corta que la de otras tecnologías.

Aplicaciones

Es adecuada para procesos de generación estacionaria (condiciones de funcionamiento óptimas).

Sigue usándose en misiones espaciales por sus buenos resultados, pero su uso terrestre se ve seriamente comprometido por su elevada sensibilidad al CO₂.

Aplicaciones militares específicas

Tipos de AFC

- Electrolito móvil
- Electrólito estático
- AFC con combustible disuelto.

1.3.2. PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Introducción

General Electric desarrolló la primera pila de membrana de intercambio de protones (PEMFCs) para las misiones espaciales Gemini de la NASA.

Es una tecnología de pila de combustible de baja temperatura al igual que la alcalina. Es posible que ambas sean las opciones más prometedoras para las aplicaciones móviles debido, además de su baja temperatura de funcionamiento, a su alta eficiencia, su elevada densidad de corriente (fáciles de transportar y con peligro reducido) y su gran versatilidad en su uso debido a que sus rangos de potencia varían desde apenas unos vatios hasta el orden de megavatios a día de hoy.

Los principales objetivos que se están buscando en la actualidad para esta tecnología se basan en reducir el espesor de la capa catalítica de platino y optimizar la dispersión del catalizador intentando de esta manera reducir el coste del conjunto, aumentar la eficiencia de transmisión y, en consecuencia, aumentar la conductividad iónica. Por otro lado, para su aplicación en dispositivos móviles se busca un material alternativo al grafito o el acero inoxidable (que será el utilizado en el equipo diseñado como se verá en el Capítulo 3) para la placa bipolar que aporte una alta conductividad eléctrica y térmica y que además sea resistente a la corrosión, más ligero y económico. (Asociación española de las pilas de combustible 2017; Rosli et al. 2017)

Físicamente es una tecnología que se diferencia de las demás en el uso de una fase sólida que separa los electrodos y que será la membrana polimérica. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Características generales

Tabla 4: Tabla de características pila PEM (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017)

Magnitud	Valor	Unidades
Parámetros generales		
Eficiencia	25 – 60	%
Vida útil ¹	5.000 - 50.000	H
Tiempo de arranque	<0.1	H
Parámetros físicos		
Presión de operación	1 – 5	Bar
Temperatura de operación	50 - 95	°C
Parámetros químicos		
Combustible	H ₂	
Agente oxidante	O ₂ , aire	
Carga (conductor iónico)	H ⁺	
Parámetros eléctricos		
Tensión de celda	Sin carga: 1.23 (Aprox.) Real: 0,7 (Aprox.)	V
Densidad de corriente	1 (J. Larminie and A. Dicks 2003) MAX: 1.8 (Cid 2014)	A/cm ²
Potencia de operación ^{2, 3}	0.2 – 1	Mw
Densidad de potencia	0,420 - 2	W/cm ²

¹: En el área del transporte las exigencias de durabilidad se encuentran en unas 5.000 horas actualmente mientras que para aplicaciones estacionarias ese valor se incrementa hasta unas 50.000 horas conservando, al menos el 90% de las características que tenía al ponerse en funcionamiento por primera vez. (Borup et al. 2008)

²: Se ha llegado a realizar una instalación de planta estacionaria tipo PEMFC de hasta 1 MW por la empresa japonesa Honda en el año 2013.

³: La potencia máxima se suele conseguir tras al menos tres minutos de operación. Este tiempo dependerá de los sistemas de precalentamiento del equipo. (Rosli et al. 2017)

Esquema gráfico y componentes

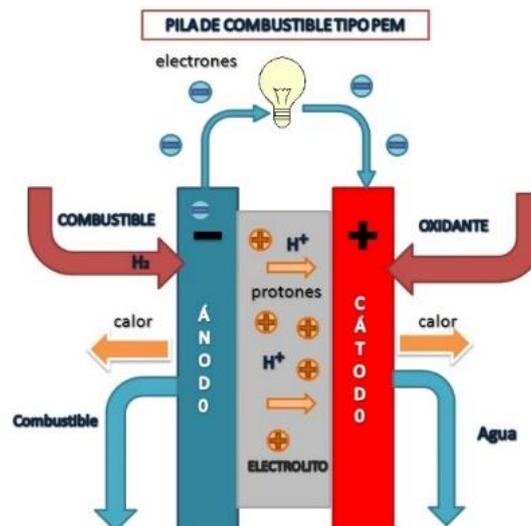


Ilustración 6: Esquema funcionamiento pila PEMFC (Creative Commons 2017; Energías Renovables 2014)

Componentes

En la **Ilustración 7** se puede ver un esquema en el que se numeran los siguientes componentes:

1. **Colectores de corriente**
2. **Placas bipolares**- Suministran los combustibles y el agente oxidante a través de canales de flujo
3. **Membrana de difusión de gases**
4. **MEA**- Será el conjunto membrana-electrodos-catalizadores donde se llevarán a cabo las reacciones de reducción y oxidación que generan la corriente eléctrica.

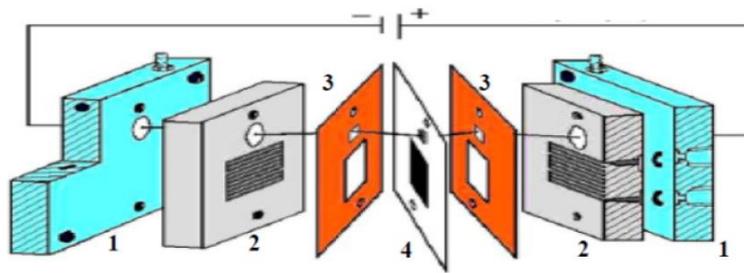


Ilustración 7: Componentes estructurales pila PEM

Materias primas de las celdas

Tabla 5: Materiales PEMFC (Tabla de creación propia)

Materiales	
Ánodo	Pt/C
Cátodo	Pt/C
Matriz	Nafion
Electrolito	KOH
Catalizador	Pt

Electrodos

Tanto el ánodo como el cátodo se constituyen disponiendo un núcleo de grafito poroso impermeabilizado con teflón al cual se le aplica un recubrimiento de platino en una de las caras que servirá como elemento catalizador para mejorar la reacción electroquímica. (Romero 2002) El teflón proporcionará la estructura mecánica del material del electrodo y además extraerá el agua del sistema hasta la superficie desde donde podrá evaporarse al ambiente. (James Larminie and Dicks 2003)

El problema que se encuentra al efectuar un recubrimiento de los electrodos con platino proviene de su gran afinidad con el monóxido de carbono (CO). Una concentración de CO superior a 10 ppm en el flujo de admisión supondrá una adsorción del mismo en la superficie contaminando el electrocatalizador de platino y reduciendo considerablemente el rendimiento de intercambio. (De Beer et al. 2015; Devanathan 2008) Según investigaciones realizadas, la oxidación del carbono hace que se aumente el espesor de la capa de recubrimiento de platino reduciendo así su capacidad catalítica. (Sousa, Mamlouk, and Scott 2010) Para dar una orientación cabe decir que las cantidades de Pt utilizadas inicialmente se

encontraban alrededor de 28 mg/cm^2 mientras que en la actualidad se ha conseguido reducir hasta niveles inferiores a 0.2 mg/cm^2 . (James Larminie and Dicks 2003; Rosli et al. 2017; Wang et al. 2011) Con esta práctica se busca claramente la reducción de coste de material del conjunto.

Una vez fijado el catalizador se fija a la membrana, se debe aplicar una capa de difusión de gas. Esta será una tela de carbón o papel, y de aproximadamente 0.2 a 0.5 mm de espesor, como se usa en la tecnología de electrodos separados. (James Larminie and Dicks 2003)



Ilustración 8: Estructura simplificada de un electrodo (J. Larminie and A. Dicks 2003)

Si se analiza la **Ilustración 8**, que representaría una recreación de la estructura superficial de un electrodo, se puede ver la primera zona dibujada en gris (a la derecha) que se correspondería con la estructura de teflón. Después habría una especie de cilindros con puntos blancos que se corresponderían a las inserciones de platino en la base de grafito (capa catalítica) y por último, un recubrimiento externo que se correspondería como la capa de difusión de gases.

Electrolito

El electrolito está compuesto por una membrana de polímero sólido (teflón) que contiene ácidos sulfónicos perfluorados (Nafion). Esta estructura ofrece al conjunto una resistencia mecánica y química muy elevadas además de proporcionar impermeabilidad al resto de sustancias. (James Larminie and Dicks 2003) El hecho de que sea impermeable facilitará la expulsión del agua producida en el electrodo evitando así las inundaciones que ponen en peligro el conjunto, además de servir como barrera de separación física entre los reactivos. (Adachi et al. 2009) Este tipo de membranas están caracterizadas por ser buenos conductores protónicos que permiten el paso a través de ellas de iones H^+ protones o iones hidroxilos sin apenas resistencia siempre y cuando se encuentren bien hidratadas. (Arazana 2005; De Beer et al. 2015; Cid 2014; Devanathan 2008)

La cantidad de reactivo suministrado a la pila es difícil de controlar. Si la cantidad suministrada es demasiado alta, se obtendrá una densidad de potencia muy alta pero el proceso será ineficiente y existirá una tendencia real a dañar la membrana. Por otro lado, si la cantidad suministrada es demasiado baja, la corrosión del soporte de los electrodos puede causar la pérdida de área superficial del catalizador (construido con base de carbono). Esto puede suponer que el voltaje de la celda caiga hasta $-0,2$ V, que la distribución de corriente deje de ser uniforme y que, como consecuencia de todo lo anterior, la pila se torne inútil para aplicaciones como las que se están estudiando en este proyecto. (García-Gabin, Dorado, and Bordons 2010; Yu et al. 2012)

Será conveniente la instalación de un sistema de control dedicado a ajustar la proporción de los reactivos en función de los requerimientos del sistema. De esta manera se asegurará el cumplimiento de las necesidades del proceso electroquímico evitando que caigan por debajo del nivel mínimo requerido o que exista un desperdicio de combustible. Un sistema de control adecuado sería uno de tipo PID por ejemplo. (Iqbal 2003)

Con todo lo anterior, hay que tener en cuenta que el agente oxidante que se va a utilizar es aire del ambiente que contendrá un 21% de oxígeno aproximadamente. Esto habrá que tenerlo en cuenta a la hora de realizar los cálculos puesto que en el proceso de reacción tendremos una gran cantidad de gases que no reaccionan que no tendríamos en el caso de introducir oxígeno puro y que tendremos que gestionar a la salida.

Combustibles

Hidrógeno

Será el combustible seleccionado para utilizar en el transcurso de este proyecto debido al interés de sus propiedades relacionadas con el medio ambiente y las bajas emisiones de productos contaminantes en su proceso de reacción con el oxígeno. El objetivo concreto estaba orientado a la obtención por vía electrolítica como se pretende hacer en el proyecto adjunto realizado por mi compañero Jorge Romero "Producción de hidrógeno vía electrolítica para su aplicación en automoción".

Debido a la baja tolerancia a las impurezas en el combustible del catalizador, las LT-PEMFC requieren hidrógeno puro (99,999%) para operar. Ésta es una de las razones de su alto coste de operación. (Chandan et al. 2013)

Cuando se utiliza hidrógeno proveniente de hidrocarburos reformados, el CO producido en el proceso debe ser eliminado y convertido en CO₂ por un proceso de oxidación. Este CO₂ serán emisiones contaminantes a la atmósfera que favorecen el efecto invernadero, por lo que en primera instancia será preferible su obtención por otros medios más limpios.

En los últimos años se ha dedicado un gran esfuerzo para reducir los niveles de CO como la alimentación de oxidantes en el combustible, la modificación del electrocatalizador (PtRu/C)... pero hasta la fecha apenas consiguen eliminar el problema e incluso aumentan el complejidad y costo del sistema.

Presión de alimentación

Al aumentar la presión de alimentación se mejoran las prestaciones de la pila (por lo general) debido a que se consigue tener una mayor densidad de reactivos en ambas partes de la membrana mejorando así la densidad de potencia del sistema. A pesar de que siempre se mejora el rendimiento, será necesario hacer un estudio previo de viabilidad que tenga en cuenta las necesidades que va a requerir la aplicación para la que ha sido diseñada la pila. Esto es así porque la presurización de flujos supone un consumo energético que puede llegar a ser no rentable si no se usa de manera razonada.

El aspecto negativo de este tipo de prácticas se encontrará con el soporte de la presurización por parte de los componentes del sistema. Gracias a la rigidez de la membrana será posible utilizar diferenciales de presión entre los dos flujos del ánodo y cátodo, pero diferencias de presiones superiores a las cinco atmósferas pueden resultar dañinas para los sistemas reduciendo su vida útil considerablemente, así como su fiabilidad. (Arazana 2005) A pesar de lo descrito anteriormente, en la pila diseñada el diferencial de presión entre ambas corrientes es 0 para evitar problemas de flujos parasitarios internos.

Procesos en la celda

Para entender mejor el proceso puede ser útil observar la estructura interna mostrada en la **Ilustración 10**. Los siguientes fenómenos tienen lugar durante el funcionamiento de la celda de combustible:

1. El H_2 y el aire son bombeados para fluir por el ánodo y por el cátodo respectivamente.
2. Los flujos de H_2 y O_2 pasan a través de las membranas de difusión de gases (GDL) / membranas micro porosas (MPL) y se difunden en las membranas catalíticas (CL).
3. H_2 se oxida en la membrana catalítica (CL) del ánodo, formando protones y electrones.
4. Los protones migran desde el ánodo hasta el cátodo y el agua procedente de la autogeneración y del sistema de humectación se transporta a través de la membrana.
5. Los electrones se conducen a través de un soporte de carbón al colector de corriente de ánodo, y luego al colector de corriente de cátodo a través de un circuito externo.
6. El O_2 se reduce con protones y electrones en el cátodo CL para formar agua.
7. El agua del producto se transporta fuera de la membrana catalítica (CL) del cátodo, a través de las membranas de difusión de gases (GDL) / membranas micro porosas (MPL) del cátodo, y finalmente al exterior de la pila.

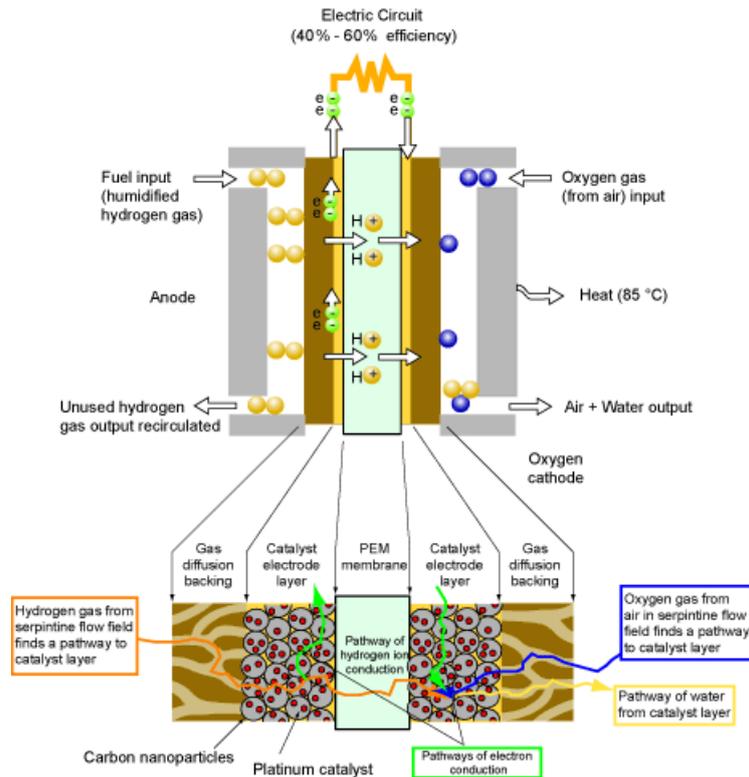


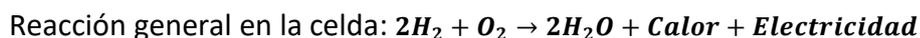
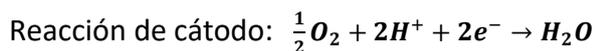
Ilustración 10: Estructura interna pila PEM (Jacobson 2006)

El ánodo y el cátodo se ponen en contacto por la parte de atrás por placas de grafito con canales. Los electrones circulan por el espacio entre canales lo que permiten la circulación de la corriente eléctrica por un circuito externo. (Arazana 2005)

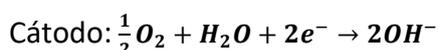
Reacciones

Las reacciones que tienen lugar en los electrodos en una pila tipo PEM son análogas a las de la PAFC. El hidrógeno de entrada se consume en el ánodo, separándose en electrones que circulan por el circuito externo y en protones de hidrógeno que atraviesan y entran en la membrana. En el cátodo, el oxígeno se combina con los electrones y los iones de hidrógeno para producir agua. El agua no se disuelve en el electrolito, sino que se expulsa con el gas de alimentación del cátodo. Como las pilas tipo PEM operan a unos 60 °C, el agua se produce de forma líquida y se expulsa por el excedente de flujo de alimentación del cátodo.

Medio ácido



Medio alcalino



El potencial exotérmico teórico es +1.23 V.

Dirección de electrones y transporte de cargas

Con las pilas de membrana se consiguen densidades de corriente cercanas a los 900 mA/cm² a una tensión de 0.7 V por celda siempre y cuando se utilice hidrógeno y oxígeno a unas cuatro atmósferas de presión para favorecer la reacción. Por otro lado, si se trabaja con presiones atmosféricas, se pueden alcanzar densidades de hasta 530 mA/cm² en la actualidad. El objetivo de rendimiento volumétrico a corto plazo se encuentra en conseguir una densidad de potencia de 650 W/l (Arazana 2005; Wang et al. 2011)

Dichas densidades corriente son aproximadamente unas diez veces superiores a las de otros sistemas de pilas de combustible y por ello se consideran como las más adecuadas para aplicaciones que requieran poco peso, coste o espacio. (Arazana 2005)

Ventajas y aplicaciones

Ventajas

- Temperatura de funcionamiento baja que no requiere el uso de aislamiento térmico, amplía las posibilidades de uso y reduce el tiempo de arranque.
- Alta densidad de potencia y respuesta rápida ante cambios en la demanda. (Romero 2002)
- Alimentación con exigencias relativamente reducidas (Combustibles reformados, H₂, aire...)
- La utilización de un polímero sólido como electrolito y el agua destilada para su hidratación elimina prácticamente la corrosión y los problemas de seguridad asociados a los electrolitos líquidos. (Arazana 2005; EG&G Technical Services Inc. 2004)
- No es necesario el uso de metales preciosos, lo cual reduce su precio considerablemente (EG&G Technical Services Inc. 2004)
- A baja potencia (menos de 40 kW), la eficiencia de la pila de combustible es superior al 65% lo cual es superior a la mayoría de sistemas que no utilizan cogeneración.
- El espesor reducido de la MEA permite construir equipos muy compactos.
- Alta resistencia al crossover de gas gracias a la presencia del electrolito sólido (Cid 2014; EG&G Technical Services Inc. 2004)
- Es fácil de ensamblar, de utilizar y de manipular (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Desventajas

- Si se utilizan hidrocarburos como combustible, el aprovechamiento energético de pilas MCFC o SOFC será superior a las PEM (el calor generado se puede aprovechar para llevar a cabo el proceso de reformado y para cogeneración).
- Mal aprovechamiento de la energía residual con la que será muy difícil cogenerar debido a su calidad reducida y solamente se podrá utilizar para aplicaciones sencillas como calentar agua. (Arazana 2005; EG&G Technical Services Inc. 2004)
- Precios más elevados que las AFC en la actualidad.

- Es necesario mantener la humedad alrededor de la membrana para lograr una conductividad protónica elevada. (Cid 2014)
- Alto precio de los catalizadores. (Cid 2014)
- Alta sensibilidad a la contaminación de los electrodos (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Aplicaciones

Los sistemas de tipo PEM son adecuados para aplicaciones que requieran alta velocidad de funcionamiento (transitorios reducidos). En la actualidad, su aplicación se centra principalmente en aplicaciones móviles como puede ser para medios de transporte o para dispositivos de telecomunicación.

Es habitual su presencia en aplicaciones relacionadas con la producción estacionaria, bien sea a pequeña o a gran escala. (EG&G Technical Services Inc. 2004) Esta aplicación es de conveniencia para este tipo de pilas debido a que el calor residual de la celda se puede utilizar para el uso doméstico, lo que aumenta significativamente la eficiencia general. (Geiger S 2003)

En el sector del transporte, este producto está tomando especial importancia debido a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que vierten los motores de combustión interna. (Wang et al. 2011) En la actualidad ya existen autobuses, coches, bicicletas, carretillas y vehículos aéreos no tripulados que disponen de esta tecnología. (Adamson K-A 2009; Haraldsson K, Folkesson A 2005)



Ilustración 11: Aeronave Helios diseñada por la NASA (Noll et al. 2004)

1.3.3. HT-PEMFC (High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Introducción

Las pilas de combustible de membrana de intercambio protónica de alta temperatura (High-temperature PEM o HT-PEM) son pilas PEM que, gracias a su composición y su disposición pueden operar temperaturas comprendidas entre 120 y 180°C. Gracias a esta nueva posibilidad de funcionamiento pueden considerarse como una posible solución frente a los típicos problemas que ofrecen las PEMFC por su propia naturaleza.

En primer lugar, cabe destacar que el aumento de temperatura supone una gran cantidad de ventajas en lo que al tema eléctrico se refiere. Los efectos más significativos se encuentran relacionados con mejoras en la transferencia de cargas y en la reducción de la resistencia eléctrica entre otros fenómenos. En consecuencia, se tendrá como resultado una reacción cinética más efectiva en la celda de combustible (aumento de la tensión de salida y aumento

del rendimiento total de generación debido al incremento de la cinética de reacción de reducción del oxígeno). (Chandan et al. 2013)

No solo es necesario determinar el nivel de temperatura, sino que también se debe garantizar la distribución de la temperatura en toda el área activa de la celda. No será conveniente reducir la temperatura por debajo de los 120°C debido a que debe impedirse la formación de agua líquida dentro del stack para evitar la lixiviación de la composición de electrolito. Este incremento de temperatura permitirá aprovechar en mayor medida el calor residual para operaciones de cogeneración. (Rosli et al. 2017)

Por otra parte, también se encuentra una ventaja a nivel de tolerancia al CO puesto que a temperaturas superiores a 140 °C se eleva hasta en el orden de un 3% o un 5% aproximadamente. (Boaventura et al. 2011; Chandan et al. 2013; Das, Reis, and Berry 2009; Oh and Ju 2015; Pan et al. 2005; Xu et al. 2006)

Otra ventaja fundamental con respecto a las pilas de membrana de intercambio de protones de baja temperatura sería la simplificación del sistema de gestión de agua necesario para que este tipo de pilas funcionen correctamente puesto que con las de alta temperatura ser podrá prescindir de este tipo de sistemas siendo sustituidos por sustancias minerales que no habrá que controlar de forma tan exhaustiva. (Rosli et al. 2017)

Características generales

Tabla 6: Tabla comparativa LT-PEMFC y HT-PEMFC (The proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) 2012)

	LT- PEMFC	HT- PEMFC
Temperatura de operación	80-100 °C	120-200 °C ¹
Electrolito	Base acuosa	Base mineral
Concentración de Pt	0.2 - 0.8 mg/cm ²	1.0 – 2.0 mg/cm ²
Tolerancia CO	< 50 ppm	1 – 5 % volumen
Tolerancia a otras impurezas	Baja	Alta
Densidad de potencia	Alta	Baja
Arranque en frío	Sí	No
Sistema de abastecimiento de agua	Complejo	-
Sistema de refrigeración del conjunto	Necesario	Estrictamente necesario
Tiempo de operación	5.000 – 50.000 h	5.000 – 40.000 h

¹: El sistema de refrigeración en el caso de la pila de alta temperatura es estrictamente necesario para evitar que haya peligro en su utilización o que sufran en demasía los componentes mientras que en la de baja temperatura será necesario para mantener un rendimiento de funcionamiento elevado.

²: Según las instituciones que regulan la normativa energética, las pilas de combustible de alta temperatura deben lograr aproximadamente 40.000 horas de operación para aplicaciones estacionarias y 5.000 horas de operación para aplicaciones móviles. (Collier et al. 2006) Como se puede apreciar las exigencias para aplicaciones estacionarias son superiores en el caso de las PEM debido a que la sollicitación de esta tecnología es inferior por sus condiciones de funcionamiento.

Esquema gráfico y componentes

El conjunto formado por el electrodo y la membrana (MEA) contará con una capa de difusión de gas (GDL), una etapa de catalizador y la membrana propiamente dicha.

Placa bipolar- Su diseño debe garantizar una buena distribución de gas dentro de la celda, una separación determinada entre ánodo y cátodo, una disipación de calor adecuada, buen transporte de corriente... El material del que esté fabricada debería al menos cumplir los requisitos marcados en la **Tabla 7** para que no actuase como un cuello de botella en el funcionamiento del sistema:

Tabla 7: Requisitos mínimos a cumplir por una placa bipolar (Steinberger-Wilckens and Lehnert 2010)

Magnitud	Valor	Unidades
Resistencia a la corrosión	Elevada	-
Temperatura	> 200	°C
Resistencia eléctrica	< 0,01	$\Omega \cdot \text{cm}^2$
Conductividad térmica	> 10	$\text{W} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$
Permeabilidad del gas	< 10	$\text{W} \cdot \text{m} / \text{K}$
Resistencia mecánica	> 4,2	N / cm^2

Proceso de montaje

El proceso de montaje es considerablemente curioso puesto que exige gran precisión de deposición para evitar elevar el valor final del equipo de forma excesiva. Por ello se ha incluido en el Anexo 2.

Materias primas de las celdas

Tabla 8: Materiales HT-PEMFC (Tabla de creación propia)

	Materiales
Ánodo	Base de Teflón con inserciones de grafito
Cátodo	Base de Teflón con inserciones de grafito
Matriz	Polibencimidazol dopado con ácido fosfórico (PBI)
Electrolito	KOH
Catalizador	Pt

Electrodos

El catalizador más usado se basa en platino y sus aleaciones. Lo más habitual es encontrar platino soportado en carbono (Pt/C) se usa como catalizador con una cantidad de aproximadamente $1 \text{ mg} / \text{cm}^2$ (mucho más alta que la cantidad utilizada en pilas de baja temperatura) (Rosli et al. 2017)

Al igual que ocurre en las pilas PEM, los materiales presentes tanto en el cátodo como en el ánodo son los mismos en lo que a base y catalizadores se refiere. (Shamardina et al. 2010)

Electrolito

Este tipo de membranas se caracterizan por ser buenos conductores protónicos que permiten el paso a través de ellas de iones H^+ , pero con la particularidad de ser impermeable al resto

de sustancias y de ser aislantes electrónicos. (Arazana 2005; De Beer et al. 2015; Devanathan 2008)

La implementación de alta temperatura mejora la cinética de la reacción reduciendo la resistencia en la membrana, aumenta la eficiencia, mejora la tolerancia a los contaminantes y requiere un diseño más simple. Sin embargo, el hecho de trabajar a alta temperatura es un parámetro crítico que hay que valorar a la hora de hacer el diseño. (Sun et al. 2015)

Membrana

El material que cobra más importancia en esta tecnología será el que compone la matriz del electrolito. Como se comentó en el desarrollo de las PEM-LT, la infrahidratación o el aumento excesivo de temperatura en las membranas de Nafion podría deteriorar seriamente la estructura de la membrana. Para solventar estos problemas se ha descubierto que una membrana basada en polibenzimidazol (PBI) y dopada con ácido fosfórico (PA) puede operar a temperaturas hasta 200 °C gracias a su buena resistencia termo-mecánica.

En las membranas PBI cuanto mayor sea el dopado con ácido de la membrana mayor será el incremento de la conductividad, sin embargo, este fenómeno reducirá considerablemente la resistencia mecánica de dicha membrana por lo que será necesario alcanzar un equilibrio. (Kerres 2005; Rosli et al. 2017)

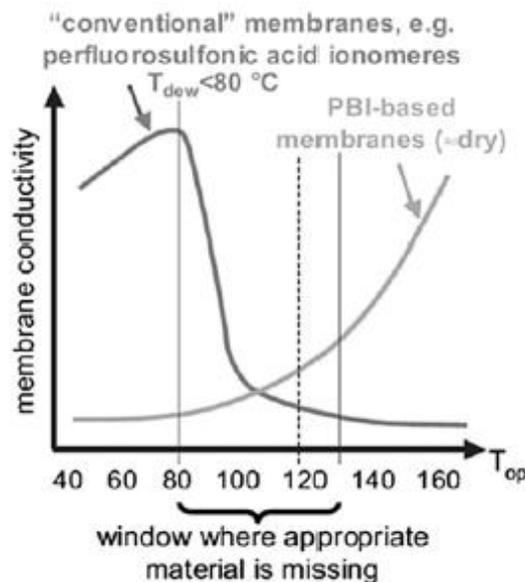


Gráfico 3: Diferencia entre el uso membranas de Nafion o PBI (Chandan et al. 2013; Rosli et al. 2017)

A partir del **Gráfico 3** se puede observar que las membranas Nafion y las de PBI difieren en lo que respecta a prestaciones en función de la temperatura de funcionamiento. Las membranas basadas en PBI serán más adecuadas para trabajar a temperaturas cercanas a los 200°C ya que ofrecerán mejores rendimientos que las convencionales, el problema aparecerá a la hora de arrancar en frío puesto que la baja conductividad protónica y la baja solubilidad del oxígeno dificultarán mucho este proceso. A pesar de ello, será la tecnología recomendada para las HT-PEMFC. (Q. Li et al. 2009; Zhang et al. 2006) Además de esto, como ya se ha comentado anteriormente, los materiales que pueden funcionar a altas temperaturas tienen una mayor tolerancia a la presencia de CO lo cual facilita su puesta en marcha. (Zhang et al. 2006)

El uso de membranas de composites de TiO₂ como material electrolítico mejorará el rendimiento de funcionamiento, la estabilidad de la celda y la conductividad protónica. (Lobato et al. 2011)

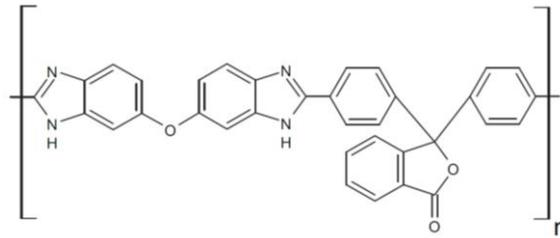


Ilustración 12: Monómero de una membrana PBI (Shamardina et al. 2010)

Se han propuesto un gran número de materiales para llevar a cabo el desarrollo de la membrana compuesta inorgánica-orgánica. El objetivo de conductividad de la membrana PBI será de 10 S/cm para las pilas PEM de alta temperatura (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Alimentación de celdas

Una de las ventajas de la pila PEM de alta temperatura es la mayor tolerancia con respecto a la pureza de los combustibles. Su sensibilidad frente a impurezas (CO) puede llegar a reducirse hasta el punto de soportar hasta un 3% en masa. En el **Gráfico 4** se representa el efecto que tiene el incremento de CO en las corrientes de entrada para una pila PEM de alta temperatura mostrando en las gráficas “huecas” la polarización de la pila o la pérdida de tensión en función de la densidad de corriente y en las “rellenas” la densidad de potencia en función de la densidad de corriente. Se puede apreciar que, a pesar de que el perjuicio es significativo, no afecta tanto como para ser un factor crítico de funcionamiento a diferencia de lo que pasaría en una pila AFC o PEM, por ejemplo. Este fenómeno permitirá abaratar el precio de obtención de los combustibles con respecto a los requerimientos de las PEM de baja temperatura. (Rosli et al. 2017)

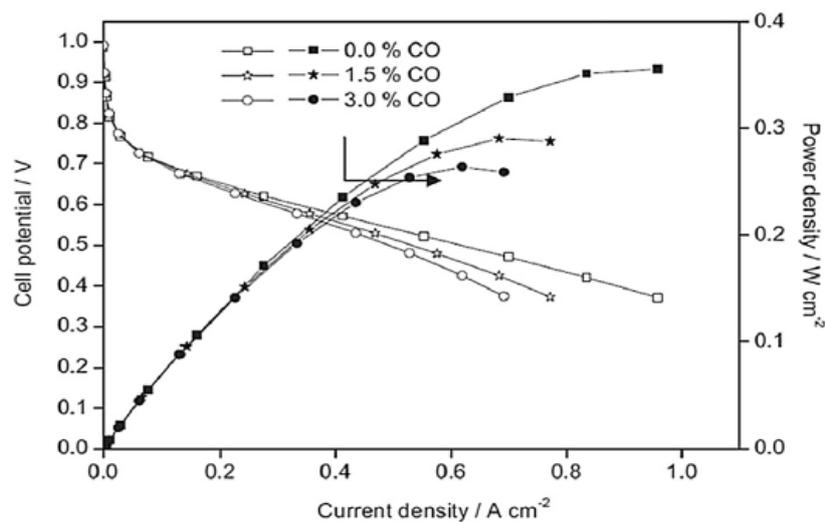


Gráfico 4: Curva de polarización y de densidad de potencia para diferentes concentraciones de CO en la entrada (Wang et al. 2011)

Al igual que en el caso de la pila PEM, se puede usar oxígeno o aire para la reducción del oxidante en el lado del cátodo y el objetivo a largo plazo se sitúa en la utilización de corrientes de aire purificado como alimentación total de la celda. Habrá que tener en cuenta que parte de la vida útil de la pila se sacrificaría por reducir el precio del combustible ya que, a pesar de que se mejora la tolerancia no se corrige por completo. (Arazana 2005; Hilker 2004; Rosli et al. 2017; Wee 2007)

Procesos en la celda

Las reacciones que se llevan a cabo dentro de la pila PEM de alta temperatura son exactamente iguales a las que se producen dentro de una pila PEM teniendo en cuenta que la cinética de reacción será más rápida por la elevación de la temperatura y los cambios en las condiciones de funcionamiento.

Ventajas y aplicaciones

Ventajas

- Tolera mucho mejor los gases contaminantes en la corriente de admisión
- No requiere tener un sistema de abastecimiento de agua continuo

Desventajas

- Precios muy elevados en la actualidad
- La durabilidad de la celda de combustible se verá seriamente comprometida a medida que aumente la temperatura debido a la mayor exigencia mecánica que esto supone.
- Existe el riesgo de que se produzca lixiviación ácida que puede causar daños a la pila y sus componentes.
- Los procedimientos para operar HT-PEMFC son complejos en comparación con el PEM convencional (Rosli et al. 2017)
- En la actualidad se está estudiando para su implementación en vehículos, pero las necesidades de gestión del calor interno evitan que se lleve a cabo a corto plazo. (Rosli et al. 2017)
- Tarda más en arrancar y la reacción requiere mayor energía de activación

Aplicaciones

Suelen utilizarse como generadores estacionarios en suministro de edificios en la actualidad.

1.3.4. SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)

Introducción

Las pilas de óxido sólido son pilas de combustible de alta temperatura caracterizadas por su elevada potencia. Fueron desarrolladas en los años 30 y basan su funcionamiento en la posibilidad del transporte iónico del que disponen algunos óxidos a temperaturas del orden de 600-1000 °C. Estas temperaturas limitan la posibilidad de utilización de diferentes materiales y además aceleran su degradación.

La posibilidad de trabajar a mayor densidad de corriente y sin problemas de corrosión, comparadas con las MCFC, las convierten en una alternativa interesante y como la más prometedora en pilas de combustible de alta temperatura. (Canales-Vázquez and J.C. Ruiz-Morales 2013; Multitek Ingeniería 2013)

Actualmente se encuentran en auge tecnológico y existe una gran cantidad de investigaciones orientadas a su desarrollo y mejora de prestaciones. El reto es encontrar nuevos materiales que presenten alta conductividad iónica a baja temperatura y permitan reducir el espesor de la capa de electrolito. De esta manera se buscaría reducir la temperatura de operación al rango 600-800°C (**IT-SOFC**, "*Intermediate Temperature Solid Oxide Fuel Cell*") (Canales-Vázquez and J.C. Ruiz-Morales 2013; Multitek Ingeniería 2013)

Características generales

Tabla 9: Tabla de características pila SOFC (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017; California Center for Sustainable Energy 2010)

Magnitud	Valor	Unidades
Parámetros generales		
Eficiencia ¹	35-60	%
Vida útil	5.000 – 35.000	h
Tiempo de arranque	<0.5	h
Parámetros físicos		
Temperatura de operación ^{2,3}	600 - 1000	°C
Parámetros químicos		
Combustible	H ²	
Carga (conductor iónico)	O ²⁻	
Parámetros eléctricos		
Potencia de operación	0.005 - 5	MW

¹: Debido a que se trabajan con temperaturas tan elevadas, es muy habitual incluir un sistema de cogeneración con el cual se puede alcanzar un rendimiento hasta del 90%. (California Center for Sustainable Energy 2010)

²: Las elevadas temperaturas de funcionamiento de las pilas SOFC son muy beneficiosas para la cinética de reacción, pero limitan mucho el uso de los materiales capaces de resistir esas condiciones de trabajo.

³: Será necesaria una temperatura superior a los 600°C para conseguir la presencia de una conducción iónica por desplazamiento de iones de oxígeno.

Esquema gráfico y componentes

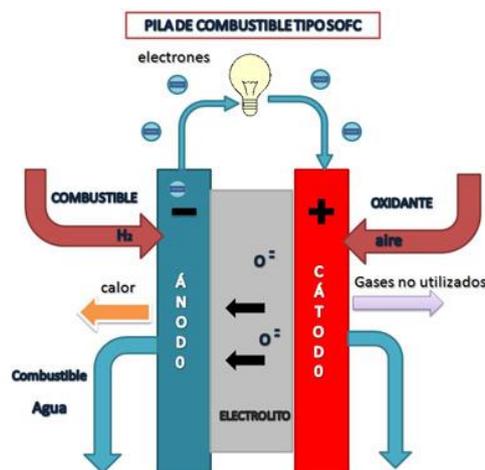


Ilustración 13: Esquema funcionamiento pila SOFC (Energías Renovables 2014)

Tomando como referencia una configuración plana, una celda SOFC está compuesta por:

- **Capa activa catódica:** Composite que proporciona conductividad electrónica e iónica.
- **Electrolito**
- **Capa activa anódica:** Cermet 40% Ni/YSZ.
- **Interconectores:** Buenos conductores electrónicos impermeables a los gases.

Sistemas auxiliares:

- **Quemador:** Precalentador del stack hasta la temperatura de funcionamiento.
- **Sistema de refrigeración:** Para evitar que surjan problemas relacionados con sobrecalentamientos, la pila debe estar refrigerada en todo momento.
- **Circuito eléctrico**

Materias primas de las celdas

Tabla 10: Materiales SOFC (Tabla de creación propia)

Materiales	
Ánodo	Co-ZrO ₂ / Ni-ZrO ₂
Cátodo	LaMnO ₃ + Si
Matriz	-
Electrolito	ZrO ₂ / Y ₂ O ₃
Catalizador	Ánodo: Ni-Y ₂ O ₃

Los materiales detallados en la **Tabla 10** conformarán el sistema de tal manera que habrá dos electrodos porosos formando una especie de sándwich con el electrolito que será sólido.

Electrodos

Las altas temperaturas de trabajo facilitan el proceso de reacción y permiten que no sea necesario utilizar metales nobles como catalizadores. De esta manera, los electrodos suelen estar fabricados mediante óxido de estroncio, lantano, manganeso o composites. Ambos electrodos deben tener una estructura porosa para permitir que los gases puedan llegar al electrolito. (Canales-Vázquez and J.C. Ruiz-Morales 2013; Multitek Ingeniería 2013)

Por lo general el ánodo está compuesto de compuestos cermet basados en CoZrO₂ o NiZrO₂ mientras que el cátodo suele estar constituido por una base de estroncio (Sr) dopado con manganita de lantano (LaMnO₃). (California Center for Sustainable Energy 2010)

Electrolito

Suelen utilizarse electrolitos sólidos cerámicos o metálicos no porosos para permitir que se alcance las elevadas temperaturas requeridas en su interior. (Cid 2014)

Los electrólitos más comunes están basados en ZrO₂, circonita típicamente estabilizada con la adición de un pequeño porcentaje de ytria (Y₂O₃) o de calcio. Son electrolitos no porosos.

Al ser electrolitos sólidos, no necesitan construirse con una configuración laminar, lo cual permitirá hacer disposiciones más adecuadas para el funcionamiento de la pila como puede ser la disposición tubular (véase **Ilustración 14**). Esta disposición favorecerá los problemas de sellado del gas que existen en el momento de diseño en el caso de las laminas. (EG&G Technical Services Inc. 2004; Multitek Ingeniería 2013)

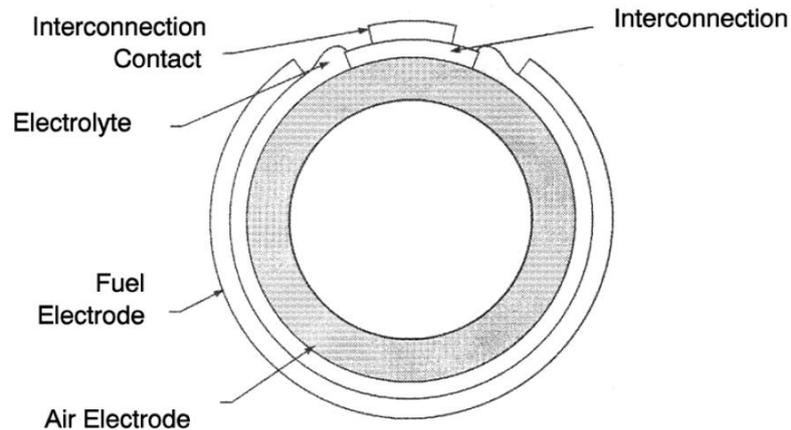


Ilustración 14: Corte transversal de una pila SOFC tubular de la marca Siemens-Westinghouse (EG&G Technical Services Inc. 2004)

A pesar de ello, la configuración más usual es la planar puesto que presenta la ventaja de que la conexión en serie entre pilas es interna y la pérdida de carga es inferior. (Canales-Vázquez and J.C. Ruiz-Morales 2013; Multitek Ingeniería 2013)

Alimentación de celdas

Son pilas de combustible caracterizadas por su elevada resistencia frente a la corrosión. Son capaces de soportar la presencia de sustancias químicas como el azufre o el monóxido de carbono (CO) hasta el punto de que pueden ser utilizados gases procedentes del carbón como combustible. Es una diferencia de gran importancia con respecto a las tecnologías vistas previamente que requerían combustibles de purzas considerablemente altas y costosas.

Además, las elevadas temperaturas de trabajo permiten convertir los combustibles internamente, lo cual reduce el coste asociado que supone añadir un convertidor al sistema. (Canales-Vázquez and J.C. Ruiz-Morales 2013; Multitek Ingeniería 2013)

Los combustibles más habituales serán el hidrógeno (H₂), el metano (CH₄), y el dióxido de carbono (CO₂). Al ser tan permisivas con los combustibles de alimentación, existirá la posibilidad de alimentarlas con gas natural o biogás haciendo así el sistema más respetuoso con el medio ambiente.

Procesos en la celda

El procedimiento químico que se lleva a cabo dentro de la celda será el siguiente: El aire se dispone de tal manera que se encuentre en contacto con el cátodo. Cuando las moléculas de oxígeno entran en contacto con el electrolito adquiere iones O²⁻ del cátodo permitiendo que, mediante difusión por la membrana llegue hasta el ánodo. Una vez allí, los iones de oxígeno reaccionarán con el combustible proporcionando unos productos de reacción entre los que se encuentran agua, calor y una corriente eléctrica que circula desde el ánodo hasta el cátodo. Para tener más claro estos conceptos se han detallado los procesos de transporte en la **ilustración 13**. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Reacciones

Reacción en el ánodo: $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$

Reacción en el cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

Reacción global: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \text{Calor}$:

Reacción de oxidación del monóxido de carbono: $CO + O_2 \rightarrow CO_2 + 2e^-$

Dirección de electrones y transporte de cargas

Existirá una transmisión de un ion negativamente cargado (O^{2-}) desde el cátodo hasta el ánodo a través del electrolito que provocará un movimiento de los electrones por el circuito eléctrico conectado con las placas bipolares.

Ventajas y aplicaciones

Ventajas

- Alta temperatura de trabajo:
 - Energía térmica de elevada calidad para realizar cogeneración
 - Cinética de reacción muy rápida
- Los catalizadores son relativamente baratos o inexistentes (por las altas temperaturas)
- Baja exigencia en la alimentación de combustibles:
 - Posibilidad de convertir los combustibles internamente
 - Lejos de ser un contaminante, el CO se puede utilizar como combustible
 - No hay requerimientos relacionados con el CO_2
- Densidades de corriente elevadas.
- Apenas tienen problemas de corrosión química al no haber electrolito líquido
- Impermeabilidad frente al crossover de gas (Electrolito sólido)
- Como el electrolito es sólido se pueden ejecutar diferentes configuraciones o morfologías del mismo (tubular, planar...)

Desventajas

- Vida útil reducida por las altas temperaturas de trabajo
- Acepta hidrocarburos reformados, pero no tolera el azufre
- Arranque lento y necesidad de precalentadores (alta temperatura)
- Necesidad de sobreprotección para proteger al personal
- Aislantes muy acusados para evitar la pérdida de calor
- Materiales con elevados puntos de fusión y con alta resistencia a la temperatura (caros)

Aplicaciones

- Plantas de generación estáticas
- Generación de energía de alta potencia hasta la escala de MW
- Posibilidad de uso en vehículos (probado en camiones, submarinos...)

- Unidades portátiles experimentales

1.3.5. PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cells)

Introducción

La pila de combustible de ácido fosfórico es la tecnología más madura en cuanto a desarrollo y comercialización se refiere ya que tuvo un crecimiento considerable hace unos años al creerse que era la única tecnología que podía proporcionar una tolerancia adecuada a la utilización de combustibles provenientes de hidrocarburos reformados. De esta manera, su implantación sería más fácil a corto plazo, pero en la actualidad se ha demostrado que no es así ya que el desarrollo del resto de tecnologías ha conseguido desbancarla.

Al igual que en las PEM, el subproducto del proceso es agua, la cual se elimina con el oxidante en el cátodo (aire u oxígeno). El procedimiento de eliminación de esta agua requiere que el sistema opere a temperaturas cercanas a los 190 °C. A temperaturas menores, el agua se disolvería en el electrolito y no se podría eliminar. A temperaturas mayores, el ácido fosfórico se descompondría.

El uso de ácido concentrado minimiza la presión de vapor y en consecuencia, el sistema de gestión de agua dentro de la pila pasa a ser sencillo.

El proceso de refrigeración suele ser mixto con un sistema de refrigeración por agua independiente y una refrigeración por paso de aire intrínseca al sistema de alimentación (EG&G Technical Services Inc. 2004)

La evolución futura de esta tecnología es incierta debido principalmente a que su eficacia eléctrica es inferior a las otras células de combustible. Sus posibilidades aumentarían con el desarrollo del electrocatalizador que pudiera reducir los costes de producción.

Características generales

Tabla 11: Tabla de características pila PAFC (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017; EG&G Technical Services Inc. 2004)

Magnitud	Valor	Unidades
Parámetros generales		
Eficiencia ¹	35 - 45	%
Vida útil	30.000 - 40.000	h
Parámetros físicos		
Presión de operación	1 - 8	atm
Temperatura de operación ²	150 - 220	°C
Parámetros químicos		
Combustible	H ₂	
Agente oxidante	O ₂	
Carga (conductor iónico)	H ⁺	
Parámetros eléctricos		
Densidad de corriente	200 - 650	mA/cm ²
Potencia de operación	0,250 - 4	MW
Densidad de potencia	0,13 - 0.35	W/cm ²

¹: Debido a que entre el 37 y el 41% de la energía obtenida es térmica, los rendimientos serán bajos con respecto a otras tecnologías. Si se utiliza el calor residual para calentar agua puede incrementarse la eficiencia hasta valores alrededor del 70%.

?: Por debajo de 150°C el ácido fosfórico tiende a ser un conductor iónico pobre y se produce un envenenamiento de los catalizadores del ánodo con CO, mientras que si se exceden los 210°C (aprox.) se produce un cambio de fase en el ácido que lo inhabilita como electrolito. (California Center for Sustainable Energy 2010)

Esquema gráfico y componentes

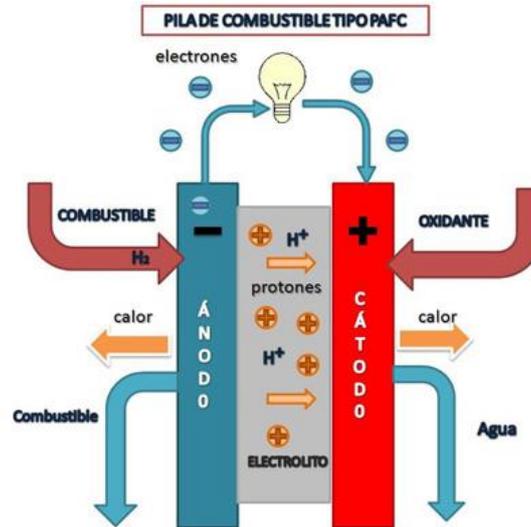


Ilustración 15: Esquema funcionamiento pila PAFC (Energías Renovables 2014)

Materias primas de las celdas

Tabla 12: Materiales PAFC (Tabla de creación propia)

Materiales	
Ánodo	PTFE-Pt/C
Cátodo	PTFE-Pt/C
Matriz	PTFE-SiC
Electrolito	H_3PO_4
Catalizador	Pt

Electrodos

Los electrodos están fabricados sobre una base de teflón (30-50% en peso) y grafito poroso (porosidad de un 90% aproximadamente) cuyo recubrimiento se lleva a cabo con una capa de platino o aleaciones de platino a modo de catalizador. El elevado carácter poroso de dicha estructura permitirá el paso de los flujos de alimentación. (Cid 2014)

La carga de catalizador de los electrodos ha pasado de ser de aproximadamente 9 mg Pt/cm^2 en los años 60 a unos 0.1 mgPt/cm^2 en el caso del cátodo y unos 0.5 mgPt/cm^2 en el caso del ánodo en la actualidad. Esta mejora ha venido motivada por la inclusión de aleaciones de Ni/Pt que permiten mejorar considerablemente la conductividad del conjunto permitiendo reducir la concentración de Platino en los electrodos. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Electrolito

Utiliza como soporte una matriz de carburo de silicio (SiC) con aglomeración de teflón saturada con ácido fosfórico (H₃PO₄) que puede ser puro o en una concentración muy elevada.

La estructura porosa de esta matriz evita fugas de electrolito por efecto capilar, sin embargo, puede que haya alguna pérdida de ácido por evaporación. Por este motivo, cada cierto número de horas de operación habrá que comprobar el nivel de electrolito.

Alimentación de celdas

La presurización de las corrientes de entrada aumenta considerablemente el rendimiento del sistema, pero la implementación de un sistema de presurización suele ser muy compleja y además induce corrosión a los elementos del sistema debido a la producción de vapor de H₃PO₄ ocasionado por el aumento de presión. Por este motivo, lo más habitual es encontrar equipos de presurización en instalaciones de alta potencia, estacionarias y que van a trabajar gran número de horas ya que será los únicos en los que compense la instalación de este tipo de complementos. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Habrà que prestar especial atención a la alimentación de las pilas cuando ésta no se haga con hidrógeno puro puesto que los combustibles con altos porcentajes de hidrógeno pueden contar con niveles de sustancias contaminantes superiores al límite de tolerancia del ánodo. De particular preocupación para este tipo de tecnologías serán el CO, el COS y el H₂S, sustancias que solamente serán admitidas por el ánodo si las concentraciones se encuentran por debajo de 1% en volumen en el caso del CO, por debajo de 50 ppmv de COS y por debajo de 20 ppmv de H₂S. Para solventar este tipo de problemas es muy habitual contar con equipos de pretratamiento de combustible que reduzcan la concentración de estos contaminantes. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Es muy habitual encontrar un sistema de reformado de gas natural (predominantemente metano) con el cual se obtenga hidrógeno y dióxido de carbono para la alimentación de la pila. El problema que aparece en el uso de estos equipos radica en el aumento del coste, la complejidad y el tamaño del sistema de pila de combustible. (James Larminie and Dicks 2003)

Procesos en la celda

Reacciones

Reacción de ánodo: $H_2(g) \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Reacción de cátodo: $\frac{1}{2}O_2(g) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Reacción general en la celda: $H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O + \text{Calor} + \text{Electricidad}$

Dirección de electrones y transporte de cargas

En lo que a transporte de cargas se refiere, los objetivos se han centrado en garantizar una estabilidad de corriente en el punto de funcionamiento y en mejorar las densidades de corriente en el punto de operación. Además de esto, este tipo de pilas por su configuración

tienen una gran cantidad de pérdidas de rendimiento directamente relacionadas con el tiempo de funcionamiento. La reducción de tensión útil de cada celda será de aproximadamente 2 mV/1000 h que, aunque parezca una cifra insignificante será considerablemente significativa si se tiene en cuenta que se realiza una conexión en serie de las pilas para conseguir una tensión de trabajo superior. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Ventajas

- Pueden trabajar durante largos periodos sin apenas necesitar mantenimiento.
- Sin riesgo de inundación interior gracias al uso de ácido fosfórico (minimiza la presión de vapor del agua).
- Menos necesidad de utilización de combustibles puros debido a que el CO₂ no reacciona con el electrolito ácido y a que permite hasta un 1% de CO diluido en la corriente de alimentación.
- La temperatura de funcionamiento le permite mayor flexibilidad en cuanto al uso de la energía residual para llevar a cabo una cogeneración, por ejemplo.

Desventajas

- La baja velocidad de reacción en la parte del cátodo con respecto a la AFC requiere el uso de gran cantidad de catalizador (Pt) lo cual aumenta su coste considerablemente. (EG&G Technical Services Inc. 2004)
- Requiere un procesamiento de combustible considerablemente complejo
- Elevada corrosividad derivada de la naturaleza corrosiva del ácido fosfórico. Esto deriva al uso de materiales caros que sean resistentes al ataque químico.(EG&G Technical Services Inc. 2004)

Aplicaciones

- Generación de energía estacionaria.
- En los primeros años de la aplicación de pilas de combustible se usaba para alimentar vehículos pesados como autobuses urbanos.

1.3.6. MCFC (Molten Carbonates Fuel Cells)

Introducción

La pila de combustible de carbonatos fundidos (MCFC, del inglés Molten Carbonate Fuel Cell) comenzó a desarrollarse durante la década de los años 60, en la cual se buscaba un sistema de generación que trabajase directamente con combustibles utilizados hasta ese momento como el carbón. Pronto se pudo comprobar que el funcionamiento con este tipo de combustibles pesados era imposible, pero en la actualidad se ha podido demostrar que puede ser posible su funcionamiento si se alimenta con GLP. (Arazana 2005)

Su funcionamiento se basa en la conductividad iónica de la que dispone las sales a elevadas temperaturas permitiendo así utilizar materiales de coste reducido obteniendo conductividades similares a las de metales nobles trabajando a temperaturas normales.

Características generales

Tabla 13: Tabla de características pila MCFC (Arazana 2005; Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017; EG&G Technical Services Inc. 2004)

Magnitud	Valor	Unidades
Parámetros generales		
Eficiencia ¹	45 – 50	%
Vida útil	40.000	h
Tiempo de arranque	<0.4	h
Parámetros físicos		
Temperatura de operación ^{2,3}	600 – 1300	°C
Parámetros químicos		
Combustible	H ₂ , CH ₄ , CO ₂	
Agente oxidante	O ₂ puro, aire	
Carga (conductor iónico)	CO ₃ ²⁻	
Parámetros eléctricos		
Tensión de celda	0,750 – 0,9	V
Densidad de corriente	100 - 200	mA/cm ²
Potencia de operación	1 - 5	Mw
Densidad de potencia	10 – 150 (EG&G Technical Services Inc. 2004)	mW/cm ²

¹: La eficiencia puede aumentarse hasta el 80-85 % si se aplica cogeneración al conjunto. (Canales-Vázquez and J.C. Ruiz-Morales 2013)

²: Su alta temperatura de funcionamiento permite reformar internamente combustibles tales como el gas natural o el biogás. (Energías Renovables 2014)

³: Serán necesarias temperaturas tan elevadas para conseguir la conductividad iónica óptima del electrolito. En función de los electrolitos utilizados, la pila podrá funcionar entre 600 y 700 °C o entre los 1100 y los 1300°C.

Esquema gráfico y componentes

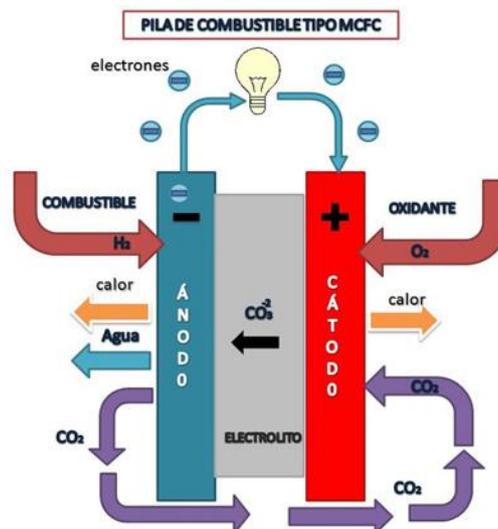


Ilustración 16: Esquema funcionamiento pila MCFC (Energías Renovables 2014)

Materias primas de las celdas

Tabla 14: Materiales de los electrodos y electrolitos (Tabla de creación propia)

Materiales	
Ánodo	Ni-Cr/Ni-Al/Ni-Al-Cr (poroso)
Cátodo	NiO/MgO/ Li (poroso)
Matriz	LiAlO ₂
Electrolito	Li ₂ CO / K ₂ CO ₃ / Na ₂ CO ₃
Catalizador	-

Electrodos

Por lo general, los electrodos siempre tienen una base de polvo de níquel sinterizado. En el caso de ánodo se utilizan aleaciones con cromo o aluminio para prevenir las aglomeraciones mientras que en el cátodo se utilizan óxidos de níquel con pequeñas adiciones de litio. A pesar de que es necesaria la presencia de Cr, los investigadores están buscando el camino para reducir su cantidad del 8% actual al 2% aproximadamente con el objetivo de reducir en la medida de lo posible las pérdidas en el electrolito. En ambos casos serán materiales porosos que permitan el paso de los gases de alimentación. (EG&G Technical Services Inc. 2004; James Larminie and Dicks 2003)

A la temperatura que opera una pila de combustible de carbonatos fundidos no se precisan catalizadores de metales nobles.

Electrolito

En el caso de este tipo de pilas la elección del material de la matriz contenedora será mucho más complejo debido a que tendrá que soportar las elevadas temperaturas que lo caracterizan. Como consecuencia de esto, el teflón queda descartado y se utilizará como sustituto una matriz cerámica porosa e inerte normalmente compuesta por LiAlO₂. (Arazana 2005)

La matriz tendrá un espesor comprendido entre 0.25 y 0.5 mm aproximadamente (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Por otro lado, como electrolito se utilizará una mezcla de sales de carbonato de litio, carbonato de sodio o carbonato de potasio fundido como electrolito dispersa en la matriz anteriormente comentada.

A la temperatura de operación (unos 650 °C), dicha sal se encuentra en fase líquida y se comporta como un buen conductor iónico que mejorará el intercambio de cargas entre los electrodos. (Arazana 2005)

El control sobre la distribución óptima del electrolito de carbonato fundido en los diferentes componentes celulares será fundamental para lograr un alto rendimiento y resistencia de los materiales debido a que será un aspecto a tener en cuenta para evitar procesos de corrosión, migración potenciada, fuga de sal o vaporización de sal.

Alimentación de celdas

Las elevadas temperaturas de operación de este tipo de pilas le permiten operar con una gran variedad de combustibles directamente ya que se lleva a cabo un proceso de reformado interno. Los combustibles pueden ser hidrógeno, metano, alcohol, gas natural...

Hace unos años se intentó desarrollar una pila MCFC que se alimentase con gas natural o gases obtenidos del carbón para abastecer energía a plantas industriales o para usarlo en aplicaciones militares, pero no continuó su desarrollo debido a las dificultades que presentaba la ejecución del proyecto. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Es necesario tener CO₂ en la entrada de aire del cátodo para que funcione correctamente, por lo que generalmente se recicla de la salida del ánodo, pero también hay otros métodos como la producción de CO₂ quemando los gases de escape o el suministro a partir de una fuente alternativa. En la **Ilustración 16** se muestra el detalle de esta corriente auxiliar (EG&G Technical Services Inc. 2004)

A diferencia de otras tecnologías, la contaminación por CO de los electrodos no existe, hasta el punto de que incluso puede utilizarse como combustible.

Procesos en la celda

Reacciones

Reacción de ánodo: $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow CO_2 + H_2O + 2e^-$:

Reacción de cátodo: $\frac{1}{2}O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$

Reacción general en la celda: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 + CO_2$ (cátodo) $\rightarrow CO_2$ (ánodo) + H_2O :

La reacción anódica se produce entre el H⁺ y los iones CO₃⁻ del electrolito dando como productos CO₂ y H₂O además de la liberación de e⁻. Por otro lado, la reacción en el cátodo combina el O₂, el CO₂ y los electrones que han circulado por el circuito externo, produciendo otra vez iones carbonato (CO₃⁻) que se unen al electrolito de nuevo.

Teniendo en cuenta las reacciones anteriores se puede apreciar que existe una necesidad de CO₂ en el flujo oxidante, el CO₂ generado en el ánodo se conecta directamente con la entrada de aire al cátodo. Antes de esto, cualquier hidrógeno residual no consumido del combustible de entrada debe ser quemado o reutilizado para evitar problemas de combustión en el lado del cátodo. En la actualidad se está estudiando la posibilidad de incorporar membranas selectivas para eliminar el hidrógeno del flujo de aire recirculado evitando así desperdiciarlo.

El paso de CO₂ servirá a modo de precalentamiento elevando considerablemente la eficiencia de la celda. (California Center for Sustainable Energy 2010)

Transporte de cargas y dirección de electrones

En este tipo de pilas es muy importante el abastecimiento de CO₂ al cátodo. Tanto es así que la presión parcial del reactivo supondrá una aportación considerable a la tensión de funcionamiento de la pila en función de la siguiente ecuación:

Ecuación 1: Tensión de la pila en función de las presiones parciales y la presión de alimentación del CO₂

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{P_{CO_2,c}}{P_{CO_2,a}} \right)$$

Gracias a las mejoras introducidas en los elementos principales de la pila se ha conseguido aumentar las densidades de potencia desde 10 mW/cm² hasta los 200 mW/cm² que se están consiguiendo aproximadamente en la actualidad.

Ventajas

- **Densidad de corriente elevada**- En comparación con las pilas PAFC, una MCFC es capaz de operar a tensiones más altas que para la misma densidad de corriente. Como consecuencia el equipo será más pequeño y más barato para suministrando la misma potencia.
- **Bajo coste de los catalizadores**- No requieren metales preciosos gracias a las altas temperaturas de operación.
- **Posibilidad de alimentación de alimentación con H₂ de baja pureza**- Es posible incluso trabajar con CO₂ sin que haya problemas para el cátodo
- **Posibilidad de cogeneración**- Gracias a la elevada temperatura de funcionamiento la energía residual es fácilmente aprovechable.
- Es posible el reformado de hidrocarburos en su interior.

Desventajas

- **Corrosión del cátodo**- Factor sensible que reduce la vida útil de la pila.
- **Temperatura constante**- La reducción de temperatura incrementa la resistencia iónica y eléctrica de los electrodos. Una caída de 30 °C reduce la tensión de salida en un 15% aproximadamente.
- **Grandes flujos de aire**- Se necesitan flujos de aire de refrigeración muy grandes capaces de evacuar el calor proveniente del cátodo para mantener temperaturas tan elevadas constantes.
- **Arranques muy lentos**
- Es prácticamente necesario que sea una instalación estática debido a que las condiciones de funcionamiento son muy exigentes.
- Materiales constructivos más caros para soportar las altas temperaturas
- Las elevadas resistencias al contacto y la resistencia de cátodo limitan las densidades de potencia.

Aplicaciones

Es habitual su uso en instalaciones de producción de energía estacionaria, de tamaño medio o de gran tamaño debido a su elevada eficiencia. (Energías Renovables 2014)

También se han utilizado en aplicaciones relacionadas con embarcaciones marinas y submarinas debido a que la cogeneración se puede aprovechar para otras aplicaciones.

1.3.7. DMFC (Direct Methanol Fuel Cells/ Pilas de combustible de metanol directo)

Introducción

Las pilas o celdas de metanol directo (o DMFC por Direct-Methanol Fuel Cells) son un tipo de pilas PEM que usan una disolución acuosa de metanol sobre el ánodo como combustible (no hidrógeno), lo que elimina la necesidad de que el combustible pase por un reformador.

La principal desventaja frente a las demás tecnologías es que, a pesar de que el metanol contiene mayor energía específica que el H_2 , el rendimiento es mucho menor debido a las bajas cinéticas de reacción tanto anódicas como catódicas. (Cid 2014)

Características generales

Tabla 15: Tabla de características pila DMFC (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017)

Magnitud	Valor	Unidades
Parámetros generales		
Eficiencia	25 - 60	%
Tiempo de arranque	<0.1	h
Parámetros físicos		
Presión de operación	Atmosférica	Pa
Temperatura de operación	20 - 100	°C
Parámetros químicos		
Combustible	Metanol (CH_3OH)	
Carga (conductor iónico)	H^+	
Parámetros eléctricos		
Tensión de celda	0.7-0.9	V
Potencia de operación	0 – 250	kW
Densidad de potencia	20 - 132 (a 90°C) (Cid 2014)	mW/cm ²
Voltaje circuito cerrado	0.9	V

Esquema gráfico y componentes

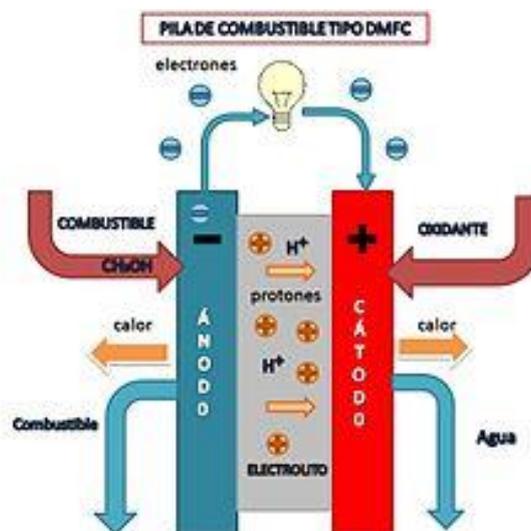


Ilustración 17: Esquema gráfico pila DMFC (Energías Renovables 2014)

Materias primas de las celdas

Tabla 16: Materiales de los electrodos y electrolitos (Tabla de creación propia)

Materiales	
Ánodo	C
Cátodo	C Mo ₂ Ru ₅ S ₅
Matriz	-
Electrolito	Polímero sólido perfluosulfonado
Catalizador	Pt / PtRu

Electrolito

En este caso, los catalizadores continúan teniendo alto contenido en Pt, pero en el lado anódico se utiliza tradicionalmente un catalizador basado en una aleación PtRu por tener una mayor tolerancia a los intermedios de la reacción de la oxidación del metanol, que actúan como venenos del catalizador. (Cid 2014)

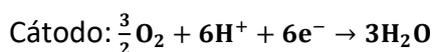
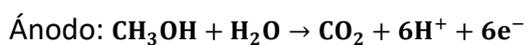
Alimentación de celdas

La mayor ventaja se encuentra en el combustible utilizado, ya que presenta una gran facilidad de almacenaje y transporte con respecto al H₂ y puede obtenerse a partir de procesos biológicos. Las aplicaciones habituales de estas pilas de combustible son en pequeños dispositivos portátiles, por la facilidad de recarga y almacenamiento de combustible.

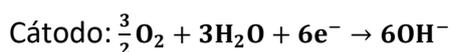
Procesos en la celda

Reacciones

Medio ácido



Medio alcalino



Dirección de electrones y transporte de cargas

Ventajas

- Son buenas para aplicaciones que requieren bajas potencias y que están funcionando de forma estacionaria durante largos periodos de tiempo.
- Facilidad de almacenaje y transporte de combustible

- Posibilidad de obtención del combustible mediante procesos biológicos

Desventajas

- Arranque muy lento
- Potencias relativamente bajas
- Preferible para operaciones estáticas

Aplicaciones

- Su comportamiento y sus características mecánicas les permite ser usadas en medios de transporte como coches, camiones, barcos... (Energías Renovables 2014; James Larminie and Dicks 2003)
- Se ven como la tecnología apropiada para alimentar dispositivos portátiles como pueden ser pequeños ordenadores, cámaras portátiles... (EG&G Technical Services Inc. 2004)

2. CAPÍTULO 2- SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.1. Introducción

Tras haber hecho un estudio exhaustivo de las diferentes tecnologías disponibles en la actualidad, se ha llegado a la conclusión de que las alternativas más capaces para aplicaciones de transporte son la pila alcalina (AFC) y la pila de intercambio protónico (PEMFC) tanto de baja temperatura (LT) como de alta (HT). A lo largo de este apartado se mostrarán los motivos por los cuales se ha elegido como mejor alternativa la PEM de baja temperatura (LT) y los motivos que han llevado al rechazo de las demás tecnologías.

Las tecnologías que no aparecen en esta selección se han rechazado directamente debido a que sus características físicas o sus requerimientos tecnológicos no son los más adecuados para su implementación en aplicaciones móviles o sencillamente porque son tecnologías que en la actualidad no permiten ofrecer prestaciones similares. Los principales problemas que presentan para utilizarlos en aplicaciones móviles son las altas temperaturas, la necesidad de sistemas auxiliares o el arranque lento en frío entre otros.

2.2. Tabla comparativa

Tecnología	Ventajas	Desventajas
PEMFC	<ul style="list-style-type: none"> • Baja temperatura. • Baja tensión de activación: Arranques rápidos. • Alta densidad de potencia • Respuesta rápida ante perturbaciones. • Baja exigencia de alimentación. • Baja corrosión. • Materiales de bajo coste. • Alta eficiencia en bajas potencias. • Equipos compactos. • Único líquido utilizado es agua: baja peligrosidad. • Fácil de ensamblar, utilizar y manipular. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mal aprovechamiento de la energía residual: Baja eficiencia. • Coste más elevado que las AFC en la actualidad. • Sistema de gestión de agua estrictamente necesario. • Alto precio de los catalizadores. • Alta sensibilidad a la contaminación de los electrodos: hidrógeno de alta pureza. • Problemas de corrosión derivados de la alta alcalinidad con la que se trabaja.
AFC	<ul style="list-style-type: none"> • Electrolito económico y posibilidades muy variadas • No utiliza placas bipolares: reducción de tamaño • Menor complejidad química • Gran variedad de catalizadores 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de usar hidrógeno de alta calidad • Alta corrosión derivados de la alta alcalinidad de las sustancias utilizadas

	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada reactividad sin utilizar metales nobles (bajo precio) • Alto rendimiento si se trabaja con combustibles puros 	
HT-PEMFC	<ul style="list-style-type: none"> • Alta tolerancia a los gases contaminantes en la admisión. • Sin necesidad de un sistema de hidratación de membrana. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costes muy elevados en la actualidad. • Menor durabilidad • Procedimientos de operación complejos. • Gestión de calor residual • Mayor tiempo de arranque: mayor energía de activación requerida.

2.2.1. PEM-LT

Es la pila más completa para aplicaciones portátiles puesto que sus características físicas le permiten construir equipos muy compactos, poco pesados, con mantenimiento reducido y elevada eficiencia. Entre las ventajas más destacadas también se encuentra el uso de sustancias no corrosivas y no peligrosas, la respuesta rápida ante perturbaciones y el arranque prácticamente instantáneo gracias a la reducida energía de activación de las reacciones.

Uno de los principales inconvenientes que presenta esta tecnología es el subsistema de hidratación de la membrana. Esto es así porque requiere un diseño de alta complejidad tanto en el aspecto de gestión de la hidratación como en lo que a compacidad se refiere. Por otro lado, como todas las tecnologías de baja temperatura, no podrá acoplarse a un sistema de cogeneración lo cual impedirá aprovechar al máximo la energía residual.

Si se utilizan hidrocarburos como combustible, el aprovechamiento energético de pilas MCFC o SOFC será superior a las PEM (el calor generado se puede aprovechar para llevar a cabo el proceso de reformado y para cogeneración), pero en el caso de utilizar hidrógeno, las cinéticas de reacción de las PEM son más favorables en conjunto que en otras tecnologías. Este último aspecto no incumbe a este proyecto puesto que el objetivo está específicamente orientado al uso de hidrógeno como combustible.

2.2.2. AFC

Es una pila de baja temperatura, factor beneficioso para su uso en cualquier tipo de aplicación portátil. Tiene arranques y adaptación a las perturbaciones relativamente rápidos y su tensión de activación es más reducida que la que caracteriza a las PEM. Otra característica a su favor viene dada por su madurez y sencillez tecnológica, las cuales harán que sea la de menor coste de producción.

Entre las desventajas que han llevado a rechazarla se pueden encontrar que el hecho de tener un electrolito líquido aumenta la probabilidad de dar lugar a situaciones de fugas y pérdidas. Dichas fugas pueden estar derivadas de un impacto o simplemente como producto de la corrosión, que también es más acusada que en el caso de las pilas PEM ya que utiliza como electrolito sustancias fuertemente básicas.

En cuanto a alimentación, será necesario usar hidrógeno muy puro como combustible para evitar problemas de envenenamiento y la consecuente reducción de rendimiento.

2.2.3. PEM-HT

Es la tecnología más moderna de las aquí planteadas, así como en el ámbito general. Por este motivo es la más desconocida, aunque no por ello menos prometedora. Cuenta con buenos rendimientos de funcionamiento y, al igual que la pila PEM cuenta con una membrana con materiales que precisan bajo mantenimiento y elevadas conductividades iónicas que permitirán mejorar el funcionamiento del sistema. Es la única tecnología de alta temperatura (más de 100°C) de las reflejadas en la sección de alternativas. A pesar de que se ha detallado anteriormente que las pilas de alta temperatura no son especialmente adecuadas para aplicaciones portátiles, ésta se ha incluido porque, a diferencia de las SOFC o MCFC que llegan a alcanzar temperaturas superiores a 500 °C de forma continuada, las PEM-HT apenas exceden los 100 °C, una temperatura relativamente fácil de aislar y de trabajar. A día de hoy sería un error llevar a cabo su implementación en el sector del transporte ya que solamente aventajaría a la PEM de baja temperatura en aspectos como la mejor tolerancia a impurezas a la entrada o que está exenta de utilizar un sistema de hidratación, pero no serían motivos suficientes para pagar el sobre coste que le diferencia con respecto a una PEM convencional.

Por otro lado, en el apartado de inconvenientes nos encontramos con temperaturas mayores, en consecuencia, mayores tiempos de arranque, mayor energía de activación y menor durabilidad derivada de las sollicitaciones mecánicas a las que está expuesta. Por otro lado, también aparece el riesgo que sufre de que se produzca lixiviación ácida que puede causar daños graves en la pila y en sus componentes.

2.3. Conclusiones

Tras haber contrastado toda la información anterior, se ha decidido que la opción más adecuada para su uso en las aplicaciones para las que se ha destinado este proyecto es la pila de intercambio protónica de baja temperatura (PEMFC-LT). Entre sus características más destacadas que han llevado a tomar esta decisión se encuentran:

- Baja temperatura de funcionamiento
- Bajo riesgo de utilización
- Arranque rápido
- Alta densidad de potencia (equipos compactos)

Estas cuatro características son de gran importancia para una aplicación de transporte puesto que, si solo se va a utilizar este sistema como abastecimiento de energía en el vehículo, se necesita que tenga un mantenimiento bajo y una tasa de potencia/peso elevada.

Por lo general, las pilas que trabajan a alta temperatura podrían ser potencialmente válidas para este tipo de aplicaciones si no existiesen problemas en el momento de realizar la implementación de un sistema cogenerativo o de aprovechamiento de energía residual o problemas relacionados con la necesidad de instalación de grandes aislamientos que penalizan seriamente el tamaño de los equipos. En un futuro cercano, es muy posible que la tecnología PEM-HT adelante a la PEM-LT en lo que a aspectos positivos se refiere y se instaure como opción por antonomasia ya que, por sus características, es la más adecuada para este

uso. Ahora bien, la tecnología actual es deficiente y por ello no se ha elegido como preferida para llevar a cabo este proyecto.

Por su parte, la pila alcalina contará con serias carencias en cuanto a fiabilidad se refiere y podría llegar a ser competitiva si se avanzase con el diseño de las membranas tipo AEM (De intercambio de aniones) que sustituirían a los electrolitos de KOH acuosos con la intención de reducir la probabilidad de corrosión del sistema, la reducción de temperatura de trabajo y la alta permisividad en las corrientes de alimentación. A día de hoy el grado de desarrollo en pilas de combustible es muy inferior al resto de tecnologías.

3. CAPÍTULO 3- DISEÑO DE EQUIPO

3.1. Componentes del sistema

Introducción

Actualmente, un sistema de pila de combustible requiere la integración de un gran número de sistemas auxiliares que favorezcan la reacción electroquímica ya que su eficiencia dependerá en gran medida de las condiciones de operación. A continuación, se hará un breve resumen de cada uno de estos componentes y, en los casos que sea necesario, se llevarán a cabo los cálculos de cada subsistema. En la **Ilustración 18** se puede ver cómo se realizaría la implantación dentro del vehículo.

Un sistema de pila de hidrógeno básico contiene:

1. Depósitos de almacenamiento de combustible
2. Unidad de control
3. Celdas de potencia
4. Baterías de acumulación

Los sistemas auxiliares que se van a incluir en este diseño serán los siguientes:

5. Sistema de precalentamiento
6. Sistema de gestión de hidratación de la membrana
7. Intercambiador sistema de refrigeración de la celda
8. Intercambiador sistema de refrigeración del sistema de propulsión
9. Sistema de compresión de aire a la entrada
10. Sistema de gestión de subproductos a la salida
11. Soporte de celdas
12. Batería de condensadores
13. Motores

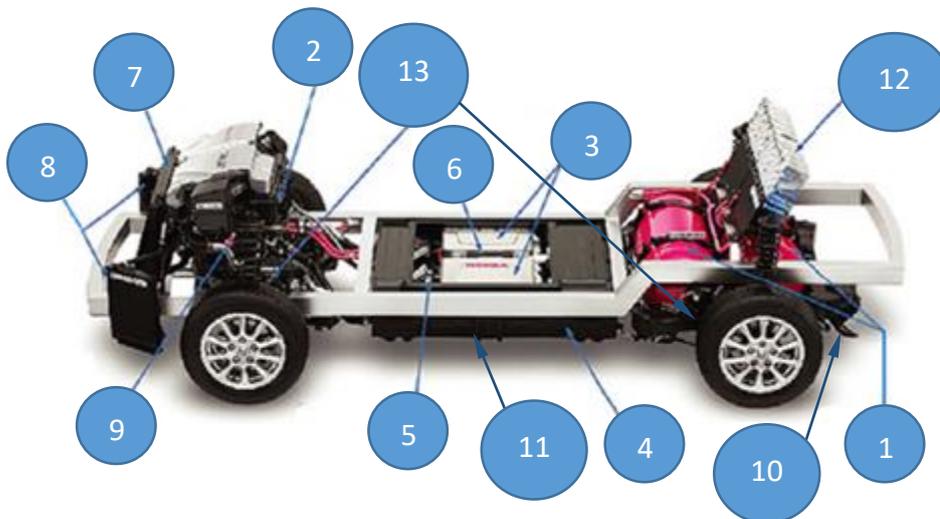


Ilustración 18: Esquema de sistemas auxiliares necesarios en un tren de potencia del Honda FCX (Wang et al. 2011)

Esquema de funcionamiento

En la **Ilustración 19** se planteará un esquema simplificado de corrientes del sistema (de todo tipo) mediante el cual se pretende guiar al lector durante los siguientes apartados explicativos en los que aparecerán diferentes sistemas auxiliares a este que se han presentado en el apartado anterior.

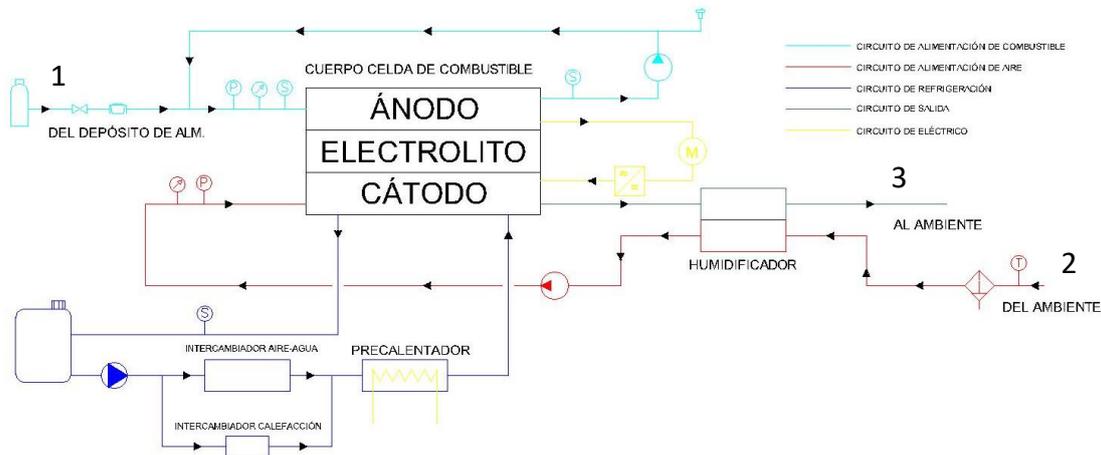


Ilustración 19: Esquema general simplificado (Esquema de creación propia)

Corrientes que conectan el sistema con el exterior:

1. Corriente de admisión de combustible \dot{m}_{H_2}
2. Corriente de admisión de aire \dot{m}_{ai}
3. Corriente de salida \dot{m}_{exit}

Una vez vistos los esquemas y los subsistemas que conforman el sistema de pila de hidrógeno completo se muestra una imagen de conjunto en la **Ilustración 20** en la que se pueden ver todos los elementos integrados de tal manera que se intenta ocupar el menor espacio posible.

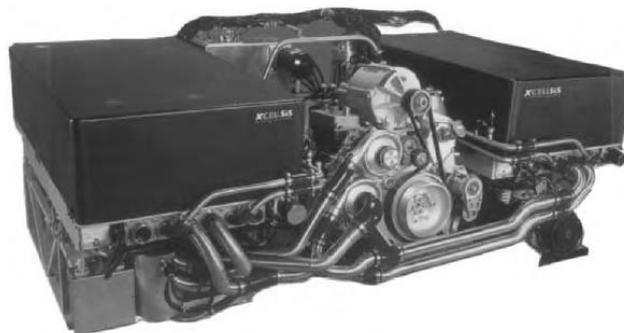
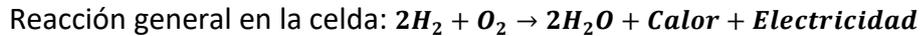
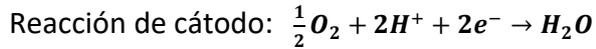
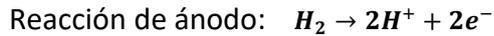


Ilustración 20: Equipo de pila de combustible con subsistemas instalados

Reacciones

A modo de recordatorio se presentan las reacciones que se llevan a cabo en el núcleo de la pila. Aunque no se haya dicho anteriormente, se trabajará en medio ligeramente ácido debido a que parte de los iones H^+ que entran en contacto con la membrana provenientes de la

corriente de combustible se disuelven aumentando la acidez del agua destilada que baña la membrana:



3.1.1. Almacenamiento de combustible

Introducción

El almacenamiento de hidrógeno es uno de los temas más controvertidos que rodean a la pila de combustible. Es habitual el pensamiento de que llevar tanques de gas almacenado a presiones muy elevadas puede suponer peligro para los ocupantes en caso de accidente, pero en realidad los tanques de almacenamiento cumplen las normativas indicadas al igual que lo hacen los vehículos alimentados con combustibles fósiles. Otro de los motivos por los que la gente piensa que es peligroso es la posibilidad de detonación que caracteriza al hidrógeno. A pesar de existir un peligro real, solamente será posible que se produzca este fenómeno en caso de que se acumulen grandes cantidades en grandes espacios y que además se cumplan una serie de condiciones que son muy difíciles de darse cuando se circula con un vehículo.

Las dificultades se encuentran en la realidad en el proceso de transporte del gas, el cual es considerablemente más difícil que en el caso de los combustibles fósiles. Esto es debido a su baja densidad que obliga a tener tanques de grandes dimensiones o a aplicar complejos y costosos procesos de compresión para poder recoger todo el hidrógeno necesario para garantizar una autonomía razonable. En la actualidad se encuentran en fase de estudio diferentes metodologías cuyo principal objetivo es la optimización de almacenamiento del gas. Entre las tecnologías utilizadas o en investigación podemos encontrar: altas presiones, temperaturas criogénicas, hidrógeno líquido, almacenamiento sólido o almacenamiento mediante materiales, ya sea mediante enlaces químicos o por fisiorción. En la **Ilustración 21** se puede ver un gráfico en el que se detallan los resultados de aplicar las diferentes tecnologías, así como los rangos de presión y temperatura para los que se aconseja cada una de ellas.

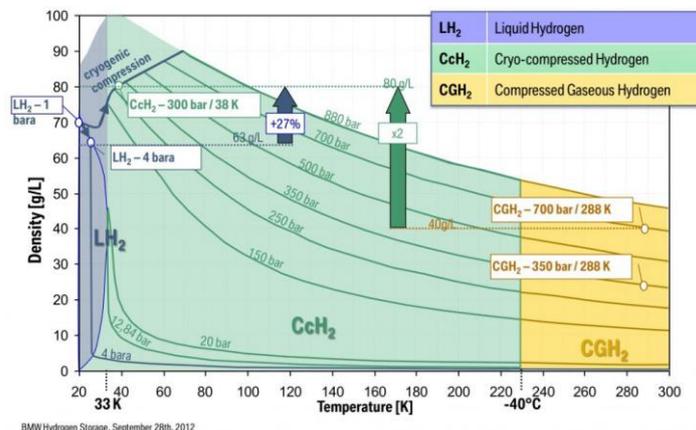


Ilustración 21: Tabla de propiedades del H₂ en función de su presión y temperatura (Santiago 2017)

En la actualidad los métodos de almacenamiento físico son los más utilizados debido a que son los más conocidos. Se basan en almacenar las moléculas en su forma libre sin que éstas se unan a otras o sean absorbidas por otros materiales. Como puede apreciarse en la **Ilustración 22**, hasta el momento se han desarrollado 4 tipos funcionales de tanques para el almacenamiento de hidrógeno que se diferencian por la resistencia estructural que les caracteriza. (Tretsiakova-McNally and Makarov 2016)

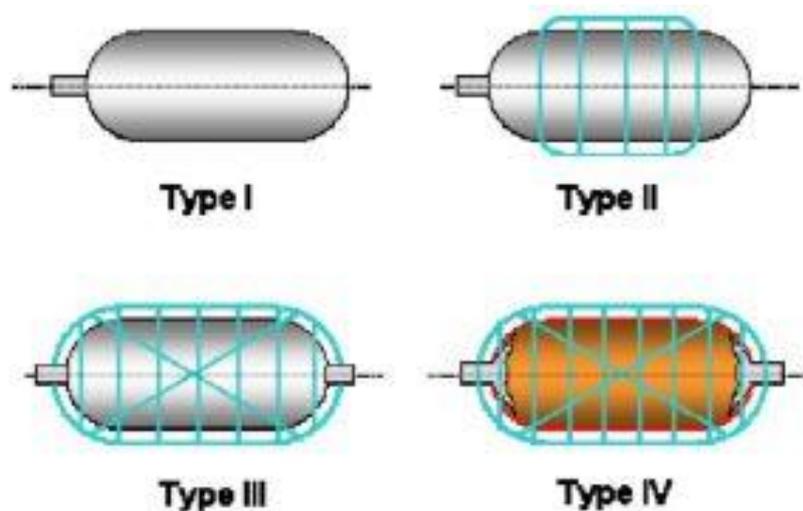


Ilustración 22: Tipos de recipientes de almacenamiento según su estructura (Barthelemy 2006)

Como se puede ver en la **Tabla 17**, las alternativas más adecuadas para el uso de recipientes de almacenamiento en transportes serán el tipo 3 y tipo 4 por motivos de peso y de resistencia a altas presiones. Concretamente, será más adecuado el **tipo 4** para su aplicación en vehículos ligeros y será apto para el diseño planteado ya que soporta los 700 bares que se han propuesto. A pesar de lo anterior, hay que tener en cuenta que los recipientes de tipo 4 son los más costosos hasta el punto que puede llegar a tener un coste significativo en el conjunto del sistema completo.

Tabla 17: Comparación de los tipos de recipientes

TIPO	1	2	3	4
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> Acero Aluminio 	<ul style="list-style-type: none"> Acero Aluminio Composites 	<ul style="list-style-type: none"> Acero Aluminio Composites 	<ul style="list-style-type: none"> Polietileno F. de carbono
Presión de operación [bar]	175 - 200	700 - 1000	500 - 700	< 700
Características especiales	-	Serán reforzados con materiales compuestos de fibra de carbono o vidrio en la dirección del aro en la sección cilíndrica del depósito.	Constan de un forro metálico interno con o sin costuras a fin de evitar las fugas de hidrógeno por difusión, recubierto todo ello por un material compuesto dispuesto en distintas direcciones. Los más resistentes son los de fibra de carbono siendo capaces de soportar hasta 700 bar.	Consta de un forro interno de material plástico para evitar la difusión del hidrógeno, reforzado externamente mediante fibras de carbono en distintas direcciones que soportará todas las tensiones de almacenamiento. Disponen de válvulas metálicas
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> Sin costuras Económicos 	<ul style="list-style-type: none"> Sin costuras 	<ul style="list-style-type: none"> Más livianos Mayor capacidad gravimétrica 	<ul style="list-style-type: none"> Ligereza Alta resistencia Alta densidad gravimétrica (11%)
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> Pesados Paredes gruesas Baja capacidad gravimétrica (1%) 	<ul style="list-style-type: none"> Pesados 	<ul style="list-style-type: none"> Más costosos 	<ul style="list-style-type: none"> Muy costosos Permeabilidad de la membrana
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> Estacionarias 	<ul style="list-style-type: none"> Estacionarias Depósitos en hidrogeneras 	<ul style="list-style-type: none"> Estacionarias Depósitos en vehículos pesados 	<ul style="list-style-type: none"> Transportes Estacionarias
Imagen				

Materiales

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, en el caso de los vehículos de pila de combustible el hidrógeno se almacenará en recipientes de los llamados “Tipo 4”.

Estructuralmente, serán recipientes que soporten condiciones de trabajo muy exigentes: altas tensiones, gran número de ciclos a fatiga (vaciado y llenado del depósito) ... Por lo general, se hará uso de materiales compuestos puesto que suelen ser menos susceptibles al fenómeno de fragilización por hidrógeno. El fenómeno de fragilización por hidrógeno consiste en que las moléculas de hidrógeno al tener un tamaño tan reducido son capaces de permear a través de diferentes materiales debilitando así su estructura interna y favoreciendo las fugas a largo plazo.

Cálculos

Para realizar el cálculo del sistema de almacenamiento se han marcado las siguientes bases de cálculo:

- **Autonomía requerida:** Se han establecido **600 km** de autonomía con el objetivo de asimilar las prestaciones que ofrece un vehículo de combustión interna con unos 45 litros de depósito de combustible.
- **Presión de almacenamiento:** La presión de almacenamiento se ha establecido en **700 bares** puesto que, como ya se ha comentado anteriormente es muy habitual para este tipo de vehículos y es la máxima presión que nos permiten utilizar las tecnologías actuales de almacenamiento garantizando el espacio reducido y la seguridad de utilización.
- **Coefficiente medio de utilización de potencia (φ_{pot}):** Será el grado de utilización de potencia del cual se considera que se hace uso cuando se viaja a una velocidad de crucero determinada. En este caso se ha considerado que la velocidad de crucero es de aproximadamente **120 km/h** y, en consecuencia, la tasa de utilización media de potencia de un **25%** (Son condiciones en las que no se requiere una tasa de potencia muy elevada).

Para determinar los valores anteriores se han tomado como referencia las características de almacenamiento de algunos vehículos comerciales que se han comercializado hasta la actualidad y diversas referencias bibliográficas.

Ecuación 2: Capacidad másica de almacenamiento requerida (m_{alm})

$$m_{alm} = \frac{S_{aut} \cdot \dot{m}_{H_2} \cdot \varphi_{pot}}{V_m} [kg]$$

Donde:

- S_{aut} : Autonomía [m]
- \dot{m}_{H_2} : Flujo másico de combustible (H_2) [kg/s]
- φ_{pot} : Coeficiente medio de utilización de potencia [%]
- V_m : Velocidad de crucero media [m/s]

Aplicándolo al sistema diseñado se introducirán los siguientes valores: $S_{aut}=600.000$ m $\dot{m}_{H_2}=0,00269$ kg/s , $\varphi_{pot}= 25\%$, $V_m= 0,33$ m/s. De esta manera obtendremos un valor de la masa de almacenamiento necesaria de: $m_{alm} = 7,04$ kg

Ecuación 3: Capacidad de almacenamiento requerida (V_{alm})

$$V_{alm} = \frac{n \cdot R \cdot T_{amb}}{P_{alm}} [m^3]$$

Donde:

- $n = \frac{m_{alm}}{M_{H_2}}$ Número de moles de H_2 de almacenamiento [mol]
- R : Constante de los gases ideales [8,31 J/K·mol]
- P_{alm} : Presión de almacenamiento [Pa]
- T_{amb} : Temperatura de almacenamiento = Temperatura ambiente [K]

Aplicándolo al sistema diseñado y tomando como datos: $M_{H_2} = 2,02 \cdot 10^{-3}$ kg/mol, $P_{alm} = 700$ bar, $T_{amb} = 288$ K se obtiene que el volumen requerido será: $V_{alm} = 0,12 m^3$

Ecuación 4: Número de recipientes requeridos (n_{bot})

$$n_{bot} = \frac{m_{alm}}{m_{bot}}$$

Donde:

- m_{bot} : Capacidad másica de cada botella [kg]

Aplicándolo al sistema diseñado y tomando como datos: $m_{alm} = 7,04$ kg y $m_{bot} = 1,24$ kg se obtiene que el número de recipientes necesarios para que sea capaz de albergar todo el combustible sea de: $n_{bot} = 6$ botellas

Equipo comercial

Atendiendo a los parámetros calculados a lo largo de este apartado, el equipo comercial que se ha utilizado será un recipiente **tipo 4** de la marca **Horizon**, concretamente el modelo **3271527** cuyo aspecto exterior se puede ver en la **Ilustración 23**.



Ilustración 23: Aspecto de los recipientes utilizados (Horizon Fuel Cells Technologies Inc.)

Se ha elegido este modelo debido a que incorpora una gran cantidad de tecnología que le permite almacenar hidrógeno a **700 bares** con una densidad gravimétrica muy elevada gracias a su estructura fabricada en fibra de carbono (recipiente de apenas 4kg). Además de esto, tiene un recubrimiento externo de fibra de vidrio que le ofrecerá una protección adicional a posibles rozamientos o golpes fuertes que existan entre los soportes y la botella. Las características completas vienen detalladas en la **Tabla 18**.

Tabla 18: Características del recipiente de almacenamiento a presión (Horizon Fuel Cells Technologies Inc.)

Magnitud	Valor		Unidades
Datos generales			
Presión de trabajo	300	700	bar
Marca	Horizon Fuel Cell Technologies		
Modelo	3271527		
Peso del recipiente	3,8		kg
Capacidad	9		l
Masa de hidrógeno almacenable	0.24	1.24	kg
Máxima capacidad de energía	10.36	175.91	MJ
Dimensiones			
Diámetro	182		mm
Longitud	543		mm

3.1.2. Unidad de control

Introducción

La unidad de control o CCU (Cell Control Unit) será un sistema de gestión electrónica de la celda en la cual se controlará la producción eléctrica que se lleva a cabo en la celda en función de las necesidades requeridas por el sistema. Al igual que ocurre en las ECU de los motores de combustión interna, la producción energética se regulará mediante la gestión del caudal de entrada de combustible en función del resto de parámetros de operación que afectan al sistema (temperatura ambiental, temperatura del equipo, presión de alimentación...).

Equipo comercial

En la actualidad, a diferencia del caso de los motores de combustión interna, el mercado carece de unidades de control comerciales específicas que se puedan instalar en sistemas de pila de hidrógeno para gestionar su funcionamiento. A pesar de ello, sería posible llevar a cabo la instalación de un sistema de procesamiento electrónico mediante un sistema de control como podría ser un microcontrolador o un PLC. Dicho sistema debería contar con los siguientes atributos:

Entradas:

1. Sonda de temperatura ambiente
2. Sonda de temperatura de actual de la pila
3. Sonda de hidratación interior de la pila

Salidas:

1. Válvula reguladora de caudal de alimentación de combustible
2. Válvula reguladora de caudal de alimentación de oxidante
3. Activación del sistema de precalentamiento

En caso de que se quisiera que controlase el resto de subsistemas habría que añadir a los requerimientos cada sensor que se haya instalado en el equipo, así como tantas salidas como actuadores precise el sistema de regulación.

Sus tareas se basarán en la toma continua de datos del sistema y del exterior (temperaturas, presiones, caudales...) con el propósito de regular la entrada de combustible y de aire al sistema para conseguir la mayor eficiencia de reacción posible. También se establecerán diferentes programas de funcionamiento y los subsistemas dependerán de las órdenes del sistema principal como por ejemplo el sistema de precalentamiento, la sobrealimentación o la refrigeración. Principalmente contará con 3 modos de funcionamiento que serán arranque, operación y apagado en los que se establecerán los parámetros de funcionamiento para cuidar la salud de la pila y conseguir los mejores resultados posibles.

3.1.3. Celdas de potencia

La celda de potencia será el elemento clave dentro del sistema de pila de combustible puesto que será el punto en el que se lleva a cabo la reacción química y del que dependerá en mayor parte la eficiencia del sistema. Por este motivo el diseño de este elemento será crucial a la hora de obtener buenos o malos resultados del sistema.

Equipo comercial

Puesto que, como se ha explicado detalladamente en el Capítulo 2 se ha elegido utilizar una tecnología PEM-LT por diferentes motivos, todas las pilas que se han buscado en el mercado han sido de este tipo como se puede ver en la siguiente tabla comparativa (**Tabla 19**).

Tabla 19: Comparativa de celdas de potencia (Tabla de creación propia a partir de las fichas técnicas del Anexo 4)

MARCA Y MODELO	Ballard FCvelocity – 9SSL	Horizon VL-30	Hydrogenics HYPM-HD 30	Hydrogenics HYPM-HD 90
General				
Tecnología	PEMFC	PEMFC	PEMFC	PEMFC
Corriente nominal [A]	300	270	500	500
Voltaje DC [V]	70.2	300 - 650	60 - 120	180 - 360
Refrigeración	Líquida	Líquida	Líquida	Líquida
Número de celdas		190		
Rendimiento				
Potencia por stack [kW]	21	27.8	31	93
Eficiencia de pico [%]	-	-	55	55
Tiempo de respuesta [s]	-	-	<3	<3
Dimensiones				
Largo [mm]	302	374	406	1085
Ancho [mm]	760	838	719	1582
Alto [mm]	60	208	261	346
Volumen [m ³]	0.01377	0.0652	0.076	0.597
Masa por stack [kg]	17	65	57	345
Masa con sist. refrigeración int [Kg]	32	80	72	360
Densidad volumétrica [kg/m ³]	2323.89	1226.99	947.37	603.02
Densidad de potencia [W/m ³]	656.25	347.5	430.55	258.33
Alimentación				
Pureza [% H ₂]	>95	-	>99.8	>99.8
Oxidante	Aire	Aire	Aire	Aire
Presión manométrica [bar]	0	-	4.4	4.4
Máxima altitud de trabajo [m]	3000	3000	-	-
Temperaturas				
Temperatura de arranque [°C]	>2	>-20	-	-
Temperatura de almacenamiento [°C]	-40 < T < 60	-	-40 < T < 65	-40 < T < 65
Temperatura flujos de entrada [°C]	2 < T < 68	-	-	-
Temperatura de ambiente [°C]	-25 < T < 75	-20 < T < 50	-10 < T < 55	-10 < T < 55

El criterio de selección se ha basado principalmente en el cumplimiento de los requerimientos de potencia, dimensiones y peso, aunque en segundo plano también se han tenido todos los demás parámetros de funcionamiento como la tensión de funcionamiento o las necesidades de pureza en la alimentación entre otras.

Finalmente se ha decidido utilizar el modelo **Horizon VL-30** puesto que se ha considerado que es el equipo más equilibrado en cuanto a prestaciones. Ya que la potencia total necesaria será de unos 88Kw, necesitaremos **3 equipos** conectados en paralelo para conseguir el pico de demanda establecido. El voltaje de salida podrá ser de 450 V como suelen trabajar las pilas de combustible y la temperatura de arranque puede llegar hasta los 20°C bajo cero, lo cual puede beneficiarla seriamente frente a sus rivales a la hora de utilizarse en climas fríos.



Ilustración 24: Aspecto real de la pila de combustible Horizon VL-30 (www.horizonfuelcell.com)

Como se puede apreciar en la **Ilustración 24** el equipo comercial incluye la pila de combustible en un formato encapsulado muy compacto. Dispondrá de subsistemas previamente instalados como por ejemplo sondas de presión y temperatura a la entrada del equipo o el sistema de refrigeración. Contará con una serie de conexiones perfectamente accesible y de un sistema de sujeción que permitirá instalar el equipo en el vehículo de una forma muy sencilla y sin hacer instalaciones adicionales.

3.1.4. Pre calentamiento

Introducción

El proceso de pre calentamiento es crucial para garantizar un buen funcionamiento de un sistema de pila de combustible. Las principales razones para llevarlo a cabo son tener un tiempo de arranque reducido y una distribución de temperatura más uniforme que minore la probabilidad de tener los peligrosos puntos calientes mejorando así la vida útil del sistema.

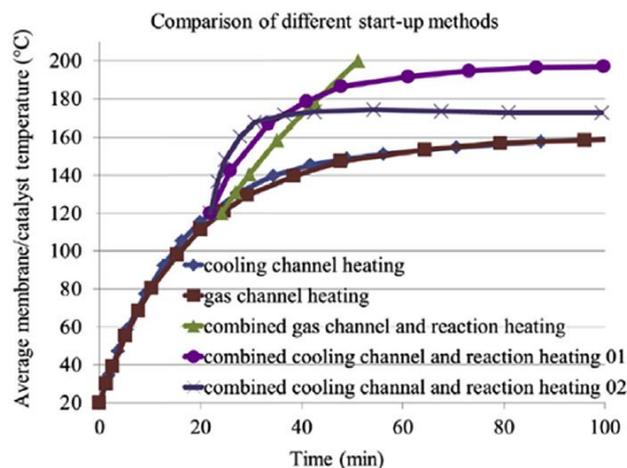


Gráfico 5: Comparación entre los diferentes métodos de pre calentamiento (Rosli et al. 2017; Wang et al. 2011)

De entre todos los sistemas de calentamiento previo estudiados y reflejados en el **Gráfico 5**, se ha determinado que el procedimiento más eficiente para alcanzar el nivel de calor deseado (60 – 70 °C) será el método de **calentamiento del refrigerante**. Como se puede ver en el **Gráfico 5**, hasta unos 120 °C prácticamente todos los sistemas de refrigeración funcionan de la misma manera. Por este motivo, el método de calentamiento de refrigerante será el que destaque frente a los demás ya que, gracias a su situación respecto al stack, proporciona un

calentamiento más uniforme en la membrana y su implantación en el sistema es relativamente sencilla mediante incorporación de resistencias eléctricas. (Rosli et al. 2017)

Cálculos

El tiempo de arranque de la calefacción puede calcularse con la **Ecuación 5**. Será una fórmula teórica que dependerá de la masa total del stack y de la potencia del sistema de precalentamiento entre otras cosas:

Ecuación 5: Tiempo de calentamiento de una pila (t) (Søren Juhl Andreassen and Kær 2008)

$$t = \frac{m_s \cdot C_{p,s} \cdot \Delta T}{\dot{Q}_{in}} [s]$$

Donde:

- m_s : masa del stack [kg]
- $C_{p,s}$: Calor específico del conjunto [970 J/kg·K con placas bipolares]
- ΔT : Incremento de temperatura [K]
- \dot{Q}_{in} : Potencia de entrada al sistema (precalentadores) [W]

Las pérdidas al medio pueden ignorarse, pero la energía de entrada (Q_{in}) puede cambiar considerablemente la temperatura de calentamiento de la celda, por ello habrá que tenerla en cuenta en la fórmula del tiempo de calentamiento.

Un tiempo de calentamiento reducido se puede considerar a aquel que se encuentre por debajo de los **10 minutos** aproximadamente para una pila tipo PEM puesto que será el tiempo que precisará el sistema para llegar a un punto de funcionamiento óptimo. Hay que tener en cuenta que antes que eso la pila también funcionará a pesar de que los rendimientos sean mucho más bajos.

Una vez establecido el tiempo en la ecuación anterior, se establecerá la temperatura final de precalentamiento (partiendo de que la temperatura inicial será la de ambiente, que sería el caso más desfavorable a priori). La temperatura final de precalentamiento que se ha seleccionado han sido **50 °C** ya que se considera que a partir de esa temperatura el sistema tiene una eficiencia lo suficientemente elevada como para funcionar correctamente y poder llegar a ser autosuficiente en lo que a energía calorífica se refiere.

Como la masa del sistema y el calor específicos son conocidos de antemano, solamente quedará introducir la potencia de los precalentadores para determinar las necesidades del sistema que cumplan los requisitos de tiempo.

En este caso, como serán **3 calentadores** (1 por cada stack) tendremos que aplicar 3000 w a cada subsistema (**9000 w en total**) para poder precalentar por debajo de los 10 minutos de funcionamiento, una potencia elevada pero que será eficiente a largo plazo ya que se utiliza poco tiempo.

Equipo comercial

El equipo comercial seleccionado será una resistencia de inmersión de acero inoxidable. A pesar de que se elevará sensiblemente su precio, será de acero inoxidable con el objetivo de evitar la presencia de corrosiones y alargar así la vida útil del sistema.

En cuanto a morfología se refiere, se ha decidido utilizar una resistencia de “fondo de tanque”. Este tipo de morfología se caracterizará por tener un tamaño relativamente reducido en comparación con otras.

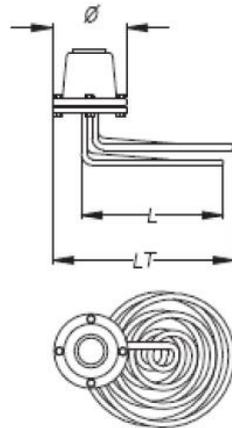


Ilustración 25: Morfología de la resistencia tipo “fondo de tanque” (Resistencias Tope S.A.)

Puesto que, como se ha detallado antes serán necesarias unas resistencias de 3000 w, el modelo a elegir será el **185-O** (véase ilustración 27). Será un equipo de 3 resistencias que funciona a 230v y tiene una densidad de potencia de 3.59 w/cm² (la recomendación para agua está establecida entre 3.5 y 4.5 w/cm² por lo que es correcta).

2.3 RESISTENCIAS DE INMERSIÓN PARA FUEL-OIL PARA FONDO DE TANQUE
(con caperuza de acero fundido y tubo de inox)

TIPO TF Ref.	W	W totales	V	W/cm ²	∅ Caja	LT mm	Rosca
15-O	1000	1000	230	3,59	85	150	½ "
14-O	2x1000	2000	230	3,59	85	170	½ "
185-O	3x1000	3000	230/400	3,59	135	240	½ "
368-O	3x2000	6000	230/400	4,57	135	240	½ "

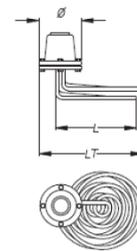


Ilustración 26: Tabla de características de la resistencia seleccionada (Resistencias Tope S.A.)

3.1.5. Hidratación de la membrana

Introducción

La hidratación de la membrana será un factor de gran importancia a la hora de conseguir buenos resultados en el funcionamiento de la pila de combustible debido a que será estrictamente necesario mantener un nivel de hidratación mínimo si se quiere tener una conductividad iónica del electrolito (Adachi et al. 2009).

Posibles problemas

No tener un sistema de gestión de humedad en la misma puede traer consigo los siguientes problemas:

Defecto de hidratación:

- **Reducción de la tasa de transferencia de cargas a través del electrolito**- La transferencia de cargas será directamente proporcional a la humedad de la membrana debido a que será el medio de propagación de las mismas.
- **Deterioro prematuro de la membrana**- Se ha observado que la sequedad de las membranas puede causar grietas y problemas de degradación prematuros provenientes de la formación de puntos calientes o del acartonamiento de la membrana.

Exceso de hidratación:

- **Inundación de los electrodos**- Una presencia excesiva de agua en los electrodos puede dar lugar a este fenómeno que consistirá en un bloqueo en los poros que les impida realizar el intercambio correctamente reduciendo la tensión de celda y, en consecuencia, la eficiencia de generación.
Este fenómeno puede deberse a que el agua o el vapor de agua producido en la capa catalítica en función de la corriente se condensará en la capa de difusión de gases e incluso en el canal de alimentación de O_2 si la presión de vapor es mayor que la presión de vapor saturado. (Wang et al. 2011).

Causas de los problemas

- **Arrastre de moléculas de agua**- En las pilas de tipo PEM, el agua se forma en el cátodo. Idealmente, con la alimentación de aire debería bastar para suministrar el oxígeno necesario de reacción en la celda y para que se extrajese el exceso de agua producido, pero cuando circulan grandes densidades de corriente es probable que el sistema no sea capaz de autogestionarse por sí mismo. Esto es así porque los iones H^+ arrastran moléculas de agua en su movimiento de tal manera que, para elevadas densidades de corriente, el ánodo puede secarse incluso en casos en los que el cátodo esté bien hidratado. (James Larminie and Dicks 2003)
- **Secado por aire de entrada**- El efecto de secado que tiene el aire cuando circula a altas temperaturas (superiores a $60^\circ C$) puede suponer que en los electrodos se eliminará más agua de la que se produce en la reacción.

Posibles soluciones

Por todos estos motivos será necesario diseñar un sistema de hidratación que garantice la presencia de agua en la membrana en todo momento. Una forma de conseguir esto es humidificar el aire a la entrada, el hidrógeno o ambos antes de que entren en la celda de combustible. (James Larminie and Dicks 2003)

Para el caso de este proyecto, se ha decidido adoptar esta solución llevándola a cabo mediante la instalación de un sistema de humectación que basará su funcionamiento en la recogida de

humedad de la corriente de salida de la pila para introducirla en la corriente de admisión. La humedad relativa a la entrada debería encontrarse **entre el 60% y el 70%** para evitar el secado de la membrana, y se utilizará este sistema para mantenerlo en esos niveles.

Permeación de la membrana

Existen varios sistemas de permeación de la membrana en función del estado del agua:

1. **Permeación vapor-vapor (VVP)**- Ambos lados de la membrana están expuestos al vapor de agua y la fuerza motriz para la permeación del agua se crea al intentar compensar la humedad en ambos lados. (Adachi et al. 2009)
2. **Permeación vapor-líquido (LVP)**- Un lado de la membrana está en contacto con agua líquida y el otro lado está expuesto al vapor de agua. La fuerza motriz para la permeación del agua se controla variando la humedad relativa del vapor. (Adachi et al. 2009)
3. **Permeación líquido-líquido (LLP)**- Ambos lados de la membrana están en contacto con agua líquida y la fuerza motriz para la permeación del agua se crea aplicando presión hidráulica. (Adachi et al. 2009)

Dependiendo del tipo de permeación del que disponga la pila de estudio, el gradiente de potencial químico de la pila se controlará mediante la variación de humedad diferencial (38-100% de HR) en los casos de VVP y LVP o mediante la variación de la presión (0-1.2 atm) en el caso de LLP. (Adachi et al. 2009)

Hydrolytic Properties ²		
Water Content, % water ⁶	5	ASTM D570
Water Uptake, % water ⁷	38	ASTM D570
Thickness Change, % increase		
from 50% RH, 23 °C (73 °F) to water soaked, 23 °C (73 °F)	10	ASTM D756
from 50% RH, 23 °C (73 °F) to water soaked, 100 °C (212 °F)	14	ASTM D756
Linear Expansion, % increase ⁸		
from 50% RH, 23 °C (73 °F) to water soaked, 23 °C (73 °F)	10	ASTM D756
from 50% RH, 23 °C (73 °F) to water soaked, 100 °C (212 °F)	15	ASTM D756

Ilustración 27: Propiedades de hidratación de la membrana de Nafion (Membranes DuPont 2010)

Para el caso de estudio se trabajará con una permeación **VVP** debido a que el agua a la salida estará en estado gaseoso. El flujo de permeación de agua a través de membrana (Nafion 117) habitual será de **0.03 g/min·cm²** a 70 ° C. (Majsztrik et al. 2007)

Cálculos

La presión a la salida de la pila será de **1,5 bar** puesto que se contará con una pérdida de carga en el sistema de 0,1 bar aproximadamente. A partir de este valor se calculará la presión parcial del agua a la salida para poder calcular el flujo másico de aire que será necesario introducir en la corriente de entrada para poder cumplir las necesidades del sistema.

Ecuación 6: Presión parcial del agua a la salida para una humedad en la corriente de entrada insignificante (P_{exit}) (J. Larminie and A. Dicks 2003)

$$\frac{P_{w\ exit}}{P_{exit}} = \frac{\dot{n}_{w\ exit}}{\dot{n}_{w\ exit} + \dot{n}_{O_2\ exit} + \dot{n}_{rest\ exit}} = \frac{2}{1 + 4.76 \cdot \lambda_{aire}} \rightarrow P_{w\ exit} = \frac{0.420 \cdot P_{exit}}{\lambda_{aire} + 0.210} [Pa]$$

Donde:

- $\dot{n}_{w\ exit} = \frac{P_e}{2 \cdot V_c \cdot F}$: Flujo molar de agua a la salida [mol/s]
- $\dot{n}_{O_2\ exit} = (\lambda - 1) \cdot \frac{P_e}{4 \cdot V_c \cdot F}$: Flujo molar de oxígeno a la salida [mol/s]
- $\dot{n}_{rest\ exit} = \frac{0.79}{0.21} \cdot \lambda_{aire} \cdot \frac{P_e}{4 \cdot V_c \cdot F}$: Flujo molar del resto de sustancias a la salida [mol/s]
- P_e : Potencia total de la celda [W]
- V_c : Tensión de cada celda [V]
- F : Constante de Faraday [96.458 C/mol]
- P_{exit} : Presión a la salida [Pa]
- λ_{aire} : Coeficiente estequiométrico del aire (2)

Aplicándolo al sistema que se está diseñando se introducirán los siguientes valores: $P_{exit} = 1.5$ bar y $\lambda_{aire} = 2$, dando como resultado una presión parcial de agua a la salida de $P_{w\ exit} = 28884,502$ Pa

Tabla 20: Vapor de agua saturado a diferentes temperaturas (J. Larminie and A. Dicks 2003)

Temperatura [°C]	Presión de vapor saturado [kPa]
15	1,705
20	2,338
30	4,246
40	7,383
50	12,350
60	19,940
70	31,190
80	47,390
90	70,130

A partir de este valor y, mediante la **ecuación 7**, se calculará la humedad relativa a la entrada utilizando la **Tabla 20** para obtener los datos de presión saturada (P_{sat})

Ecuación 7: Humedad relativa (ϕ)

$$\phi = \frac{P_w}{P_{sat}} [\%]$$

Donde:

- P_{sat} : Presión de vapor saturado [Pa]

Introduciendo los valores: $P_w = P_{w\ exit} = 28884,50$ Pa y $P_{sat} = 47390$ Pa (para 80°C de temperatura de operación) se obtendrá el siguiente valor para la humedad relativa: $\phi = 61$ % que se encontrará entre 60 y 70% que son los valores recomendados para la humedad relativa a la entrada como se comentó anteriormente.

Una vez comprobado que el nivel de humedad a la entrada es correcto para la presión de salida establecida, se procederá a calcular las necesidades de agua a la entrada en flujo másico como se puede ver en la **Ecuación 8**.

Ecuación 8: Flujo másico de agua en la corriente de entrada (\dot{m}_w) (J. Larminie and A. Dicks 2003)

$$\dot{m}_w = \frac{M_{H_2O}}{M_{aire}} \cdot \frac{P_w}{P_T - P_w} \cdot \dot{m}_a \text{ [kg/s]}$$

Donde:

- M_{H_2O} : Masa molar del agua [18 g/mol]
- M_{aire} : Masa molar del aire [28.97 g/mol]
- P_w : Presión parcial del agua presente en la corriente de aire [Pa]
- $P_T = P_a + P_w$: Presión total [Pa]
- \dot{m}_a = Flujo másico de aire [kg/s]
- $\dot{m}_T = \dot{m}_w + \dot{m}_a$: Flujo másico total [kg/s]

Para el equipo que se está diseñando se introducirán los siguientes valores: $P_w = 28884,50$ Pa, $P_T = 162120$ Pa, $\dot{m}_a = 0,082$ Kg/s obteniendo un valor para las necesidades de flujo másico de agua en la corriente de entrada de $\dot{m}_w = 0,0110067$ kg/s que habrá que inyectar mediante el sistema de humidificación.

3.1.6. Refrigeración

Introducción

La eficiencia que caracteriza a una celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) depende enormemente de un sistema de enfriamiento efectivo. Debe existir un sistema de refrigeración que mantenga en un cierto nivel de temperatura en el sistema durante toda la operación que evite las pérdidas de eficiencia cuando es excesivamente baja y los posibles peligros de funcionamiento cuando es excesivamente elevada.

Además de esto, será necesaria cierta uniformidad de la temperatura dentro de la celda para evitar la presencia de puntos calientes. Los puntos calientes serán puntos de alta resistencia o mal refrigerados (como se puede ver en la **Ilustración 28**) que al estar a temperaturas muy altas pueden formar agujeros de alfiler en la membrana, deteriorándola y reduciendo así su vida útil.

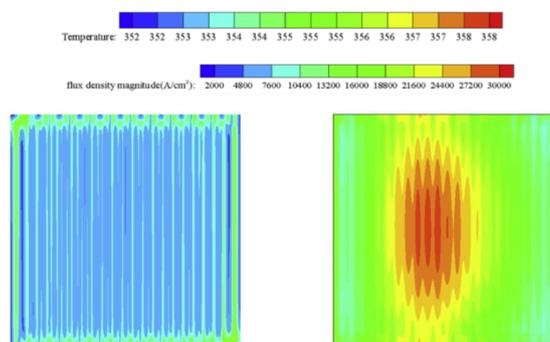


Ilustración 28: Pila de combustible con presencia de puntos calientes (Rahgoshay et al. 2017)

Por ello, será importante realizar un estudio de flujos internos que determinen los flujos de temperatura del refrigerante por los canales de alimentación, así como los flujos de temperatura alrededor de los colectores de entrada y salida de los gases reactivos ya que tendrán una influencia masiva en la distribución de temperatura en las placas bipolares. (Asghari, Akhgar, and Imani 2011; Wang et al. 2011)

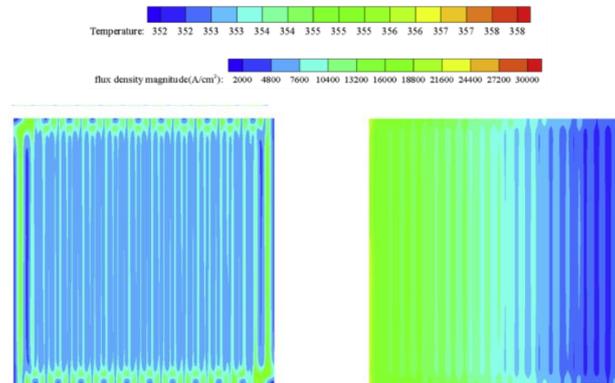


Ilustración 29: Pila de combustible sobredimensionada (Rahgoshay et al. 2017)

Como se puede ver en la **Ilustración 29**, si el dimensionamiento del sistema de refrigeración no es correcto el nivel térmico se reducirá en demasía perjudicando directamente al rendimiento del sistema. El índice de temperatura uniforme (IUT) es un parámetro que servirá para medir estos gradientes de temperatura proporcionando una visión general acerca de la uniformidad de la temperatura dentro de las placas. (Rahgoshay et al. 2017)

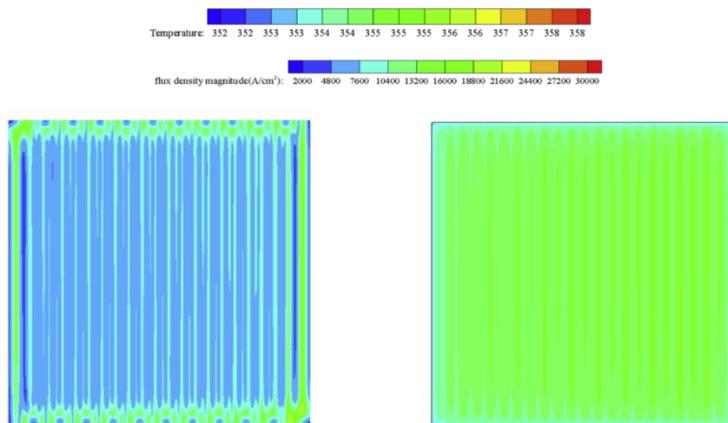


Ilustración 30: Pila de combustible con un nivel térmico uniforme

En la **Ilustración 30** se puede ver una pila perfectamente dimensionada en la cual se cuenta con un nivel térmico completamente uniforme y dentro de las temperaturas de máxima eficiencia de la pila.

Los estudios realizados con diferentes disposiciones han determinado que la configuración en **serpentin múltiple** es aquella que garantiza mayor uniformidad de temperatura, y como consecuencia de esto será la configuración que se utilizará en el diseño de la celda. (Baek et al. 2011; Rahgoshay et al. 2017)

El exceso de calor producido por la pila y no utilizado en el procesamiento de combustible se podrá utilizar para otras aplicaciones de baja temperatura como por ejemplo la calefacción del habitáculo. Esto permitirá mejorar el rendimiento global del sistema y reducir el desperdicio energético. (Rahgoshay et al. 2017; Rosli et al. 2017) Al tener un nivel de

temperaturas de funcionamiento bajo y reducido, la gestión térmica se torna difícil puesto que no es muy adecuado para reutilizarlo en cogeneración y si se desperdicia se reduce la eficiencia considerablemente. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Tecnologías de enfriamiento

Existen diversas tecnologías de refrigeración de pilas de combustible principalmente diferenciadas por la naturaleza de los fluidos de intercambio. Su diseño debe estar optimizado para garantizar el paso del refrigerante por la mayor cantidad de superficie posible minimizando la caída de presión y evitando así el consumo parasitario de energía que minoraría el rendimiento del conjunto. (Moayeri, Ka, and Fateh 2017)

La refrigeración quizás sea incluso más importante en las celdas que en los motores de combustión interna puesto que el hecho de no enfriar todas las zonas por igual y a un nivel determinado puede reducir considerablemente el rendimiento del conjunto.

Las pilas que tengan una potencia superior a 5 kW suelen estar refrigeradas por agua siempre mientras que si la potencia es inferior a 2 kW suelen estar refrigeradas por aire por su simplicidad de funcionamiento. A continuación, se hará una pequeña introducción de los aspectos que incumben a cada tipo de refrigeración:

Refrigeración líquida- Normalmente basan su funcionamiento en canales de refrigeración internos entre el ánodo y el cátodo que portan fluidos de refrigeración. Este tipo estará orientado a pilas de alta potencia (por encima de los 5 KW) con flujos de calor muy elevados. Se utilizará agua glicolada debido a su alta capacidad térmica, su baja peligrosidad y su bajo coste de utilización frente a otros fluidos refrigerantes. En pilas de dimensiones reducidas será difícil incluir esta tecnología ya que la ejecución de canales internos de refrigeración puede suponer un esfuerzo significativo. (James Larminie and Dicks 2003; Rahgoshay et al. 2017)

Refrigeración por aire- Basa su funcionamiento en tener un dispositivo denominado soplador que será el encargado de suministrar el aire necesario para la reacción del cátodo enfriando simultáneamente la pila de combustible gracias al paso de la corriente de aire a baja temperatura. De esta manera debe asegurarse que el soplador pueda suministrar el aire suficiente para mantener la proporción estequiométrica de aire requerido en todo momento. (Barreras et al. 2014; Pan et al. 2005) Debido al elevado consumo energético que supone trabajar con altos flujos de aire, solamente será aconsejable su instalación en pilas de baja potencia. (Chandan et al. 2013)

Tecnología seleccionada

La tecnología seleccionada para la pila que se está diseñando es la **refrigeración por agua** debido a dos motivos principalmente:

En primer lugar, será debido al escaso espacio del que se dispone para albergar el equipo. La elevada capacidad calorífica del agua permitirá reducir el espacio del equipo de refrigeración con respecto a los voluminosos ventiladores y aletas que habría que instalar en caso de utilizar un sistema refrigerado por aire.

En segundo lugar, aparece la densidad de potencia. Las pilas utilizadas tienen unos niveles de potencia muy elevados y precisan un sistema de refrigeración muy potente ya que el sistema de alimentación de aire apenas disipa calor a su paso por el sistema.

Esquema de funcionamiento

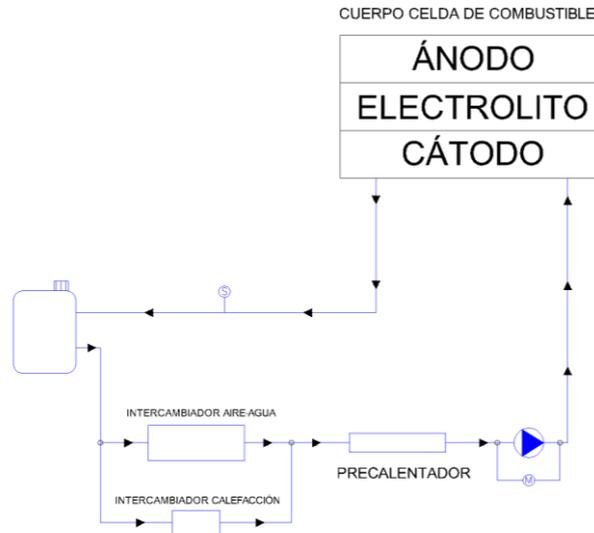


Ilustración 31: Esquema de principio sistema de refrigeración (creación propia)

Cálculos

El objetivo principal de los cálculos será dimensionar los intercambiadores de calor, así como decidir qué tecnología es la más adecuada para su uso en esta aplicación.

Calor residual producido

Aplicando la **Ecuación 9** se calculará la potencia de calor residual que se desprende de la pila de combustible. Dependerá directamente de la potencia eléctrica del conjunto.

Ecuación 9: Flujo de calor residual total producido en la pila (\dot{Q}_{Tref}) (Kabza 2015)

$$\dot{Q}_{Tref} = P_e \cdot \left(\frac{1.25}{V_c} - 1 \right) [W]$$

Donde:

- P_e : Potencia eléctrica de la celda [W]
- V_c : Tensión de operación de la celda [V]

Aplicado al sistema que se está diseñando se introducirán los siguientes valores: $P_e=89481,99$ W, $V_c= 1.18$ V, lo cual dará un flujo de calor desprendido de: $\dot{Q}_{Tref}= 53418,14242$ W

Refrigeración por aire

Como el equipo que se ha seleccionado dispone de refrigeración líquida, no existirá un sistema de refrigeración por aire propiamente dicho, pero tendremos que tener en cuenta que la alimentación de aire a la pila para llevar a cabo la reacción actuará como un sistema de

refrigeración constante. Teniendo en cuenta lo anterior, habrá que hacer un análisis orientativo de la energía que se va a liberar por este medio (**Ecuación 10**) para evitar tener que destinar esa carga en el dimensionamiento del sistema de refrigeración por agua.

Ecuación 10: Calor disipado por la corriente de aire en la alimentación ($\dot{Q}_{a in}$) (Kabza 2015)

$$\dot{Q}_{a in} = r \cdot \dot{m}_{a ref} \cdot C_p \cdot \Delta T [W]$$

Donde:

- \dot{m}_{ref} : Flujo másico de aire de refrigeración [kg/s]
- C_p : Calor específico del aire [1004 J/(kg·K)]
- $\Delta T = T_{ao} - T_{ai}$: Incremento de temperatura entre la entrada y la salida [K]
- T_{ao} : Temperatura aire de salida de la pila [K]
- T_{ai} : Temperatura aire de entrada a la pila [K]
- r : Eficiencia de intercambio [%]

Aplicándolo al sistema que se está diseñando se introducirán los siguientes parámetros: $\dot{m}_{ref} = \dot{m}_{entrada de aire} = 0,081624558$ kg/s, $r = 0,5$, $T_{ao} = 288$ K, $T_{ai} = T_{amb} = 328$ K obteniendo un valor de: $\dot{Q}_{a in} = 1639,02$ W que será calor absorbido por la corriente y que, por tanto minorará el calor que tenga que absorber el agua del sistema de refrigeración principal.

Refrigeración por agua

Teniendo en cuenta lo que se ha planteado en el apartado anterior con respecto al flujo de alimentación se puede llegar a la conclusión de que el flujo de calor que llegará al sistema de refrigeración por agua será la diferencia entre el flujo de calor total disipado (calculado en la **Ecuación 9**) y el flujo de calor disipado en la corriente de alimentación (calculado en la **Ecuación 10**)

Ecuación 11: Flujo másico de refrigeración por agua ($\dot{m}_{w ref}$) (Kabza 2015)

$$\dot{m}_{w ref} = \frac{\dot{Q}_{w ref}}{r \cdot C_p \cdot \Delta T} [Kg/s]$$

Donde:

- $\dot{Q}_{w ref} = \dot{Q}_{T ref} - \dot{Q}_{a in}$: Flujo de calor de refrigeración [W]
- C_p : Calor específico del agua [4180 J/(kg·K)]
- $\Delta T = T_{wo} - T_{wi}$: Incremento de temperatura entre la entrada y la salida [T]
- T_{wo} : Temperatura agua de salida de la pila [K]
- T_{wi} : Temperatura agua de entrada a la pila [K]
- r : Eficiencia de intercambio [%]

Aplicándolo al sistema diseñado se introducirán los siguientes datos: $\dot{Q}_{T ref} = 53418,14242$ W; $\dot{Q}_{a in} = 1639,021134$ W, $T_{wo} = 328$ K, $T_{wi} = 288$ K, $r = 0,5$. Con todo ello se obtendrá un flujo de refrigerante: $\dot{m}_{w ref} = 0,15484187$ kg/s.

Equipo comercial

Intercambiador

Para disipar al ambiente el calor que se ha calculado anteriormente será necesario disponer de un intercambiador aire agua que reduzca la temperatura del refrigerante a la entrada. Como se calculó en la **Ecuación 11**, el \dot{Q}_{wref} tendrá un valor de 53418,14242 W, que será la energía que habrá que disipar mediante este sistema. Puesto que dicha energía es muy similar a la que se disipa en un vehículo convencional, se ha decidido utilizar un radiador de coche de aletas sobredimensionado que será capaz de disipar hasta 55 kW.

La regulación de la temperatura dentro de la pila se deberá hacer mediante una válvula termostática que consiga mantener la temperatura de operación en un intervalo de variación inferior a los 5 °C para evitar pérdidas de eficiencia en el equipo.



Ilustración 32: Aspecto del intercambiador aire-agua del sistema de refrigeración

Bomba de refrigerante

La bomba de impulsión de refrigerante será una bomba que debido a las peculiaridades de la instalación no podrá ir conectada a ningún eje de giro puesto que, a diferencia de los motores de combustión interna, carece de uno de giro continuo. Tenerlo conectado a un eje de transmisión podría propiciar el calentamiento del sistema a bajas velocidades o cuando está parado. Por ello, una bomba eléctrica conectada a 12V permitirá regular el caudal que se precise en cada momento evitando sobrecalentamientos innecesarios. En la **Ilustración 32** se puede ver como cuenta con carcasa metálica y eje con rodamientos, que indican la elevada calidad de componentes de los que dispone para evitar posibles averías al ser un componente de alta importancia.



Ilustración 33: Aspecto real bomba de agua (www.hella.com)

3.1.7. Equipo eléctrico

Introducción

Estructuralmente, un vehículo de pila de hidrógeno es prácticamente igual que un vehículo eléctrico recargable. Para este modelo se ha decidido utilizar una disposición de un solo motor que impulse el par generado a las ruedas traseras mediante un sistema de transmisión.

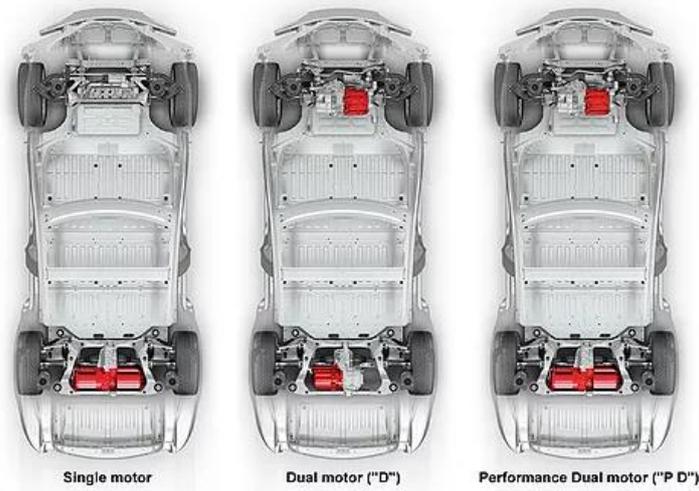


Ilustración 34: Diferentes disposiciones de motores eléctricos (Verbist 2017)

En la **Ilustración 34** aparecen diferentes disposiciones del tren de potencia de un vehículo eléctrico. A pesar de que se podría haber utilizado otra disposición como podría haber sido la colocación de un motor en cada rueda o un sistema de tracción total, se ha decidido utilizar la de motor trasero. De esta manera, se han intentado evitar complicaciones en el sistema de gestión de potencia, complicaciones mecánicas, y como consecuencia de esta última los rozamientos mecánicos. Si se reduce el número de componentes mecánicos que forman parte del sistema de transmisión de potencia se podrán aumentar considerablemente los rendimientos mecánicos.

Componentes del sistema

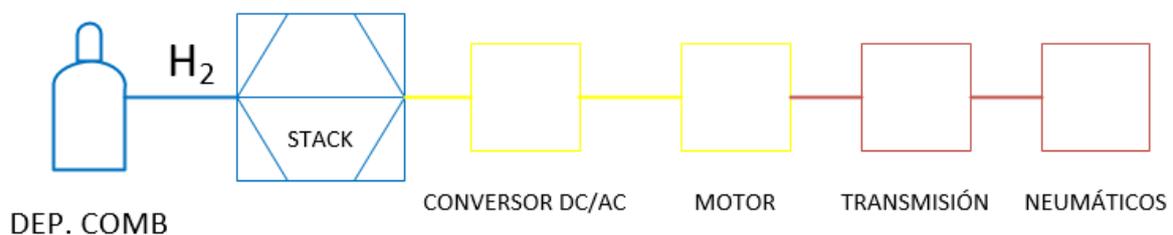


Ilustración 35: Esquema de propulsión simplificado (Creación propia)

En la **Ilustración 35** se ha querido mostrar un esquema de propulsión simplificado en el que aparecen componentes de 3 colores diferentes. Por un lado, el color azul muestra los componentes correspondientes al sistema de alimentación y procesamiento de hidrógeno. En segundo lugar, estará el sistema eléctrico en color amarillo que será el encargado de extraer

la electricidad generada en la pila de combustible y adecuarla a las necesidades de los consumidores y, por último, aparece en color granate el sistema de transmisión de potencia. El sistema de transmisión de potencia será de naturaleza mecánica y su cometido se basará en transmitir el movimiento generado en el motor hasta las ruedas dotando de utilidad al conjunto.

Motor

Introducción

Como se ha comentado en la introducción, se contará con un sistema de potencia de un solo motor conectado a un sistema de transmisión que impulsará las ruedas traseras.

Serán motores eléctricos trifásicos de inducción de corriente alterna con rotor de cobre y 4 polos. Giran hasta 15 000 rpm. El rotor está refrigerado por aire y no cuenta con imanes permanentes.

Hasta los últimos años, los motores de inducción AC han sido más difíciles de controlar puesto que es necesaria la variación de la frecuencia de oscilación de la corriente para poder variar la velocidad de salida. En la actualidad ya existen sistemas electrónicos que regulan fácilmente este parámetro y que, en consecuencia, hacen que este tipo de motores sea más adecuado para su uso en automoción. Cambiando electrónicamente dos de las fases del motor el sentido de giro se invierte y se consigue la marcha atrás sin usar engranajes adicionales lo cual reduce la complejidad del sistema y ahorra peso.

Equipo comercial

El motor se ha seleccionado en función de los requerimientos de potencia que han marcado las características del vehículo y las prestaciones deseadas para el mismo. Puesto que se ha decidido utilizar un único motor para mover todo el conjunto se ha tenido muy presente la elevada carga de potencia a la que estará sometido y, en consecuencia, los requerimientos mecánicos y de refrigeración a los que va a estar expuesto a lo largo de su vida útil. Finalmente, se ha decidido utilizar un motor **Alren 315L 1-6** refrigerado por aire.



Ilustración 36: Motor Alren 315L 1-6 (www.alren.es)

Su potencia es de **90 kw**, que se encuentra por encima de la potencia requerida y sus dimensiones son relativamente contenidas para la aplicación que se está buscando. En la

Ilustración 36 se puede ver una imagen del motor real y en la **Tabla 21** las especificaciones que lo caracterizan.

Tabla 21: Características técnicas motor Alren 315L 1-6 (www.alren.es)

Magnitud	Valor	Unidades
Características generales		
Marca	Alren	
Modelo	315L 1-6	
Máxima eficiencia	94,9	%
Parámetros eléctricos de funcionamiento		
Tensión de alimentación	400	V
Número de polos	4	
Tipo de corriente	Alterna	
Tipo de motor	Trifásico	
Factor de potencia ($\cos(\varphi)$)	0,86	
Intensidad nominal	160,36	A
Intensidad de bloqueo	6,7	A
Parámetros mecánicos de funcionamiento		
Potencia máxima	90	KW
Par máximo	224	N·m
Par de bloqueo	200	N·m
Régimen de giro nominal	990	rpm
Máximo régimen de giro	15.000	rpm
Ruido de funcionamiento	83	db
Dimensiones		
Largo	770	mm
Ancho	480	mm
Alto	55	mm
Peso	68	Kg

Baterías de acumulación

Introducción

Se dispondrá de una batería de acumulación que sea capaz de almacenar la energía proveniente de la pila de combustible en aquellos momentos en los que exista un exceso de producción o en los que los motores eléctricos se encuentren en fase de retención o de generación (práctica muy habitual en vehículos eléctricos o híbridos).

Equipo comercial

La batería seleccionada para utilizar en este proyecto ha sido una batería de la marca Toyota que incluye en alguno de sus modelos híbridos. En el vehículo para el que se está redactando

el proyecto hará funciones similares a las que realiza en un vehículo híbrido que ya se han comentado en el apartado de producción. En la **Tabla 22** se muestran sus características:

Tabla 22: Características de la batería (Toyota motor Company Inc.)

Magnitud	Valor	Unidades
Características generales		
Marca	Panasonic	
Tecnología	Ion-Litio	
Número de celdas	240 (30)	
Parámetros de funcionamiento		
Tensión de funcionamiento	288	V
Capacidad	6.5	A·h
Potencia específica	1192	W/kg
Energía específica	41	W·h/Kg
Dimensiones		
Largo	552	mm
Ancho	382	mm
Alto	96	mm
Peso	68	Kg

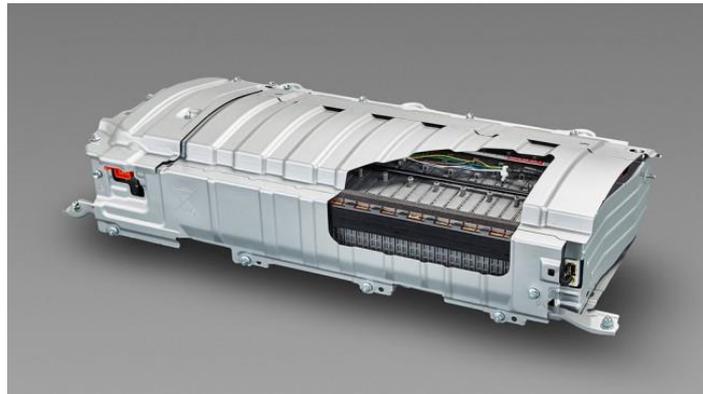


Ilustración 37: Stack de baterías de ion litio (Toyota Motor Company Inc.)

Convertor DC/AC

Este será uno de los elementos más importantes del sistema eléctrico puesto que será el encargado de administrar cada uno de los elementos que forman el equipo y que trabajan con diferentes tensiones eléctricas. La variedad de funcionamiento de los equipos será la siguiente:

- Baterías: 280 V (DC)
- Pila de combustible: 450 V (DC)
- Motores: 400 V (AC)
- Elementos auxiliares: 12 V (DC)

El convertor DC/AC será el dispositivo encargado de gestionar el funcionamiento de todas estas tensiones y para ello contará con un sistema de transformadores y rectificadores

electrónicos. Estará situado en el eje trasero junto a la rueda y también será el encargado de gestionar la recarga del paquete de baterías desde el freno regenerativo.

3.1.8. Sistema de transmisión

Introducción

El sistema de transmisión de un vehículo eléctrico será mucho más simple que el de un vehículo de combustión debido a que será posible prescindir del sistema de velocidades. Esto es así debido a que los motores eléctricos cuentan con una curva de par prácticamente plana y ofrecerán desde el primer momento la máxima cifra de par disponible. Como el par de bloqueo es de 200 N·m no será necesario preocuparse por el par de arranque a la hora de diseñar el sistema de transmisión y, por tanto, solamente se realizará el cálculo de la relación de transmisión necesaria para mantener el punto nominal para la velocidad de 30 m/s que se ha establecido en apartados anteriores como velocidad de crucero:

Ecuación 12: Relación de transmisión

$$RT = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

Donde:

- $\omega_2 = \frac{v}{r}$: Velocidad angular a la salida [rad/s]
- v : Velocidad del vehículo [m/s]
- r : Radio de la rueda [m]
- ω_1 : Velocidad angular a la entrada (giro del motor) [rad/s]

Estableciendo una velocidad de crucero $v = 30$ m/s, se introducirán los siguientes parámetros en la fórmula: $r = 0,31$ m y $\omega_1 =$ rad/s que será la velocidad nominal de giro del motor. Se obtendrá que la relación de transmisión requerida es: **$RT = 1,073874909$**

3.1.9. Sistemas de regulación de presión a la entrada

Introducción

Como se detallará en el apartado 3.2.6, la pila trabajará a una presión por encima de la atmosférica con el objetivo de mejorar el rendimiento del sistema. Por este motivo, será necesario instalar dos sistemas de regulación de presión en las corrientes de entrada. En la **Ilustración 38** se puede apreciar que estos dos sistemas serán un sistema de reducción de presión en la alimentación del combustible (proviene de unos tanques de almacenamiento a 700 bar) y un sistema de presurización en la corriente de aire ya que tiene que elevarlo desde la presión atmosférica a la de operación. La condición necesaria para el buen funcionamiento será que ambas presiones sean iguales debido a que si hay una presión diferencial muy grande, la porosidad de la membrana hará que aparezcan desplazamientos de los flujos hasta el punto de que pueden retornar estropeando los sistemas de alimentación o almacenamiento y creando el fenómeno crossover o diferentes retrocesos en las corrientes.

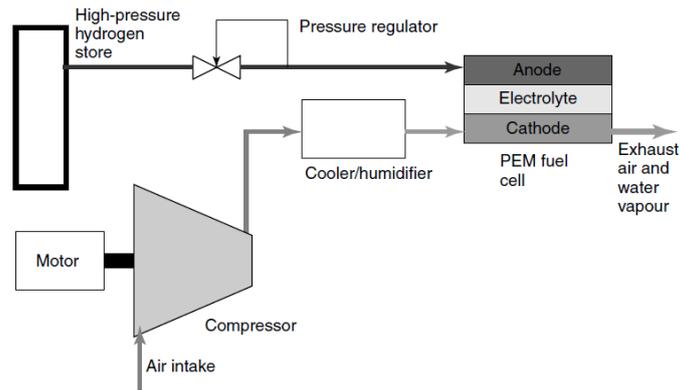


Ilustración 38: Esquema simple de sobrealimentación en una pila PEM (James Larminie and Dicks 2003)

Esquema de funcionamiento circuito reductor de presión de combustible

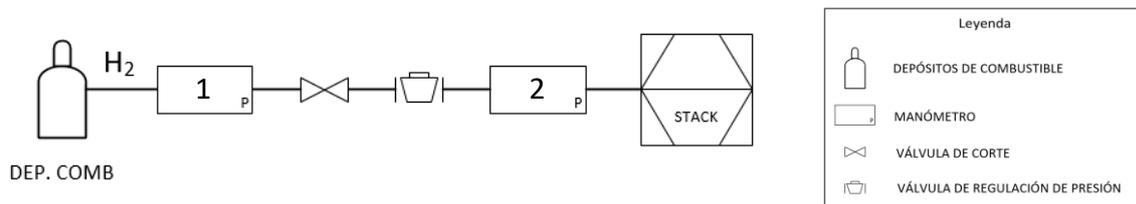


Ilustración 39: Esquema de funcionamiento del sistema reductor de presión en la corriente de entrada de combustible (Creación propia)

Breve descripción de cada componente que forma el sistema:

- **Manómetro 1:** Marcará la presión a la que se encuentra el suministro de combustible desde la bombona.
- **Válvula de corte:** Permitirá desconectar la alimentación de combustible sin que haya contacto del sistema con la atmósfera.
- **Válvula reguladora de presión:** Será el elemento responsable de reducir la presión desde la presión de almacenamiento hasta la presión de operación de la pila
- **Manómetro 2:** Marcará la presión de operación al llegar al stack (CONSIGNA)

Equipo comercial válvula reguladora de presión

Al disponer de hidrógeno almacenado a 700 bares de presión no será necesario aportar ninguna energía al sistema de alimentación puesto que la energía de la que dispone al estar presurizado bastará para desplazarlo por todo el circuito. Para adecuarlo a la presión de operación requerida por el sistema se utilizará una válvula reguladora de presión para gases como ya se ha visto en la **Ilustración 38**. Una válvula reguladora de presión contará con dos componentes que serán un presostato integrado encargado de medir la presión y de introducir la consigna y una válvula de accionamiento electromecánico que abrirá o cerrará el paso electrónicamente en función de la presión de alimentación.

Presostato

Como se puede ver en la **Ilustración 40**, se ha contado con un presostato electrónico de la marca Trafag y modelo EPN-S 8320 cuya toma de información es continua enviándola a la central de procesamiento y posteriormente a la electroválvula para realizar la regulación.



Ilustración 40: Presostato Trafag EPN-S 8320 (www.festo.com)

Electroválvula reguladora de presión

Será una electroválvula de la marca Festo y modelo MS4-LR-1/4-D6-AS que dispone de tarado manual y regulación electrónica. Su aspecto real se muestra en la **Ilustración 41**.



Ilustración 41: Electroválvula Festo MS4-LR-1/4-D6-AS (www.festo.com)

Esquema de funcionamiento compresor de aire

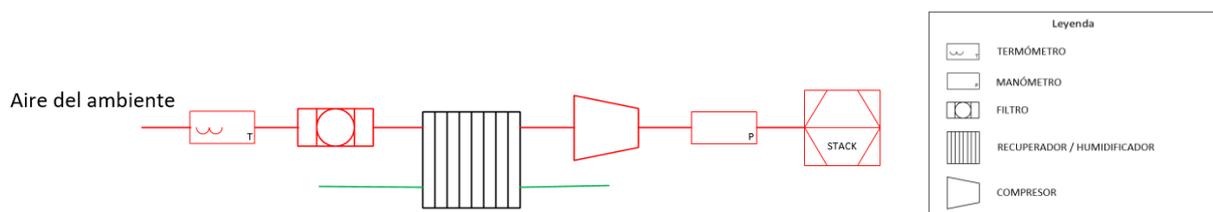


Ilustración 42: Esquema de funcionamiento del sistema de compresión de aire en la corriente de entrada (Creación propia)

Breve descripción de cada componente que forma el sistema:

- **Termómetro:** Dispositivo para medir la temperatura de la entrada de aire.
- **Filtro:** Elemento cuyo objetivo es retener las partículas que se puedan aspirar en la alimentación de aire con el propósito de evitar que deterioren el sistema.
- **Humidificador:** Será el elemento responsable de humidificar la corriente de entrada aprovechando la humedad disponible en la corriente de salida (muy elevada).
- **Compresor:** Este elemento será el responsable de elevar la presión hasta el nivel de operación de la pila.
- **Manómetro:** Marcará la presión de operación del aire (al llegar al stack).

Equipo comercial compresor de aire

El compresor utilizado para alimentar la corriente de aire debe alimentarse de forma eléctrica ya que las corrientes de gases a la salida no tienen la suficiente velocidad o presión para utilizar su energía. Aunque podrían instalarse elementos de enfriamiento como intercoolers que aumentarían la densidad del aire a su llegada a la pila, se ha decidido realizar una aspiración normal del ambiente.



Ilustración 43: Turbocompresor Celeroton CT-14-1000 (www.celeroton.com)

El modelo elegido ha sido el turbocompresor Celeroton CT-14-1000 (como se puede ver en la **Ilustración 43**) debido a que, como se ha comentado en el apartado de cálculos anterior cumplía los parámetros de diseño fijados para la corriente de entrada a la pila. Además, gracias a su diseño de compresión axial será muy compacto y ligero siendo muy adecuado para esta aplicación debido a que la presión obligará a instalar 6 turbocompresores en conjunto. Contará con un inverter electrónico que le permitirá regular la velocidad de giro en función de las necesidades del sistema y los rodamientos de bolas facilitarán el mantenimiento y reducirán el rozamiento de los elementos puesto que prescinde de sistemas de lubricación más allá de los propios sistemas característicos de los rodamientos de bolas. Las características principales vienen reflejadas en la **Tabla 23**.

Tabla 23: Características del turbocompresor Celeroton CT-14-1000 (www.celeroton.com)

Magnitud	Valor	Unidades
Máximo ratio de presión (ΔP)	143	%
Máximo flujo másico de aire	55	g/s
Máxima eficiencia del sistema (η_{tot})	66	%
Máxima potencia consumida	1000	W
Máxima velocidad de giro	200.000	rpm
Peso	0.7	Kg

Cálculos

Como parámetros de selección se han marcado principalmente la presión a alcanzar (**0.6 bar**) y el flujo másico de aire necesario (**0.0823 Kg/s**). Como el compresor seleccionado no alcanza el nivel de presión marcado en una sola etapa se dispondrán 2 compresores en serie y, como el flujo másico para una presión elevada no llega a los 82,3 g/s que marcan las necesidades se

colocará un compresor por cada equipo de pila de combustible. De esta manera tendremos 6 equipos de compresión de aire con la disposición marcada en la **Ilustración 44**:

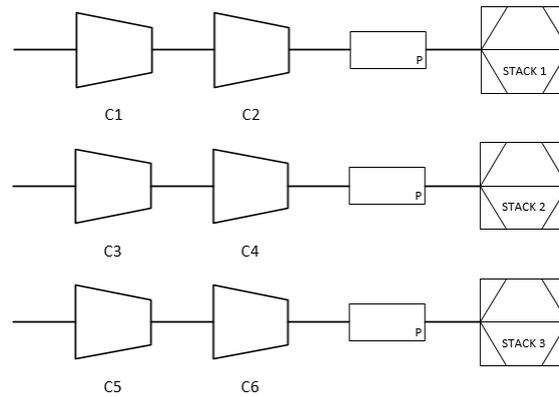


Ilustración 44: Diagrama de disposición de compresores en el sistema de alimentación (creación propia)

Teniendo esta disposición el flujo másico que pasa por cada compresor se reducirá a una tercera parte:

$$\frac{0.0823}{3} = 0.0274 \text{ kg/s}$$

Mientras que el salto de presión que deberá vencer cada uno se reducirá aproximadamente a la mitad:

$$\frac{0.6}{2} = 0.3 \text{ bar}$$

Aplicando estos valores al gráfico de prestaciones representado en la **Gráfico 6** y obteniendo el punto de funcionamiento del sistema, se puede ver que el compresor deberá funcionar a un régimen de giro de unas 180.000 rpm y su rendimiento será considerablemente cercano al máximo posible.

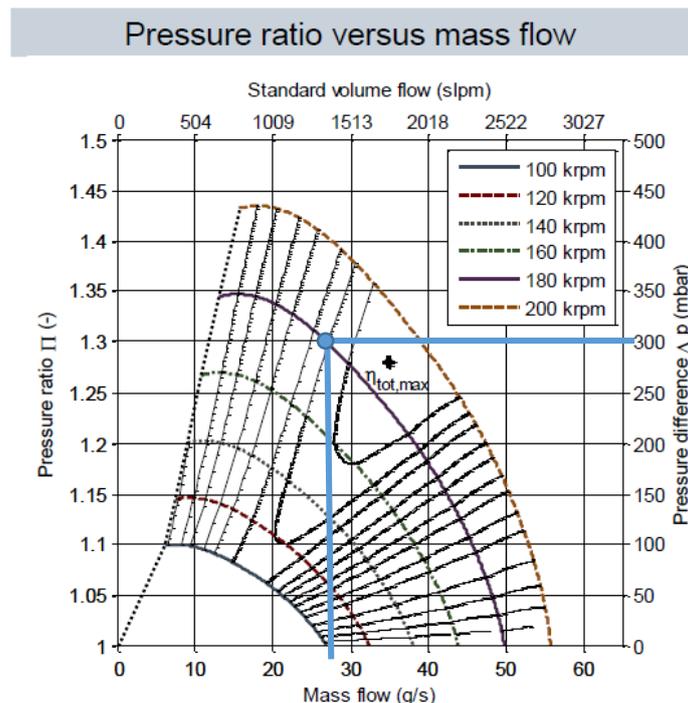


Gráfico 6: Ratio de presión frente a flujo másico (www.celeroton.com)

3.1.10. Gestión de residuos y subproductos

Introducción

A pesar de que las pilas de combustible son equipos que apenas vierten residuos contaminantes al medio cuentan con una serie de subproductos como el agua (en su mayor parte) o aire sin reaccionar que se tendrán que saber gestionar y eliminar del sistema.

Gestión de aire de salida

El flujo de aire a la salida será importante para pilas en los que sea necesario el control de la humedad de la corriente aire de entrada como ocurre con la pila PEM y que ya se ha comentado en apartados anteriores. Esto es así porque la instalación contará con un recuperador de humedad que transmitirá el contenido de agua de la corriente de salida que se desperdiciaría en un momento a la de entrada aprovechando tanto el agua como la energía que se ha usado para su formación. (James Larminie and Dicks 2003)

Ecuación 13: Flujo másico de aire a la salida ($\dot{m}_{salida\ de\ aire}$) (James Larminie and Dicks 2003)

$$\dot{m}_{salida\ de\ aire} = \left(\frac{M_{aire}}{0.21 \cdot \lambda_{O_2} \cdot F} \cdot \lambda_{aire} - \frac{M_{O_2}}{4 \cdot F} \right) \cdot \frac{P_e}{V_c} \text{ Kg/s}$$

Donde:

- M_{aire} : Masa molar de aire [28,97 g/mol]
- M_{O_2} : Masa molar oxígeno molecular [16 g/mol]
- **0,21**: Proporción aprox. de oxígeno en el aire
- λ_{O_2} : Coeficiente estequiométrico del oxígeno (4)
- **F**: Constante de Faraday [96.458 C/mol]
- P_e : Potencia eléctrica de la pila [W]
- V_c : Tensión de celda [V]

Aplicado al equipo que se está diseñando se introducirán los siguientes valores: $P_e = 89481,99 \text{ W}$, $V_c = 1,18 \text{ V}$ y se ha obtenido que $\dot{m}_{salida\ de\ aire} = 0,078 \text{ kg/s}$.

Producción de agua dentro de la pila

La producción de agua en la pila se lleva a cabo debido a la reacción redox que se induce dentro de la misma. Se creará un flujo másico correspondiente a la siguiente fórmula:

Ecuación 14: Máximo flujo másico de agua producido en la pila ($\dot{m}_{agua\ producida}$)

$$\dot{m}_{agua\ producida} = \frac{M_{H_2O}}{F} \cdot \frac{P_e}{V_c} \text{ [Kg/s]}$$

Donde:

- M_{H_2O} : Masa molecular del agua [18 g/mol]
- **F**: Constante de Faraday [96.458 C/mol]

- P_e : Potencia total del sistema [W]
- V_c : Tensión de celda [V]

Introduciendo los mismos valores de P_e y V_c que en la **Ecuación 14** se obtendrá que el flujo másico de agua producida dentro de la pila es: $\dot{m}_{agua\ producida} = 0,022$ kg/s

3.2. Parámetros de operación

3.2.1. Potencia requerida por el sistema

Introducción

La potencia que se necesitará de la pila dependerá principalmente de las características del vehículo (tanto mecánicas como de funcionamiento) y de los niveles de eficiencia que seamos capaces de alcanzar una vez se haya puesto el sistema en funcionamiento.

Cálculos

La ecuación que marca las necesidades de potencia para un vehículo es la siguiente:

Ecuación 15: Potencia requerida por el vehículo (P_r)

$$P_r = \frac{(m_v \cdot a \cdot v + 0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_F \cdot v^3 + m \cdot g \cdot C_R \cdot v + m \cdot g \cdot v \cdot \sin(\alpha))}{\epsilon_T} + P_{aux} \text{ [kW]}$$

Donde:

- m_v : Masa total del vehículo [kg]
- m_p : Masa de pasajeros [kg]
- a : Aceleración del vehículo requerida [m/s^2]
- v : Velocidad del vehículo requerida [m/s]
- ρ : Densidad del aire [kg/m^3]
- C_x : Coeficiente aerodinámico de penetración del vehículo [s^2/kg]
- A_F : Área frontal del vehículo [m^2]
- g : Aceleración de la gravedad [m/s^2]
- C_R : Coeficiente de rozamiento con el suelo
- α : Ángulo de inclinación de la calzada [rad]
- ϵ_T : Rendimiento total sistema (incluye rendimiento pila, motor y transmisión) [%]
- P_{aux} : Potencia necesaria para accionar los elementos auxiliares [W]

Los valores que se han considerado para realizar el cálculo anterior han sido los siguientes: $m_v= 1100$ kg, $m_p= 240$ kg, $a= 1,3$ m/s^2 , $v= 30$ m/s, $\rho= 1,29kg/m^3$, $C_x= 0,24$ s^2/kg , $A_F= 2$ m^2 , $g= 9,81$ m/s^2 , $C_R= 0.0085$, $\alpha= 0,02rad$, $\epsilon_T= \%$, $P_{aux}= 400$ W. Los parámetros que están marcados en azul son parámetros universales. Por otra parte, caben destacar las siguientes observaciones de los demás: Las masas del vehículo se han establecido en tanto en cuanto se ha considerado para definir un vehículo de 4 plazas de tamaño medio. La aceleración se ha marcado como aceleración máxima que se va a alcanzar y en el caso de la velocidad, se ha marcado la velocidad de crucero habitual. Por último, se ha querido dar una potencia de consumo de 400 W a los sistemas auxiliares que incluirían iluminación exterior e interior, gestión electrónica, marcadores...

Aplicando los valores presentados a la **Ecuación 15** se obtendrá que el valor de la potencia requerida por el sistema será: $P_r = 170784,8476$ W. Esta potencia será la que marcará las necesidades de hidrógeno a la entrada.

También existirá el concepto de "Potencia eléctrica" que se utilizará como base de cálculo para muchas operaciones posteriormente y que se define como la potencia de salida de la pila. Será la potencia que tiene justamente antes de aplicarle el rendimiento eléctrico, de motor y de transmisión.

Ecuación 16: Potencia eléctrica (P_e)

$$P_e = (m_v \cdot a \cdot v + 0.5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A_F \cdot v^3 + m \cdot g \cdot C_R \cdot v + m \cdot g \cdot v \cdot \sin(\alpha)) / \epsilon_{trans} + P_{aux}$$

Donde:

- ϵ_{trans} : Rendimiento de transmisión (incluye el rendimiento eléctrico, de motor y de transmisión) [%]

Introduciendo los valores en la fórmula se obtiene que la potencia eléctrica será : $P_e = 89481,99491$ **W**, que sería equivalente a unos 120 cv que es lo que se marcaba como potencia objetivo a la hora de diseñar el vehículo.

3.2.2. Alimentación de la pila

El proceso de alimentación de reactivos debe llevarse a cabo de forma cuidadosa puesto que es relativamente fácil mezclar las corrientes de alimentación de la pila. Para evitar este fenómeno se han desarrollado diferentes tecnologías de canalización que reducen el riesgo de mezcla mediante juntas y flujos cruzados canalizados mediante placas bipolares.

Alimentación de Hidrógeno

Introducción

La alimentación de hidrógeno se realizará a partir de un depósito de combustible presurizado como se comentó en el apartado 3.1.1 en el que se detallaban los sistemas de almacenamiento. Para conseguir la presión requerida, ésta se reducirá mediante una válvula estranguladora (véase esquema de la **Ilustración 39**). Además existirá un sistema de recirculación perfectamente acompasado con un sistema de purga (como se puede ver en la **Ilustración 45**) que permitirá aprovechar al máximo el combustible que no ha conseguido reaccionar en la primera pasada.

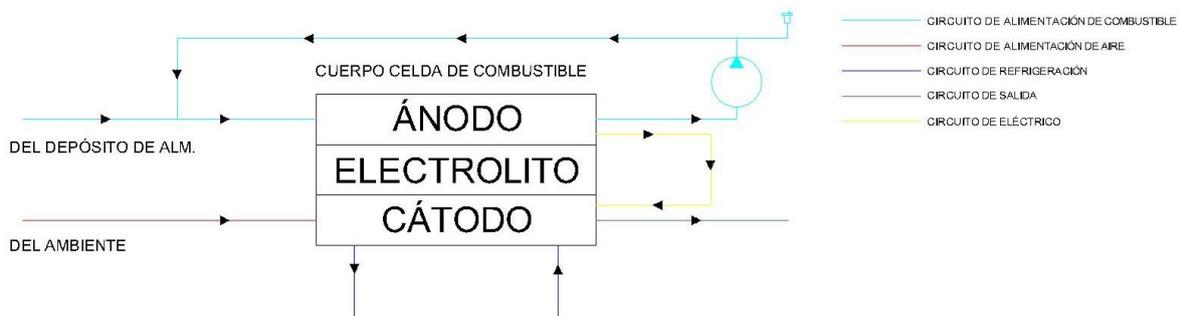


Ilustración 45: Esquema de funcionamiento sistema alimentación de hidrógeno. (Creación propia)

El parámetro que regula la eficiencia de reacción del combustible será el factor de utilización del combustible en cada pasada por la pila y su valor se ha establecido en $\mu_f = 0,85$.

Cálculos

Ecuación 17: Flujo másico de hidrógeno necesario a la entrada (\dot{m}_{H_2}) (J. Larminie and A. Dicks 2003)

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{M_{H_2} \cdot P_e}{2 \cdot V_c \cdot F} \quad [Kg/s]$$

Donde:

- M_{H_2} : Masa molar hidrógeno molecular [2,02 g/mol]

- P_e : Potencia eléctrica de la pila [W]
- V_c : Tensión real de celda [V]
- F : Constante de Faraday [96.458 C/mol]

Los valores que se han utilizado para los parámetros anteriores han sido los siguientes: $P_e=89481,99$ W, $V_c= 1,18$ V y se ha obtenido que $\dot{m}_{H_2} = 0,001408$ kg/s.

Equipo comercial

Bomba de recirculación

Como se puede ver en la **Ilustración 45**, se ha instalado un compresor eléctrico en el sistema de recirculación con el objetivo que evacuar el hidrógeno que no se ha utilizado, compensar la pérdida de carga que se produce al paso por la pila y evitar de esta manera que la dirección de movimiento del flujo de combustible sea contraria a la establecida.

La base de cálculo con la que se cuenta para seleccionar un compresor será la siguiente:

Flujo másico de hidrógeno residual: $\dot{m}_{H_2(residual)} = (1 - \mu_f / \mu_{rec}) \cdot \dot{m}_{H_2}$, en la cual los valores de los parámetros serán: $\mu_f=0,85$, $\mu_{rec}=1,72$ siendo este último la tasa de recirculación que hay que incluir en este caso debido a que el flujo másico a la salida de la pila es muy reducido. De esta manera se intentará garantizar un paso de aire suficiente por la pila y una presión de impulsión que sea superior a la de entrada.

$$\dot{m}_{H_2(residual)} = 7,112 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Presión de operación:

$$P_{TOTAL} = 1,6 \text{ bar}_g$$

Con los datos anteriores se ha decidido utilizar un compresor comercial de la marca **Celeroton**, concretamente el modelo **CT-17-700**.



Ilustración 46: Aspecto del turbocompresor Celeroton CT-17-700 (www.celeroton.com)

Tabla 24: Características del turbocompresor Celeroton CT-14-1000 (www.celeroton.com)

Magnitud	Valor	Unidades
Máximo ratio de presión (ΔP)	170	%
Máximo flujo másico de aire	16	g/s
Máxima eficiencia del sistema (η_{tot})	63	%
Máxima potencia consumida	700	W
Máxima velocidad de giro	280.000	rpm
Peso	0.6	Kg

En la **Tabla 24** se detallan las características técnicas del compresor entre las que cabe destacar su alto régimen de giro (giro sobre cojinetes autolubricados) y su baja relación peso/incremento de presión.

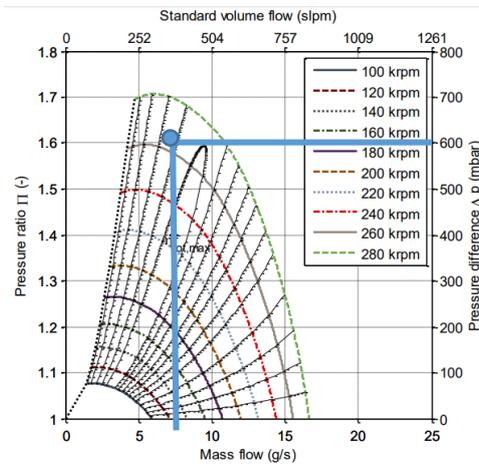


Gráfico 7: Ratio de presión frente a flujo másico (www.celeroton.com)

Como se puede ver en el **Gráfico 7**, para conseguir las prestaciones requeridas el modelo de compresor seleccionado deberá girar a una velocidad de giro de unas 270.000 rpm lo cual es muy superior a la velocidad de giro del compresor utilizado en la alimentación de oxidante como se vio en el apartado 3.1.9.

Alimentación de Oxígeno

Introducción

La alimentación de oxidante se puede llevar a cabo mediante oxígeno puro o mediante aire que proporcione oxígeno disponible en su composición. Para aplicaciones como la de este proyecto, lo más habitual es tener una alimentación directa de aire del ambiente puesto que alimentar con oxígeno puro supondría llevar un sistema de almacenamiento a mayores, además de ser más costoso. Para evitar estos inconvenientes se ha seleccionado esta opción para aplicarla en el proyecto que se está llevando a cabo.

Esquema de funcionamiento

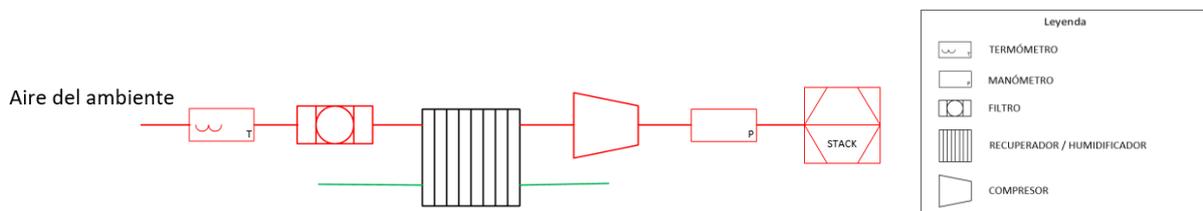


Ilustración 47: Esquema de funcionamiento del sistema de compresión de aire en la corriente de entrada (Creación propia)

Cálculos

Ecuación 18: Flujo másico de aire necesario a la entrada ($\dot{m}_{\text{entrada de aire}}$) (James Larminie and Dicks 2003)

$$\dot{m}_{\text{entrada de aire}} = \frac{M_{\text{aire}}}{0.21 \cdot \lambda_{O_2} \cdot F} \cdot \lambda_{\text{aire}} \cdot \frac{P_e}{V_c} \left[\text{Kg/s} \right]$$

Donde:

- M_{aire} : Masa molar de aire [28,97 g/mol]
- λ_{aire} : Coeficiente estequiométrico del aire (2)
- P_e : Potencia eléctrica de la pila [W]
- V_c : Tensión de celda [V]
- F : Constante de Faraday [96.485 C/mol]
- λ_{O_2} : Coeficiente estequiométrico del oxígeno (4)

Aplicándolo al sistema que se está diseñando se introducirán los siguientes valores: $P_e = W$, $V_c = 1,18$ V obteniendo un resultado de: $\dot{m}_{\text{entrada de aire}} = 0,081624558$ kg/s

La **Ecuación 18** estará basada en la ecuación de requerimiento de oxígeno del sistema, que se relacionará con esta mediante la proporción de O₂ presente en el aire y las masas molares de cada sustancia: $\dot{m}_{O_2} = \frac{M_{O_2} \cdot P_e}{\lambda_{O_2} \cdot V_c \cdot F} \left[\text{Kg/s} \right]$

Equipo comercial

El equipo comercial específico que se va a utilizar para esta instalación será un recuperador de humedad que, como se ha explicado anteriormente, servirá para captar la humedad de la corriente de salida e incluirla en la corriente de entrada. De esta manera se evitarán posibles problemas que puedan surgir en lo que a hidratación de la membrana se refiere. El equipo seleccionado será un recuperador de papel de flujo cruzado de la marca **Salvador Escoda**, concretamente el modelo **MU-RECO 800 BQ** que permitirá caudales de hasta 800 m³/h (cuando en el equipo se están utilizando aproximadamente 550 m³/h).



Ilustración 48: Aspecto real del recuperador Salvador Escoda MU-RECO 800 BQ (www.salvadorescoda.com)

Se ha decidido utilizar este equipo debido a que ya incluye un sistema de filtración incorporado y, además sus dimensiones son contenidas para el flujo de aire con el que trabaja.

Estequiometría

Se han llevado a cabo simulaciones variando las presiones desde la atmosférica hasta 25 psi manométricos con relaciones estequiométricas de aire de 200, 250 y 300% llegando a la conclusión de que no había una variación significativa del voltaje de la celda siempre que la temperatura fuera adecuada para la reacción química y se distribuyera uniformemente en la célula. (Ubong, Shi, and Wang 2009) Por este motivo se ha decidido que la alimentación sea

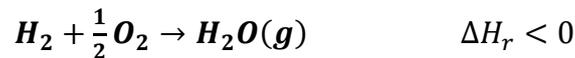
con una proporción ligeramente por encima de la estequiométrica para evitar problemas de defecto de alimentación pero sin necesidad de sobredimensionar la instalación.

3.2.3. Aspectos termodinámicos de la reacción (energía libre de Gibbs)

Introducción

En el proceso de funcionamiento de una pila de combustible con hidrógeno en la alimentación se lleva a cabo una reacción de oxidación del hidrógeno para formar agua según la siguiente reacción:

Ecuación 19: Reacción de oxidación del hidrógeno como combustible



La entalpía de reacción (ΔH_r) será igual a la entalpía de formación de agua ($\Delta_f H_{\text{H}_2\text{O}}$). Generalmente se obtendrá como producto agua en estado gaseoso por lo que habrá que utilizar el poder calorífico superior del H_2O para caracterizar dicha reacción.

Energía libre de Gibbs

En condiciones normales, la máxima diferencia de potencial que se puede obtener de una pila estará definida por el incremento de energía entre el instante inicial y el final. La variación de energía libre de Gibbs se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 20: Incremento de energía libre de Gibbs teórico en la reacción (ΔG^0)

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 + T \cdot \Delta S^0$$

Ecuación 21: Cálculo de energía libre de Gibbs en función de la energía específica ($\Delta \bar{g}_f$)

$$\Delta \bar{g}_f = (\bar{g}_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (\bar{g}_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(\bar{g}_f)_{\text{O}_2}$$

El problema que existe para aplicar esta fórmula es que la energía libre de Gibbs no es constante y dependerá del estado del combustible y de la temperatura. En la siguiente tabla se muestran algunos valores para esta reacción y diferentes temperaturas (J. Larminie and A. Dicks 2003).

Tabla 25: Energía libre de Gibbs $\Delta\bar{g}_f$, máxima tensión en circuito abierto y límite de eficiencia referido al poder calorífico superior para la reacción $H_2 + 2O_2 \rightarrow H_2O$ a diferentes temperaturas (James Larminie and Dicks 2003)

Temperatura (°C)	LHV (J/mol)	HHV (J/mol)	Δg_f (J · mol ⁻¹) (Est: Gas)	Δg_f (J · mol ⁻¹) (Est: Líquido)	Máx. tensión circ. Abierto (V) (Est: Gas)	Máx. tensión circ. Abierto (V) (Est: Líquido)	Límite de eficiencia (%)
-25	241300	287400	-230800	-245400	1,196375625	1,272056232	-
0	241600	286600	-229700	-241300	1,190673661	1,250803459	-
25	241800	285800	-228600	-237100	1,184971698	1,229032325	83
50	242100	285000	-227500	-233100	1,179269734	1,208297912	80
100	242600	283400	-225200	-225200	1,167347447	1,167347447	79
200	243500	280000	-220400	-210000	1,142466151	1,088556678	77
400	245300	265800	-210300	-199000	1,090111758	1,031537042	74
600	246900	242300	-199700	-230400	1,035165564	1,194302183	70
800	248200	218800	-188700	-267100	0,978145929	1,384540422	66
1000	249300	195300	-177500	-308300	0,920089573	1,598104875	62

Ecuación 22: Energía específica de Gibbs a una P y una T determinadas (G)

$$G = R \cdot T \cdot (-\ln(k_p)) + \ln\left((P_{H_2}^{n_{H_2}}) \cdot (P_{O_2}^{n_{O_2}}) \cdot (P_{H_2O}^{n_{H_2O}})\right) \text{ [J/mol}_{\text{comb}}]$$

Donde:

- **R**: Constante de los gases ideales [8,31 J/kg·K]
- **T**: Temperatura de operación de la pila [K]
- **k_p**: Constante de equilibrio [bar^{-1.5}]
- **P_{H₂}, P_{O₂}, P_{H₂O}**: Presiones parciales [Pa]
- **n_{H₂}, n_{O₂}, n_{H₂O}**: Número de moles que actúan en la reacción (- si está en los reactivos)

Aplicándolo al sistema de estudio habrá que introducir los siguientes parámetros: **T** = 353 K, **k_p** = 3,33573E+33 bar^{-1.5}, **P_{H₂}** = 162120 Pa, **P_{O₂}** = 34045,2 Pa, **P_{H₂O}** = 162120 Pa, **n_{H₂}** = -1 mol, **n_{O₂}** = -0,5 moles, **n_{H₂O}** = 1 mol obteniendo como resultado: **G**= -226430,9164 J/mol_{comb}

A partir de este parámetro se podrá calcular el rendimiento total de la pila (**Ecuación 34**), y la potencia libre de Gibbs como se puede ver en la **Ecuación 23**:

Ecuación 23: Potencia libre de Gibbs

$$P_G = G \cdot \frac{\dot{m}_{H_2}}{M_{H_2}} \text{ [W]}$$

Donde:

- **m_{H₂}**: Flujo másico de combustible (H₂) [kg/s]
- **M_{H₂}**: Masa molar hidrógeno molecular [2,02 g/mol]

Introduciendo del valor del flujo másico de combustible en la fórmula anterior (**m_{H₂}**=0,0014 kg/s) se obtendrá que la potencia libre de Gibbs desarrollada es de: **P_G** = 159438,264 W

3.2.4. Tensión de trabajo y sobrepotenciales de la celda

El valor teórico de tensión de una pila de combustible es de aproximadamente 1.23 V para una celda que funciona por debajo de 100 °C. Sin embargo, cuando la pila se pone en funcionamiento este voltaje se reduce pudiendo llegar a tener valores hasta de 0.4 V en casos en los que la demanda de intensidad es muy elevada. (James Larminie and Dicks 2003) Para determinar el valor de la tensión de celda para unas presiones parciales determinadas, tanto para reactivos como productos, habrá que utilizar la ecuación de Nernst escrita en la **Ecuación 26**. La ecuación de Nernst requerirá el conocimiento del valor de la tensión de circuito abierto V_c^0 que se calculará mediante las **Ecuaciones 24 y 25**.

Ecuación 24: Trabajo eléctrico realizado (J. Larminie and A. Dicks 2003)

$$W_e = \text{Carga} \cdot \text{Voltaje} = -z \cdot F \cdot V_c$$

Donde:

- F : Constante de Faraday [96.485 C/mol]
- V_c : Tensión de celda [V]
- z : Número de electrones que se transfieren por cada molécula de combustible (Hidrógeno=2)

En caso de trabajar con un sistema reversible, el trabajo eléctrico W_e coincidirá con la energía libre de Gibbs liberada $\Delta\bar{g}_f$ y la tensión de celda se convertirá en tensión de celda en circuito abierto (J. Larminie and A. Dicks 2003). En la **Ecuación 25** se pueden ver todos estos parámetros sustituidos y la tensión de celda en circuito abierto despejada, que es lo que se necesitará en la Ecuación de Nernst.

Ecuación 25: Fuerza electromotriz de un sistema reversible (en circuito abierto) (J. Larminie and A. Dicks 2003)

$$V_c^0 = \frac{-\Delta\bar{g}_f}{z \cdot F}$$

Sustituyendo en la **Ecuación 25** los siguientes valores: $\Delta\bar{g}_f =$, $z =$, $F =$, se obtiene que la tensión de circuito abierto es igual a: $V_c^0 = 1,19 \text{ V}$.

Ecuación 26: Ecuación de Nernst (V_c)

$$V_c = V_c^0 + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{1/2}}{P_{H_2O}} \right)$$

Donde:

- V_c^0 : Fuerza electromotriz en circuito abierto [V]
- R : Constante de los gases ideales [8,31 J/kg·K]
- T : Temperatura de operación [K]
- P_{H_2} : Presión parcial hidrógeno [Pa]
- P_{O_2} : Presión parcial oxígeno [Pa]
- P_{H_2O} : Presión parcial agua [Pa]

Para el sistema de estudio se introducirán los siguientes valores: $V_c^0 = 1,19 \text{ V}$, $T = 353 \text{ K}$, $P_{H_2} = 162120 \text{ Pa}$, $P_{O_2} = 34045,2 \text{ Pa}$, $P_{H_2O} = 162120 \text{ Pa}$. El resultado de la tensión de celda será $V_c = 1,18 \text{ V}$.

Como se puede ver, el valor obtenido es menor que el teórico y será debido principalmente a que la temperatura de trabajo es relativamente baja. En caso de trabajar a altas temperaturas

la tensión máxima posible se reduce, pero la caída de tensión a baja densidad de corriente es mucho menor, lo cual mejora su comportamiento frente a las de baja temperatura ya que se obtiene una curva prácticamente lineal y más próxima a la horizontal. Las irreversibilidades a altas temperaturas son menores. (James Larminie and Dicks 2003)

Pérdidas e irreversibilidades que ocasionan las caídas de tensión

Existen varios fenómenos químicos dentro de la pila que reducirán considerablemente su rendimiento. Para poder determinarlos y cuantificarlos se utilizan los sobrepotenciales que se desarrollarán a lo largo de este apartado.

Sobrepotencial de activación

Ocasionado por la necesidad energética que tiene el sistema para poner en movimiento los electrones desde la superficie de los electrodos. Para el caso de pilas de hidrógeno es muy habitual considerar que la sobretensión en el ánodo es despreciable en comparación con la del cátodo.

Ecuación 27: Sobrepotencial de activación del ánodo (Ecuación de Tafel) (Kabza 2015)

$$\eta_{act} = a + b \cdot \ln(i)$$

Donde:

- $a = -\frac{R \cdot T}{z \cdot \alpha \cdot F} \cdot \ln(i_0)$: Ordenada en el origen
- $b = \frac{R \cdot T}{z \cdot \alpha \cdot F}$: Pendiente de Tafel
- R : Constante de los gases ideales [8,31 J/kg·K]
- T : Temperatura de operación [K]
- z : Número de electrones que se transfieren por cada molécula de combustible (Hidrógeno=2)
- α : Coeficiente de transferencia de carga
- F : Constante de Faraday [96.485 C/mol]
- i_0 : Densidad de corriente de intercambio [A/m²]
- i : Densidad de corriente de la pila [A/m²]

Aplicándolo al sistema que se está diseñando se introducirán los siguientes valores en la fórmula: $T = K$, $\alpha = 0,5$ (valor correspondiente a una pila PEM), $i_0 = 2000 \text{ A/m}^2$ (teniendo en cuenta que el catalizador utilizado es Platino), $i = 8000 \text{ A/m}^2$ (marcado como parámetro de diseño) y se obtendrá el siguiente valor: $\eta_{act} = 0,034 \text{ V}$

Solamente se hará del ánodo debido a que la densidad de corriente que circula por el cátodo es tan reducida que se puede despreciar a la hora de hacer este cálculo. El hecho de expresar esta ecuación en función de los parámetros de Tafel permitirá conocer inmediatamente los valores de la pendiente de la curva y la ordenada en el origen. Esto servirá para tener una orientación de cómo está trabajando en este aspecto la pila.

Sobrepotencial por cruce de combustible y corrientes internas

Esta pérdida de energía resulta del desperdicio de combustible que se difunde a través del electrolito principalmente. Exceptuando los casos de celdas de metanol directo con corrientes muy bajas, este fenómeno suele despreciarse. En este caso **se desprecia**.

Sobrepotencial óhmico

Caída de tensión directamente relacionada con la resistencia que oponen los diferentes materiales de los componentes del sistema al flujo de electrones a través de los mismos. La caída de voltaje será directamente proporcional a la densidad de corriente que pase por el circuito.

Ecuación 28: Sobrepotencial óhmico (η_{ohm})

$$\eta_{ohm} = i \cdot r_{cell} \quad [V]$$

Donde:

- r_{cell} : Resistencia específica de la celda de combustible [$\Omega \cdot \text{cm}^2$]

La densidad de corriente $i = 8000 \text{ A/m}^2$, que como ya se dijo antes estaba marcada como base de diseño mientras que la resistencia de la celda dependerá de los componentes de la misma. En este caso se ha establecido un valor de $r_{cell} = 2,450\text{E-}05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ debido a que la Membrana está compuesta por Nafion 117 y las placas bipolares son de acero inoxidable+TiN. De esta manera se obtiene un valor para el sobrepotencial óhmico de: $\eta_{ohm} = 0,196 \text{ V}$

Sobrepotencial de transporte o pérdidas de concentración

Aparece como resultado del cambio en la concentración de los reactivos en la superficie de los electrodos a medida que se utiliza el combustible debido a la incapacidad del sistema para proporcionar suficiente reactivo a los lugares de reacción.

Ecuación 29: Sobrepotencial de transporte (Aproximación empírica) (James Larminie and Dicks 2003)

$$\eta_{conc} = m \cdot \exp(n \cdot i) \quad [V]$$

Contará con dos parámetros de ajuste que se establecerán en función de la tecnología utilizada. Para el caso de una pila con tecnología PEM se utilizarán los siguientes valores: $m = 3 \cdot 10^5 \text{ V}$ y $n = 8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{mA}$, que sustituyéndolos en la **Ecuación 29** se obtendrá un valor para el sobrepotencial de transporte de: $\eta_{conc} = 1,27\text{E-}02 \text{ V}$.

Como se puede apreciar, por su valor será mucho menos significativo que los sobrepotenciales que se han visto anteriormente, pero no será lo suficientemente bajo como para despreciarlo.

La **Ecuación 29** será una aproximación empírica que estará basada en la ecuación teórica que se muestra a continuación: $\eta_{conc} = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{C_S}{C_B}\right) = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right)$ [V] Donde: R : Constante de los gases ideales [J/kg·K], T : Temperatura de operación [K], $i = \frac{z \cdot F \cdot D \cdot (C_B - C_S)}{\delta}$: Densidad de corriente de la pila [A/m^2], $i_L = \frac{z \cdot F \cdot D \cdot C_B}{\delta}$: Densidad de corriente límite [A/m^2], z : Número de electrones que se transfieren por cada molécula de

combustible (Hidrógeno=2), D : Constante de difusión de Fick [m^2/s], C_B : Concentración de la especie reactiva en el interior, C_S : Concentración de la especie reactiva en la superficie, δ : Espesor de la capa de difusión [m].

Tensión de trabajo real

Tras haber calculado la tensión teórica con la ecuación de Nernst (**ecuación 26**) y haber calculado todos los sobrepotenciales que minoran el rendimiento de la pila por diferentes fenómenos químicos (**Ecuaciones 27, 28, 29**) se podrá determinar la tensión que podrá aportar al sistema cada celda que lo conforma mediante la **Ecuación 30**:

Ecuación 30: Tensión de operación real teniendo en cuenta los sobrepotenciales (V_{cr}) (Ecuación simplificada)

$$V_{cr} = V_c - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{conc} = V_c - A \cdot \ln(i) - i \cdot r + m \cdot \exp(n \cdot i) \quad [\text{V}]$$

Donde:

- V_c : Tensión de celda
- $A = \frac{R \cdot T}{z \cdot \alpha \cdot F}$: Pendiente de Tafel
- r : Resistencia específica [Ω/m^2]
- m, n : Constantes de la ecuación de sobrepotencial de transferencia
- i : Densidad de corriente de la pila. [A/m^2]

Teniendo en cuenta lo anterior y aplicándolo al sistema que se está diseñando se introducirán los siguientes parámetros: $V_c = 1,18 \text{ V}$, $A = 0,025 \text{ V}$, $i = 8000 \text{ A}/\text{m}^2$, $m = 3 \cdot 10^5 \text{ V}$, $n = 8 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{mA}$, $r_{cell} = 2,450\text{E-}05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$. A partir de los mismos, se obtendrá que la tensión real de celda será: $V_{cr} = \mathbf{0,776 \text{ V}}$.

3.2.5. Eficiencia y límites de eficiencia

A diferencia de los casos de los generadores eólicos, en los que la energía máxima está marcada con el Coeficiente de Betz (Energía máxima del generador = $0,58 \times$ energía cinética del viento) o en las máquinas térmicas cuya eficiencia se encuentra limitada por el ciclo de Carnot (límite de Carnot= T_1-T_2/T_1), en el caso de las pilas de combustible se podría alcanzar el 100% de rendimiento en caso de que no existiesen irreversibilidades. (James Larminie and Dicks 2003) De ahí su interés en realizar inversiones para mejorar sus eficiencias.

En primer lugar, se planteará la máxima eficiencia teórica que se podría alcanzar (límite de eficiencia). Este fenómeno se conseguiría en el caso de que el proceso fuese totalmente reversible, lo cual significaría que la energía eléctrica coincidiría con la energía libre de Gibbs y por tanto figuraría en el numerador de la **Ecuación 31**:

Ecuación 31: Máxima eficiencia teórica (ϵ_{max}) (Kabza 2015)

$$\epsilon_{max} = \frac{\Delta \bar{g}_f}{\Delta \bar{h}_f} \cdot 100 \quad [\%]$$

Donde:

- $\Delta \bar{g}_f$: Energía libre de Gibbs [$\text{J}/\text{mol}_{\text{comb}}$]
- $\Delta \bar{h}_f$: Entalpía de formación del agua en estado gas [$\text{J}/\text{mol}_{\text{comb}}$]

Aplicándolo al equipo que se está diseñando se introducirán los siguientes valores: $\Delta \bar{g}_f = -226430,92 \text{ J}/\text{mol}_{\text{comb}}$ y para $\Delta \bar{h}_f = -114690,485 \text{ J}/\text{mol}_{\text{comb}}$ que será la entalpía de formación del

agua en estado gaseoso puesto que es la forma de trabajo de la pila diseñada. A partir de esto se obtendrá una eficiencia máxima teórica de $\epsilon_{max} = 93,64\%$

En la **Ecuación 32** se calcula la eficiencia térmica en la cual se compara la potencia eléctrica obtenida de la pila con respecto a la potencia calorífica que sería capaz de dar el combustible si se pudiese aprovechar el 100 % de la misma.

Ecuación 32: Eficiencia térmica de la pila (ϵ_{term}) (J. Larminie and A. Dicks 2003)

$$\epsilon_{term} = \frac{P_e}{P_C} [\%]$$

Donde:

- P_e : Potencia eléctrica [W]
- $P_C = \frac{\dot{m}_{H_2}}{\Delta \bar{h}_f}$: Potencia calorífica del combustible consumido [W]
- \dot{m}_{H_2} : Flujo másico de combustible (H₂) [kg/s]
- $\Delta \bar{h}_f$: Entalpía de formación del agua en estado gas [J/kg_{comb}]

Aplicándolo al equipo que se está diseñando se introducirán los siguientes valores: $P_e = 89481,994$ W, $\dot{m}_{H_2} = 0,001408$ kg/s y $\Delta \bar{h}_f = -114690,485$ J/g, que darán una eficiencia eléctrica de: $\epsilon_{elec} = 55,40\%$

Con la **Ecuación 32** se analizará la eficiencia del equipo en sí mismo, que da un valor del **55,4 %**. Esto quiere decir que el rendimiento es considerablemente elevado contando con que hay un proceso de oxidación intermedio que desprende mucho calor residual y que penalizará considerablemente la eficiencia del equipo. Este rendimiento es comparable a los motores de combustión interna más eficientes funcionando en condiciones de diseño. Por este motivo se considera que es muy elevado con respecto a los motores de combustión interna debido al estado actual de la tecnología de la pila de hidrógeno.

En el caso de la **Ecuación 33** se estará analizando la eficiencia a nivel eléctrico. Por ello, entrarán en juego todos aquellos fenómenos que minoran el rendimiento de funcionamiento de la pila que se encuentran representados por los sobrepotenciales como se explicó en el apartado 3.2.4. Este rendimiento sería máximo si el proceso fuese reversible puesto que la tensión de celda V_c coincidiría con la tensión de celda en circuito abierto V_c^0 .

Ecuación 33: Eficiencia eléctrica de la celda (ϵ_{elec}) (Cid 2014)

$$\epsilon_{elec} = \frac{W_{real}}{W_{teórico}} = \frac{z \cdot F \cdot V_c}{z \cdot F \cdot V_c^0} = \frac{V_c \cdot \mu_f}{V_c^0}$$

Donde:

- V_c : Tensión de celda [V]
- V_c^0 : Tensión de celda en circuito abierto [V]
- $\mu_f = \frac{\text{Masa de combustible reaccionado}}{\text{Masa de combustible consumida}}$: Coeficiente de utilización del combustible [%]

Aplicándolo al equipo diseñado se introducirán los siguientes valores: $V_c = 0,776$ V, $V_c^0 = 1,19$ V y $\mu_f = 85$ % . A partir de lo anterior se obtendrá la siguiente eficiencia eléctrica: $\epsilon_{elec} = 55,96$ %.

Es un valor bastante alto que habitualmente suele encontrarse entre 50 y 70 %, lo cual indica que las pérdidas de tensión que existen dentro de la pila son relativamente reducidas. Esto puede deberse a la utilización de materiales de calidad como las membranas de Nafion, que cuentan con una conductividad muy elevada (reduciendo el sobrepotencial óhmico) y una

resistencia al paso de corrientes (reduciendo el sobrepotencial de transporte) o las placas bipolares de acero inoxidable, que como se comentará en el apartado 3.3.1, tendrán una relación conductividad-precio muy buena.

A partir de los valores calculados en las **Ecuaciones 31 y 33** se podrá calcular la eficiencia total de la pila como equipo. Con este parámetro se podrá cuantificar la diferencia entre la energía introducida y la energía aprovechada a la salida en forma de electricidad. De esta manera se tendrán en cuenta los fenómenos químicos y eléctricos que se llevan a cabo dentro del equipo.

Ecuación 34: Eficiencia real de la pila

$$\epsilon_{pila} = \epsilon_{max} \cdot \epsilon_{elec} \cdot \mu_f = 0,9364 \cdot 0,5596 \cdot 0,85 = \mathbf{44,54 \%}$$

En el apartado de transmisión de potencia se encontrarán dos rendimientos mecánicos. Por un lado, habrá un rendimiento proveniente del motor eléctrico, que suelen tener valores muy elevados. En este caso también lo será ya que el motor seleccionado se caracteriza por la utilización de materiales de elevada calidad, lo cual repercute directamente en su rendimiento ofreciendo una cifra de: $\epsilon_m = 94,90 \%$

Por otro lado, estará la eficiencia de transmisión que recogerá las pérdidas ocasionadas en todos y cada uno de los sistemas de transmisión de potencia desde el motor hasta las ruedas como pueden ser engranajes, palieres, rozamientos varios... En este aspecto, las cifras de rendimiento suelen estar entre el 80 y el 90 %. Para el caso de estudio que se está llevando a cabo se ha decidido utilizar la siguiente cifra: $\epsilon_{st} = 85 \%$

Ecuación 35: Rendimiento total del sistema de transmisión

$$\epsilon_{trans} = \epsilon_m \cdot \epsilon_{st} = \mathbf{80,67\%}$$

Aplicando todos los rendimientos que se han calculado a lo largo de este apartado se calculará el rendimiento del conjunto, que conceptualmente marcará la diferencia de energía que existe entre la energía que se introduce en el sistema mediante el combustible y la energía que se obtiene finalmente en la rueda.

Ecuación 36: Rendimiento total del sistema

$$\epsilon_{sist} = \epsilon_{pila} \cdot \epsilon_{trans} = \mathbf{35,93 \%}$$

Tras haber hecho el estudio de eficiencias y rendimientos se ha decidido hacer un análisis cuantitativo de las energías que forman parte del sistema para comprobar que se cumplen. El diagrama de Sankey que se muestra en el **Gráfico 8** marca forma muy visual los flujos de energía que se desprenden a partir del momento de la alimentación de la pila.

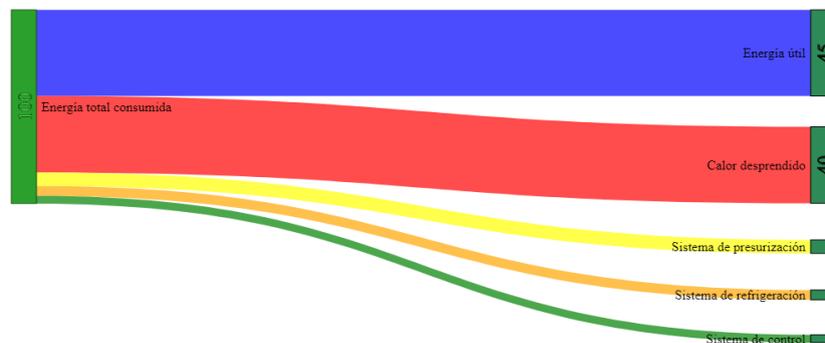


Gráfico 8: Diagrama energético de Sankey (creación propia)

En el **Gráfico 9** se hará un análisis comparativo entre las pilas de combustible que trabajan con agua líquida, con agua en forma de vapor y los límites de eficiencia de Carnot.

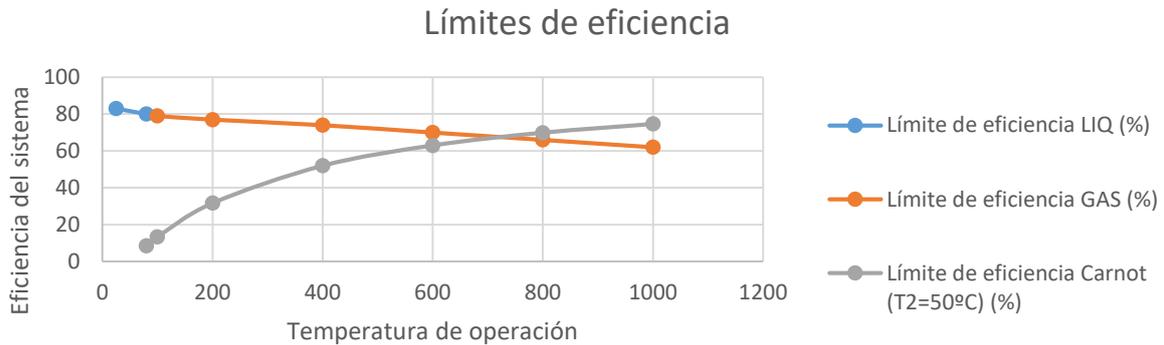


Gráfico 9: Límite de eficiencia para cada tipo de pila en función de la temperatura de operación (J. Larminie and A. Dicks 2003)

Analizando el gráfico se puede apreciar que, según esta fórmula, cuanto menor temperatura mayor es el límite de eficiencia de la pila. En la vida real, las pérdidas de voltaje casi siempre serán menores a temperaturas más altas, por lo que será beneficioso elevar la temperatura de operación. (James Larminie and Dicks 2003) También se puede apreciar que a partir de 750°C aproximadamente los motores de combustión comienzan a tener unas posibilidades de eficiencia superiores a las pilas.

3.2.6. Presión de operación

Introducción

Las pilas de combustible de gran potencia suelen trabajar a presiones superiores a la atmosférica. A pesar de que es beneficioso para el rendimiento del sistema, es perjudicial para aspectos relacionados con sus características físicas puesto que al incluir elementos auxiliares se incrementará el peso, el tamaño y la complejidad del equipo. (James Larminie and Dicks 2003) Aun teniendo en cuenta lo anterior, en el diseño de la pila se ha decidido implantar un sistema que eleve ligeramente la presión a la entrada (0,6 bar_g) con el objetivo de aumentar el ratio potencia/ peso del sistema.

Cálculos

Tanto la presión como la concentración de los reactivos afectará a la energía libre de Gibbs y, por lo tanto, a la tensión resultante. La ecuación de Nernst marcará ese nivel de tensión conseguido antes de aplicar la reducción que se lleva a cabo mediante los sobrepotenciales en función de las variables físicas a las que esté sometida la sustancia.

Variación de prestaciones por sobrealimentación

En este apartado se ha realizado un pequeño estudio de mejora de prestaciones de la pila en función del incremento de presión en la corriente de entrada. Para ello, se han ido analizando los resultados de los incrementos de tensión y de potencia que experimenta la pila en función

de dichos incrementos de presión utilizando las **Ecuaciones 37 y 38** y obteniendo las **Gráficas 10 y 11** de las cuales se ha obtenido la presión de trabajo de la pila.

Ecuación 37: Variación de tensión debida a la sobrepresión de alimentación (ΔV)

$$\Delta V = \Delta V_{Ganancia} - \Delta V_{Pérdidas} = C_V \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) - 3.58 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T_1}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{0.286} - 1\right) \cdot \lambda \quad [V]$$

Donde:

- C_V : Constante de ganancia de voltaje [V]
- P_1 : Presión ambiental [Pa]
- P_2 : Presión de alimentación [Pa]
- T_1 : Temperatura ambiente [K]
- η_m : Rendimiento motor [%]
- η_c : Rendimiento compresor [%]
- λ_{aire} : Coeficiente estequiométrico del aire (2)

Aplicándolo al equipo diseñado se introducirán los siguientes datos: $C_V = 0,15$ V, $P_1 = P_{amb} = 101325$ Pa, $P_2 =$ VARIABLE, $T_1 = T_{amb} = 288$ K, $\eta_m = 0,9$ %, $\eta_c = 0,7$ %, de lo cual se obtendrá que la ganancia de tensión obtenida vendrá representada en la gráfica 2 para diferentes valores de sobrepresión a la entrada:

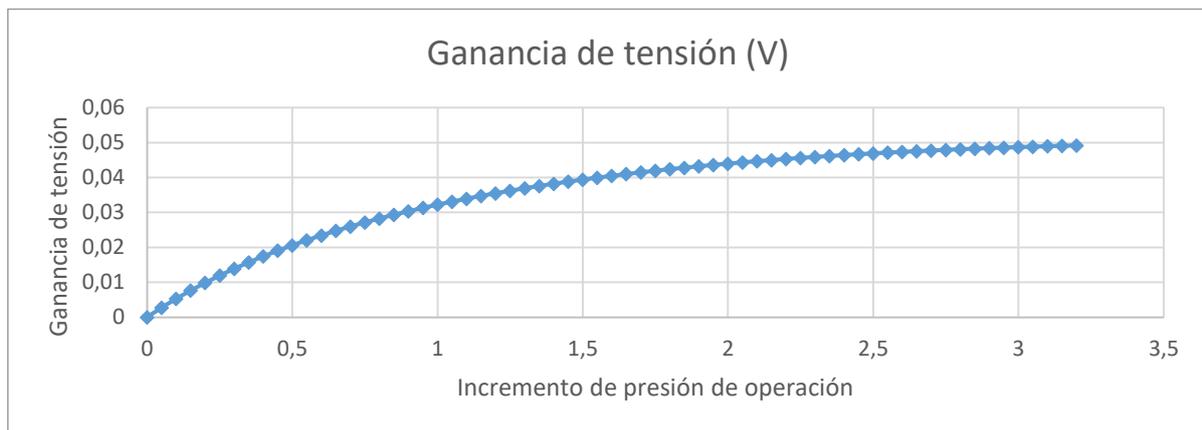


Gráfico 10: Ganancia de tensión (V) en función del incremento de presión de operación [ΔP]

Ecuación 38: Variación de potencia debida a la sobrepresión de alimentación (ΔP)

$$\Delta P = \Delta P_{Ganancia} - \Delta P_{Pérdidas} = C_W \cdot \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \cdot I \cdot n - C_p \cdot \frac{T_1}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \left(\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right) \cdot \dot{m} \quad [W]$$

Donde:

- C_W : Constante de ganancia de potencia [W]
- n : Número de celdas en serie
- I : Intensidad que circula por la pila [A]
- C_p : Calor específico del aire [J/g·K]
- γ : Coeficiente de expansión adiabática

Aplicándolo al equipo diseñado se introducirán los siguientes datos: $C_V = 0,15$ V, $P_1 = P_{amb} = 101325$ Pa, $P_2 = 162120$ Pa, $T_1 = T_{amb} = 288$ K, $\eta_m = 0,9$ %, $\eta_c = 0,7$ %, de lo cual se obtendrá que la ganancia de potencia es:

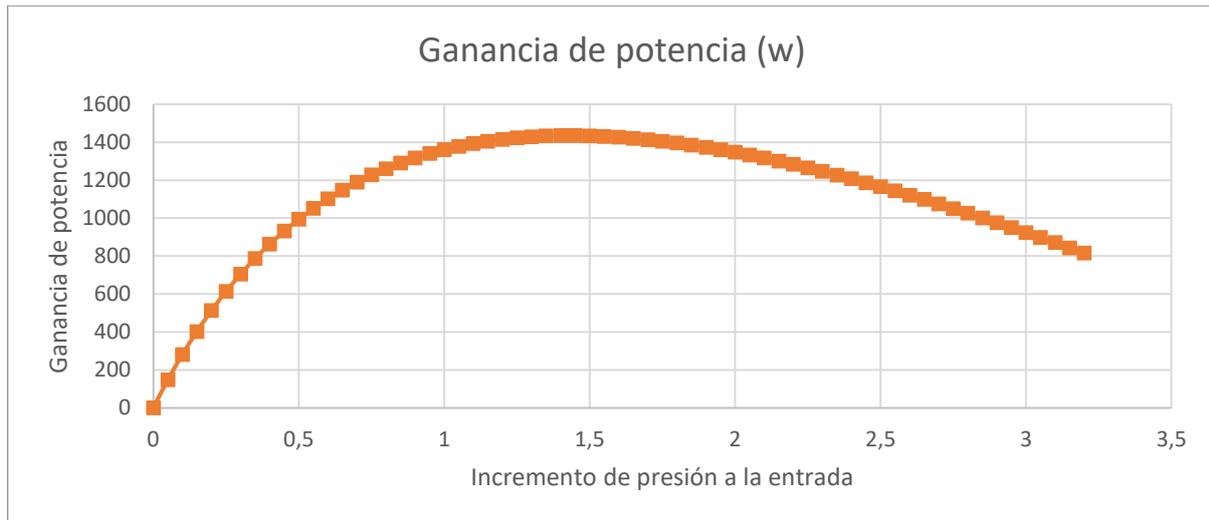


Gráfico 11: Ganancia de potencia (W) en función del incremento de presión de operación [ΔP]

Puesto que la ganancia de tensión representada en el **Gráfico 11** siempre es ascendente se ha tomado como referencia de diseño el incremento de potencia. En este caso se tendrá un máximo en la gráfica que, aproximadamente estará en 1,5 bar y cuya ganancia de potencia correspondiente será de 1400 w (en la que ya se encuentra incluida las pérdidas provenientes del sistema de sobrepresión a la entrada), lo cual es una cifra a tener en cuenta a nivel global del sistema. Por este motivo, se ha decidido tomar una presión de operación de la pila (P_{TOT}) de **1,6 bar_a**.

3.2.7. Envejecimiento de la pila

Introducción

Existe una degradación del rendimiento de la pila que es directamente proporcional al número de horas que se encuentra trabajando. Esta disminución de prestaciones proviene de los siguientes fenómenos químicos que se llevan a cabo dentro de la pila:

Deterioro de los materiales- Debido a procesos de corrosión o a desprendimientos de materiales de los compuestos iniciales como podría ser el agotamiento de catalizadores entre otros.

Mala gestión del agua de abastecimiento- Como se ha comentado en el apartado de hidratación, este fenómeno puede estar directamente relacionado con el deterioro de los materiales. Los procesos de inundado y secado continuados de la membrana de la pila producen serios desperfectos microestructurales en las membranas que a la larga supondrán una fuente de pérdidas de rendimiento considerables.

Alta densidad de potencia- A pesar de que los rendimientos de intercambio de las membranas son cada vez mayores, el hecho de trabajar con densidades de potencia muy elevadas puede suponer un decremento considerable en la vida útil de las pilas. Por este motivo, habrá que hacer un cálculo cuidadoso y exhaustivo en lo que a densidades de corriente se refiere para evitar la fatiga de la membrana y que de esta manera se deteriore de forma prematura.

Con todo lo anterior, cabe destacar que una pila PEM con buenos parámetros de uso puede alcanzar valores de 50.000 h de uso gracias al uso del Nafion en la membrana. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Cálculos

A lo largo del tiempo de uso de la pila, se deteriorará en términos de tensión de 4 a 6 $\mu\text{V}/\text{h}$, lo cual afectará considerablemente al funcionamiento del sistema y habrá que tenerlo en cuenta a la hora de realizar el diseño. A pesar de ello, llegará un momento en el que el rendimiento se minore tanto que deje de ser rentable la utilización de la pila y esto suele llegar pasadas entre 20.000 y 60.000 horas dependiendo de las condiciones de trabajo de la pila. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Tabla 26: Pérdidas de tensión del equipo a lo largo de su vida útil (tabla de creación propia)

Tiempo de funcionamiento (t) [s]	Pérdida de tensión por celda [V]	Pérdida total de tensión [V]
10000	0,006	3,498
20000	0,012	6,996
30000	0,018	10,494
40000	0,024	13,992
50000	0,03	17,49
60000	0,036	20,988

Como se puede apreciar en la **Tabla 26**, para una pila de características estándar tendremos una pérdida de casi 20 V a la salida una vez se hayan pasado 60.000 horas. Este fenómeno unido a la reducción de la densidad de corriente ocasionada por el deterioro de los materiales reducirá la eficiencia del sistema hasta el punto de no poder utilizarse.

3.3. Diseño de la pila

3.3.1. Placas bipolares

Las placas bipolares son una parte esencial en el sistema de alimentación de la pila de combustible ya que servirán como conductores de la corriente generada desde los electrodos hasta los colectores y como guía para las corrientes de alimentación. Su composición y diseño son factores de gran compromiso en el momento de construir una pila puesto que debe garantizar una buena conductividad para mejorar el rendimiento del conjunto, debe ser un conjunto ligero (constituyen el 80% del peso de la pila) y se intentará que sean baratos (supone el 30% del coste total de la pila). (Liu et al. 2002)

Cuentan con canales internos repartidos por toda la superficie cuya función se basa en alimentar de reactivos a los electrodos. Estos canales harán que el tamaño de estas pilas sea superior con respecto a las pilas de colectores externos, pero su fiabilidad frente a averías y frente a fugas será muy superior. Serán los encargados de suministrar combustible y oxidante de forma homogénea y existen varias disposiciones de entre las cuales cabe destacar la de tipo serpentin. El abastecimiento se realiza mediante canales verticales para alimentar hidrógeno sobre los ánodos y mediante canales horizontales para alimentar aire (u oxígeno) sobre los cátodos. De esta manera se facilitarán las conexiones con los colectores de gas y se reducirá el riesgo de mezcla de los gases. (James Larminie and Dicks 2003)

Como se ha visto en apartados anteriores, el voltaje de una celda de combustible habitualmente es muy reducido cuando se extrae una corriente útil (sobre 0.7 V), lo cual obliga en muchas ocasiones a conectar varias celdas en serie con el objetivo de conseguir una tensión de funcionamiento adecuada a las aplicaciones para las que ha sido diseñada. Este nuevo conjunto de celdas se denomina stack o pila y se lleva a cabo realizando conexiones en serie de las placas bipolares entre sí como se puede ver en la **Ilustración 49**. (James Larminie and Dicks 2003)

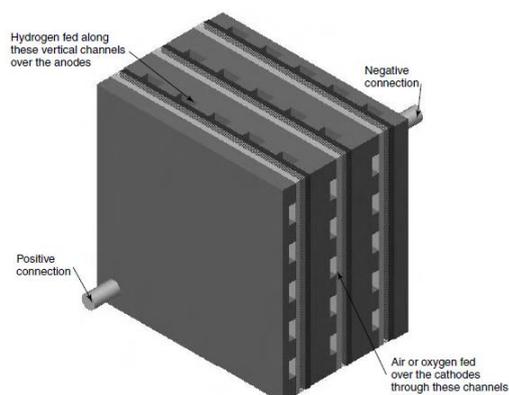


Figure 1.10 A three-cell stack showing how bipolar plates connect the anode of one cell to the cathode of its neighbour.

Ilustración 49: Aspecto de un stack que conecta 3 celdas en serie mediante las placas bipolares (J. Larminie and A. Dicks 2003)

Idealmente, la placa bipolar debe ser lo más delgada posible, para minimizar la resistencia eléctrica y reducir el tamaño del sistema, sin embargo, esto hace que los canales para el flujo de gas se estrechen y se dificulte el bombeo de gas a través de la celda aumentando la pérdida de carga del sistema. (J. Larminie and A. Dicks 2003) En la **Ilustración 50** se pueden observar canales de alimentación mecanizados en placas bipolares a modo serpentin.

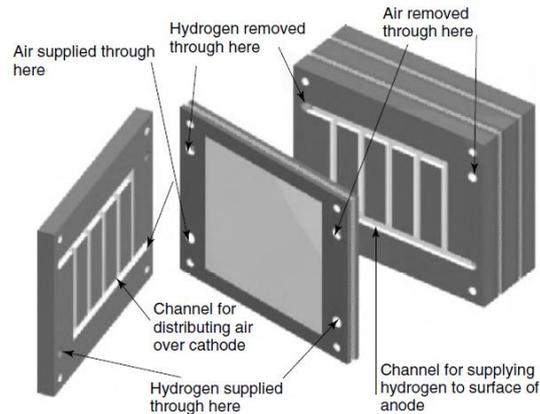


Ilustración 50: Canales de alimentación internos mecanizados en placas bipolares (J. Larminie and A. Dicks 2003)

Materiales

Para que un material pueda ser empleado para fabricar placas bipolares este debe poseer una elevada conductividad eléctrica, protección frente a la corrosión y buena estabilidad mecánica trabajando con $\text{pH} < 4$ (ya que estamos trabajando en medio ácido), ligereza, impermeabilidad a los gases reactivos bajo coste en la medida de lo posible.

Tabla 27: Características recomendadas para una placa bipolar (James Larminie and Dicks 2003; Membranes DuPont 2010)

Magnitud	Valor recomendado	Unidades
Conductividad en el plano	> 100	S/cm
Resistencia de contacto interfacial	< 30	$\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$
Resistencia a la corrosión	< 16	$\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Conductividad térmica	> 10	$\text{W}/(\text{mK})$
Conductividad eléctrica	> 10	S/cm
Permeabilidad a los reactivos	$< 2 \times 10^{-6}$	$\text{cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
Fuerza de flexión e impacto	> 59	MPa
Fuerza de impacto	> 40.5	J/m

Habitualmente, las placas bipolares se fabrican en resinas de grafito de alta densidad ya que éste es un material ligero, buen conductor y con una corrosión mínima en el ambiente de operación de las pilas de intercambio protónico, pero presenta la limitación de su coste y su dificultad de utilización en lo que a fragilidad de uso se refiere. Por estos motivos se han intentado desarrollar placas con otros materiales como metales o composites.

En el caso de los metales el acero inoxidable es el material que presenta propiedades más prometedoras debido fundamentalmente a su bajo coste. A pesar de poseer una elevada impermeabilidad y conductividad y de tener buenas propiedades mecánicas, se ha comprobado que tiene una alta probabilidad de sufrir corrosión. Para solventar este problema suelen aplicarse recubrimientos basados en TiN que permiten reducir el carácter corrosivo manteniendo una resistencia de contacto reducida. (X. Li, Roberts, and Holmes 2006)

En lo que a composites se refiere, el funcionamiento se basará en la presencia de una resina que hará las dotes de matriz aportando unidad al conjunto y una rejilla o material de relleno que operará como refuerzo y como material conductor del elemento. (Cid 2014) Como

matrices se suelen utilizar resinas termoestables como pueden ser epoxi, fenólica o viniléster aunque, en menor medida, también se pueden utilizar matrices termoplásticas. Como refuerzo suelen utilizarse materiales basados en carbono por sus características conductoras y mecánicas. (Jeon et al. 2007)

La tecnología seleccionada será la de **acero inoxidable con recubrimiento de TiN** puesto que es la que tiene un mayor compromiso entre las prestaciones y el coste total. Como ya se ha comentado en el apartado de "Sobrepotencial óhmico", que es donde más afecta esta elección, la conductividad será considerablemente buena ofreciendo una resistencia total de la pila de $r_{cell} = 2,450E-05 \Omega \cdot \text{cm}^2$, que es considerablemente reducida para no utilizar resinas de grafito. El peso, a pesar de que es elevado está contenido ya que 195 kg en conjunto es una cifra aceptable para el conjunto total del tren de potencia de un vehículo.

3.3.2. Conjunto membrana-electrodos (MEA)

El conjunto membrana-electrodos es la parte principal de la pila ya que es donde se llevan a cabo las reacciones de oxidación y reducción responsables del funcionamiento de la pila. Principalmente está formada por una membrana polimérica capaz de intercambiar iones, una capa catalítica y el electrodo.

Membrana

Introducción

Es uno de los elementos diferenciadores ya que la tecnología PEM es una de las pocas que dispone de ello. Consiste en una capa delgada que alojará el electrolito y que conducirá los protones desde el ánodo hasta el cátodo debido, entre otras cosas, a la existencia de un gradiente de potencial eléctrico aplicado al electrolito. (Wang et al. 2011).

Existen dos mecanismos de transporte de protones por la membrana. Por un lado, está el mecanismo de difusión "vehicular". Al formarse iones de hidronio (H_3O^+), los protones, se podrán transportar desde regiones de alta concentración de protones hasta las zonas de bajas concentraciones. Por otro lado, está el mecanismo de "Salto". Éste tiene lugar cuando se presenta suficiente contenido de agua para que las cadenas laterales de los grupos sulfónicos estén conectadas, donde los protones pueden moverse directamente de un sitio a otro. (Wang et al. 2011)

Son muy sensibles a la contaminación y a la temperatura y no pueden superar los 90°C debido a que es posible que pierdan propiedades conductoras si no hay una humedad suficiente. (Cid 2014)

Tabla 28: Características recomendadas para la membrana (Membranes DuPont 2010)

Magnitud	Valor	Unidades	Fuente
Temperatura	<90	°C	(Cid 2014)
Espesor	Gore 18: 18 Nafion® 115: 127 Nafion® 117: 183 Nafion® 1110: 254 10 - 100	µm	- (Membranes DuPont 2010) (Membranes DuPont 2010) (Membranes DuPont 2010) (James Larminie and Dicks 2003)
Conductividad protónica	Grupos sulfónicos: 0.1	S/cm	(Cid 2014)
Peso	Nafion® 115: 250 Nafion® 117: 360 Nafion® 1110: 500	g/m ²	(Membranes DuPont 2010) (Membranes DuPont 2010) (Membranes DuPont 2010)
Precio	700	\$/m ²	(Cid 2014)

Materiales

Las membranas actuales están compuestas por una base estructural de polímero sólido (normalmente Teflón), que proporciona resistencia física a la membrana a la cual se le realizan unas inserciones de ácido perfluorosulfónico (comercialmente conocido como Nafion, que serán las encargadas de proporcionar posibles caminos de carga para el transporte de protones.

Physical and Other Properties ^a		
	Typical Value	Test Method
Physical Properties		
Tensile Modulus, MPa (kpsi)		
50% RH, 23 °C (73 °F)	249 (36)	ASTM D882
water soaked, 23 °C (73 °F)	114 (16)	ASTM D882
water soaked, 100 °C (212 °F)	64 (9.4)	ASTM D882
Tensile Strength, Max. MPa (kpsi)		
50% RH, 23 °C (73 °F)	43 (6.2) in MD, 32 (4.6) in TD	ASTM D882
water soaked, 23 °C (73 °F)	34 (4.9) in MD, 26 (3.8) in TD	ASTM D882
water soaked, 100 °C (212 °F)	25 (3.6) in MD, 24 (3.5) in TD	ASTM D882
Elongation at Break, %		
50% RH, 23 °C (73 °F)	225 in MD, 310 in TD	ASTM D882
water soaked, 23 °C (73 °F)	200 in MD, 275 in TD	ASTM D882
water soaked, 100 °C (212 °F)	180 in MD, 240 in TD	ASTM D882
Tear Resistance—Initial, g/mm		
50% RH, 23 °C (73 °F)	6000 in MD, TD	ASTM D1004
water soaked, 23 °C (73 °F)	3500 in MD, TD	ASTM D1004
water soaked, 100 °C (212 °F)	3000 in MD, TD	ASTM D1004
Tear Resistance ¹ —Propagating, g/mm		
50% RH, 23 °C (73 °F)	>100 in MD, >150 in TD	ASTM D1922
water soaked, 23 °C (73 °F)	92 in MD, 104 in TD	ASTM D1922
water soaked, 100 °C (212 °F)	74 in MD, 85 in TD	ASTM D1922
Specific Gravity	1.98	—
Other Properties		
Conductivity, S/cm	0.10 min.	See footnote ⁴
Available Acid Capacity, meq/g	0.90 min.	See footnote ⁵
Total Acid Capacity, meq/g	0.95–1.01	See footnote ⁵

Ilustración 51: Propiedades físicas de la membrana de Nafion (Membranes DuPont 2010)

Como se puede apreciar en la **Ilustración 51**, las membranas de Nafion se caracterizan por:

- Tener alta conductividad iónica
- Evitar el transporte de electrones
- Su impermeabilidad a los gases de alimentación (evitar el paso del ánodo al cátodo y viceversa)
- Ser químicamente estables en un entorno con radicales HO⁻ y HOO

- Resistentes a lo largo de las temperaturas operativas.
- Mecánicamente robustas.

El material seleccionado ha sido el **Nafión 117** debido principalmente a su densidad, que es considerablemente más reducida que la del Nafión 1100 mientras que la conductividad protónica es prácticamente la misma y a un precio similar.

Cálculos

La difusividad de la membrana dependerá del contenido de agua de la membrana local en relación a los ácidos presentes en su composición. Esta relación dará lugar al parámetro λ , que conceptualmente medirá el contenido de agua (moles) / cantidad de ácidos SO_3H adheridos a la membrana (moles). Para cada tipo de membrana será necesario calcular una ecuación que relacione el contenido de agua con el coeficiente de difusividad de Fick que se obtendrá a partir de la relación de Springer (Chen and Hickner 2004; Springer, Zawodzinski, and Gottesfeld 1991)

En el caso de estudio que se está llevando a cabo a lo largo de este proyecto se obtiene el **Gráfico 12**. Las condiciones que cumple son tener una membrana de Nafión 117 y una temperatura de operación de 80 °C.

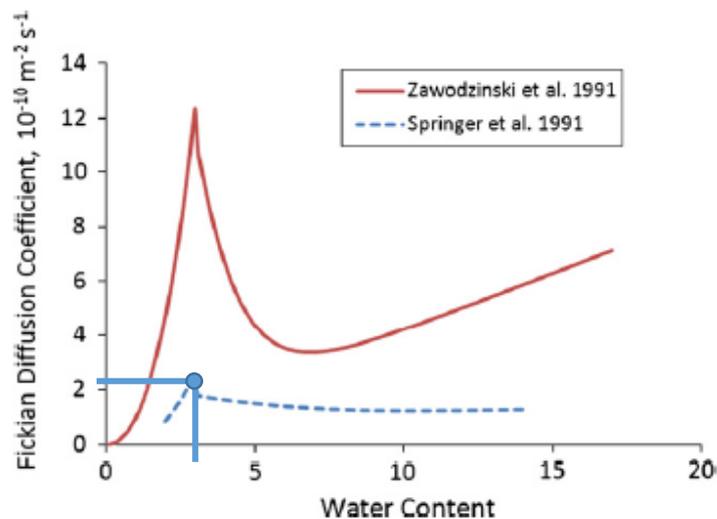


Gráfico 12: Coeficientes de difusión de Fick para membranas de Nafión ante diferentes contenidos de agua (80°C) (Wang et al. 2011)

Analizando el **Gráfico 12** se puede ver como, según la correlación de Springer, el máximo coeficiente de difusión se alcanza para un coeficiente de agua contenida de $\lambda=3$ aproximadamente, alcanzando un valor de coef. de difusión aproximado: $K = 2,2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

Electrodos

Introducción

En aplicaciones prácticas, interesará tener electrodos con una superficie de contacto elevada y una estructura interna porosa para mejorar el intercambio iónico (OH^-) y permitir el paso de combustible (H_2) hacia el electrolito. Por lo general, el rendimiento de la pila aumentará de forma directamente proporcional al aumento de superficie. (James Larminie and Dicks 2003)

Al contar con una estructura porosa, las posibilidades de que haya fugas por los bordes desperdiciando parte de los combustibles se multiplican. Para evitar este fenómeno, lo que suele hacerse es un sellado exterior mediante juntas con diseños especiales (como se explicará en el apartado 3.3.3) que no impidan el paso de los flujos desde los colectores hasta los electrodos, pero que evite la pérdida de las corrientes al exterior. (James Larminie and Dicks 2003)

Tabla 29: Características recomendadas para electrodos (Membranes. n.d.)

Magnitud	Valor	Unidades	Fuente
Espesor	0.03	mm	(James Larminie and Dicks 2003)
Espesor GDL	0.2-0.5	mm	(James Larminie and Dicks 2003)
Precio Pt	70 (2008) 25 (2018)	€/g	(Coininvest 2018)
Cantidad de Pt utilizada	0.03 1	mg/cm ²	(Noonan et al. 2012) (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Estructura interna

Los electrodos están compuestos estructuralmente por dos elementos: La capa de difusión de gas y la capa catalítica.

Capa catalítica

Será una capa formada por un catalizador de la reacción cuya función se basará en la mejora de la cinética de reacción de las reacciones de oxidación y reducción necesarias para el funcionamiento de la pila de combustible y la mejora de la conductividad del conjunto entre otras cosas. Esta capa será depositada sobre la membrana mediante aerografía (actualmente) para garantizar el contacto íntimo entre los diferentes componentes de la MEA. (Cid 2014)

Será conveniente la presencia de un ionómero, una molécula intercambiadora de iones mezclada con el material catalítico cuya función se dividirá en dos propósitos principales. El primero y más importante será el de actuar como medio de intercambio de iones a través del electrodo. Por otro lado, actuará como aglutinante del catalizador haciendo que la unión entre los diferentes elementos que componen la MEA. (Hern et al. 2006)

Materiales

El material principal de una capa catalítica será el catalizador puesto que será el elemento que favorezca la velocidad de reacción y que, en consecuencia, realice la tarea para la que ha sido diseñada, mejorar la tasa de cargas que se envían al circuito eléctrico.

Tradicionalmente, tanto para el ánodo como para el cátodo, es usado como material catalizador el Platino (Pt) por su capacidad de catalización en este tipo de reacciones, pero tiene como inconvenientes principales el elevado precio (a pesar de que actualmente se ha reducido considerablemente) y el envenenamiento que puede sufrir mediante CO en la alimentación. Para solucionar estos problemas se está invirtiendo en investigación para buscar nuevos materiales que contengan mucho menos platino. (Cid 2014)

A pesar de ello, por lo general será necesario que este material se encuentre soportado por otro material base que le aporte resistencia mecánica y que le proporcione mayor dispersión de las partículas. Los materiales de soporte se pueden dividir en dos grupos en función de la naturaleza de sus materiales. Por un lado estarán los materiales carbonosos (en la actualidad son los más utilizados) y por otro los no carbonosos, que por lo general estarán basados en óxidos, carburos inorgánicos o polímeros conductores (Cid 2014)

El ionómero contará con una composición basada en una disolución de Nafión al 5% en masa que, gracias a su conductividad será capaz de transportar los iones, H^+ u OH^- , a través de la capa catalítica. (Cid 2014) La relación que suele guardarse entre el ionómero y el catalizador está comprendida entre el 20 y el 40%. (Gasteiger et al. 2005)

Membrana de difusión de gas

Será la capa encargada de gestionar las diferentes corrientes internas que se puedan formar en la pila. Además, deberá permitir el paso de los reactivos actuando como un difusor de gas, proporcionando un soporte mecánico al conjunto y canalizando la salida de los productos resultantes, así como del exceso de agua generado en el sistema. (Cid 2014)

Entre las razones que hay para eliminar el agua a través de la porosidad de la capa de difusión de gases destacarán las siguientes: reduce las necesidades de potencia parasitaria del condensador de escape, se pueden usar temperaturas de operación más altas al eliminar calor residual por otra vía y finalmente el sistema de control se simplifica. (EG&G Technical Services Inc. 2004)

Materiales

Lo más habitual es contar con una base conductora formada por papel o tela de carbono cuya porosidad esté comprendida entre el 45 y el 60%. A partir de eso, se aplicará un recubrimiento de negro de carbono microporoso con una mezcla de Teflón comprendida entre el 20 y el 40 en masa que servirá para difundir el gas de alimentación sobre el catalizador. (Cleveland and Morris 2014) En la actualidad se está investigando en la utilización de materiales porosos basados en metales debido a su bajo coste y su buen comportamiento trabajando en medios alcalinos. Uno de los materiales más estudiados ha sido la espuma de níquel. (Van Drunen et al. 2014)

3.3.3. Juntas

Son los dispositivos encargados de evitar la fuga de reactivos, así como de prevenir de un posible cortocircuito por el contacto entre placas bipolares contiguas.

Materiales

Tradicionalmente han estado fabricadas en caucho de silicona, pero debido al elevado mantenimiento que supone su deterioro en aplicaciones de largos tiempos de operación, se está investigando la instalación de nuevos materiales más resistentes como pueden ser el vidrio o el teflón. (Cheng et al. 2010)

En el caso del proyecto que se está desarrollando en este documento se ha decidido utilizar las juntas de silicona.

3.3.4. Disposición de celdas

Tensión de trabajo del stack

La tensión de funcionamiento de un stack comercial suele encontrarse entre 450 y 750 V. Para el sistema que se está diseñando en este proyecto se ha decidido utilizar una tensión de operación de **450 V**. Por este motivo, será necesario realizar una conexión en serie de las celdas de tal manera que sea posible alcanzar este nivel de tensión.

Cálculos

Ecuación 39: Número de celdas en serie

$$n_s = \frac{V_p}{V_{rc}}$$

Donde $V_p = 450$ V es la tensión total de la pila necesaria y $V_{rc} = 0,776$ V será la tensión real de celda cuyo cálculo se ha visto a lo largo del apartado “tensión de trabajo y sobrepotenciales de celda”. Introduciendo los valores anteriores en la fórmula se obtiene que el número de celdas conectadas en serie necesario será: **$n_s = 580$ celdas**.

Con este número de celdas se conseguirá una tensión de sistema de 450,06 V, lo cual supera los requerimientos establecidos y será perfectamente válido para el diseño.

Intensidad de trabajo del stack

La intensidad de trabajo del stack estará marcada por la densidad de corriente que sea capaz de mantener la membrana de la pila. En este caso se ha marcado una densidad de corriente de **8000 A/cm²**.

Este valor ha inducido la necesidad de utilizar varios equipos en paralelo para poder mantener una intensidad de operación (I_{op}) de **234,21 A**. La intensidad de trabajo se obtiene a partir de la potencia total de trabajo y marcará las necesidades del sistema, que se verán superadas

para un solo equipo comercial y habrá que reducirlo en función de las posibilidades de los mismos.

Ecuación 40: Número de celdas en paralelo

$$n_p = \frac{I_{op}}{I_{tar}}$$

Donde:

- I_{op} : Intensidad de operación del sistema [A]
- I_{tar} : Intensidad de operación objetivo para cada stack [A]

Como ya se ha comentado anteriormente, la intensidad de operación del sistema será $I_{op} = 234,21$ A y la intensidad objetivo del stack vendrá marcada por las posibilidades de potencia del equipo comercial. En este caso, al trabajar con un equipo de 30 kW y 450 V habrá que marcar una intensidad objetivo de $I_{tar} = 100$ A aproximadamente. Aplicando la **Ecuación 40** y redondeando se obtendrá: **$n_s = 3$** .

Serán necesarios 3 equipos en paralelo para garantizar el suministro de intensidad de potencia.

4. CAPÍTULO- ESTUDIO ECONÓMICO BÁSICO

Tras haber realizado un presupuesto detallado y un estudio económico de ciclo de vida se han obtenido los siguientes resultados que nos permitirán sacar conclusiones.

4.1. Presupuesto de fabricación

Como se puede apreciar en las siguientes tablas y gráficos, a partir de los precios actuales de mercado de los diferentes componentes del sistema se ha intentado estimar el coste total del equipo. Esta estimación se ha llevado a cabo por categorías con el objetivo de conseguir ver desde una perspectiva general qué elementos son más costosos y en cuáles se puede mejorar en el futuro.

PRESUPUESTO

Pila de combustible

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Celda de combustible comercial	3	3132	9396
Coste total instalación general:			9396

Sistema de refrigeración

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Intercambiador	1	128,43	128,43
Tuberías	1	150	150
Vaso de expansión	1	65	65
Bomba de agua	1	46,18	46,18
Coste total sistema de refrigeración:			389,61

Sistema de almacenamiento

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Recipientes a presión	6	300	1800
Válvulas	11	26	286
Tuberías	1	350	350
Manómetro	6	21	126
Soporte botellas	1	325	325
Regulador de presión	1	460	460
Coste total sistema de almacenamiento:			3347

Sistema de precalentamiento

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Precalentador eléctrico	3	160,25	480,75
Tuberías y demás conexiones	3	24,6	73,8
Cables y conexiones	3	5,2	15,6
Coste total sistema de precalentamiento:			570,15

Sistema de regulación de presión a la entrada

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Válvula de regulación de presión	3	17,47	52,4
Presostato	3	44,87	134,6
Compresor	6	120	720
Humidificador	1	1710	1710
Filtro	1	Incl. Humidificador	-
Manómetro	3	Incl. Humidificador	-
Termómetro	1	12,80	12,8
Coste total sistema de regulación de presión:			2629,8

Sistema eléctrico

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Batería	1	650	650
Motor eléctrico Alren trifásico 90kw	1	3575	3575
Convertor AC/DC	1	2120	2120
Coste total sistema eléctrico:			6345

RESUMEN DE RESULTADOS:

SUBSISTEMA	COSTE [€]
Pila de combustible	9396
Sistema de refrigeración	389,61
Sistema de almacenamiento	3347
Sistema de precalentamiento	570,15
Sistema de regulación de presión a la entrada	2629,8
Sistema eléctrico	6345

} COSTE TOTAL DE LA INSTALACIÓN: **22677 €**

Todos los datos recogidos en las tablas anteriores se han representado en un diagrama de sectores en el **Gráfico 13**. Se puede ver claramente como hay dos subsistemas que dominan frente a los demás: pila de combustible y sistema eléctrico.

En cuanto al sistema eléctrico, será normal que haya una tasa de coste elevada puesto que es donde se encuentran todos los sistemas de transmisión de potencia y almacenamiento de energía como los motores, los rectificadores, las baterías... que son sistemas que requieren una tecnología considerablemente avanzada y que ataca directamente a su precio.

Por otro lado, como ya se ha comentado anteriormente está el sistema de pila de combustible que, al encontrarse en fase experimental, sus procesos de fabricación y la tecnología están muy poco desarrolladas suponiendo un sobre coste de importancia a la hora de llevarlo a cabo en la realidad. Posiblemente sea este el subsistema en el que, a corto plazo, sea más fácil reducir costes y mejorar el mercado de la pila de combustible.

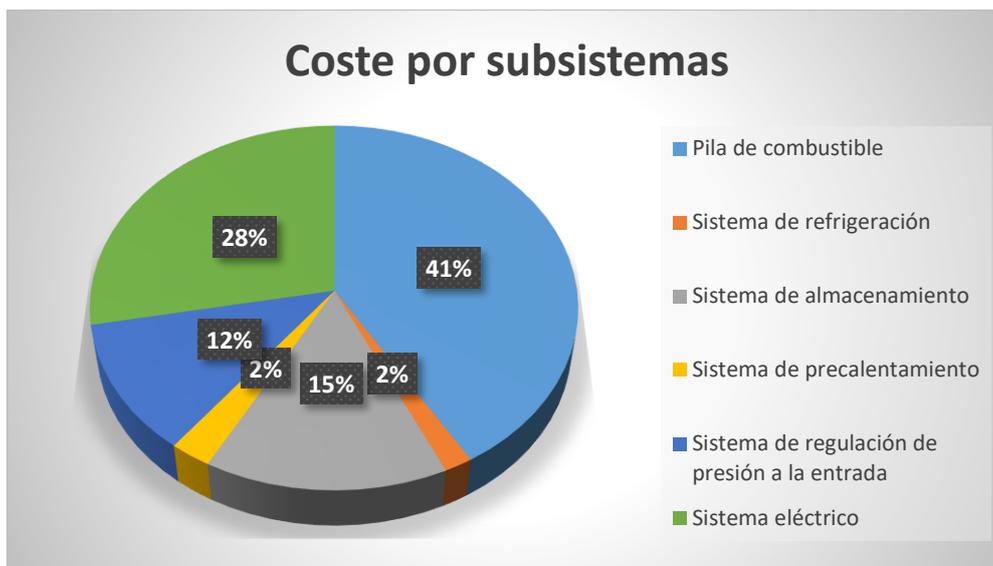


Gráfico 13: Coste por subsistemas (gráfico de creación propia)

4.2. Estudio de costes a lo largo del ciclo de vida del vehículo

Para llevar a cabo el estudio de costes de cada tecnología se ha partido del coste inicial (costes fijos) estimado de cada una incluyendo únicamente el sistema de generación de potencia para evitar posibles incompatibilidades relacionadas con equipamientos o accesorios adicionales. Los costes variables estarán compuestos por:

- **Consumo de combustible:** Responderá a los datos recogidos en la **Tabla 30** cuyos precios se han tomado el día 09/06/2018:

Tabla 30: Datos cálculos coste de combustible

Coste de combustible				
Datos	MCI- Gasolina	MCI- Diesel	H ₂	BATERÍAS
Precio medio litro de combustible: [€/l]; [€/l]; [€/Kg]; [€/Kw-h]	1,35	1,26	4,87	0,13
Consumo de combustible: [l/100 km]; [l/100 km]; [kg/100 km]; [kW·h/100 km]	6	4,1	1,17	12,7

- **Coste de mantenimiento:** Se han establecido los periodos de mantenimiento habituales para cada tecnología y, posteriormente se han multiplicado todas las necesarias para el periodo de kilometraje estudiado por el precio de cada una que serán diferentes al tener diferentes necesidades.

Tabla 31: Datos cálculos coste de mantenimiento

Coste de mantenimiento				
Datos	MCI- Gasolina	MCI- Diesel	H ₂	BATERÍAS
Periodos de mantenimiento preventivo [Km/sesión]	15000	15000	30000	60000
Coste sesión mantenimiento preventivo [€/sesión]	150	150	200	250
Coste de reparaciones ¹ (a lo largo de toda la vida)	760	920	4526,53	1316

¹Se estima que el coste de las reparaciones que se tienen que hacer en un vehículo a lo largo de su vida equivalen aproximadamente al 20% de su coste por lo que para hacer este análisis se ha utilizado esta suposición también.

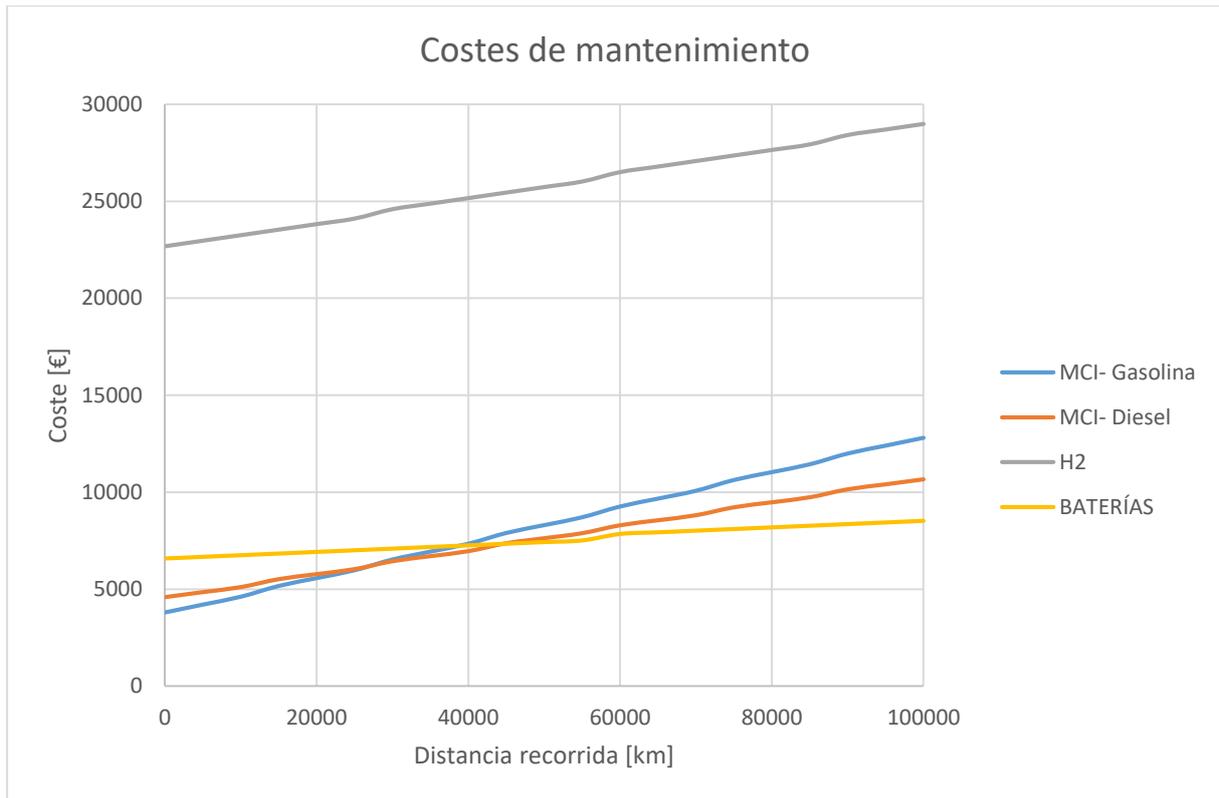


Gráfico 14: Costes de mantenimiento hasta 100.000 km (Gráfico de creación propia)

En el **Gráfico 14** se pueden ver los costes dibujados para cada tecnología en diferentes colores. Este estudio se ha realizado solamente hasta los 100.000 km, que es una distancia muy habitual para un vehículo hoy en día. Cabe destacar que los costes fijos que tiene una pila de combustible penalizan gravemente su coste a nivel vital puesto que, como se puede ver en el **Gráfico 14**, apenas tiene nada que hacer con respecto a sus rivales de la actualidad.



Gráfico 15: Costes de mantenimiento hasta 1.000.000 km (Gráfico de creación propia)

En el **Gráfico 15** el análisis se llevará hasta los 1.000.000 km. Si bien es cierto que esta cifra de km no es la más habitual para que lo soporten los vehículos actuales, se puede ver como en cuestión de costes la pila de combustible gracias a su bajo mantenimiento consigue imponerse frente a los vehículos impulsados con Gasolina (a partir de los 700.000 km aproximadamente). Aunque este resultado no es realmente satisfactorio a día de hoy, sí que es esperanzador ya que, a pesar de que el coste fijo es aproximadamente 5 veces superior que todos sus rivales,

a largo plazo consigue superar a alguno de ellos en lo que a costes se refiere gracias a su fiabilidad y bajo mantenimiento. Si se consiguiera bajar, aunque fuese solo a la mitad el coste de producción ya podría superar a los motores diésel mejorando las prestaciones de un motor eléctrico de baterías y reduciendo la contaminación al medio ambiente. A pesar de los resultados obtenidos hay que tener en cuenta que la industria del motor de combustión interna está totalmente desarrollada a día de hoy mientras que la que rodea a la de las pilas de combustible está caracterizada por la experimentación y la inclusión de nuevas metodologías de trabajo día a día. Además, como la demanda es muy reducida, los procesos de fabricación son en su mayor parte manuales y no incluyen automatización. La inclusión de nuevas tecnologías y de la filosofía de la fabricación a gran escala puede hacer que a corto plazo la fabricación de las pilas pueda ser considerablemente menos costosa que en la actualidad.

5. CAPÍTULO 5- CONCLUSIONES

5.1. Resumen de resultados (alternativamente, una síntesis de la solución tecnológica propuesta)

En este trabajo se ha diseñado un sistema completo de pila de combustible tipo PEM que incluye equipo y subsistemas con aplicación para automoción (vehículo ligero con una potencia de 90 kW). De acuerdo con los objetivos planteados se describirán a continuación las conclusiones más destacadas obtenidas en cada apartado.

- Tras analizar las diferentes tecnologías existentes en la actualidad, se ha llegado a la conclusión de que las alternativas más capaces para aplicaciones de transporte son la pila alcalina (AFC) y la pila de intercambio protónico (PEMFC) tanto de baja temperatura (LT) como de alta (HT). Se ha decidido utilizar la **pila de intercambio protónica de baja temperatura (PEMFC-LT)** debido a que, entre sus características más destacadas se encuentran: baja temperatura de funcionamiento, el bajo riesgo de utilización, el arranque rápido y la elevada densidad de potencia (equipos compactos), características de gran importancia para una aplicación de transporte.
- Los **parámetros de operación** de la pila **seleccionados** mediante revisión bibliográfica para vehículos que funcionan en la actualidad han sido los siguientes:

• Autonomía requerida:	600 km	• Masa del vehículo	1340 kg
• Presión de almacenamiento:	700 bar	• Tensión de trabajo:	450 V
• Temperatura de operación:	353 K	• Combustible:	Hidrógeno
• Presión de operación:	1,6 bar	• Agente oxidante:	Aire

- Los **parámetros de operación calculados** a partir de los requerimientos anteriores son los mostrados a continuación:

• Max. potencia eléctrica necesaria:	89482 W	• Tensión de C. Abierto:	1,19 V
• Flujo másico de combustible:	0,0014 kg/s	• Tensión real de la celda:	0,776 V
• Eficiencia total de la pila:	44,54 %	• Trabajo eléctrico:	228 kW
• Capacidad de almacenamiento:	7,04 kg	• Número de recipientes (hidrógeno)	6

Para conseguir estas prestaciones ha sido necesario instalar 3 equipos de pila de combustible **Horizon VL-30** de 30 kW de potencia cada uno conectados en paralelo de tal manera que cada uno contenga unas 580 celdas de combustible conectadas en serie. De esta manera se conseguirá alcanzar el nivel de tensión requerido por el sistema cumpliendo con los requerimientos de potencia del sistema completo.

- Los **materiales** utilizados en los componentes de la celda seleccionados con la finalidad de mejorar el rendimiento del conjunto manteniendo unos costes de fabricación reducidos son los siguientes:

• Electroodos	Base de teflón y grafito
• Capa catalítica	Platino
• Membrana de difusión de gases	Papel de carbono
• Membrana	Nafion 117
• Placas bipolares	Acero Inoxidable + TiN
• Juntas	Silicona

- En lo que respecta a los **subsistemas** calculados se hará un pequeño resumen de cada uno para indicar qué elementos se han instalado en función de las necesidades del equipo:

Almacenamiento: Se ha decidido utilizar unos recipientes con estructura interna de fibra de carbono de tipo 4 para que sean capaces de soportar los 700 bar de presión. Se utilizarán 6 botellas para almacenar los 7 kg de hidrógeno necesarios.

Precalentamiento: Será necesario para mejorar la respuesta en frío y se aplicará al agua de refrigeración mediante un equipo de resistencias de 9 kW.

Hidratación: Será necesario un sistema de hidratación de la membrana para impedir que ésta se seque y se deteriore debido a la considerable densidad de potencia con la que se está trabajando en la pila.

Refrigeración: Será necesario seleccionar un sistema refrigerado por agua debido a que la potencia es lo suficientemente elevada como para que un sistema de refrigeración por aire no sea suficiente.

Transmisión de potencia: La potencia eléctrica se transmitirá a las ruedas mediante un único motor **Alren 315L 1-6** de 90 kW refrigerado por aire y mediante un sistema de transmisión convencional.

Presión de operación: En el caso del hidrógeno, se reducirá la presión de alimentación hasta 1,6 bar mediante una válvula reguladora mientras que en el caso del aire se elevará la presión mediante 6 turbocompresores (3 en paralelo y 2 en serie para cada equipo).

- El **coste** total de fabricación del equipo asciende a **22677 €**, de lo cual **9396 €** se corresponden con el sistema de pila de combustible (aproximadamente el 40 % del total) y **6345 €** se corresponden con el coste del sistema eléctrico (aproximadamente el 28 % del total). Debido a su importancia relativa, éstos serán los sistemas a tener en cuenta a la hora de mejorar los precios de los componentes de cara al futuro.

Tras haber analizado las conclusiones anteriores, se ha determinado que, a día de hoy es totalmente posible fabricar una pila de combustible tecnológicamente capaz de hacer frente a los motores de combustión interna y a los sistemas de almacenamiento de energía limitados (baterías), solo que habrá que investigar en materia de procesos de fabricación y de nuevos materiales menos costosos con el objetivo de minimizar el coste inicial del equipo.

5.2. Principales aportaciones del autor del TFM

Las tareas que se han tenido que desempeñar a lo largo de este trabajo se resumen en 4:

En la primera parte del trabajo se ha realizado una profunda revisión bibliográfica en la cual se ha procurado llevar a cabo un estudio detallado acerca de las diferentes tecnologías de pila de combustible disponibles en la actualidad con el objetivo de determinar con un criterio objetivo cuál de ellas es la más adecuada para instalarla en un vehículo de pila de combustible.

En la segunda parte del trabajo se ha realizado otra revisión bibliográfica en la cual, una vez elegida la tecnología, se han establecido los parámetros de funcionamiento como base de cálculo. Este apartado merece una mención individual debido a que la confidencialidad general que rodea a este sector tecnológico hace que encontrar fórmulas y parámetros de operación sea especialmente complicado.

Tomando como base el apartado anterior, en la tercera parte del trabajo se ha calculado y dimensionado un equipo de pila de combustible (incluidos subsistemas) pretendiendo tener en cuenta todos los factores que serían necesarios para ponerlo en funcionamiento.

En la cuarta y última parte, se ha realizado un estudio económico básico con el objetivo de analizar la situación económica por la que está atravesando la pila de combustible en nuestros días y la perspectiva que tiene de cara a mejoras futuras con respecto a las tecnologías que le hacen competencia.

5.3. Sugerencias para trabajos futuro

A corto plazo, el objetivo de mejora está claramente orientado en la reducción de los costes de producción de la pila debido a que es el principal inconveniente que le enfrenta a sus competidores actuales ya que llega a quintuplicar el coste inicial de un motor de combustión interna.

Otro de los problemas que habría que atacar a día de hoy es todo aquello relacionado con la obtención de hidrógeno para su uso como combustible. Al ser un combustible alternativo es preferible no obtenerlo a partir de combustibles fósiles (por reformado de petróleo) y poder obtener todo mediante procedimientos alternativos como puede ser la electrolisis. El problema con la electrolisis se encuentra en que los consumos energéticos a día de hoy son muy elevados y hacen que el precio del mismo sea muy elevado consecuentemente. Además del aspecto económico hay que tener en cuenta el medioambiental.

En el almacenamiento sería conveniente mejorar los aspectos relacionados con la seguridad, el consumo energético de presurización y el espacio de almacenamiento. Como se ha mencionado en el apartado dedicado al almacenamiento, ya existen programas de investigación relacionados con nuevas tecnologías de almacenamiento como puede ser mediante enlaces químicos o fisorción que podrían ofrecer soluciones válidas a corto plazo.

Por otro lado, a largo plazo sería de gran interés poder realizar la implantación de una celda de alta temperatura en aplicaciones móviles, por ello creo que estudiar la implantación de una celda tipo PEM-HT en vehículos podría ser el siguiente paso en este campo. Si se encontrasen soluciones a problemas como los altos costes de fabricación o la gestión de las altas temperaturas, se podría conseguir un equipo mucho más compacto y completo en lo que a funcionamiento se refiere, ya que la respuesta a las variaciones por parte de esta tecnología se lleva a cabo de una manera mucho más rápida que en las pilas de baja temperatura.

BIBLIOGRAFÍA

- Adachi, Makoto et al. 2009. "Correlation of In Situ and Ex Situ Measurements of Water Permeation Through Nafion NRE211 Proton Exchange Membranes." *Journal of The Electrochemical Society* 156(6): B782. <http://jes.ecsdl.org/cgi/doi/10.1149/1.3116922>.
- Adamson K-A, Jerram LC. 2009. "2009 Niche Transport Survey." *Fuel Cell Today* 11(2).
- Andreasen, Søren Juhl, and Søren K. Kær. 2007. "400 W High Temperature PEM Fuel Cell Stack Test." *ECS Transactions* 5(1): 197–207. <http://ecst.ecsdl.org/content/5/1/197.abstract>.
- Andreasen, Søren Juhl, and Søren Knudsen Kær. 2008. "Modelling and Evaluation of Heating Strategies for High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stacks." *International Journal of Hydrogen Energy* 33(17): 4655–64.
- Anstrom, J R. 2016. Woodhead Publishing Series in Energy 2 - *Hydrogen-Fueled Motorcycles, Bicycles, and Industrial Trucks*. 1st ed. Elsevier Ltd. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423645000026>.
- Araya, Samuel Simon et al. 2014. "Performance and Endurance of a High Temperature PEM Fuel Cell Operated on Methanol Reformate." *International Journal of Hydrogen Energy* 39(32): 18343–50.
- Arazana, Manuel. 2005. "Las Pilas de Combustible, Un Posible Futuro Energético." <http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-1242-las-pilas-combustible--posible-futuro-energetico.aspx>.
- Ariema energía. 2003. "PILAS DE COMBUSTIBLE." <http://www.pilasde.com/tecnologia-del-hidrogeno/pilas-de-combustible>.
- Asensio, Juan Antonio et al. 2011. "Membrana Polimérica." *Afinidad LXVIII* 554: 246–58.
- Asghari, Saeed, Hooman Akhgar, and Bagher Faghih Imani. 2011. "Design of Thermal Management Subsystem for a 5 KW Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell System." *Journal of Power Sources* 196(6): 3141–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.11.077>.
- Asociación española de las pilas de combustible. 2017. "Introducción a Los Tipos de Pilas de Combustible." <http://www.appice.es/app.php?x=3&x2=2>.
- Baek, Seung Man, Seung Ho Yu, Jin Hyun Nam, and Charn Jung Kim. 2011. "A Numerical Study on Uniform Cooling of Large-Scale PEMFCs with Different Coolant Flow Field Designs." *Applied Thermal Engineering* 31(8–9): 1427–34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.01.009>.
- Barreras, Félix et al. 2014. "Optimal Design and Operational Tests of a High-Temperature PEM Fuel Cell for a Combined Heat and Power Unit." *International Journal of Hydrogen Energy* 39(10): 5388–98.
- Barthelemy, H. 2006. "Compatibility of Metallic Materials with Hydrogen Review of the Present Knowledge." *Whcc*: 1–19.
- Bazylak, A. 2009. "Liquid Water Visualization in PEM Fuel Cells: A Review." *International Journal of Hydrogen Energy* 34(9): 3845–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.084>.

- De Beer, Chris et al. 2015. "Electrical Circuit Analysis of CO Poisoning in High-Temperature PEM Fuel Cells for Fault Diagnostics and Mitigation." *IEEE Transactions on Industry Applications* 51(1): 619–30.
- Boaventura, M., H. Sander, K. A. Friedrich, and A. Mendes. 2011. "The Influence of CO on the Current Density Distribution of High Temperature Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells." *Electrochimica Acta* 56(25): 9467–75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2011.08.039>.
- Borup, Rod et al. 2008. "PEM Fuel Cell Durability FC26 Overview." *Fuel Cell*: 1039–45.
- Bose, Saswata et al. 2011. "Polymer Membranes for High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Recent Advances and Challenges." *Progress in Polymer Science* 36(6): 813–43. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670011000256>.
- California Center for Sustainable Energy. 2010. "Fuel Cells." <https://web.archive.org/web/20101123204231/http://energycenter.org/index.php/technical-assistance/renewables/fuel-cells> (March 20, 2018).
- Canales-Vázquez, J., and J.C. Ruiz-Morales. 2013. "Fuel Cells" in *Materials for Sustainable Energy Applications. Conversion, Storage, Transmission and Consumption*. ed. Pan Stanford Publishing Pte Ltd.
- Chandan, Amrit et al. 2013. "High Temperature (HT) Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)-A Review." *Journal of Power Sources* 231: 264–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.126>.
- Chen, Ken S, and Michael A Hickner. 2004. "A New Constitutive Model for Predicting Proton Conductivity In." : 1–7.
- Cheng, Fangyi et al. 2010. "MnO₂-Based Nanostructures as Catalysts for Electrochemical Oxygen Reduction in Alkaline Media." *Chemistry of Materials* 22(3): 898–905.
- Cid, Ricardo Escudero. 2014. "Estudio de Durabilidad de Pilas de Combustible de Metanol Directo." Universidad Autónoma de Madrid. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/666359/escudero_cid_ricardo.pdf?sequence=1.
- Cleveland, Cutler J., and Christopher Morris. 2014. *Handbook of Energy Fuel Cells*. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780124170131000182>.
- Coininvest. 2018. "Precios de Platino Gramo." <https://www.coininvest.com/es/graficos/precio-del-platino/gramo/#chart>.
- Collier, Amanda et al. 2006. "Degradation of Polymer Electrolyte Membranes." *International Journal of Hydrogen Energy* 31(13): 1838–54.
- "Creative Commons." 2017. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>.
- Das, Susanta K., Antonio Reis, and K. J. Berry. 2009. "Experimental Evaluation of CO Poisoning on the Performance of a High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell." *Journal of Power Sources* 193(2): 691–98.
- Deavin, O.I. et al. 2012. "Energy and Environmental Science 9." : 8584.
- Devanathan, Ram. 2008. "Recent Developments in Proton Exchange Membranes for Fuel Cells." *Energy Environ. Sci.* 1(1): 101–19. <http://dx.doi.org/10.1039/B808149M>.

- Van Drunen, Julia et al. 2014. "Electrochemically Active Nickel Foams as Support Materials for Nanoscopic Platinum Electrocatalysts." *ACS Applied Materials and Interfaces* 6(15): 12046–61.
- EG&G Technical Services Inc. 2004. *Fuel Cell Handbook*. Seven. Morgantown.
- Energías Renovables. 2014. "Cómo Funcionan Las Pilas de Combustible." <http://www.energiasrenovablesinfo.com/hidrogeno/pilas-combustibles-tipos/>.
- Garcia-Gabin, Winston, Fernando Dorado, and Carlos Bordons. 2010. "Real-Time Implementation of a Sliding Mode Controller for Air Supply on a PEM Fuel Cell." *Journal of Process Control* 20(3): 325–36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2009.11.006>.
- Gasteiger, Hubert A., Shyam S. Kocha, Bhaskar Sompalli, and Frederick T. Wagner. 2005. "Activity Benchmarks and Requirements for Pt, Pt-Alloy, and Non-Pt Oxygen Reduction Catalysts for PEMFCs." *Applied Catalysis B: Environmental* 56(1–2 SPEC. ISS.): 9–35.
- Geiger S, Copper MAJ. 2003. "Fuel Cell Small Stationary Market Survey." *Fuel Cell Today*.
- Govindarasu, R, R Parthiban, and PK Bhaba. 2012. "Investigation of Flow Mal-Distribution in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack."
- "Grove, Sir William Robert." 2001. *Encyclopaedia Britannica Deluxe edition*.
- "Grove, Sir William Robert (1811–1896)." 2005. *Oxford Dictionary of National Biography, Oxford University Press, online*.
- Grove, W. 1843. "On the Gas Voltaic Battery. Experiments Made with a View of Ascertaining the Rationale of Its Action and Its Application to Eudiometry." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 133(1843): 91–112.
- Haraldsson K, Folkesson A, Alvfors P. 2005. "Fuel Cell Buses in the Stockholm CUTE Project – First Experiences from a Climate Perspective." *J Power Sources*: 620–631.
- Hern, Javier, Enrique Herrero, Antonio Aldaz, and Juan M Feliu. 2006. "Methanol Oxidation on Gold Nanoparticles in Alkaline Media : Unusual Electrocatalytic Activity." 52: 1662–69.
- Hilkert, Marlene. 2004. *Pathways for a Transition to a Sustainable Hydrogen Transportation Fuel Infrastructure in California*. <https://books.google.com/books?id=QQF8AQAAQBAJ&pgis=1>.
- Iqbal, M.T. 2003. "Modeling and Control of a Wind Fuel Cell Hybrid Energy System." *Renewable Energy* 28(2): 223–37.
- Jacobson, David. 2006. "PEM Fuel Cells." *NIST*. <https://www.physics.nist.gov/MajResFac/NIF/pemFuelCells.html> (March 19, 2018).
- Jeon, Min K. et al. 2007. "Performance Degradation Study of a Direct Methanol Fuel Cell by Electrochemical Impedance Spectroscopy." *Electrochimica Acta* 53(2): 447–52.
- Kabza, Alexander. 2015. "Fuel Cell Formulary." <Http://Www.Pemfc.De>: 1–84.
- Kerres, J. A. 2005. "Blended and Cross-Linked Ionomer Membranes for Application in Membrane Fuel Cells." *Fuel Cells* 5(2): 230–47.
- Kreuer, K. D. 2000. "On the Complexity of Proton Conduction Phenomena." *Solid State Ionics* 136–137: 149–60.
- Larminie, J., and A. Dicks. 2003. *Fuel Cells Systems Explained*. Second edi. ed. Wiley & Sons.

Chichester (England).

- Larminie, James, and Andrew Dicks. 2003. *Fuel Cell Systems Explained*. <http://eu.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-047084857X.html>.
- Lee, Hye Jin et al. 2011. "Demonstration of a 20 W Class High-Temperature Polymer Electrolyte Fuel Cell Stack with Novel Fabrication of a Membrane Electrode Assembly." *International Journal of Hydrogen Energy* 36(9): 5521–26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.02.014>.
- Li, Qingfeng, Jens Oluf Jensen, Robert F. Savinell, and Niels J. Bjerrum. 2009. "High Temperature Proton Exchange Membranes Based on Polybenzimidazoles for Fuel Cells." *Progress in Polymer Science* 34(5): 449–77. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079670009000100>.
- Li, X., E. P L Roberts, and S. M. Holmes. 2006. "Evaluation of Composite Membranes for Direct Methanol Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 154(1): 115–23.
- Liang, H. D. et al. 2015. "Fabrication of 3D Photonic Components on Bulk Crystalline Silicon." *Optics Express* 23(1): 121. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=oe-23-1-121>.
- Liang, Huagen et al. 2014. "Membrane Electrode Assembly with Enhanced Platinum Utilization for High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell Prepared by Catalyst Coating Membrane Method." *Journal of Power Sources* 266: 107–13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.05.014>.
- Liu, Zhaolin et al. 2002. "Synthesis and Characterization of PtRu/C Catalysts from Microemulsions and Emulsions." *Journal of Materials Chemistry* 12(8): 2453–58. <http://xlink.rsc.org/?DOI=b200875k>.
- Lobato, Justo et al. 2011. "A Novel Titanium PBI-Based Composite Membrane for High Temperature PEMFCs." *Journal of Membrane Science* 369(1–2): 105–11.
- M. Becquerel. 1839. "Note Sur Une Pile Voltaïque d'une Grande Énergie, Construite Par M. Grove." *Comptes Rendus*: 8, 497.
- Majsztrik, Paul W., M. Barclay Satterfield, Andrew B. Bocarsly, and Jay B. Benziger. 2007. "Water Sorption, Desorption and Transport in Nafion Membranes." *Journal of Membrane Science* 301(1–2): 93–106.
- Mary Bellis. 2017. *Hydrogen Fuel Cells*. <https://www.thoughtco.com/hydrogen-fuel-cells-1991799>.
- Membranes DuPont. 2010. "Http://Www2.Dupont.Com/FuelCells/En_US/Assets/Downloads/Dfc101.Pdf." http://www2.dupont.com/FuelCells/en_US/assets/downloads/dfc101.pdf.
- Moayeri, M, A Ka, and D Sadeghi Fateh. 2017. "Morphological and Physical Study of Cu-Ni Sintered Porous Wicks Used in Heat Pipes and Fuel Cells." 4(2016): 255–66.
- Multitek Ingeniería. 2013. "Pila de Combustible. Multitek. Estudios y Proyectos de Ingeniería." http://www.multitekingenieros.com/pila_combustible.
- Noll, Thomas E et al. 2004. "Investigation of the Helios Prototype Aircraft Mishap." *Volume I Mishap Report I*(January): 100.

- Noonan, Kevin J.T. et al. 2012. "Phosphonium-Functionalized Polyethylene: A New Class of Base-Stable Alkaline Anion Exchange Membranes." *Journal of the American Chemical Society* 134(44): 18161–64.
- Oh, Kyeongmin, and Hyunchul Ju. 2015. "Temperature Dependence of CO Poisoning in High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Phosphoric Acid-Doped Polybenzimidazole Membranes." *International Journal of Hydrogen Energy* 40(24): 7743–53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.107>.
- Pan, Chao et al. 2005. "Integration of High Temperature PEM Fuel Cells with a Methanol Reformer." *Journal of Power Sources* 145(2): 392–98.
- Rahgoshay, S. M., A. A. Ranjbar, A. Ramiar, and E. Alizadeh. 2017. "Thermal Investigation of a PEM Fuel Cell with Cooling Flow Field." *Energy* 134: 61–73.
- Romero, Pedro Gómez. 2002. "No Title." *Mundo Científico* 233.
- Rosli, R.E. et al. 2017. "A Review of High-Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell (HT-PEMFC) System." *International Journal of Hydrogen Energy* 42(14): 9293–9314. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319915313069>.
- Santiago, Óscar. 2016. "Pilas de Combustible En El Espacio: Misiones Gemini." <http://apilados.com/blog/pilas-combustible-espacio>.
- . 2017. "Almacenamiento de Hidrógeno Comprimido: Tipos de Tanques." <http://apilados.com/blog/almacenamiento-hidrogeno-comprimido-tipos-tanques/> (May 13, 2018).
- Shamardina, O., A. Chertovich, A. A. Kulikovskiy, and A. R. Khokhlov. 2010. "A Simple Model of a High Temperature PEM Fuel Cell." *International Journal of Hydrogen Energy* 35(18): 9954–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.012>.
- Smitha, B., S. Sridhar, and A. A. Khan. 2005. "Solid Polymer Electrolyte Membranes for Fuel Cell Applications - A Review." *Journal of Membrane Science* 259(1–2): 10–26.
- Sousa, T., M. Mamlouk, and K. Scott. 2010. "A Non-Isothermal Model of a Laboratory Intermediate Temperature Fuel Cell Using PBI Doped Phosphoric Acid Membranes." *Fuel Cells* 10(6): 993–1012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.08.057>.
- Springer, T, T Zawodzinski, and S Gottesfeld. 1991. "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model." *J. Electrochem. Soc* 138(8): 2334–41.
- Steinberger-Wilckens, R, and W Lehnert. 2010. *Innovations in Fuel Cell Technologies*.
- Stölten, D., and B. Emonts. 2012. *Fuel Cell Science & Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*. ed. Wiley-VCH. Weinheim (Germany).
- Su, Huaneng et al. 2014. "Low Platinum Loading for High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell Developed by Ultrasonic Spray Coating Technique." *Journal of Power Sources* 267: 155–59. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775314007782>.
- Sun, Hong, Chen Xie, Hao Chen, and Saif Almheiri. 2015. "A Numerical Study on the Effects of Temperature and Mass Transfer in High Temperature PEM Fuel Cells with Ab-PBI Membrane." *Applied Energy* 160: 937–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.02.053>.
- "The Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)." 2012.

<http://www.fuelcelltoday.com/technologies/pemfc>.

- Tretsiakova-McNally, S., and D. Makarov. 2016. "LECTURE - Safety of Hydrogen Storage."
- Ubong, E. U., Z. Shi, and X. Wang. 2009. "Three-Dimensional Modeling and Experimental Study of a High Temperature PBI-Based PEM Fuel Cell." *Journal of The Electrochemical Society* 156(10): B1276. <http://jes.ecsdl.org/cgi/doi/10.1149/1.3203309>.
- Varcoe, J.R., and R.C.T. Slade. 2005. "Fuel Cells 5." : 187.
- Verbist, Lars. 2017. "Useful Information When Buying a Previously Owned Tesla Model S." <https://www.teslars.com/single-post/2017/12/03/Usefull-information-when-buying-a-Previously-Owned-Tesla-Model-S-Part-2> (May 31, 2018).
- Wang, Yun et al. 2011. "A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research." *Applied Energy* 88(4): 981–1007.
- Wee, Jung Ho. 2007. "Applications of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11(8): 1720–38.
- Weiss-Ungethüm, Jörg et al. 2014. "Experimental Investigation of a Liquid Cooled High Temperature Proton Exchange Membrane (HT-PEM) Fuel Cell Coupled to a Sodium Alanate Tank." *International Journal of Hydrogen Energy* 39(11): 5931–41.
- Xu, Hui, Ying Song, H. Russell Kunz, and James M. Fenton. 2006. "Operation of PEM Fuel Cells at 120-150 °C to Improve CO Tolerance." *Journal of Power Sources* 159(2): 979–86.
- Yu, Yi et al. 2012. "Current Mapping of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell with a Segmented Current Collector during the Gas Starvation and Shutdown Processes." *International Journal of Hydrogen Energy* 37(20): 15288–300.
- Zhang, Jianlu et al. 2006. "High Temperature PEM Fuel Cells." *Journal of Power Sources* 160(2 SPEC. ISS.): 872–91.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Esquema básico de una celda de combustible (Asensio et al. 2011).....	1
Ilustración 2: Estructura pila de combustible de R. Grove (Grove 1843)	3
Ilustración 3: Pila de combustible utilizada en la misión Gemini (NASA) (Santiago 2016)	3
Ilustración 4: Esquema funcionamiento pila AFC (Energías Renovables 2014)	6
Ilustración 5: Esquema físico-químico del funcionamiento básico de una pila de combustible(J. Larminie and A. Dicks 2003) 9	
Ilustración 6: Esquema funcionamiento pila PEMFC (Creative Commons 2017; Energías Renovables 2014).....	11
Ilustración 7: Componentes estructurales pila PEM	12
Ilustración 8: Estructura simplificada de un electrodo (J. Larminie and A. Dicks 2003)	13
Ilustración 9: Estructura de ácido perfluorosulfonado (James Larminie and Dicks 2003).....	14
Ilustración 10: Estructura interna pila PEM (Jacobson 2006).....	17
Ilustración 11: Aeronave Helios diseñada por la NASA (Noll et al. 2004).....	19
Ilustración 12: Monómero de una membrana PBI (Shamardina et al. 2010).....	23
Ilustración 13: Esquema funcionamiento pila SOFC (Energías Renovables 2014).....	26
Ilustración 14: Corte transversal de una pila SOFC tubular de la marca Siemens-Westinghouse (EG&G Technical Services Inc. 2004)	28
Ilustración 15: Esquema funcionamiento pila PAFC (Energías Renovables 2014).....	31
Ilustración 16: Esquema funcionamiento pila MCFC (Energías Renovables 2014).....	34
Ilustración 17: Esquema gráfico pila DMFC (Energías Renovables 2014).....	38
Ilustración 18: Esquema de sistemas auxiliares necesarios en un tren de potencia del Honda FCX (Wang et al. 2011)	45
Ilustración 19: Esquema general simplificado (Esquema de creación propia)	46
Ilustración 20: Equipo de pila de combustible con subsistemas instalados	46
Ilustración 21: Tabla de propiedades del H2 en función de su presión y temperatura (Santiago 2017).....	47
Ilustración 22: Tipos de recipientes de almacenamiento según su estructura (Barthelemy 2006).....	48
Ilustración 23: Aspecto de los recipientes utilizados (Horizon Fuel Cells Technologies Inc.)	51
Ilustración 24: Aspecto real de la pila de combustible Horizon VL-30 (www.horizonfuelcell.com)	55
Ilustración 25: Morfología de la resistencia tipo “fondo de tanque” (Resistencias Tope S.A.)	57
Ilustración 26: Tabla de características de la resistencia seleccionada (Resistencias Tope S.A.)	57
Ilustración 27: Propiedades de hidratación de la membrana de Nafion (Membranes DuPont 2010).....	59
Ilustración 28: Pila de combustible con presencia de puntos calientes (Rahgoshay et al. 2017).....	61
Ilustración 29: Pila de combustible sobredimensionada (Rahgoshay et al. 2017)	62
Ilustración 30: Pila de combustible con un nivel térmico uniforme	62
Ilustración 31: Esquema de principio sistema de refrigeración (creación propia)	64
Ilustración 32: Aspecto del intercambiador aire-agua del sistema de refrigeración.....	66
Ilustración 33: Aspecto real bomba de agua (www.hella.com).....	66
Ilustración 34: Diferentes disposiciones de motores eléctricos (Verbist 2017)	67
Ilustración 35: Esquema de propulsión simplificado (Creación propia)	67
Ilustración 36: Motor Alren 315L 1-6 (www.alren.es).....	68
Ilustración 37: Stack de baterías de ion litio (Toyota Motor Company Inc.)	70
Ilustración 38: Esquema simple de sobrealimentación en una pila PEM (James Larminie and Dicks 2003)	72

Ilustración 39: Esquema de funcionamiento del sistema reductor de presión en la corriente de entrada de combustible (Creación propia).....	72
Ilustración 40: Presostato Trafag EPN-S 8320 (www.festo.com)	73
Ilustración 41: Electroválvula Festo MS4-LR-1/4-D6-AS (www.festo.com)	73
Ilustración 42: Esquema de funcionamiento del sistema de compresión de aire en la corriente de entrada (Creación propia)	73
Ilustración 43: Turbocompresor Celeroton CT-14-1000 (www.celeroton.com).....	74
Ilustración 44: Diagrama de disposición de compresores en el sistema de alimentación (creación propia)	75
Ilustración 45: Esquema de funcionamiento sistema alimentación de hidrógeno. (Creación propia)	79
Ilustración 46: Aspecto del turbocompresor Celeroton CT-17-700 (www.celeroton.com).....	80
Ilustración 47: Esquema de funcionamiento del sistema de compresión de aire en la corriente de entrada (Creación propia)	81
Ilustración 48: Aspecto real del recuperador Salvador Escoda MU-RECO 800 BQ (www.salvadorescoda.com)	82
Ilustración 49: Aspecto de un stack que conecta 3 celdas en serie mediante las placas bipolares (J. Larminie and A. Dicks 2003)	95
Ilustración 50: Canales de alimentación internos mecanizados en placas bipolares (J. Larminie and A. Dicks 2003).....	96
Ilustración 51: Propiedades físicas de la membrana de Nafion (Membranes DuPont 2010)	98

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Diagrama de Ragnone. Comparación entre la energía específica y la potencia específica (Cid 2014)	2
Gráfico 2: Relación presión de vapor-temperatura según las diferentes concentraciones de electrolito (James Larminie and Dicks 2003)	8
Gráfico 3: Diferencia entre el uso membranas de Nafion o PBI (Chandan et al. 2013; Rosli et al. 2017).....	22
Gráfico 4: Curva de polarización y de densidad de potencia para diferentes concentraciones de CO en la entrada (Wang et al. 2011)	23
Gráfico 5: Comparación entre los diferentes métodos de precalentamiento (Rosli et al. 2017; Wang et al. 2011)	55
Gráfico 6: Ratio de presión frente a flujo másico (www.celeroton.com).....	75
Gráfico 7: Ratio de presión frente a flujo másico (www.celeroton.com).....	81
Gráfico 8: Diagrama energético de Sankey (creación propia)	90
Gráfico 9: Límite de eficiencia para cada tipo de pila en función de la temperatura de operación (J. Larminie and A. Dicks 2003)	91
Gráfico 10: Ganancia de tensión (V) en función del incremento de presión de operación [ΔP]	92
Gráfico 11: Ganancia de potencia (W) en función del incremento de presión de operación [ΔP].....	93
Gráfico 12: Coeficientes de difusión de Fick para membranas de Nafion ante diferentes contenidos de agua (80°C) (Wang et al. 2011).....	99
Gráfico 13: Coste por subsistemas (gráfico de creación propia)	107
Gráfico 14: Costes de mantenimiento hasta 100.000 km (Gráfico de creación propia).....	108
Gráfico 15: Costes de mantenimiento hasta 1.000.000 km (Gráfico de creación propia).....	108

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Tensión de la pila en función de las presiones parciales y la presión de alimentación del CO ₂	37
Ecuación 2: Capacidad másica de almacenamiento requerida (m_{alm}).....	50
Ecuación 3: Capacidad de almacenamiento requerida (V_{alm}).....	51
Ecuación 4: Número de recipientes requeridos (n_{bot}).....	51
Ecuación 5: Tiempo de calentamiento de una pila (t) (Søren Juhl Andreasen and Kær 2008).....	56
Ecuación 6: Presión parcial del agua a la salida para una humedad en la corriente de entrada insignificante (Pexit) (J. Larminie and A. Dicks 2003).....	60
Ecuación 7: Humedad relativa \emptyset	60
Ecuación 8: Flujo másico de agua en la corriente de entrada mw (J. Larminie and A. Dicks 2003).....	61
Ecuación 9: Flujo de calor residual total producido en la pila QT ref (Kabza 2015).....	64
Ecuación 10: Calor disipado por la corriente de aire en la alimentación Qa in (Kabza 2015).....	65
Ecuación 11: Flujo másico de refrigeración por agua mw ref (Kabza 2015).....	65
Ecuación 12: Relación de transmisión.....	71
Ecuación 13: Flujo másico de aire a la salida (msalida de aire) (James Larminie and Dicks 2003).....	76
Ecuación 14: Máximo flujo másico de agua producido en la pila (magua producida).....	76
Ecuación 15: Potencia requerida por el vehículo Pe	78
Ecuación 16: Potencia eléctrica (Pe).....	78
Ecuación 17: Flujo másico de hidrógeno necesario a la entrada (mH2) (J. Larminie and A. Dicks 2003).....	79
Ecuación 18: Flujo másico de aire necesario a la entrada (mentrada de aire) (James Larminie and Dicks 2003).....	82
Ecuación 19: Reacción de oxidación del hidrógeno como combustible.....	83
Ecuación 20: Incremento de energía libre de Gibbs teórico en la reacción (ΔG0).....	83
Ecuación 21: Cálculo de energía libre de Gibbs en función de la energía específica (Δgf).....	83
Ecuación 22: Energía específica de Gibbs a una P y una T determinadas (G).....	84
Ecuación 23: Potencia libre de Gibbs.....	84
Ecuación 24: Trabajo eléctrico realizado (J. Larminie and A. Dicks 2003).....	85
Ecuación 25: Fuerza electromotriz de un sistema reversible (en circuito abierto) (J. Larminie and A. Dicks 2003).....	85
Ecuación 26: Ecuación de Nernst (Vc).....	85
Ecuación 27: Sobrepotencial de activación del ánodo (Ecuación de Tafel) (Kabza 2015).....	86
Ecuación 28: Sobrepotencial óhmico (ηohm).....	87
Ecuación 29: Sobrepotencial de transporte (Aproximación empírica) (James Larminie and Dicks 2003).....	87
Ecuación 30: Tensión de operación real teniendo en cuenta los sobrepotenciales (Vcr) (Ecuación simplificada).....	88
Ecuación 31: Máxima eficiencia teórica emax (Kabza 2015).....	88
Ecuación 32: Eficiencia térmica de la pila eterm (J. Larminie and A. Dicks 2003).....	89
Ecuación 33: Eficiencia eléctrica de la celda elec (Cid 2014).....	89
Ecuación 34: Eficiencia real de la pila.....	90
Ecuación 35: Rendimiento total del sistema de transmisión.....	90
Ecuación 36: Rendimiento total del sistema.....	90
Ecuación 37: Variación de tensión debida a la sobrepresión de alimentación (ΔV).....	92
Ecuación 38: Variación de potencia debida a la sobrepresión de alimentación (ΔP).....	92
Ecuación 39: Número de celdas en serie.....	102

Ecuación 40: Número de celdas en paralelo 103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de pilas de combustible (Tabla de creación propia)	5
Tabla 2: Tabla de características pila AFC (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017)	6
Tabla 3: Materiales AFC (Tabla de creación propia)	7
Tabla 4: Tabla de características pila PEM (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017) ...	11
Tabla 5: Materiales PEMFC (Tabla de creación propia)	12
Tabla 6: Tabla comparativa LT-PEMFC y HT-PEMFC (The proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) 2012)	20
Tabla 7: Requisitos mínimos a cumplir por una placa bipolar (Steinberger-Wilckens and Lehnert 2010)	21
Tabla 8: Materiales HT-PEMFC (Tabla de creación propia)	21
Tabla 9: Tabla de características pila SOFC (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017; California Center for Sustainable Energy 2010)	26
Tabla 10: Materiales SOFC (Tabla de creación propia)	27
Tabla 11: Tabla de características pila PAFC (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017; EG&G Technical Services Inc. 2004)	30
Tabla 12: Materiales PAFC (Tabla de creación propia)	31
Tabla 13: Tabla de características pila MCFC (Arazana 2005; Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017; EG&G Technical Services Inc. 2004)	34
Tabla 14: Materiales de los electrodos y electrolitos (Tabla de creación propia)	35
Tabla 15: Tabla de características pila DMFC (Ariema energía 2003; Asociación española de las pilas de combustible 2017)	38
Tabla 16: Materiales de los electrodos y electrolitos (Tabla de creación propia)	39
Tabla 17: Comparación de los tipos de recipientes	49
Tabla 18: Características del recipiente de almacenamiento a presión (Horizon Fuel Cells Technologies Inc.)	52
Tabla 19: Comparativa de celdas de potencia (Tabla de creación propia a partir de las fichas técnicas del Anexo 4)	54
Tabla 20: Vapor de agua saturado a diferentes temperaturas (J. Larminie and A. Dicks 2003)	60
Tabla 21: Características técnicas motor Alren 315L 1-6 (www.alren.es)	69
Tabla 22: Características de la batería (Toyota motor Company Inc.)	70
Tabla 23: Características del turbocompresor Celeroton CT-14-1000 (www.celeroton.com)	74
Tabla 24: Características del turbocompresor Celeroton CT-14-1000 (www.celeroton.com)	80
Tabla 25: Energía libre de Gibbs Δg_f , máxima tensión en circuito abierto y límite de eficiencia referido al poder calorífico superior para la reacción $H_2 + 2O_2 \rightarrow H_2O$ a diferentes temperaturas (James Larminie and Dicks 2003)	84
Tabla 26: Pérdidas de tensión del equipo a lo largo de su vida útil (tabla de creación propia)	94
Tabla 27: Características recomendadas para una placa bipolar (James Larminie and Dicks 2003; Membranes DuPont 2010)	96
Tabla 28: Características recomendadas para la membrana (Membranes DuPont 2010)	98
Tabla 29: Características recomendadas para electrodos (Membranes. n.d.)	100
Tabla 30: Datos cálculos coste de combustible	107
Tabla 31: Datos cálculos coste de mantenimiento	107
Tabla 32: Propiedades del Hidrógeno como combustible (Søren Juhl Andreasen and Kær 2007)	132

ANEXOS

Anexo 1- Propiedades del hidrógeno

Tabla 32: Propiedades del Hidrógeno como combustible (Sofen Juhl Andreasen and Kær 2007)

Propiedad	Valor	Condiciones
Densidad	16.27 kg/m ³	25°C, 200 bar
Poder calorífico inferior (PCI)	120.1 MJ/kg	25°C, 200 bar
Densidad energética (Masa)	33.4 kW·h/kg	25°C, 200 bar
Densidad energética (Volumen)	542.6 kW·h/m ³	25°C, 200 bar
Densidad	0.084 kg/m ³	Presión y temperatura normales

Hoja de seguridad del hidrógeno

HIDROGENO		ICSC: 0001 Marzo 2002	
CAS: 1333-74-0 H ₂ RTECS: MW9900000 Masa molecular: 2.0 NU: 1049 CE Índice Anexo I: 001-001-00-9 CE / EINECS: 215-605-7			
TIPO DE PELIGRO / EXPOSICIÓN	PELIGROS AGUDOS / SINTOMAS	PREVENCIÓN	PRIMEROS AUXILIOS / LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Extremadamente inflamable. Muchas reacciones pueden producir incendio o explosión.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Cortar el suministro; si no es posible y no existe riesgo para el entorno próximo, dejar que el incendio se extinga por sí mismo; en otros casos apagar con agua pulverizada, polvo, dióxido de carbono.
EXPLOSIÓN	Las mezclas gas/aire son explosivas.	Sistema cerrado, ventilación, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión. Utilicemos herramientas manuales no generadoras de chispas. No manipular las botellas con las manos grasientas.	En caso de incendio: mantener fría la botella rociando con agua. Combatir el incendio desde un lugar protegido.
EXPOSICIÓN			
Inhalación	Asfixia.	Sistema cerrado y ventilación.	Aire limpio, reposo. Respiración artificial si estuviera indicada. Proporcionar asistencia médica.
Piel	Congelación grave.	Guantes aislantes del frío.	Proporcionar asistencia médica.
Ojos		Gafas de protección de seguridad.	
Ingestión			
DERRAMES Y FUGAS	ENVASADO Y ETIQUETADO		
Eliminar toda fuente de ignición Evacuar la zona de peligro. Consultar a un experto. Ventilar. Eliminar el vapor con agua pulverizada.	Clasificación UE Símbolo: F+ R: 12 S: (2)-9-16-33 Clasificación NU Clasificación de Peligros NU: 2.1		
RESPUESTA DE EMERGENCIA	ALMACENAMIENTO		
Ficha de emergencia de transporte (Transport Emergency Card): TEC (R)-20S1949 Código NFPA: H 0; F 4; R 0;	A prueba de incendio. Mantener en lugar fresco.		
			
Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión Europea © IPCS, CE 2005			

VEÁSE INFORMACIÓN IMPORTANTE AL DORSO

HIDROGENO		ICSC: 0001	
DATOS IMPORTANTES			
ESTADO FÍSICO; ASPECTO: Gas comprimido inodoro e incoloro.		VÍAS DE EXPOSICIÓN: La sustancia se puede absorber por inhalación.	
PELIGROS FÍSICOS: El gas se mezcla bien con el aire, formándose fácilmente mezclas explosivas. El gas es más ligero que el aire.		RIESGO DE INHALACIÓN: Al producirse una pérdida de gas se alcanza muy rápidamente una concentración nociva de este en el aire.	
PELIGROS QUÍMICOS: El calentamiento intenso puede originar combustión violenta o explosión. Reacciona violentamente con aire, oxígeno, halógenos y oxidantes fuertes, originando peligro de incendio y explosión. Los metales catalizadores tales como el platino o el níquel aumentan este tipo de reacciones.		EFFECTOS DE EXPOSICIÓN DE CORTA DURACIÓN: Asfixiante simple. Véanse Notas.	
LÍMITES DE EXPOSICIÓN: TLV: asfixiante simple (ACGIH 2002).			
PROPIEDADES FÍSICAS			
Punto de ebullición: -253°C Densidad relativa de vapor (aire = 1): 0.07		Punto de inflamación: gas inflamable Temperatura de autoignición: 500-571 °C Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 4-76	
DATOS AMBIENTALES			
NOTAS			
Altas concentraciones en el aire producen una deficiencia de oxígeno con riesgo de pérdida de conocimiento o muerte. Comprobar el contenido de oxígeno antes de entrar en la zona. A concentraciones tóxicas no hay alerta por el olor. Medir concentraciones de hidrógeno con un detector de gas adecuado (un detector de gas inflamable normal no es adecuado).			
INFORMACIÓN ADICIONAL			
Límites de exposición profesional (INSHT 2011): Notas: Asfixiante simple			
Nota legal Esta ficha contiene la opinión colectiva del Comité Internacional de Expertos del IPCS y es independiente de requisitos legales. Su posible uso no es responsabilidad de la CE, el IPCS, sus representantes o el INSHT, autor de la versión española.			
© IPCS, CE 2005			

Anexo 2- Proceso de montaje HT-PEMFC

El método de montaje se basará principalmente en los siguientes pasos:

1. **Preparación del GDL-** Se depositará polvo de carbón, un solvente y un polímero aglutinante (Teflón) sobre papel carbón. Será interesante contar con una capa GDL muy porosa para facilitar el intercambio de masa reactiva, así como delgada para aumentar el rendimiento de la celda mediante la reducción de la resistencia a la transferencia de masa de reactivo. (Rosli et al. 2017)
2. **Preparación del material de soporte del catalizador-** El electrocatalizador normalmente cuenta con los siguientes componentes: Soporte de carbono platino (Pt/C), un disolvente (acetona) y un ionómero. (Lobato et al. 2011)
3. **Preparación del electrodo-** Hay dos métodos que suelen usarse para depositar de tinta de catalizado. Uno de ellos es el CCM y consistirá en aplicar la tinta directamente sobre la membrana mientras que el otro (CCS) consiste en aplicar la tinta sobre el GDL utilizando un sustrato recubierto con catalizador. (H. Liang et al. 2014; H. D. Liang et al. 2015; Pan et al. 2005; Su et al. 2014)
4. **Preparación de la membrana de PBI-** La membrana suele estar dopada con ácido fosfórico al 85% en peso, aunque dependerá de la composición de la misma. Hay que tener en cuenta que un mayor dopaje puede aumentar la conductividad protónica de la membrana, pero la resistencia mecánica de la misma se reducirá. (Q. Li et al. 2009; Zhang et al. 2006)
5. **Ensamblaje-** El ensamblaje electrodo/membrana se puede llevar a cabo mediante la presión en caliente de los materiales con el objetivo de reducir lo máximo posible la resistencia de contacto entre los diferentes componentes de la MEA. (Lee et al. 2011)

Anexo 3- Fabricantes de pilas para el transporte

Table 3
A list of key companies in the fuel cell transportation sector [26,28,29].

Company	Website	Location	Details
BAE Systems	baesystems.com	UK	Integration of a fuel cell APU into its hybrid bus powertrain
Ballard	ballard.com	Canada	FC forklifts; HD6, their next generation engine for hybrid fuel-cell buses
Daimler	daimler.com	UK	Fuel-cell buses, the new BlueZERO FCV
General Motors	gm.com	USA	115 units of its fourth generation Equinox FCV, which have been delivered to California, Germany, China, Korea and Japan
H2Logic	h2logic.com	Denmark	FC forklifts, focusing on the European market
Honda	honda.com	Japan	200 of its FCX clarity are expected to be shipped to California and to government members in Japan within the next 3 years, FC sport, which uses the FCX clarity technology in a sport-like designed car
Hydrogenics	hydrogenics.com	Canada	20 kW minibuses, APUs and range extenders
Hyundai-Kia	worldwide.hyundai.com	Korea	Borrego FCEV, using four generation FC technology and is expected to have a 426-mile range
Nissan	nissan-global.com	Japan	X-TRAIN SUV, equipped with Nissan's latest generation FC system, provided Renault with FC technology for Renault's hybrid drive FC Scenic
Nuvera	nuvera.com	USA	PowerEdge, hybrid FC forklifts, 82 kW FC bus
Oorja Protonics	oorjaprotonics.com	USA	DMFC-based charger for forklifts' batteries
Proton Motor	proton-motor.de	Germany	Zemship FC passenger ferry, FC powered street sweeper, light duty truck
Protonex	PROTONEX.com	USA	APUs, UAVs (Unmanned Aerial Vehicles)
Toyota	toyota.com	Japan	40 units of its latest FCHV-adv unveiled in Japan
Tropical S.A.	tropical.gr	Greece	Hybrid FC bikes and scooters, with the FC charging the battery
UTC power	utcpower.com	USA	120 kW PureMotion system for FC buses, and 120 kW FC cars
Volkswagen	volkswagen.com	Germany	16 units of its Passat Lingyu shipped to California for demonstration and testing
Volvo	volvo.com	Sweden	APUs

Anexo 4- Ficha técnica equipos comerciales

Membrana



Product Information

Nafion™ perfluorosulfonic acid (PFSA) membranes are non-reinforced films based on chemically stabilized PFSA/polytetrafluoroethylene (PTFE) copolymer in the acid (H⁺) form. The physical properties remain the same for the chemically stabilized membranes, which exhibit substantially lower fluoride ion release compared to the non-stabilized polymer—a sign of improved chemical durability. Nafion™ PFSA membranes are widely used for proton exchange membrane (PEM) fuel cells and water electrolyzers. The membrane performs as a separator and solid electrolyte in a variety of electrochemical cells that require the membrane to selectively transport cations across the cell junction. The polymer is chemically resistant and durable.

Order and Packaging Information

Membrane dimensions are based on dry product conditioned at 23 °C (73°F) and 50% relative humidity (RH) before cutting. The membrane's water content will affect its dimensions, and the change may not be symmetrical in the length, width, and thickness directions. In addition, certain conditioning steps performed by the customer also may affect the dimensions. Customers may wish to review their membrane treatment steps and dimensional requirements with a Nafion™ technical representative before establishing membrane shipping dimensions.

Standard dry product dimensions for individual pieces include:

Width: 0.30 m (min.) to 1.22 m (max.)

Length: 0.30 m (min.) to 1.22 m (max.)

The membrane delivery package for cut pieces will depend on the size and quantity of the membrane order. Smaller sized membranes are shipped flat, while longer lengths of individual pieces are shipped on a roll. The membranes are protected with a polyethylene wrap and inner packaging, and then placed in shipping containers.

Standard dry product dimensions for roll goods include:

Width: 12-in (0.305-m) and 24-in (0.610-m) standard roll widths, and roll widths from 0.20-m (min.) up to 1.22-m (max.) on special order. Intermediate widths available in increments of 0.125-in

Length: 50-m standard roll length

There is a 100 m² minimum order requirement for non-standard roll widths and lengths. Membrane pieces or rolls can be cut to custom sizes, and special packaging provided at additional cost and/or delivery time. Please contact Nafion™ Customer Service for details.



Table 1. Properties of Nafion[®] PFSA Membrane

Thickness and Basis Weight Properties ¹		
Membrane Type	Typical Thickness (μm)	Basis Weight (g/m ²)
Nafion [®] N115	127	250
Nafion [®] N117	183	360
Nafion [®] N1110	254	500
Physical and Other Properties ²		
	Typical Value	Test Method
Physical Properties		
Tensile Modulus, MPa (kpsi)		
50% RH, 23 °C (73 °F)	249 (36)	ASTM D882
water soaked, 23 °C (73 °F)	114 (16)	ASTM D882
water soaked, 100 °C (212 °F)	64 (9.4)	ASTM D882
Tensile Strength, Max., MPa (kpsi)		
50% RH, 23 °C (73 °F)	43 (6.2) in MD, 32 (4.6) in TD	ASTM D882
water soaked, 23 °C (73 °F)	34 (4.9) in MD, 26 (3.8) in TD	ASTM D882
water soaked, 100 °C (212 °F)	25 (3.6) in MD, 24 (3.5) in TD	ASTM D882
Elongation at Break, %		
50% RH, 23 °C (73 °F)	225 in MD, 310 in TD	ASTM D882
water soaked, 23 °C (73 °F)	200 in MD, 275 in TD	ASTM D882
water soaked, 100 °C (212 °F)	180 in MD, 240 in TD	ASTM D882
Tear Resistance—Initial, g/mm		
50% RH, 23 °C (73 °F)	6000 in MD, TD	ASTM D1004
water soaked, 23 °C (73 °F)	3500 in MD, TD	ASTM D1004
water soaked, 100 °C (212 °F)	3000 in MD, TD	ASTM D1004
Tear Resistance ³ —Propagating, g/mm		
50% RH, 23 °C (73 °F)	>100 in MD, >150 in TD	ASTM D1922
water soaked, 23 °C (73 °F)	92 in MD, 104 in TD	ASTM D1922
water soaked, 100 °C (212 °F)	74 in MD, 85 in TD	ASTM D1922
Specific Gravity	1.98	—
Other Properties		
Conductivity, S/cm	0.10 min.	See footnote ⁴
Available Acid Capacity, meq/g	0.90 min.	See footnote ⁵
Total Acid Capacity, meq/g	0.95–1.01	See footnote ⁵
Hydrolytic Properties ²		
Water Content, % water ⁶	5	ASTM D570
Water Uptake, % water ⁷	38	ASTM D570
Thickness Change, % increase		
from 50% RH, 23 °C (73 °F) to water soaked, 23 °C (73 °F)	10	ASTM D756
from 50% RH, 23 °C (73 °F) to water soaked, 100 °C (212 °F)	14	ASTM D756
Linear Expansion, % increase ⁸		
from 50% RH, 23 °C (73 °F) to water soaked, 23 °C (73 °F)	10	ASTM D756
from 50% RH, 23 °C (73 °F) to water soaked, 100 °C (212 °F)	15	ASTM D756

¹Measurements taken with membrane conditioned to 23 °C (73 °F), 50% RH.

²Physical properties measured for Nafion[®] N115. Where specified, MD—machine direction, TD—transverse direction. Conditioning state of membrane given. Measurements taken at 23 °C (73 °F), 50% RH.

³Tear resistance (g/mm) of dry membrane increases with thickness. Values given measured using 50 μm membrane.

⁴Conductivity measurement as described by Zawodzinski, et al., *J. Phys. Chem.*, 95 (15), 6040 (1991). Membrane conditioned in 100 °C (212 °F) water for 1 hr. Measurement cell submerged in 25 °C (77 °F) D₂O water during experiment. Membrane impedance (real) taken at zero imaginary impedance.

⁵A base titration procedure measures the equivalents of sulfonic acid in the polymer and uses the measurement to calculate the acid capacity or equivalent weight of the membrane.

⁶Water content of membrane conditioned to 23 °C (73 °F), 50% relative humidity (RH), compared to dry weight basis.

⁷Water uptake from dry membrane to water soaked at 100 °C (212 °F) for 1 hr (dry weight basis).

⁸Typical MD and TD values. MD expansion is slightly less than TD.

Recommended Roll Storage Conditions

Unopened roll packages of Nafion™ PFSA membrane should be stored in the original shipping box, out of direct sunlight, and in a climate-controlled environment maintained at 10–30 °C (50–86 °F) and 30–70% relative humidity. Before opening the package, pre-condition the membrane roll to the processing area temperature for 24 hr.

Once opened and exposed to the environment, the membrane will equilibrate to the ambient relative humidity and change in dimensions accordingly. Membrane order dimensions are specified and measured at 23 °C (73 °F) and 50% relative humidity.

Handling Practices

Ventilation should be provided for safe handling and processing of Nafion™ PFSA membrane. The amount of local exhaust necessary for processing Nafion™ PFSA membrane at elevated temperatures will depend on the combined factors of membrane quantity, temperature, and exposure time.

Scrap Disposal

Preferred disposal options are (1) recycling and (2) landfill. Incinerate only if incinerator is capable of scrubbing out hydrogen fluoride and other acidic combustion products. Treatment, storage, transportation, and disposal must be in accordance with applicable federal, state/provincial, and local regulations.

Safe Handling and Use of Nafion™ PFSA Membranes

The following information should be reviewed before handling and processing Nafion™ PFSA membranes:

- Material Safety Data Sheet for Nafion™ PFSA membranes N115, N117, and N1110
- Nafion™ "Safety in Handling and Use" technical bulletin, T-01
- "Guide to Safe Handling of Fluoropolymer Resins," Fourth Edition, November 2005, Published by the Fluoropolymers Division of the Society of the Plastics Industry, Inc.

The data listed here fall within the normal range of product properties, but they should not be used to establish specification limits nor used alone as the basis of design. This information is based on technical data that Chemours believes to be reliable. It is intended for use by persons having technical skill and at their own discretion and risk. This information is given with the understanding that those using it will satisfy themselves that their particular conditions of use present no health or safety hazards. Because conditions of product use are outside our control, Chemours makes no warranties, express or implied, and assumes no obligation or liability in connection with any use of this information or for results obtained in reliance thereon. The disclosure of the information is not a license to operate under or a recommendation to infringe any patent of Chemours or others.

Medical Statement: Please contact your Chemours representative to discuss limitations regarding medical applications.

For more information about Nafion™, contact:

The Chemours Company FC, LLC	Telephone USA: (800) 283-2493
Global Customer Service for IXM	Fax: (302) 861-3736
22828 NC Highway 87 W	Email: customerservice.nafion@chemours.com
Fayetteville, NC 28306, USA	Web: chemours.com/Nafion

© 2016 The Chemours Company FC, LLC. Nafion™ and any associated logos are trademarks or copyrights of The Chemours Company FC, LLC. Chemours™ and the Chemours Logo are trademarks of The Chemours Company.

C-10604 (2/16)

Motor




DATOS TÉCNICOS IE2

TAMAÑO ESTÁNDAR

6 POLOS-1000RPM

NO.	Type	Output KW	Voltage V	Amps A	Speed r/min	EFF. %	<i>your require & efficiency</i>	P.F. Cosφ	locked torque/ rated torque	locked current/ rated current	max torque/ rated torque	Noise LwdB(A)
46	90S-6	0,75	400	1,94	940	77,7	78,9	0,72	2,1	5,8	2,1	57
47	90L-6	1,1	400	2,73	940	79,7	81	0,73		5,9		57
48	100L1-6	1,5	400	3,54	940	81,5	82,5	0,75		6		61
49	112M-6	2,2	400	5,01	940	83,4	84,3	0,76		6		65
50	132S-6	3	400	6,71	960	84,9	85,6	0,76	2	6,2		69
51	132M1-6	4	400	8,82	970	86,1	86,8	0,76		6,8		69
52	132M2-6	5,5	400	11,80	970	87,4	88	0,77	2,1	7,1		69
53	160M-6	7,5	400	15,80	970	89	89,1	0,77		6,7		73
54	160L-6	11	400	22,62	970	90	90,3	0,78		6,9		73
55	180L-6	15	400	29,37	980	91	91,2	0,81	2	7,2		73
56	200L1-6	18,5	400	36,03	980	91,5	91,7	0,81	2,1	7,2	73	
57	200L2-6	22	400	42,09	980	92	92,2	0,82		7,3	73	
58	225M-6	30	400	55,73	980	92,5	92,9	0,84	2	7,1	74	
59	250M-6	37	400	67,56	980	93	93,3	0,85	2,1	7,1	76	
60	280S-6	45	400	80,78	980	93,5	93,7	0,86		7,2	78	
61	280M-6	55	400	98,41	980	93,8	94,1	0,86		7,2	78	
62	315S-6	75	400	133,63	990	94,2	94,6	0,86	2	6,7	83	
63	315M-6	90	400	160,36	990	94,2	94,9	0,86		6,7	83	
64	315L1-6	110	400	194,34	990	95	95,1	0,86		6,7	83	
65	315L2-6	132	400	233,21	990	95	95,4	0,86		6,7	83	

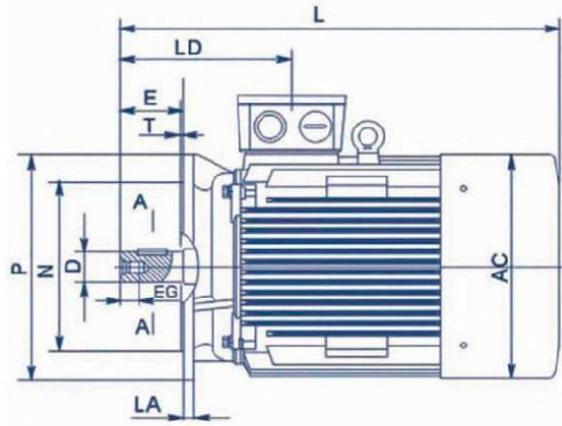
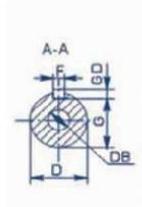


motores trifásicos MOTORES-ELÉCTRICOS.ES 

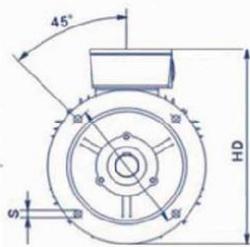
ALREN COTAS / DIMENSIONES DE MONTAJE: B5, B5R IE2

TAMAÑO ESTÁNDAR
Carcasa de hierro

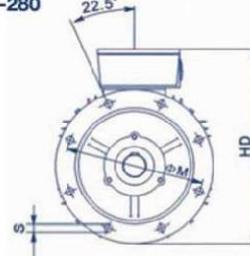
132-280



132-200



225-280



FRAME SIZE	POLES	D	E	F	G	M	N	P	S	T	FLANG E	AC	AD	HF	L	IDH
132S	2.4.6.8	38	80	10	33	265	230	300	15	4	4	275	210	315	470	M12×28
132M	2.4.6.8	38	80	10	33	265	230	300	15	4	4	275	210	315	510	M12×28
160M	2.4.6.8	42	110	12	37	300	250	350	19	5	4	330	255	385	615	M16×36
160L	2.4.6.8	42	110	12	37	300	250	350	19	5	4	330	255	385	660	M16×36
180M	2.4.6.8	48	110	14	42,5	300	250	350	19	5	4	380	280	430	700	M16×36
180L	2.4.6.8	48	110	14	42,5	300	250	350	19	5	4	380	280	430	740	M16×36
200L	2.4.6.8	55	110	16	49	350	300	400	19	5	8	420	305	480	770	M20×42
225S	4,8	60	140	13	53	400	350	450	19	5	8	470	335	535	815	M20×42
225M	2	55	110	16	49	400	350	450	19	5	8	470	335	535	820	M20×42
	4.6.8	60	140	13	53	400	350	450	19	5	8	470	335	535	845	M20×42
250M	2	60	140	13	53	500	450	550	19	5	8	510	370	595	920	M20×42
	4.6.8	65	140	13	58	500	450	550	19	5	8	510	370	595	920	M20×42
280S	2	65	140	13	58	500	450	550	19	5	8	580	410	650	995	M20×42
	4.6.8	75	140	20	67,5	500	450	550	19	5	8	580	410	650	995	M20×42
280M	2	65	140	13	58	500	450	550	19	5	8	580	410	650	1045	M20×42
	4.6.8	75	140	20	67,5	500	450	550	19	5	8	580	410	650	1045	M20×42

 MOTORES-ELÉCTRICOS.ES

Equipos de pilas de combustible

Horizon VL-30 (Equipo seleccionado para instalar en el vehículo)



The VL-30 Fuel Cell from Horizon delivers high power density with simple balance of plant requirements.

With its ease of integration, the VL-30 be widely used in cars, buses, passenger cars and logistics vehicles.

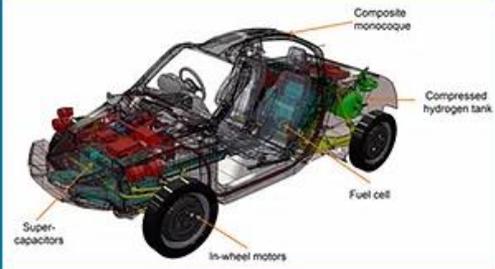
The VL-30 is also suitable for stationary power solutions.

PEM FUEL CELL SYSTEM

- Compact 30kW module
- 2kW/L power density
- Liquid-Cooled design
- Self-Humidifying
- Low pressure program
- Simple operation

SYSTEM SPECIFICATIONS	VL-30
Nominal Continuous Power Output*	0 to 27.8KW
System output voltage *	300-650V (Optional)
FUEL CELL SYSTEM**	
Continuous Power Output	0 to 33kW
Number of Cells	190 Cells
Nominal Voltage	100 - 180V DC
Nominal Output	270A @ 124V
Fuel Cell Dimensions	838*374*208mm
Weight	80kg
AUXILIARY EQUIPMENT	
DC-DC	300-650V (Optional) , External
Cooling system	External
Oxygen supply system	External
OPERATING ENVIRONMENT	
Operating environment temperature	-20°C to +50°C
Start-up Temperature	-20°C
Operating Altitude	Up to 3,000m





Ballard FCvelocity – 9ssl



PRODUCT SPECIFICATIONS

	3.8	4.8	10.5	14.3	17.2	21.0
Rated Power [kW] ¹	12.8	16.0	35.0	48.0	57.4	70.2
DC voltage (at 300A) ¹	7.1	7.2	10.7	13	15	17
Mass (with no coolant) [kg]	92	104	174	220	255	302
Stack core length [mm]	760	760	760	760	760	760
Stack core width [mm]	60	60	60	60	60	60
Stack core height [mm]						

Type:	PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell stack	
Performance:	Maximum current	300A
	Shock and vibration	Automotive ²
Fuel:	Fuel composition (pre-humidification)	> 95% H ₂ ³
Oxidant:	Oxidant composition (pre-humidification)	Compressed ambient (filtered to remove particulates)
Stack Temperatures:	Storage temperature ⁴	-40 to 60° C (-40 to 140° F)
	Start-up temperature	> 2° C (> 36° F)
	Fluid inlet temperature (operating)	2 to 68° C (36 to 154° F) ¹
	External ambient temperature (operating)	-25 to 75° C ⁴ (-13 to 167° F) ⁴

Additional information available upon request.

1. Values achieved at Ballard-specified conditions at the beginning of operational life.
2. Vibration 5g, meets USABC/SNL CRADA No. SC961447 USABC 10. Shock: 5g sections of IEC 60068-2-27 Ea and IEC 60068-2-29 Eb.
3. H₂ purity as per SAE specifications: J2719 with exceptions.
4. Allowable temperature following approved Ballard dry out procedure only, without dry out procedure +2-60°C.

FCvelocity-9SSL

Ballard Power Systems offers a proton exchange membrane (PEM) fuel cell stack based on our proven, fourth generation transportation stack technology.

Available now to customers with fuel cell stack integration capabilities, the FCvelocity-9SSL is designed to perform in rugged conditions and is scalable depending upon customer requirements. Stacks are available in power increments from approximately 4 to 21 kilowatts.

The FCvelocity-9SSL provides stable electrical power to a system over a wide range of operating and environmental conditions. A liquid-cooled, hydrogen-fueled product, the FCvelocity-9SSL uses Ballard's standard fuel cell components.

Suitable for motive applications, the FCvelocity-9SSL features fast, dynamic response, robust and reliable operation and durable packaging.

The FCvelocity-9SSL establishes a new standard of performance by optimizing reliability, power density and compatibility with customer system requirements.

Please contact us for product availability and pricing.

Specifications and descriptions in this document were in effect at the time of publication. Ballard Power Systems, Inc. reserves the right to change specifications, product appearance or to discontinue products at any time (04/2011)

BALLARD, Ballard®, Powered by Ballard®, FCgen® and FCvelocity® are trademarks of Ballard Power Systems Inc. SPCS101006-0K

Ballard Power Systems, Inc.
9000 Glenlyon Parkway
Burnaby, British Columbia
Canada, V5J 5J8

TEL: (+1) 604.454.0900
FAX: (+1) 604.412.4700

www.ballard.com

Hydrogenics HYPM-HD 30

HYDROGENICS

SHIFT POWER | ENERGIZE YOUR WORLD

HYPM-HD 30 POWER MODULE

The industry benchmark for durable, zero-emission propulsion for light and heavy duty mobility.



Hydrogenics is the world leader in developing and implementing hydrogen solutions. With over 60 years of experience, we are committed to safety and reliability in everything that we do. Our fuel cell expertise enables us to provide flexible and customized solutions that offer your business advantages in performance, cost and ease of integration.

Our HyPM™-HD 30 Power Modules are engineered to deliver superior performance, durability and reliability. Their advanced design provides a robust and flexible platform for zero-emission mobility applications including public transit, commercial trucking, railway and aircraft.

Technology Leadership

HyPM-HD 30 incorporates Hydrogenics' proprietary PEM stack technology, using high durability components designed for demanding conditions. Our compact form makes HyPM-HD 30 the right fit for space constrained applications.

Enhanced Reliability

Every HyPM-HD 30 delivers world-leading efficiency from a low pressure compact design that is highly durable and scalable to meet your requirements.

Ease of Integration

Our turnkey system includes simple electrical and mechanical interfaces that allow for easy integration with other powertrain components.



HyPM-HD 30

Hydrogenics' HyPM™ -HD 30 Power Modules offer a fully integrated solution for the high efficiency and durability requirements of light and heavy duty mobility.



HyPM-HD 30 Power Module Technical Specifications†

Technical Data	HD-30
Continuous Power	31 kW
Operating Current	0 to 500 A _{DC}
Operating Voltage	60 to 120 V _{DC}
Peak Efficiency ^a	55%
Response	<5s from off to idle <3s from idle to rated power
Fuel	Hydrogen > 99.8%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H ₂ O) or 60% ethylene glycol/DI H ₂ O
Ambient Temperature	-10 to +65° C operating -40 to +65° C storage (<2° C with automated freeze shutdown feature)
Communication Interface	CAN v2.0A (standard 11 bit)
Dimensions (LxWxH)	719 x 406 x 261 mm ^b
Mass ^a	72 kg
Volume	76 L ^b
Expected Lifetime	10,000+ hours

(a) Coolant pump excluded
(b) Coolant pump and air delivery excluded



HyPM-HD 30 Features:

- Liquid-cooled advanced MEA PEM stack
- Integral Balance of Plant
- Advanced onboard controls and diagnostics
- Low pressure cathode air delivery
- -40°C sub-zero shutdown capability
- Rapid start-up and dynamic response
- Unlimited start-stop cycling
- Robust, rugged and reliable
- No water for humidification required
- No nitrogen required for shutdown
- Designed for ease of UL and CE system certifications

Hydrogenics Corporation
220 Admiral Boulevard
Mississauga, Ontario
Canada L5T 2N6
Phone: 905.361.3660
Fax: 905.361.3626
powersales@hydrogenics.com

Hydrogenics GmbH
Power Systems
Am Wiesenbusch 2, Halle 5
45966 Gladbeck, Germany
Phone: +49.2043.944.133
Fax: +49.2043.944.146

Hydrogenics USA
Power Systems
12707 High Bluff Dr., Suite 200
San Diego, CA 92130 USA
tel: +1.858.794.1473
fax: +1.905.361.3626
hydrogensales@hydrogenics.com

† Actual delivered product may differ in appearance. Specifications subject to change without prior notification. Mechanical and electrical interface diagrams available on request. Contact us to find out more or request a quote. © Hydrogenics Corporation 12-2016

HyPM-HD Power Modules-12-2016

We're ready.
www.hydrogenics.com

Hydrogenics HYPM-HD 90

HYDROGENICS
SHIFT POWER | ENERGIZE YOUR WORLD

HYPM-HD 90 POWER MODULE

The industry benchmark for durable, zero-emission propulsion for light and heavy duty mobility.



Hydrogenics is the world leader in developing and implementing hydrogen solutions. With over 60 years of experience, we are committed to safety and reliability in everything that we do. Our fuel cell expertise enables us to provide flexible and customized solutions that offer your business advantages in performance, cost and ease of integration.

Our HyPM™-HD 90 Power Modules are engineered to deliver superior performance, durability and reliability. Their advanced design provides a robust and flexible platform for zero-emission mobility applications including public transit, commercial trucking, railway and aircraft.

Technology Leadership

HyPM-HD 90 incorporates Hydrogenics' proprietary PEM stack technology, using high durability components designed for demanding conditions. Our compact form makes HyPM-HD 90 the right fit for space constrained applications.

Enhanced Reliability

Every HyPM-HD 90 delivers world-leading efficiency from a low pressure compact design that is highly durable and scalable to meet your requirements.

Ease of Integration

Our turnkey system includes simple electrical and mechanical interfaces that allow for easy integration with other powertrain components.



HyPM-HD 90

Hydrogenics' HyPM-HD 90 Power Modules offer a fully integrated solution for the high efficiency and durability requirements of light and heavy duty mobility.



HyPM-HD 90 Power Module Technical Specifications†

Technical Data	HD-90
Continuous Power	93 kW
Operating Current	0 to 500 A _{DC}
Operating Voltage	180 to 360 V _{DC}
Peak Efficiency ^a	55%
Response	<5s from off to idle <3s from idle to rated power
Fuel	Hydrogen > 99.8%
Oxidant	Ambient Air
Coolant	De-ionized water (DI H ₂ O) or 60% ethylene glycol/DI H ₂ O
Ambient Temperature	-10 to +55° C operating -40 to +65° C storage (<2° C with automated freeze shutdown feature)
Communication Interface	CAN v2.0A (standard 11 bit)
Dimensions (LxWxH)	1582 x 1085 x 346 mm ^a
Mass ^a	360 kg
Volume	594 L ^a
Expected Lifetime	10 000+ hours

(a) Coolant pump excluded
(b) Coolant pump and air delivery excluded



HyPM-HD 90 Features:

- Liquid-cooled advanced MEA PEM stack
- Integral Balance of Plant
- Advanced onboard controls and diagnostics
- Low pressure cathode air delivery
- -40°C sub-zero shutdown capability
- Rapid start-up and dynamic response
- Unlimited start-stop cycling
- Robust, rugged and reliable
- No water for humidification required
- No nitrogen required for shutdown
- Designed for ease of UL and CE system certifications

Hydrogenics Corporation
220 Admiral Boulevard
Mississauga, Ontario
Canada L5T 2N6
Phone: 905.361.3660
Fax: 905.361.3626
powersales@hydrogenics.com

Hydrogenics GmbH
Power Systems
Am Wiesenbusch 2, Halle 5
45966 Gladbeck, Germany
Phone: +49.2043.944.133
Fax: +49.2043.944.146

Hydrogenics USA
Power Systems
12707 High Bluff Dr., Suite 200
San Diego, CA 92130 USA
tel: +1.858.794.1473
fax: +1.905.361.3626
hydrogensales@hydrogenics.com

HyPM-HD Power Modules 12-2016

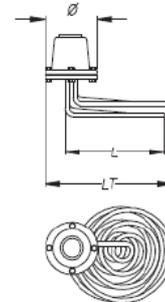
† Actual delivered product may differ in appearance. Specifications subject to change without prior notification. Mechanical and electrical interface diagrams available on request. Contact us to find out more or request a quote. © Hydrogenics Corporation 12-2016

We're ready.
www.hydrogenics.com

Resistencia de precalentamiento

**2.3 RESISTENCIAS DE INMERSIÓN PARA FUEL-OIL PARA FONDO DE TANQUE
(con caperuza de acero fundido y tubo de inox)**

TIPO TF Ref.	W	W totales	V	W/cm ²	∅ Caja	LT mm	Rosca
15-O	1000	1000	230	3,59	85	150	½ "
14-O	2x1000	2000	230	3,59	85	170	½ "
185-O	3x1000	3000	230/400	3,59	135	240	½ "
368-O	3x2000	6000	230/400	4,57	135	240	½ "



Compresores

Celeroton CT-14-1000

CT-14-1000



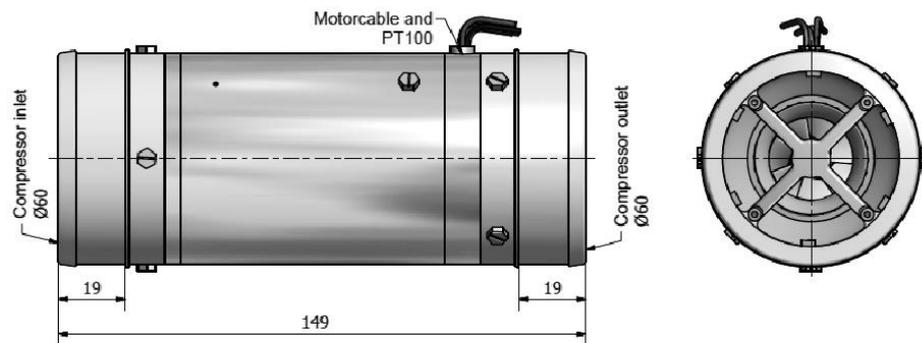
Highly compact, high-speed, electrically driven diagonal turbo compressor for the circulation and compression of various gases and refrigerants.

- Lowest ratio of volume and weight versus pressure and mass flow due to highest speeds
- Aerodynamic and electromagnetic optimization for highest total efficiency
- High-speed ball bearings with permanent lubrication
- Compatible to converter CC-230-3500 or CC-100-1000
- Integrated temperature measurement for overload



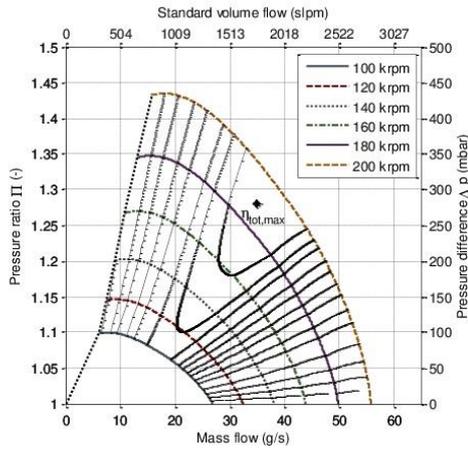
Specifications turbo compressor	
Maximum pressure ratio	1.43
Maximum mass flow	55 g/s
Maximum overall efficiency η_{tot}	66 %
Rated power	1,000 W
Rated speed	200,000 rpm
Weight	700 g

Drawing (in mm)

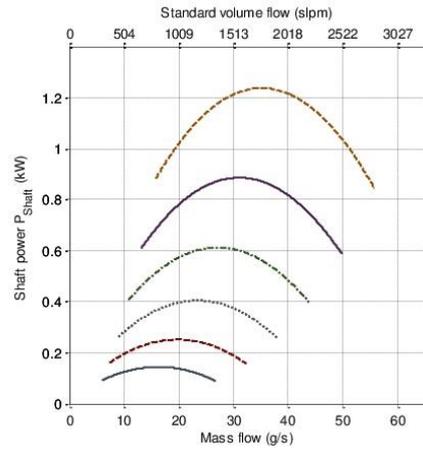


Compressor maps: overpressure operation

Pressure ratio versus mass flow



compressor input power versus mass flow

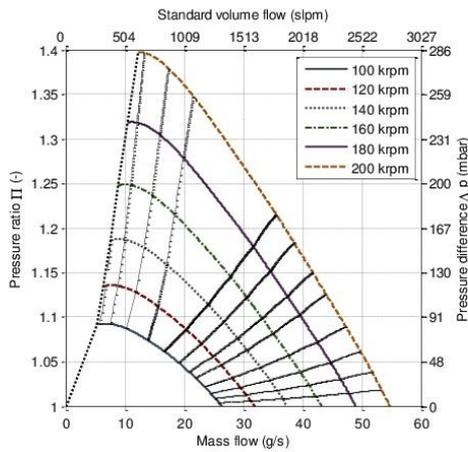


The specifications and compressor maps in this datasheet for overpressure operation refer to air (ISO 8778) at the inlet: temperature: $T = 293.15 K = 20^\circ C$, pressure: $p_{in} = 1 bar$.

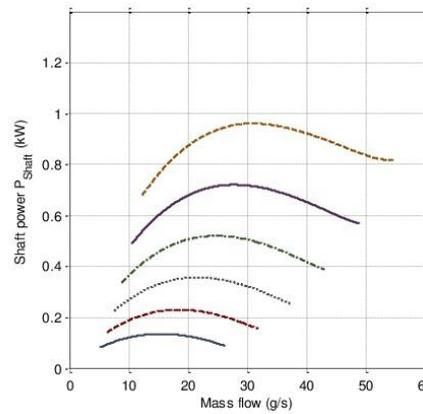
For technical details and further information please refer to the user's manual.

Compressor maps: vacuum operation

Pressure ratio versus mass flow

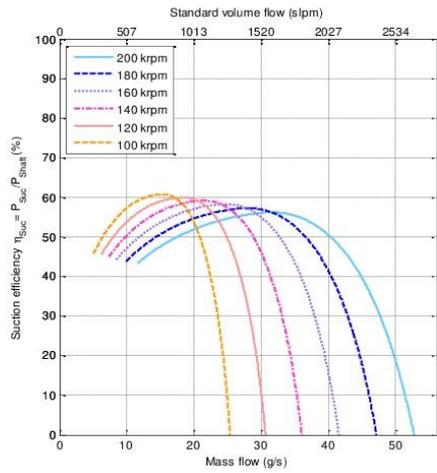


compressor input power versus mass flow

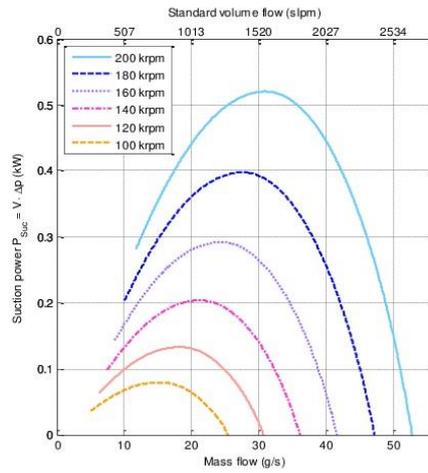


Compressor maps: vacuum operation

Suction efficiency versus mass flow



Suction power versus mass flow



Order codes: CT-14-1000.Bxx.Wxx

Bearing options Gxx

- B00 Standard ball bearing
- B01 Vacuum ball bearing
- B99 Custom specific ball bearing (inlet conditions and / or gas, etc.)

Winding options Wxx

- W01 Standard winding for converter CC-230-3500
- W02 Winding for converter CC-100-1000 (limited performance)

$\eta_{tot} = \eta_{is} * \eta_m$: isentropic overall efficiency
 η_{is} : isentropic compressor efficiency
 η_m : motor efficiency

Celeroton AG

Industriestrasse 22
 CH-8604 Volketswil

Tel.: +41 44 250 52 20
 Fax: +41 44 250 52 29

info@celeroton.com
 www.celeroton.com

© Celeroton AG. All rights reserved.

Celeroton CT-17-700

CT-17-700



Highly compact, high-speed, electrically driven radial turbo compressor for the circulation and compression of various gases and refrigerants.

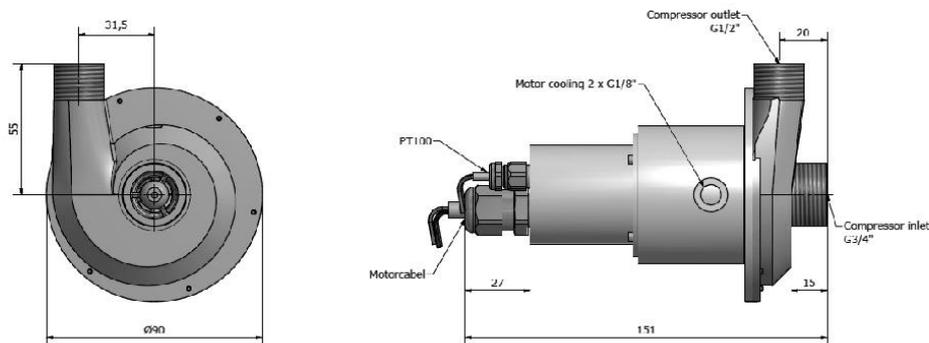
- Lowest ratio of volume and weight versus pressure and mass flow due to highest speeds
- Aerodynamic and electromagnetic optimization for highest total efficiency
- High-speed ball bearings, permanent lubrication
- Compatible to converters CC-230-3500 or CC-100-1000
- Integrated temperature measurement for overload protection



Specifications turbo compressor

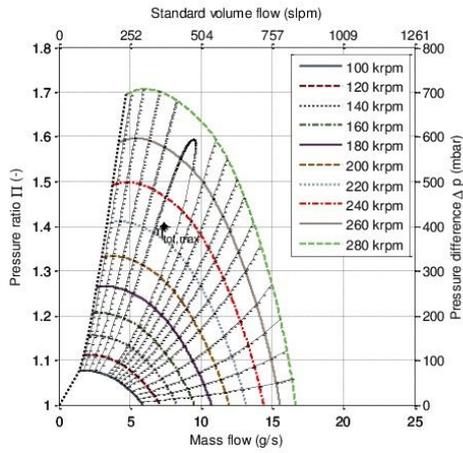
Maximum pressure ratio	1.7
Maximum mass flow	16 g/s
Isentropic overall efficiency η_{tot}	63 %
Rated power	700 W
Rated speed	280,000 rpm
Weight	600 g

Drawing (in mm)

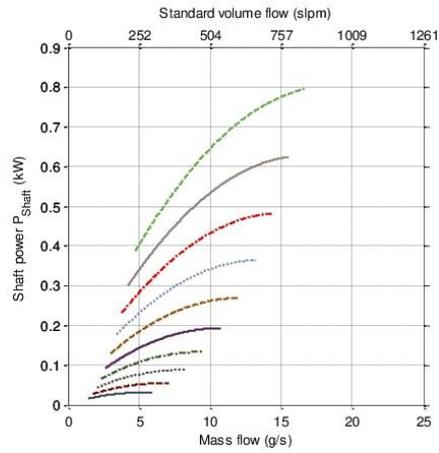


Compressor maps: overpressure operation

Pressure ratio versus mass flow



Compressor input power versus mass flow

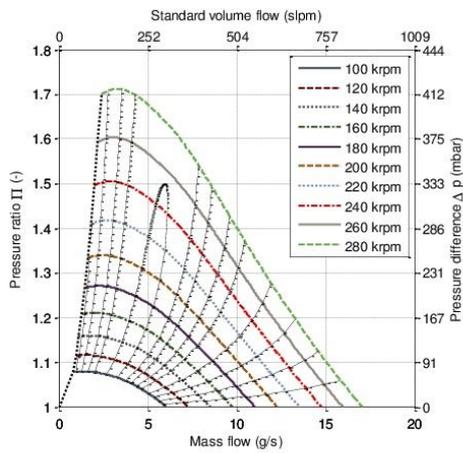


The specifications and compressor maps in this datasheet for overpressure operation refer to air (ISO 8778) at the inlet: temperature: $T = 293.15 \text{ K} = 20^\circ \text{ C}$, pressure: $p_{in} = 1 \text{ bar}$.

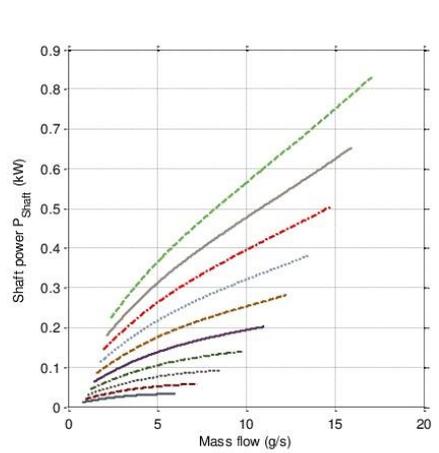
For technical details and further information please refer to the user's manual.

Compressor maps: vacuum operation

Pressure ratio versus mass flow



Compressor input power versus mass flow



Order codes: CT-17-700.Bxx.Wxx

Bearing options Bxx

B00	Standard ball bearing
B01	Vacuum ball bearing
B99	Custom specific ball bearing (inlet conditions and / or gas, etc.)

Winding options Wxx

W01	Standard winding for converter CC-230-3500
W04	Winding for converter CC-100-1000

$\eta_{tot} = \eta_{is} * \eta_m$: isentropic overall efficiency
 η_{is} : isentropic compressor efficiency
 η_m : motor efficiency

Celeroton AG

Industriestrasse 22
CH-8604 Volketswil

Tel.: +41 44 250 52 20
Fax: +41 44 250 52 29

info@celeroton.com
www.celeroton.com

© Celeroton AG. All rights reserved.

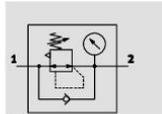
Válvula reguladora de presión

Reguladores de presión MS4/MS6-LR, serie MS

FESTO

Hoja de datos

Con manómetro



- Caudal
1000 ... 7500 l/min
 - Temperatura
-10 ... +60 °C
 - Presión de funcionamiento
0,8 ... 20 bar
 - www.festo.com
- Juegos de piezas de repuesto
→ 19



Una válvula reguladora de presión (lado secundario) mantiene el aire de control a niveles casi constantes, independientemente de las oscilaciones de presión que sufra la red (lado primario) a raíz del consumo de aire.

- Buenas características de regulación con histéresis pequeña y compensación de presión primaria
- Gran caudal con poca caída de presión
- Suministrable con y sin escape secundario
- Seguridad contra accionamiento involuntario, para asegurar los valores de ajuste
- Cuatro márgenes de regulación de la presión: 0,3 ... 4 bar, 0,3 ... 7 bar, 0,5 ... 12 bar y 0,5 ... 16 bar
- Dos conexiones para manómetros para una instalación más versátil
- Opción integrada de flujo inverso para escape de salida 2 a salida 1
- Sensor de presión opcional
- Manómetro opcional con botón giratorio
- Variante opcional EX4 para el uso en zonas 1, 2, 21 y 22 con peligro de explosión

Datos técnicos generales		
Tamaño	MS4	MS6
Conexión neumática 1, 2		
Rosca interior	G $\frac{1}{8}$ o G $\frac{1}{4}$	G $\frac{1}{4}$, G $\frac{3}{8}$ o G $\frac{1}{2}$
Placa base AG...	G $\frac{1}{8}$, G $\frac{1}{4}$ o G $\frac{3}{8}$	G $\frac{1}{4}$, G $\frac{3}{8}$, G $\frac{1}{2}$ o G $\frac{3}{4}$
Placa base AQ...	NPT $\frac{1}{8}$, NPT $\frac{1}{4}$ o NPT $\frac{3}{8}$	NPT $\frac{1}{4}$, NPT $\frac{3}{8}$, NPT $\frac{1}{2}$ o NPT $\frac{3}{4}$
Construcción	Regulador de membrana, de accionamiento directo	
Función de regulación	Presión de salida constante, con compensación de la presión de entrada, con flujo inverso, con/sin descarga secundaria	
Tipo de fijación	Con accesorios Montaje en línea Montaje en panel frontal	
Posición de montaje	Indistinta	
Seguridad contra accionamiento involuntario	Botón giratorio con enclavamiento Botón giratorio con enclavamiento, para cerrar con candado (accesorio) Botón giratorio con cerradura integrada	
Margen de regulación de la presión/ accionamiento	D5 [bar] 0,3 ... 4, accionamiento manual ¹⁾ D6 [bar] 0,3 ... 7, accionamiento manual ¹⁾ D7 [bar] 0,5 ... 12, accionamiento manual (0,5 ... 10 con sensor de presión AD... o con certificación UL) ¹⁾ D8 [bar] -	0,5 ... 16, accionamiento manual (0,5 ... 10 con certificación UL)
Histéresis máxima de la presión	[bar] 0,25 (0,4 con manómetro con botón giratorio DM1/DM2)	0,25 (0,4 con manómetro con botón giratorio DM2)
Indicación de presión	Con sensor de presión para la indicación de la presión mediante LCD, con salida eléctrica Con sensor de presión para la indicación de la presión de salida y con salida eléctrica Con manómetro para la indicación de la presión de salida Con manómetro de escala con zonas verde y roja, para la indicación de la presión de salida Con manómetro con botón giratorio para la indicación de la presión de salida G $\frac{1}{8}$ en preparación - G $\frac{1}{4}$ en preparación -	

1) MS4: En el caso de válvulas reguladoras con manómetro de botón giratorio DM..., el margen de regulación empieza en 0,8 bar.
† Importante: Este producto cumple con los estándares ISO 1179-1 e ISO 228-1

Reguladores de presión MS4/MS6-LR, serie MS



Hoja de datos

Caudal nominal normal $q_{nN}^{1)}$ [l/min]						
Tamaño		MS4		MS6		
Conexión neumática		G $\frac{1}{8}$	G $\frac{1}{4}$	G $\frac{1}{4}$	G $\frac{3}{8}$	G $\frac{1}{2}$
Margen de regulación de la presión	D5	1200 ²⁾	2100 ²⁾	2400 ²⁾	5500 ²⁾	7500 ²⁾
	D6	1150	1800	3000	5800	6500
	D7	1000	1700 ³⁾	2700	4500	5500
	D8	–	–	2200	4000	4500

- 1) Medición con $p_1 = 10$ bar y $p_2 = 6$ bar y $\Delta p = 1$ bar
- 2) Medición con $p_1 = 10$ bar y $p_2 = 3$ bar y $\Delta p = 1$ bar
- 3) Utilizando un manómetro con botón giratorio DM1/DM2, $q_{nN} = 800$ l/min, $q_{n,max} = 2200$ l/min

Condiciones de funcionamiento y del entorno			
Tamaño		MS4	MS6
Presión de funcionamiento	[bar]	0,8 ... 14 (0,8 ... 10) ¹⁾	0,8 ... 20 (0,8 ... 10) ¹⁾
Fluido de trabajo		Aire comprimido según ISO 8573-1:2010 [7:4:4] Gases inertes	
Nota sobre el fluido de trabajo/mando		Es posible el funcionamiento con aire comprimido lubricado (lo cual requiere seguir utilizando aire lubricado)	
Temperatura ambiente	[°C]	–10 ... +60 (0 ... +50) ²⁾	
Temperatura del fluido	[°C]	–10 ... +60 (0 ... +50) ²⁾	
Temperatura de almacenamiento	[°C]	–10 ... +60	
Clase de resistencia a la corrosión ³⁾		2	
Certificación UL		c UL us - Recognized (OL)	

- 1) El valor entre paréntesis es válido para MS4/MS6-LR con certificación UL.
- 2) El valor entre paréntesis es válido para MS4/MS6-LR con sensor de presión AD... .
- 3) Clase de resistencia a la corrosión CRC 2 según norma de Festo FN 940070
Componentes con moderado riesgo de corrosión. Aplicación en interiores en caso de condensación. Piezas exteriores visibles con características esencialmente decorativas en la superficie que están en contacto directo con atmósferas habituales en entornos industriales.

ATEX	
Certificación UE	EX4
ATEX, categoría gas	II 2G
Ex-protección contra encendido gas	c T6 X
ATEX, categoría polvo	II 2D
EX-protección contra encendido polvo	c 60 °C X
ATEX, temperatura ambiente	–10 °C ≤ Ta ≤ +60 °C
Símbolo CE (consultar declaración de conformidad)	Según directiva de protección contra explosiones de la UE (ATEX)

Pesos [g]		
Tamaño	MS4	MS6
Regulador de presión	225	730
Válvula reguladora de presión, con botón giratorio con cerradura incorporada E11	350	1000

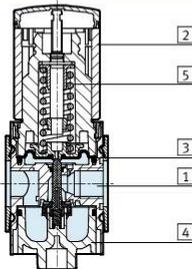
Reguladores de presión MS4/MS6-LR, serie MS



Hoja de datos

Materiales

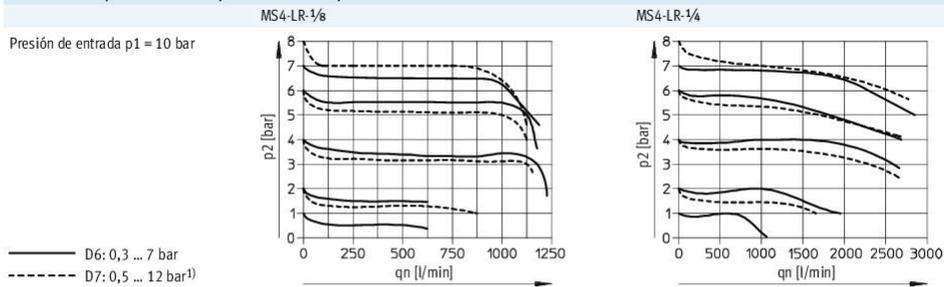
Vista en sección



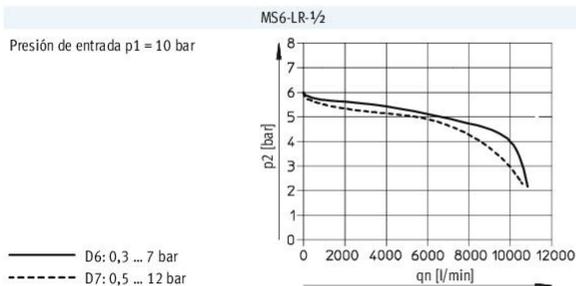
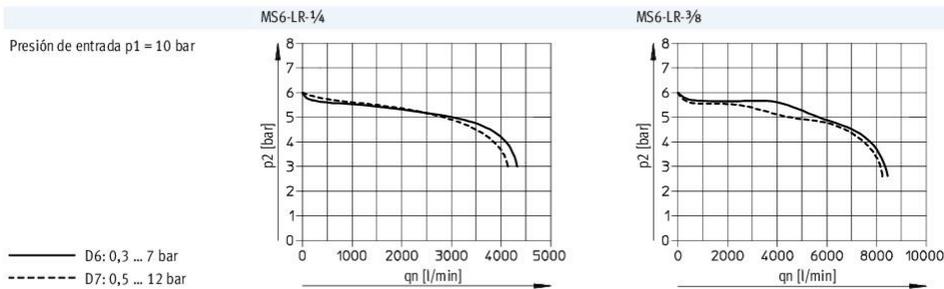
Regulador de presión

1	Cuerpo	Fundición inyectada de aluminio
2	Botón giratorio	PA / POM
	Botón giratorio con cerradura integrada E11	Aluminio
3	Membrana	NBR
4	Tapa en la parte inferior	PET
5	Muelle	Acero
-	Juntas	NBR
Características del material		Conformidad con RoHS
		Sin cobre ni PTFE sólo con cierre VS

Caudal normal q_n en función de la presión secundaria p_2



1) En la línea característica de la variante DM1/DM2, la caída inicial de presión es mayor.



2015/12 – Reservado el derecho de modificación

→ Internet: www.festo.com/catalogue/...

13

Reguladores de presión MS4/MS6-LR, serie MS

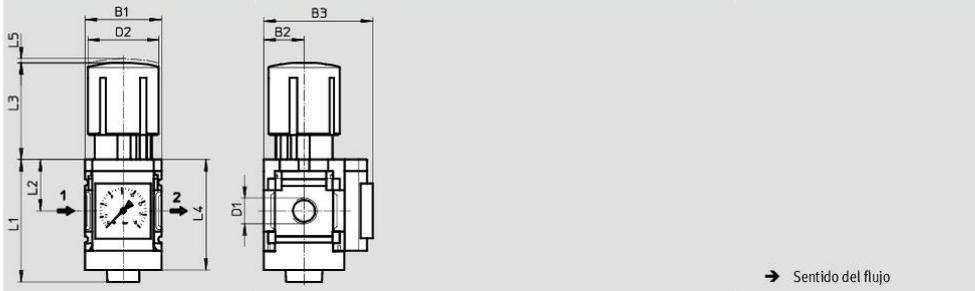


Hoja de datos

Dimensiones: estándar

Datos CAD disponibles en www.festo.com

Con manómetro integrado, unidad de indicación [bar], botón giratorio estándar con enclavamiento



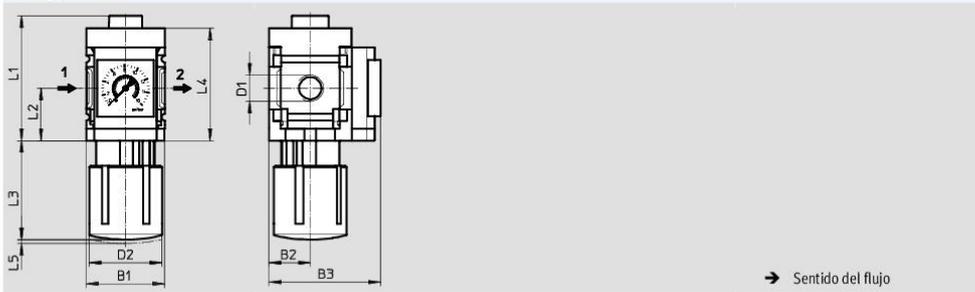
Tipo	B1	B2	B3		D1	D2	L1	L2	L3	L4	L5
			Manómetro								
			Escala estándar	Escala de color rojo y verde							
MS4-LR-1/8	40	21	57	58,5	G1/8	37,2	64,4	27	51,1	58,5	2
MS4-LR-1/4					G1/4						
MS6-LR-1/4	62	31	77	78,5	G1/4	51,2	94	39	86	85	5
MS6-LR-3/8					G3/8						
MS6-LR-1/2					G1/2						

† Importante: Este producto cumple con los estándares ISO 1179-1 e ISO 228-1

Dimensiones: posición alternativa de montaje

Datos CAD disponibles en www.festo.com

Botón giratorio KD



Tipo	B1	B2	B3	D1	D2	L1	L2	L3	L4	L5
MS4-LR-1/8-...-KD	40	21	57	G1/8	37,2	64,4	27	51,1	58,5	2
MS4-LR-1/4-...-KD				G1/4						
MS6-LR-1/4-...-KD	62	31	77	G1/4	51,2	94	39	86	85	5
MS6-LR-3/8-...-KD				G3/8						
MS6-LR-1/2-...-KD				G1/2						

† Importante: Este producto cumple con los estándares ISO 1179-1 e ISO 228-1

Presostato

EPN-S 8320

PRESOSTATO ELECTRÓNICO

La empresa Suiza Trafag, es un proveedor internacional líder de sensores e instrumentación de alta calidad para la monitorización y medición de presión y temperatura. El presostato electrónico EPN-S se basa en la familia de transmisores EPN de eficacia probada. Como garantía de precisión y fiabilidad, abarca un amplio rango de temperaturas y una excelente estabilidad duradera incluso en los entornos más exigentes como aplicaciones para construcción naval y ferroviaria. El punto de conmutación está preconfigurado de fábrica o puede programarse in situ mediante el Trafag Sensor Communicator.



Aplicaciones

- Construcción naval
- Construcción de motores
- Vehículos ferroviarios
- Construcción de maquinaria
- Oleohidráulica
- HVAC

Ventajas

- Construcción robusta para condiciones difíciles
- Amplio rango de temperatura
- Excelente estabilidad duradera
- Diseño muy compacto
- Punto de conmutación configurado de fábrica o programable in situ con Trafag Sensor Communicator SC

12/2017

Hoja de datos H72333g

Datos técnicos			
Principio de medición	Capa fina de acero	Temperatura del medio	-40°C ... +125°C
Rango de medición	0 ... 2.5 a 0 ... 600 bar 0 ... 30 a 0 ... 7500 psi	Temperatura ambiente	Estándar: -25°C ... +85°C Opcional accesorio 67: -40°C ... +125°C
Señal de salida	Transistor (open source)	Homologación / Conformidad	DNV-GL
Precisión @ 25°C típ.	± 0.5 % FS típ. (punto de conmutación)		

Sujeto a modificaciones

Trafag sensors & controls
Switzerland

Industriestrasse 11
8608 Bubikon

Tel. +41 44 922 32 32
Fax +41 44 922 32 33

www.trafag.com
trafag@trafag.com

trafag
sensors  controls

Información de pedido / código de tipo

				8320 . XX XX XX XX XX XX								
Rango de medición ¹⁾	Rango de presión [bar]	Sobre-presión [bar]	Presión de rotura [bar]	Rango de presión [psi]	Sobre-presión [psi]	Presión de rotura [psi]						
		0 ... 2.5	5	100	75	0 ... 30	30	720	G5			
	0 ... 4	8	100	76	0 ... 50	115	860	G6				
	0 ... 6	12	100	77	0 ... 100	170	1450	G7				
	0 ... 10	20	200	78	0 ... 150	290	2900	G8				
	0 ... 16	32	200	79	0 ... 250	464	2900	G9				
	0 ... 25	50	300	80	0 ... 400	725	4350	H0				
	0 ... 40	80	300	81	0 ... 500	1160	4350	H1				
	0 ... 60	120	500	82	0 ... 1000	1740	5800	H2				
	0 ... 100	200	500	83	0 ... 1500	2900	7250	H3				
	0 ... 160	320	1000	85	0 ... 2000	4640	10850	H5				
	0 ... 250	500	1000	74	0 ... 3000	7250	14500	G4				
	0 ... 400	800	1500	84	0 ... 5000	11600	21750	H4				
	0 ... 600	1000	2000	86	0 ... 7500	14500	29000	H6				
Sensor	Presión relativa											23
Conexión de presión	G1/4" macho (Junta)											17
	1/4" NPT macho											30
	G1/2" macho (DIN3852-A) ²⁾											21
	M14x1.5 macho (DIN3852-A) ²⁾											22
	1/2" NPT macho ²⁾											51
Conexión eléctrica	Conector eléctrico macho: EN 175301-803-A (DIN43650-A)											04
	Cable apantallado: Material: FDR 25 (Raychem), 4 x 0.5 mm ² , -40°C ... +125°C, (longitud de cable ver "Accesorios")											78
	Cable apantallado: Material: Radox Tenuis-TW 600V MM S (EN45545), 4 x 0.5mm ² , -40°C ... +120°C, (longitud de cable ver "Accesorios")											88
Señal de salida	1 Transistor out: punto de conmutación "ON": ... (bar); punto de conmutación "OFF": ... (bar); tiempo de retardo: estándar 5 (ms), ... (ms) rango: 5...10000 (ms)											T1
Accesorios	Amortiguación de picos de presión ø 0.4 mm											44
	Amortiguación de picos de presión ø 1.0 mm											40
	Conector hembra EN 175301-803-A (DIN43650-A)/NBR, -40°C ... +90°C											58
	Versión ferroviaria (500 VAC/DC), solo con cable apantallado											11
	Temperatura de funcionamiento elevada: -40 °C... +125 °C											67
	Longitud de cable 1.5 m											1M
	Longitud de cable 3.0 m											3M
Longitud de cable 5.0 m											5M	

¹⁾ Rangos de presión especiales, según especificaciones del cliente, bajo pedido

²⁾ Bajo pedido

i Aparato de programación Sensor Communicator SC

N.º pedido

- Sensor Communicator SC: F88030
- Cable de programación con conector EN 175301-803A: F88049

Instrucciones:

- Sensor Communicator SC: www.trafag.com/H73699 (EN) y www.trafag.com/H73698 (DE)



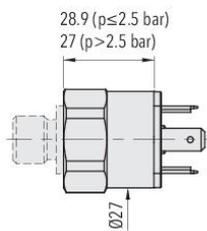
EPN-S 8320

Especificaciones		
Precisión	Precisión @ 25°C típ.	± 0.5 % FS típ. (punto de conmutación)
	Dependencia de temperatura punto de conmutación	Punto de conmutación @ +25°C: ± 0.5 % FS típ. Punto de conmutación @ -25°C ... +85°C: ± 1.0 % FS típ. Punto de conmutación @ -40°C ... +125°C: ± 1.3 % FS típ. (accesorio 67: temperatura de funcionamiento elevada -40°C ... +125°C)
	Estabilidad duradera 1 año típ.	≤ ± 0.15 % FS típ.
Datos eléctricos	Tensión de alimentación	24 (9 ... 32) VDC
	Resistencia de aislamiento	>10 MΩ, 250 VDC ☞ >10 MΩ, 500 VDC
	Rigidez dieléctrica	250 VAC, 50 Hz ☞ 500 VAC, 50 Hz
	Señal de salida / tensión de supply	Transistor (open source): 24 (9 ... 32) VDC
	Protección contra inversión de polaridad, resistencia a cortocircuito @ 25°C durante 5 min.	integrado
	Toma de corriente	≤ 15 mA
Condiciones ambientales	Temperatura del medio	-40°C ... +125°C
	Temperatura ambiente	Estándar: -25°C ... +85°C Opcional accesorio 67: -40°C ... +125°C
	Tipo de protección	Conexión eléctrica 04: IP65 (IP67) Conexión eléctrica 78/88: IP69K
	Humedad	Máx. 95 % relativa
	Vibración	15 g (50...2000 Hz)
	Choque	50 g / 11 ms
Protección CEM	Emisión	EN/IEC 61000-6-3
	Inmunidad	EN/IEC 61000-6-2
Datos mecánicos	Sensor (en contacto con los medios)	1.4542 (AISI630)
	Conexión de presión (en contacto con los medios)	Rangos de presión ≤ 250 bar: 1.4542 (AISI630) Rangos de presión > 250 bar: 1.4301 (AISI304)
	Caja	1.4301 (AISI304)
	Junta	FKM 70 Sh
	Conector eléctrico macho	Ver información de pedido
	Peso	~ 85 ... 110 g
	Par de apriete	25 Nm

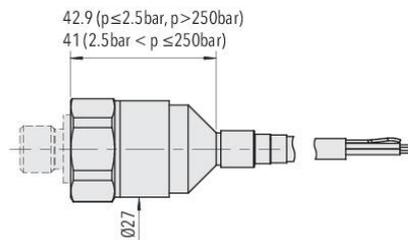
EPN-S 8320

Salida de conmutación	
Señal de salida	1 Transistor (open source)
Ajuste del punto de conmutación	Punto de conmutación configurado de fábrica o programable in situ con Trafag Sensor Communicator SC
Rango de ajuste	0 ... 100 % FS
Histéresis de conmutación	≥ 1 % FS
Corriente de conmutación	≤ 0.5 A @ -40°C ... +85°C ≤ 0.4 A @ +85°C ... +125°C (solo con accesorio 67: temperatura de funcionamiento elevada -40°C ... +125°C)
Resistencia de conmutación	≤ 3Ω
Tiempo de retardo	Ajuste estándar: 5 ms ajustable con Trafag Sensor Communicator (y conexión eléctrica 04): 5 ms ... 10 s

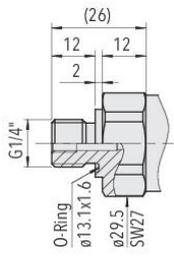
Dimensiones



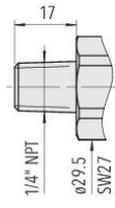
8320.XX.XXXX.04.XX.XX
Punto de conmutación configurado de fábrica o programable in situ con Trafag Sensor Communicator SC



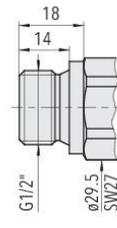
8320.XX.XXXX.78.XX.XX Punto de conmutación configurado de fábrica
8320.XX.XXXX.88.XX.XX



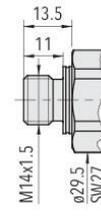
8320.XX.XX17.XX.XX.XX



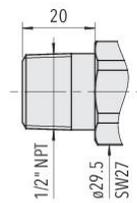
8320.XX.XX30.XX.XX.XX



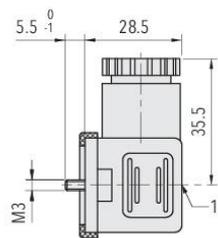
8320.XX.XX21.XX.XX.XX



8320.XX.XX22.XX.XX.XX



8320.XX.XX51.XX.XX.XX



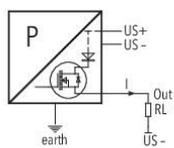
1) Tightening torque 50...60Ncm

8320.XX.XXXX.XX.XX.58

Conexión eléctrica

		Tipo de protección / conexión eléctrica	
		IP65 (IP67)	IP69K
<p>Señal de salida</p> <p>8320.XX.XXXX.XX.T1</p>		<p>Estándar industrial EN175301-803A</p> <p>04</p>	<p>Cable **)</p> <p>78/88</p> <p>Apantallamiento</p>
		<p>1</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>⊕</p>	<p>marrón</p> <p>azul</p> <p>negro</p> <p>amarillo / verde</p>

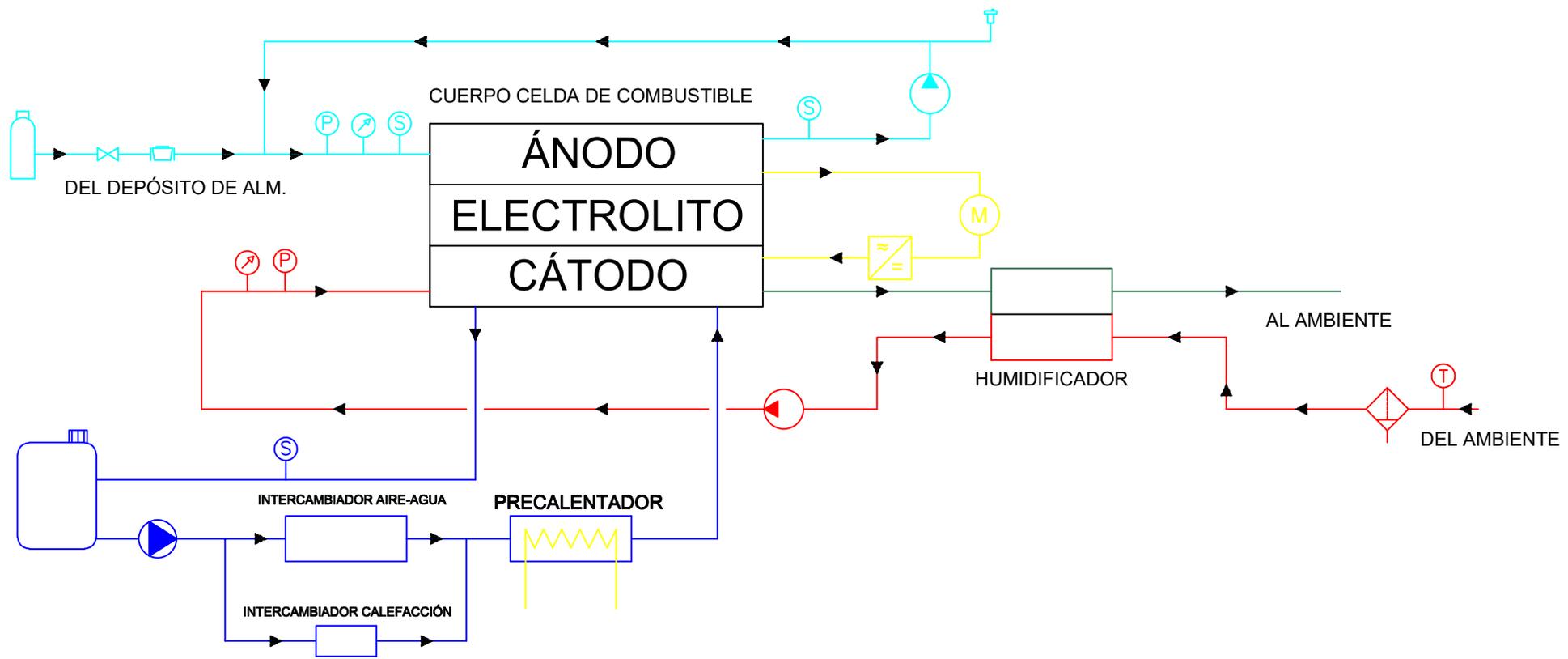
**): Ventilación a través del extremo de cable



Conexión de cargas a los contactos de conmutación

Información ampliada		
Documentos	Hoja de datos	www.trafag.com/H72333
	Manual de instrucciones	www.trafag.com/H73333
	Flyer	www.trafag.com/H70652

Anexo 5- Planos



LEYENDA

	BOMBA HIDRÁULICA		FILTRO DE AIRE CON PURGA
	COMPRESOR		CONVERSOR C.C. A C.A.
	VÁLVULA DE CORTE		MOTOR ELÉCTRICO
	TERMÓMETRO		VALV. REG. DE PRESIÓN
	SONDA DE TEMPERATURA		MANÓMETRO
	PURGA		

- CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE
- CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN DE AIRE
- CIRCUITO DE REFRIGERACIÓN
- CIRCUITO DE SALIDA
- CIRCUITO DE ELÉCTRICO

	ESCUELA DE ING. INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE VALLADOLID	
	PROYECTO: Diseño de una pila de hidrógeno para su aplicación en automoción	
PLANO: Esquema general instalación P. Combustible	MOD: FECHA: 01/07/2016	ESCALA: S/E FORMATO: A4