

5 Estado del Arte y Transductores Comerciales

Este estudio se centrará en aquellos transductores de uso y aplicación para un Sistema de Pila de Combustible mencionados en la Tabla 8. Estudiando las diferencias que presentan entre cada uno de ellos y la relevancia de su utilidad en función de la potencia del SPC², así como la aplicabilidad según su rango de medida, precio, etc.

Se deberán tener en cuenta factores importantes para la tecnología de hidrógeno como son volumen y peso, que la hagan competitiva con las alternativas actuales. Estos factores afectan tanto a la tecnología propia del hidrógeno, como a su BoP, dado que este Proyecto se centra en el estudio de instrumentación, estos requisitos deberán ser tenidos en cuenta en su elección.

Los elementos estudiados en este Apartado son los más representativos por diferentes motivos; no se han incluido todos los estudiados por no aportar más información relevante a la actual y hacer demasiado extenso el documento. Para ver las características suministradas por los fabricantes, tanto de estos transductores como de algunos estudiados y no incluidos en este Apartado remítase al “Anexo I: Características Técnicas del Fabricante”.

A la hora de seleccionar cualquier sensor se deberá tener en cuenta que el precio es un factor importante a tener en cuenta, pero debido a la complejidad que plantea trabajar con un gas como el hidrógeno, la complejidad añadida de encontrar fabricantes que suministren equipos específicos para este gas, y que es una tecnología nueva y cara que se está desarrollando, no es el factor clave que incite a seleccionar un sensor en vez de otro.

5.1 Sensor de Presión

Los rangos de trabajo para un sensor de presión aplicado a un SPC, suelen ser del orden de la presión atmosférica; por regla general, estos sistemas no sobrepasan el bar de sobre-presión, por lo que los sensores deben ser muy precisos con un rango de trabajo de entre 0 y 1 bar.

La presión de trabajo de los stack está íntimamente relacionada con la potencia nominal del stack, así como con el fabricante. El stack está constituido por unas MEA's con una

² Para definir un SPC lo más general posible se ha optado por elegir un conjunto representativo de stacks, cuyas especificaciones suministradas por el fabricante se pueden encontrar en el Anexo II: Especificaciones de los SPC.

determinada forma y dimensiones definidas por el fabricante y la potencia que suministran. Estas MEA's son atravesadas por el hidrógeno y el aire necesario para que se produzca la reacción para obtener energía eléctrica. Los flujos que atraviesan dichas MEA's deben de tener unas condiciones de presión lo suficientemente altas para que el flujo atraviese todas las membranas que forman el stack, y lo suficientemente pequeños para que en el paso a través de las membranas de tiempo a que se produzca la reacción. Hay que llegar a una solución de compromiso, puesto que si la presión es demasiado alta puede que se rompan las membranas, y si es demasiado baja, puede que no se produzca la reacción.

Los fabricantes recomiendan una presión de operación para su stack (Tabla 8), pero la práctica demuestra que el stack, puede soportar un rango de presiones variado. Así pues, en las Figura 80 y Figura 81, se puede observar las variaciones de presión para los dos stack de la Figura 77, pertenecientes a dos fabricantes distintos.

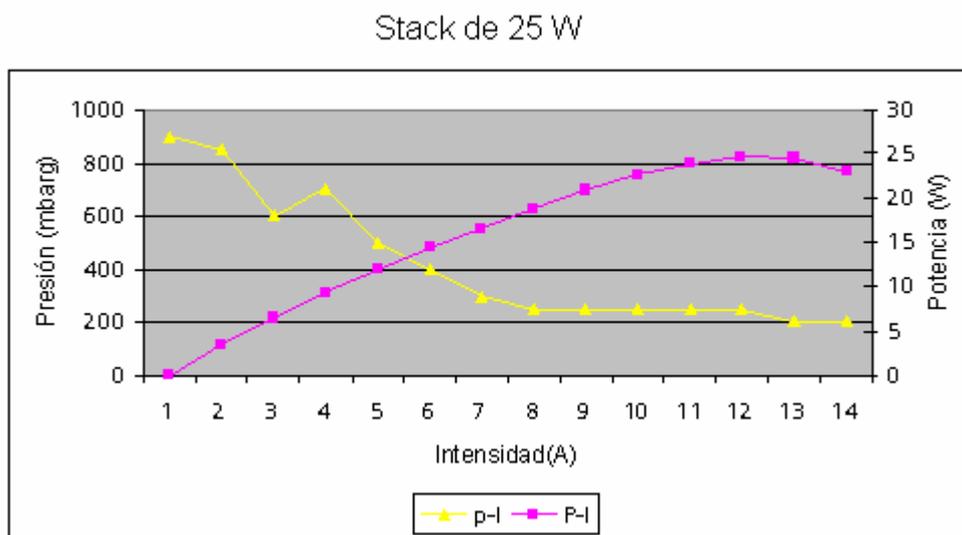


Figura 80.- Curva del rango de presión de trabajo para un stack de 25 W

En la curva de la Figura 80, se representa la presión de entrada de hidrógeno en el ánodo frente a la intensidad, y se puede observar que el rango de presiones del stack varía entre 200 y 900 mbarg. La presión del aire en el cátodo no ha sido tomada en cuenta, ya que el aire es introducido a través de unos ventiladores y el fabricante suministra la tensión a la que deben estar alimentados. La potencia con la que éstos funcionan está íntimamente ligada con la presión a la que se introduce el flujo de aire, pero debido a que éste es cogido y tirado al ambiente sin un previo ni post tratamiento, no se ha medido.

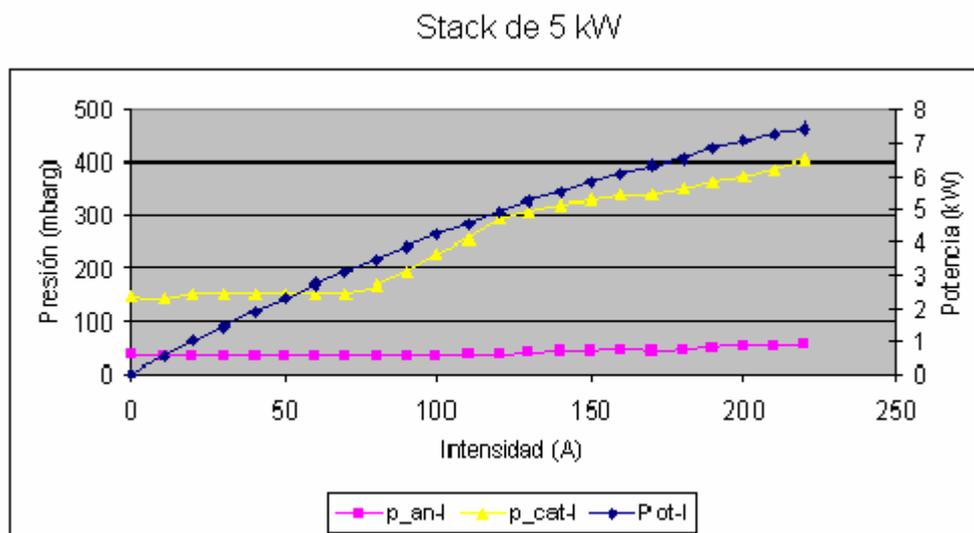


Figura 81.- Curva del rango de las presiones de trabajo para un stack de 5 kW

En este otro stack (Figura 81), sí se han realizado las medidas de la presión en el ánodo y en el cátodo. Ya que la forma de introducir el flujo de aire en este stack es a través de un compresor. Como se puede apreciar el rango de presiones en el ánodo está comprendido entre 30 y 60 mbar, mientras que en el cátodo está comprendido entre 150 y 450 mbar.

De ambas Figuras (Figura 80 y Figura 81), se puede deducir que para dos tipos muy distintos de pilas de combustible, de distintos fabricantes, caudales de operación, y potencia nominal, sus presiones de operación no sobrepasan 1 barg. Por lo que los transductores de presión que se muestran a continuación se mueven en este rango de presiones.

En los siguientes apartados se desarrollarán las características de algunos transductores comerciales, eligiendo aquellos que sean capaces de medir presiones comprendidas entre 0 y 1 barg. Se escogerán varios sensores de fabricantes distintos y se compararán unos con otros con lo que se obtendrán unas conclusiones.

El catálogo de los sensores expuestos en este apartado y otros que no se han incluido pueden verse en el Anexo I: Características Técnicas del Fabricante.

5.1.1 Sensor de presión: Bürkert

Este transductor es suministrado por Bürkert, que ofrece varios modelos para el mismo rango de medida (0 a 1 barg), como se puede ver en el Anexo I. Este sensor utiliza un principio de medida basado en la tecnología cerámica; por lo que Bürkert ofrece un sensor de presión tipo capacitivo mostrado en la Figura 82.

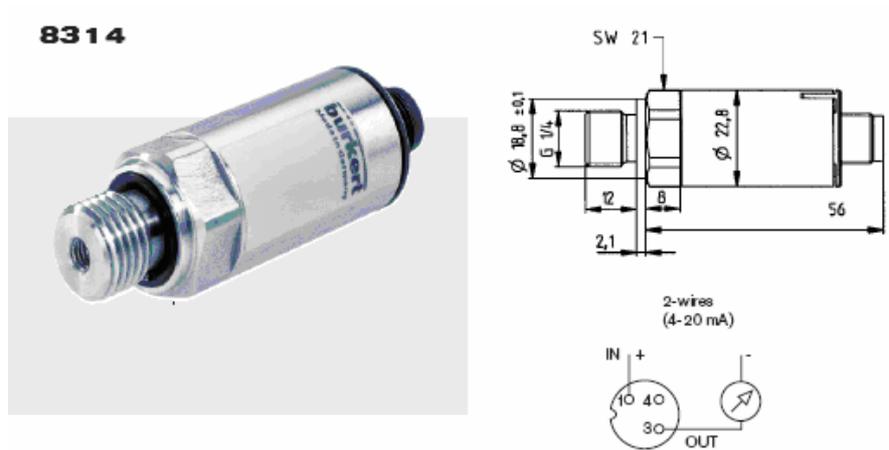


Figura 82.- Sensor de presión de Bürkert de 0 a 1 barg

Los datos técnicos suministrados por este fabricante vienen dados en la Tabla 9

Tipo de Transductor	Capacitivo; tecnología cerámica
Rango de Presión	0 a 1 barg
Conexión Eléctrica	M12 x 1 clavija
Medida	Presión Relativa
Tiempo de Respuesta	< 2 ms para medidas estáticas
Precisión	$\leq 0,3$ % FS (Fondo de Escala)
Material	Acero Inoxidable
Señal de salida	4 – 20 mA
Consumo	< 8 V; 0,02 A
Rango de Temperatura	-15 a 85 °C
Límite de presión	
Dimensiones	h = 70,1 mm; Φ = 18,8 mm
Peso	95 g
Precio	150 €

Tabla 9.- Datos técnicos del transductor modelo 8314 de Bürkert

Este sensor es válido para tomar medida estáticas, como es el caso que nos ocupa. Es capaz de medir valores comprendidos entre 0 y 1 bar, asociando dichas medidas a una salida eléctrica entre 0 y 10 V. Este sensor está capacitado para trabajar con hidrógeno y aire, ya que el material del que está fabricado es con acero inoxidable. Y tiene unas características físicas (volumen y peso) reducidas.

5.1.2 Sensor de presión: Instycal

En la Figura 83 se muestra el sensor de presión ofertado por Instycal; este sensor puede ser suministrado con dos o tres vías de salida. Debido a que el flujo a medir es hidrógeno interesará que sólo tenga dos vías, una de entrada y otra de salida, por lo que el conexionado eléctrico será como el mostrado en la Figura 84.

Este sensor es capaz de realizar medidas estáticas y dinámicas midiendo variaciones de la presión entre un rango de valores de 0 a 1 barg, al que asociará una señal de salida entre 0 y 10 V. Su rango de funcionamiento se encuentra entre 10 y 36 V en continua. La influencia de la temperatura en las medidas tomadas con este sensor vienen dadas por una variación de la medida de 0'2 %/10 K; el sensor tendrá un correcto funcionamiento entre 0 °C y 70 °C. Debido a que los SPC de alta potencia trabajan en un rango de temperatura cercanos a los 70 °C, se deberá tener en cuenta si la medida tomada por el sensor se ve afectada.

Este sensor está diseñado para aplicaciones hidráulicas y neumáticas, por lo que podrá ser usado en los tres flujos a medir, el de hidrógeno, el de aire, y el de agua desionizada.

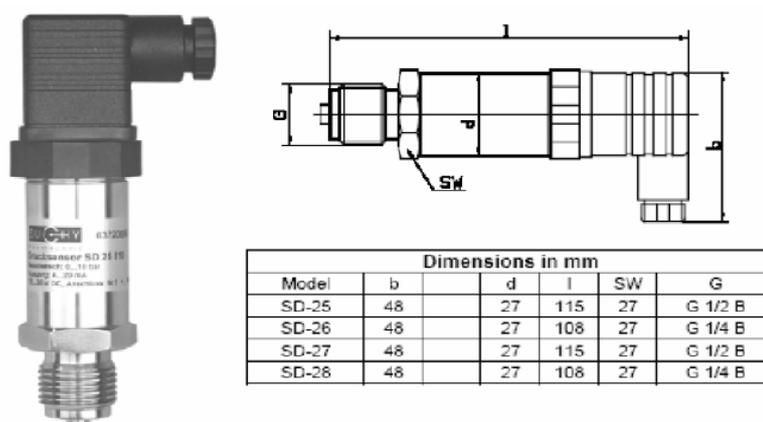


Figura 83.- Sensor de presión modelo SD-25 de Instycal

Tipo de Transductor	Capacitivo; tecnología cerámica
Rango de Presión	0 a 1 barg
Conexionado Eléctrico	Clavijas según DIN 43650
Medida	Presión Relativa
Tiempo de Respuesta	Estática y dinámica
Dimensiones	l = 108 mm; d = 27 mm; b = 48 mm
Peso	200 g
Precisión	0'5 % ó 1 %
Señal de salida	4 – 20 mA 0 – 10 V
Material	Acero inoxidable
Consumo	10 a 36 VDC
Rango de Temperatura	0 – 70 °C
Límite de presión	250 bar
Precio	135 €

Tabla 10.- Características técnicas sensor modelo SD-25 de Instycal

Two-wire system

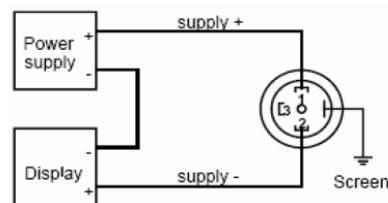


Figura 84.- Conexionado eléctrico del sensor de presión modelo SD-27 de Instycal

5.1.3 Conclusión

De la comparativa entre los sensores expuestos en este apartado así como los que aparecen en el Anexo I de este documento, se puede decir que debido al volumen y peso que aportan al SPC no se usarán sensores de presión para baja potencia (< 100 W).

Aunque sí se debe asegurar que los niveles de presión del flujo del ánodo estén dentro del rango de funcionamiento del stack (comprendidos entre los 200 mbarg y los 900 mbarg para el stack de 25 W de la Figura 80) para lo que se suele usar un regulador de presión neumático sin consumo eléctrico, como el mostrado en la Figura 85, cuyas características técnicas se han incluido en el Anexo III: Características Técnicas de Actuadores, que asegure que la presión a la entrada del SPC no sobrepase el máximo valor permitido.



Figura 85.- Regulador de presión manual entre 0 y 1 barg

La forma de proteger el stack frente a bajas presiones es detectando que la tensión del mismo no se mantiene estable y cae. Esto puede darse por dos motivos, el sistema de aporte de hidrógeno está agotándose por lo que no es capaz de suministrar el flujo necesario para la potencia demandada (Figura 92), lo que se traduce en que la presión a la entrada está por debajo del valor mínimo recomendado por el fabricante; la forma de actuar es desconectar la carga demandada. Y el otro motivo por el que la tensión del stack puede verse afectada aún poseyendo un aporte de combustible y comburente adecuado es porque alguna de las membranas del stack se hayan dañado, por lo que no se alcanzan los valores de tensión y potencia deseados.

Para SPC de media potencia, comprendidos entre los 100 W y los 1.000 W, se usarán sensores para medir la presión en las corrientes de entrada al ánodo y al cátodo, en caso de que el aire sea introducido mediante un compresor. La presión en el circuito de refrigeración no será medida, siempre que la refrigeración sea mediante ventilación forzada, tipología bastante frecuente en este rango de potencia. Por lo que se podrá usar cualquiera de los dos sensores expuestos con anterioridad.

El sensor ofrecido por Instycal presenta algunas ventajas frente al de Bürkert y es que permite tomar medidas dinámicas y estáticas además de su versatilidad en aplicaciones neumáticas e hidráulicas; frente a estas ventajas presenta otras desventajas como poseer un volumen y peso mayores que las que posee el sensor de Bürkert. Además este último sensor presenta una mayor precisión, 0'3 %, y un mayor rango de temperaturas en el que su medida no se ve afectada (Tabla 9 y Tabla 10). Para aplicaciones de baja y media

potencia este último factor no añade mayores prestaciones ya que sus temperaturas de trabajo son menores de 70 °C, pero para potencias elevadas la temperatura de trabajo se encuentra cercana a éste límite superior presentado por el sensor de Instygal. Por lo que se tiene una especial inclinación a usar el sensor ofrecido por Bürkert, dado su comportamiento frente a la temperatura, su peso y volumen.

5.2 Sensor de Temperatura

Para seleccionar los sensores de temperatura necesarios para el SPC, se requerirá conocer los rangos de temperatura en los que trabaja cada uno de los distintos flujos que interfieren en él (Figura 79); estos son, en el caso más genérico, flujo de aire, de hidrógeno, y el de agua del circuito de refrigeración. Dependiendo de la potencia del stack y del fabricante será necesario o no medir las temperaturas de todos estos flujos.

Como se puede apreciar en la Tabla 11, los stacks de menor potencia (menos de 100 W), operan en un rango de temperatura similar para las corrientes de hidrógeno y de aire, en torno a los 40 °C, no siendo necesario el circuito de agua de refrigeración hasta los 1.000 W de potencia; momento en el que el stack suele trabajar a unas temperaturas de operación en torno a los 65 ó 70 °C (Tabla 11).

En los stacks de baja potencia los flujos de hidrógeno y de aire suelen ser introducidos a temperatura ambiente (Figura 86). Al producirse la reacción química en el stack, se genera energía eléctrica y calor, lo que hace que aumente la temperatura de operación del stack (30 - 40 °C); es por ello que estos stack suelen llevar incorporados unos ventiladores que tienen una doble función, la de alimentar al stack del aire necesario para que se produzca la reacción y la de la refrigeración del mismo (no siendo necesaria la refrigeración mediante agua). Los stacks de baja potencia suelen ser empleados para aplicaciones portables en las que el tamaño y el peso son características muy importantes en el diseño de las mismas, es por ello que no se suelen introducir actuadores que alteren las temperaturas de los flujos a controlar, sino que se suele usar un termopar que avise de la temperatura máxima que es capaz de soportar el stack y una vez se alcanza dicha temperatura se actúa disminuyendo la carga solicitada.

Para los stack de potencia intermedia (entre 100 W y 1.000 W), se recomienda que el flujo de hidrógeno sea calentado, mientras que el de aire es introducido a temperatura ambiente a través de ventiladores, como se puede apreciar en la Figura 86. Las temperaturas de operación del stack están comprendidas entre 25 y 70 °C; al igual que en

los stack de baja potencia el rendimiento del stack está en torno al 50 %, por lo que además de energía eléctrica se genera calor. La refrigeración del stack, necesaria para trabajar dentro de su rango de operación, podrá ser realizada mediante ventiladores, con los que además se suele aportar el comburente, o mediante agua, dependiendo del fabricante y el diseño que haga en sus MEAs. Para trabajar con un SPC entre estos rangos de potencia se suelen emplear sensores termopares en la corriente de entrada al ánodo que controle su temperatura, siendo controlada con la caldera. La temperatura del circuito de agua de refrigeración del stack será medida con otro termopar, en caso de ser necesaria

En los stack de mayor potencia, a partir de 1.000 W, los flujos de hidrógeno y de aire suelen ser calentados antes de ser introducidos en el stack a una temperatura entre 60 y 70 °C; para ello se suele emplear una caldera. Los termopares toman los datos medidos de cada flujo, enviando unas señales al control, donde se traduce el significado de dichas señales, dando como resultado una serie de valores que harán entrar en acción al actuador, que en este caso será una caldera. El circuito de refrigeración mediante agua desionizada, es calentada para ser introducida en el stack a la temperatura de operación (aproximadamente 60 °C), y posteriormente será controlada su temperatura mediante termopares, ya que el stack irá calentando el agua hasta que el circuito de refrigeración tendrá que disminuir su temperatura.

Potencia (W)	T H ₂ (°C)	T aire (°C)	T agua (°C)
20	40 - 50	5 - 40	No Aplica
25	30 - 40	T ambiente	No Aplica
100	65	5 - 40	No Aplica
200	65	5 - 40	No Aplica
300	65	5 - 40	No Aplica
1.000	70	5 - 40	60
2.000	70	5 - 70	60
3.000	70	5 - 70	60
5.000	65	5 - 65	65

Tabla 11.- Temperaturas de operación del Stack suministradas por el fabricante

En la Figura 86 se puede ver representado los valores de la Tabla 11, se puede apreciar que los rangos de temperatura de operación de los stacks aumentan conforme aumenta la potencia que suministran; así como que a mayores temperaturas de operación será necesario la refrigeración mediante agua, en lugar de con aire (en la gráfica aparece la refrigeración mediante agua a los 1.000 W).

En la curva que representa la temperatura del hidrógeno frente a la potencia del stack, se observa que la temperatura se mantiene relativamente constante para potencias menores de 100 W (40 °C) y para potencias mayores de 100 W (65 °C), experimentando un cambio de temperatura brusco entre los 50 y los 100 W en función del fabricante, es por este motivo que en aplicaciones menores de 100 W no se suele poner sistemas de refrigeración con agua, sino que es suficiente con una ventilación forzada introducida por los mismos ventiladores que aportan el comburente al stack como ya se ha dicho anteriormente.

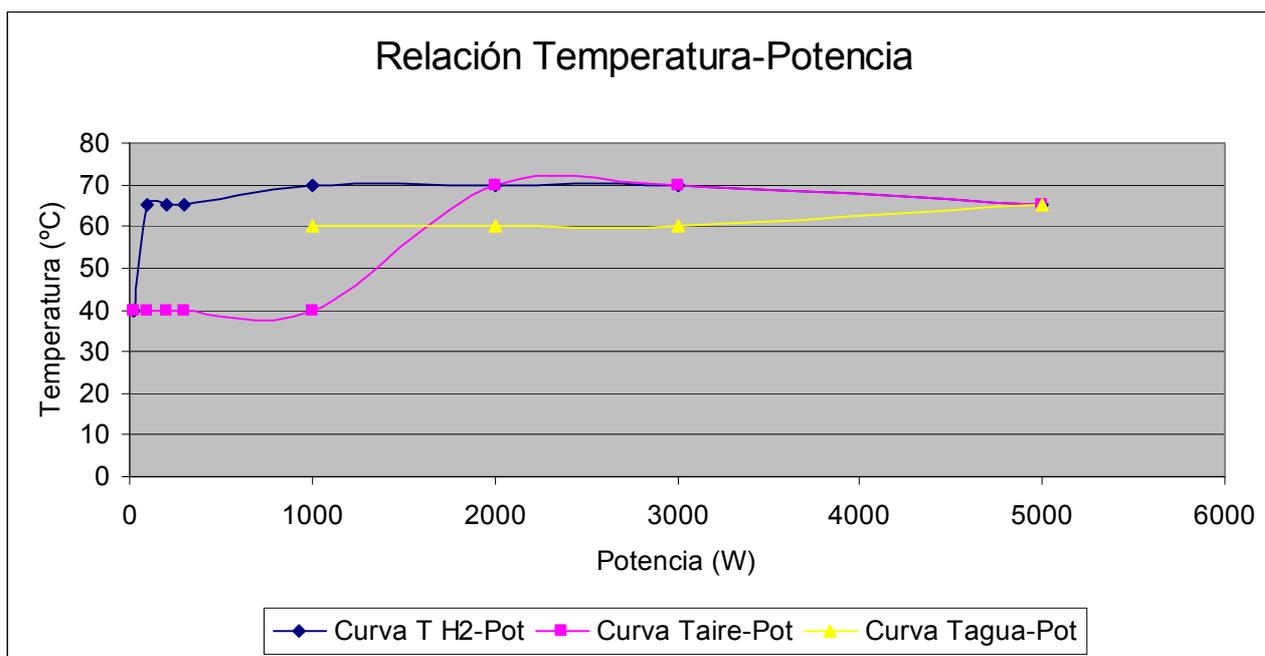


Figura 86- Gráfica que relaciona la temperatura de los diferentes flujos del SPC con la temperatura

5.2.1 Pt 100:Neuportus

El sensor de la Figura 87 está compuesto por una resistencia de platino y posee un display, en el que se representa la temperatura medida. Este sensor es capaz de medir desde 0 hasta 50 °C, por lo que sólo se usaría para medir la temperatura en el flujo de hidrógeno de stack de menos de unos 50 W.



Figura 87.- Termopar con display modelo INFCT-011B

Tipo de Transductor	Termopar; RTD
Clase	K
Medida	Temperatura absoluta
Tiempo de Respuesta	< 3 s
Precisión	$\pm 0'5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Material	Platino
Señal de salida	0 – 10 V _{DC} 4 – 20 mA
Consumo	< 8 W
Rango de Temperatura	0 – 50 °C
Dimensiones	48 x 96 x 152 mm
Peso	200 g
Precio	251'51 €

Tabla 12.- Características técnicas del termopar de INFCT-011B

Este sensor es útil para medidas de laboratorio, ya que al llevar incorporado un display se toma el dato de la temperatura del mismo. No es necesario adecuar la señal analógica de salida del sensor mediante un control.

En la Figura 88 se muestra un sensor de temperatura Pt 100 clase B de 4 hilos ofrecido por RS Amidata, sin el display que adapta la salida del sensor, sino que está preparado para ser integrado en un SPC, pudiendo medir la temperatura del combustible y el comburente, ya que tiene un rango de medida entre -50 y 200 °C, por lo que abarcan

todas las temperaturas de los flujos a medir en un SPC de baja y alta potencia. Este sensor tiene un precio de 39 €.



Figura 88.- Sensor de temperatura Pt 100 de RS Amidata

5.2.2 Termistor: RS Amidata

Con este sensor de temperatura se puede medir un mayor rango de temperaturas, la gran ventaja que plantea es su peso y su volumen como se puede ver en la Tabla 13.



Figura 89.- Termistor tipo K

Tipo de Transductor	Termistor NTC tipo K
Medida	Temperatura
Tiempo de Respuesta	15 s
Rango de Temperatura	-40 a 250 °C
Dimensiones	58'2 x 2mm
Peso	0'2 g
Precio	62'19 €

Tabla 13.- Características técnicas del chip termistor tipo K

5.2.3 Termopar: RS Amidata

En la Figura 90 se muestra un termopar tipo K de base metálica que emplea aleaciones de níquel dopado con aluminio o con cromo. Este sensor presenta un amplio rango de temperaturas que es capaz de medir, como consecuencia de este amplio rango pierde precisión en la toma de medidas.

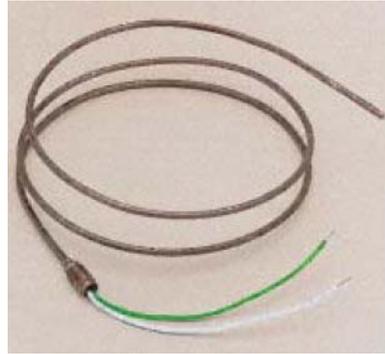


Figura 90.- Termopar tipo K con vaina de acero inoxidable 3 x 1 mm

Tipo de Transductor	Termopar tipo K
Medida	Temperatura
Rango de Temperatura	-200 a 1.100 °C
Precisión entre 0 y 400 °C	± 3 °C
Dimensiones	3 mm x 1 m
Peso	< 10 g
Precio	24'93 €

Tabla 14.- Características técnicas del sensor de la Figura 90

El conexionado eléctrico se lleva a cabo mediante el código de colores que se muestra en la Tabla 15

Cables de termopar:	
Brazo positivo (Ni/Cr)	Verde
Brazo negativo (Ni/Al)	Blanco
Aislamiento externo	Verde
Cables de compensación:	
Brazo positivo (Cu)	Blanco
Brazo negativo (Constantan)	Azul
Aislamiento externo	Rojo

Tabla 15.- Conexionado eléctrico del termopar de RS Amidata

Cada termopar se usa para un rango de temperatura distinto, como se puede ver en la Tabla 16. Se muestran algunos tipos de termopares en la Figura 91, su catálogo ha sido introducido en el Anexo I.

	Type J	Type K	Type N	Type T	Type R	Units
Minimum continuous temperature	-60	-200	-230	-200	-50	°C
Maximum continuous temperature	+850	+1100	+1300	+400	+1350	°C
Maximum spot reading	+1100	+1300	+1320	+500	+1400	°C

Tabla 16.- Rango de medida de cada tipo de termopar



Figura 91.- Diferentes tipos de termopares

El fabricante suministra la misma hoja de características para los termopares de la Figura 91, que se ha introducido en el Anexo I de este documento.

5.2.4 Conclusión

La toma de medidas para cualquier SPC se realizará a través de sensores Pt 100 o termopares siempre que abarquen el rango de temperatura a medir. No implican un incremento de peso, ni volumen apreciable en el sistema, por lo que se dispondrá de uno de ellos para cualquier rango de potencia del stack, ya que tampoco tienen un consumo apreciable.

El criterio de selección, se definirá en función del plazo de entrega del fabricante, ya que los precios de estos sensores no sobrepasan los 100 €.

5.3 Sensor de Flujo

La relación flujo-potencia es la medida más afectada, ya que la energía eléctrica generada está íntimamente relacionada con el combustible aportado, de forma que la energía ni se crea ni se destruye sólo se transforma. Debido a que el rendimiento energético de un stack convencional está en torno al 50 %, el flujo de hidrógeno y de aire a introducir está sobredimensionado al que realmente consumiría el stack en condiciones ideales.

Como se puede apreciar en la Figura 92 la relación flujo de hidrógeno y de aire con la potencia no es lineal. Con lo que para mayores potencias el incremento de flujo necesario para conseguirlo es mayor que para bajas potencias. Se puede deducir que el rendimiento energético para stacks de bajas potencias es menor que para altas potencias, ya que con un pequeño incremento de flujo se obtiene un incremento de potencia comparativamente mayor que el que se experimentaría si la relación flujo potencia fuera lineal.

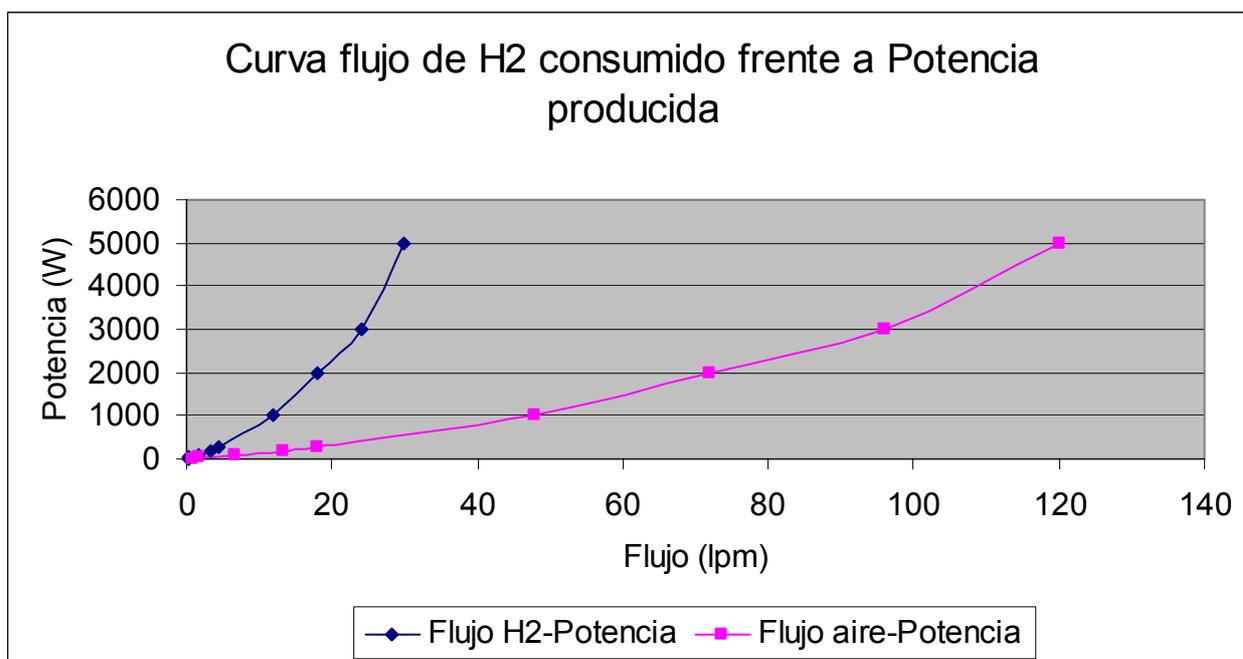


Figura 92.- Gráfico que relaciona el combustible y el comburente con la potencia generada

Potencia (W)	Flujo H ₂ (lpm)	Flujo Aire (lpm)
20	0'22	0'88
25	0'40	1'60
100	1'67	6'68
200	3'33	13'32
300	4'50	18'00
1.000	12'00	48'00
2.000	18'00	72'00
3.000	24'00	96'00
5.000	30'00	120'00

Tabla 17.- Flujos de hidrógeno y aire consumidos para obtener la potencia nominal

El flujo de aire suele estar en una proporción 1 a 3 ó 1 a 4 con respecto al flujo de hidrógeno (Tabla 17). Es una proporción dada por el fabricante y recibe el nombre de..... Esta proporción se mantiene para distintos fabricantes y distintas potencias.

El flujo de agua desionizada, en caso de ser necesaria para la refrigeración, no se suele medir con la precisión necesaria para el resto de flujos, debido a que, una vez conocida la capacidad del circuito de refrigeración, se emplea un tanque de expansión donde se regulan las posibles pérdidas, quedando un circuito cerrado.

5.3.1 Sensor de flujo másico 1: RS Amidata

Este sensor es suministrado por RS Amidata; diferencia entre dos gamas, la gama 1 que permite una medida del flujo bidireccional y la gama 2 que mide el flujo de forma unidireccional con salida amplificada. Dado que en los SPC el flujo siempre lleva la misma dirección, del sistema de almacenamiento al stack, se estudiará el sensor de gama 2 mostrado en la Figura 93. Este sensor no permite controlar el flujo, como ocurre en el resto de sensores mostrados en este apartado, de forma ilustrativa se presenta este sensor, aunque debido a su consumo eléctrico, su peso y volumen se usarán los controladores y medidores de flujo másico, más comúnmente llamados Mass Flow

Controller (MFC), para la medida y control del flujo en un SPC. Ya que en un mismo sistema se tiene integrado sensor y controlador.



Figura 93.- Sensor de flujo másico de RS Amidata gama 2, modelo AWM2.300V

Tipo de Transductor	De silicio
Rango de medición	0 – 1 lpm
Medida	Flujo másico (hidrógeno/aire)
Tiempo de Respuesta	< 3 ms
Precisión	1 %
Material	Acero Inoxidable
Señal de salida	0 a 5 V _{DC}
Consumo	50 mW 8 – 15 V _{DC}
Rango de Temperatura	-25 a 85 °C
Límite de presión	1.725 mbar
Dimensiones	15'5 x 39'5 x 54'5 mm
Peso	10'8 g
Precio	98'81 €

Tabla 18.- Características técnicas del sensor de flujo másico de RS Amidata

Además de este sensor se muestra en el Anexo I otros sensor de flujo másico ofrecido por Festo.

5.3.2 MFC: Iberfluid

El MFC mostrado en la Figura 94, perteneciente a Iberfluid es válido para trabajar con cualquier tipo de gas siempre y cuando el material que compone el MFC sea compatible con el flujo a controlar.

Hay una gran variedad de MFC ofertados en el mercado dependiendo de las necesidades a cubrir, siendo el componente del BoP más desarrollado en la tecnología de hidrógeno. Para aplicaciones pequeñas se puede encontrar MFC que midan y controlen pequeños flujos como el mostrado en la Figura 95 donde su rango de funcionamiento está comprendido entre 0'05 lpm hasta 2 lpm y en un rango de presión comprendido entre 0 y 10 barg. Se usará en aplicaciones donde el tamaño sea un requisito importante como es el caso de aplicaciones portables de baja potencia.

En la Figura 94 se muestra un MFC cuya interfaz con el usuario es a través de un display y una botonera con la que se regula el caudal. Se ha elegido este MFC para desarrollar sus características por varios motivos, el principal es que no necesita de un PC para su funcionamiento, por lo que es perfectamente integrable



Figura 94.- MFC de 0 a 10 lpm de Iberfluid

Rango de medición	0 – 10 lpm
Medida y control	Flujo másico (hidrógeno/aire)
Tiempo de Respuesta	0'7 s
Precisión	3 % FS
Material	Acero inoxidable
Señal de salida	0 – 5 V _{DC} 4 – 20 mA
Consumo	24 V _{DC} 250mA
Rango de Temperatura	0 – 70 °C
Límite de presión	10 barg
Dimensiones	95 x 90 x 140 mm
Peso	600 g
Precio	1.151'30 €

Tabla 19.- Características técnicas del MFC de la Figura 94

El precio de los MFC estará comprendido entre 1.000 € y los 2.000 €, dependiendo de las características físicas que estos posean, presión, flujo que son capaces de regular, etc. Pero no será un factor determinante en la selección de estos instrumentos.



Figura 95.- MFC de pequeñas dimensiones de Bronkhorst

5.3.3 MFC: Bronkhorst

Este MFC ofrecido por Bronkhorst, es específico para flujos elevados, la medida y control del flujo se realiza a través de un PC, además aporta un volumen y peso considerados al SPC (Tabla 20), por lo que encontrarán su aplicación en stacks de alta potencia, en los que las restricciones de peso y volumen se vean relajadas.



Figura 96.- MFC modelo F-203AC

Rango de medición	2 – 100 lpm
Medida y control	Flujo másico (hidrógeno/aire)
Tiempo de Respuesta	< 2 s
Precisión	0'2 % FS
Material	Acero inoxidable
Señal de salida	0 – 5 V _{DC} / 0 – 10 V _{DC} 4 – 20 mA
Consumo	15 V _{DC} 250 mA
Rango de Temperatura	-10 a 70 °C
Límite de presión	64 barg
Dimensiones	240 x 74 x 153 mm
Peso	4'9 kg
Precio	2.236'45 €

Tabla 20.- Características técnicas del MFC modelo F-203AC

5.3.4 Conclusión

El mercado de transductores ofrece, tanto sensores de flujo másico, como controladores de flujo másico que llevan incorporado un sensor. Los primeros (Figura 93) ocupan, pesan, consumen menos y son más baratos, pero en contraposición se tiene que no son capaces de controlar el flujo que circula a través de ellos. Dado que sin el control del flujo los SPC pierden autonomía desaprovechando el combustible se usan los MFC, equipos que llevan integrados una válvula, que controla el paso del flujo, y un sensor que mide y compara el valor medido con el deseado.

Para aplicaciones de baja potencia no sale rentable energéticamente el uso de un MFC, debido a que consumen una potencia en torno a los 7 W, ver Tabla 19, por lo que en SPC con esta potencia se buscarán otras soluciones para regular el flujo, como pueden ser la recirculación de gases o una válvula reguladora de caudal manual como la mostrada en la Figura 97, cuyas especificaciones técnicas se muestran en el Anexo III de este documento. Dado que la regulación de este flujo se fija de forma manual no tiene sentido poner un sensor de flujo másico ya que aunque se advierta un exceso o falta de flujo no se podrá actuar sobre la válvula reguladora de caudal de forma automática.



Figura 97.- Válvula reguladora de caudal manual

En aplicaciones con SPC de hasta 1.000 W se podrá usar el MFC de la Figura 95 con un consumo eléctrico de unos 7 W que compensa el ahorro de combustible que se produce, frente al consumo eléctrico y el volumen que añade este equipo al sistema.

Para aplicaciones de mayor potencia, el rango del MFC debe ser mayor (Figura 92) y, además, debe ser capaz de medir y controlar una amplia gama de flujos para un mismo stack, por ejemplo para el stack de 5 kW mostrado en la Figura 77, los consumos de hidrógeno oscilan entre los 30 – 65 lpm y entre 60 – 240 lpm para aire; sus características técnicas se especifican en el Anexo II: Especificaciones de los SPC. Por lo que el MFC adecuado para medir y controlar el flujo de hidrógeno sería el MFC modelo F-203AC de Bronkhorst (Figura 96) y para aire el MFC modelo F-202AC de Bronkhorst, cuyas

especificaciones se pueden ver en el Anexo II de este documento, que no se ha añadido en este apartado por no aportar información adicional a la que ya se ha mostrado.

5.4 Sensor de Humedad

En la Tabla 21 se observa que para bajas potencias las corrientes de gas no deben ser humidificadas, ya que las temperaturas de operación de éstos están en torno a los 40 °C máximo (Figura 86), por lo que no se corre el riesgo de secar las membranas del stack. Sin embargo a partir de unos 300 W de potencia se trabaja a temperaturas superiores (entre 60 y 70 °C) y será recomendable humidificar las corrientes de entrada entre el 90 y el 100 HR %. Para potencias mayores de 1.000 W será requisito indispensable el humidificar dichas corrientes para evitar la destrucción del stack y obtener la potencia deseada.

Potencia (W)	HR %
20	Auto-humidificada
25	Auto-humidificada
100	Auto-humidificada
200	Auto-humidificada
300	~ 90 %
1.000	~ 90 %
2.000	~ 90 %
3.000	~ 95 %
5.000	100 %

Tabla 21.- Relación potencia del stack y la necesidad de humidificar ánodo y cátodo

Todos los fabricantes de pilas de combustible informan que el stack tendrá un mejor funcionamiento si se humidifican los flujos de entrada al ánodo y al cátodo, ya sean stack de baja, media o alta potencia. Aunque de forma práctica esto sólo es rentable para stack de potencia superior a los 300 W.

Para medir la humedad de los flujos se usarán higrómetros, se humidificará la corriente al 100 %,

5.4.1 Sensor de humedad: Honeywell

Este sensor (Figura 98) está diseñado para medir la humedad relativa de cualquier gas, y lleva integrado un termistor. Posee un alto nivel de respuesta combinado con un volumen y peso despreciable (Figura 99 y Tabla 22) hace de él un elemento integrable para cualquier aplicación en cualquier rango de potencia, ya que tan sólo conlleva un consumo de 1 mW.

Dado que en los SPC de menos de 300 W no será necesaria la humidificación del stack se podrá prescindir del uso de este sensor, que aunque no conlleva un volumen, consumo ni peso apreciable sí que incluye un aumento de la complejidad desde el punto de vista del control que tendrá que preocuparse de adecuar una señal de entrada y salida para e sensor.

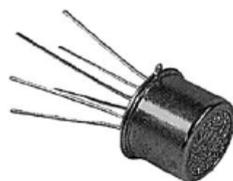


Figura 98.- Sensor de humedad modelo HIH-3602-C

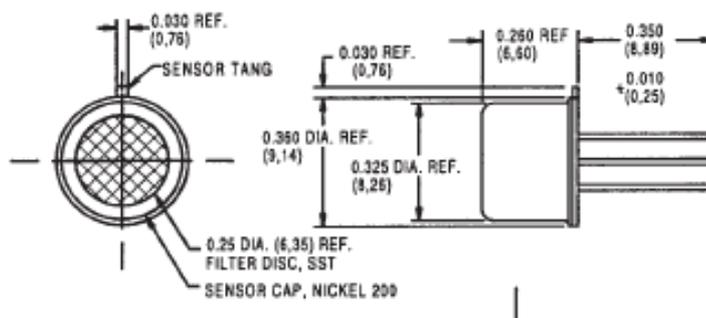


Figura 99.- Dimensiones del sensor de humedad

Tipo de Transductor	Capacitivo; Silicio
Rango de medida	0 – 100 % HR
Sensor de temperatura	RTD Platino $\alpha = 0'00375 \Omega/\Omega/^{\circ}\text{C}$
Medida	Humedad relativa
Tiempo de Respuesta	< 50 s
Precisión	$\pm 2 \%$
Material	Material hidrofóbico con filtro de acero inoxidable
Señal de salida	0 – 5 V _{DC}
Consumo	5 V _{DC} ; 200 μA
Rango de Temperatura	-40 a 85 °C
Dimensiones	$\varnothing = 9'14 \text{ mm}; l = 15\text{mm}$
Peso	< 100 g
Precio	27'04 €

Tabla 22.- Características técnicas del sensor de humedad

En el Anexo I, se incluye otro sensor de humedad suministrado por RS Amidata, cuyas características técnicas son similares a las dadas en la Tabla 22. Dado que estos sensores son fáciles de encontrar en el mercado y que sus características técnicas son similares, su elección vendrá condicionada principalmente por su precio y el plazo de entrega del fabricante.

Para SPC de más de 300 W, no sólo habrá que disponer de un sensor de humedad, sino que para mantener las corrientes de gas humidificada al 100 % HR habrá que actuar sobre ellas mediante un humidificador como el mostrado en la Figura 100. La complejidad y el tamaño de este sistema vendrá dado en función de los flujos a humidificar. A mayor flujo la cantidad de agua desionizada necesaria para humidificar será mayor, por lo que el sistema también aumentará su tamaño. Este sistema consistirá en hacer pasar un flujo de gas por un depósito de agua desionizada en equilibrio fase-gas; es decir, el flujo de gas

(ya sea hidrógeno o aire) se circula por la parte superior del depósito de agua desionizada, humidificándose con el vapor de agua. Este depósito tendrá que tener las dimensiones adecuadas para que de tiempo a que el flujo de gas se humidifique al 100 % HR. Este sistema debe de disponer de un tanque de expansión, ya que existe un consumo de agua.

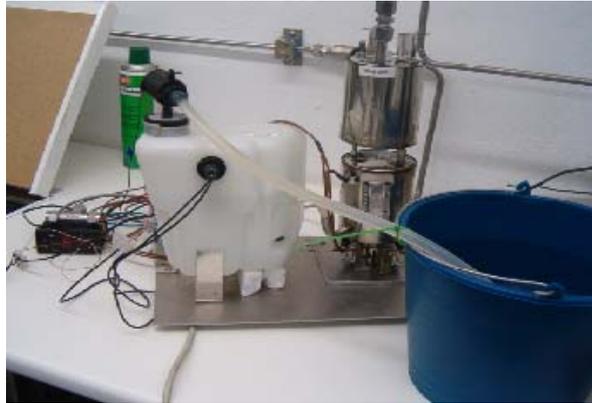


Figura 100.- Sistema de humidificación para gases

Este sistema (Figura 100) será estudiado y desarrollado en más detalle en el Apartado 6: Propuesta de un SPC. Donde la detección de un porcentaje de humedad relativa inferior al 100 %, desencadena el funcionamiento de una serie de actuadores que conforman el sistema de humidificación.

5.5 Sensor de Tensión y Corriente

Las tensiones y las intensidades más habituales a medir en un sistema de pila de combustible vienen dadas en función de la potencia que estas son capaces de producir, como se muestra en la Tabla 23. En la que se puede observar que a mayor potencia las tensiones con las que trabaja el stack son mayores. Con ello se consigue que las intensidades del stack aunque aumenten lo hagan en una proporción menor, evitando diseñar sistemas de adecuación de potencia con intensidades elevadas en la medida de lo posible.

La tensión del stack y de cada celda se mide mediante un sensor efecto Hall. La tensión de celda no debe estar por debajo de 0'4 V, independientemente de la potencia del stack; la forma de actuar si en alguna de las celdas se alcanza una tensión por debajo de ésta, es dejar de demandar carga al stack. De forma genérica, por cada celda que compone el stack se obtiene una tensión de unos 0'8 V.

En la Figura 101 se puede observar como las curvas que relacionan la tensión máxima y mínima con la potencia son prácticamente paralelas a partir de los 1.000 W. Además, a medida que aumenta la potencia la pendiente de la curva tensión – potencia disminuye, con lo que para aumentar la potencia se aumenta la intensidad generada. Esto se debe a que una celda da una tensión de unos 0'8 V, al aumentar el número de celdas se aumenta la tensión, y por tanto, la potencia. Este método es efectivo hasta que se alcanzan unos parámetros de peso y volumen que dejan de compensar el incremento de potencia que supone añadir una celda más al stack. Por lo que se opta por un diseño de las membranas que aumente la intensidad generada.

Potencia (W)	Tensión (V)
20	2 - 11
25	8 – 24
100	2 – 18
200	5 – 38
300	5 – 58
1.000	14 – 24
2.000	14 – 24
3.000	32 – 51
5.000	39 – 58

Tabla 23.- Rango de tensiones de trabajo en función de la potencia

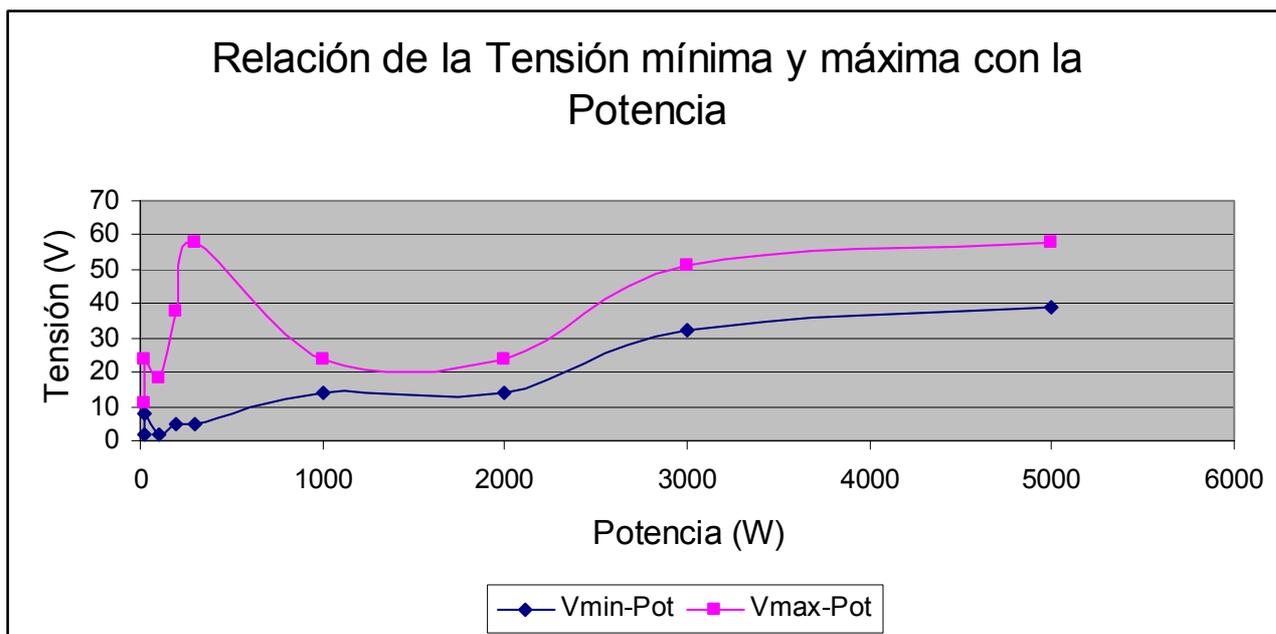


Figura 101.- Rango de tensión permitido en un stack en función de la potencia

5.5.1 Sensor efecto Hall (200 A): R.S. Amidata

El sensor de la Figura 102 es suministrado por R.S. Amidata, y fabricado por LEM. Existen varios modelos que son capaces de medir intensidades desde 50 A hasta 600 A, como se puede ver en el Anexo I. Se ha escogido el sensor modelo HAS 300-S, ya que posee el rango adecuado (debe ser capaz de medir intensidades de 0 a 220 A) para medir la intensidad del stack del sistema propuesto en el Apartado 6.



Figura 102.- Sensor efecto Hall modelo HAS 300-S

En la Tabla 24, se muestran las características de este sensor.

Fabricante	LEM
Modelo	HAS 300-S
Rango de medida	0 – 300 A
Tensión aplicada	± 15 V
Corriente aplicada	± 15 mA
Tensión de salida	± 4 V
Dimensiones	30 x 40 x 30 mm
Peso	60 g
Precio	26'9 €

Tabla 24.- Características técnicas del sensor HAS 300-S

5.5.2 Sensor efecto Hall (Tensión): R.S. Amidata

Este sensor (Figura 103) es suministrado por R.S. Amidata y fabricado por LEM, se ha escogido un modelo de sensor basado en el efecto Hall. Como se puede apreciar en la Tabla 25 el rango de medida del sensor puede ser ajustado a las necesidades de la aplicación, en función de la resistencia R_1 , que se incluye en el circuito de medida (Figura 104).



Figura 103.- Sensor de tensión modelo LV 25-P

Fabricante	LEM
Modelo	LV 25-P
Rango de medida	0 – 500 V
Precisión	$\pm 0'6 \%$ de I_n
Temperatura de funcionamiento	0 – 70 °C
I_n	10 mA
Señal de salida	25 mA
Tensión de alimentación	± 15 V
Corriente de alimentación	10 mA
Tiempo de respuesta	40 μ s
Dimensiones	29'2 x 20'9 x 26 mm
Peso	22 g
Precio	42'32 €

Tabla 25.- Características técnicas del sensor de tensión

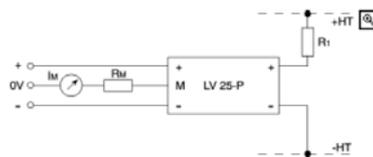


Figura 104.- Circuito de medida del sensor de tensión