

## 6 Propuesta de un SPC con lo estudiado

Como se ha podido observar en puntos anteriores, todos los sistemas de pila de combustible no son iguales ni necesitan la misma instrumentación, así por ejemplo, en un stack de baja potencia hay muchos parámetros que no son susceptibles de ser medidos, como el flujo, o la temperatura. Así como tampoco tiene sentido medir la humedad de dicho flujo, ya que no requiere ser humidificado.

Para realizar dicha propuesta será necesario fijar el parámetro principal del SPC, el stack. Para realizar un estudio lo más genérico posible, se escoge aquel stack que requiere el mayor número de actuaciones para su correcto funcionamiento, es decir, cualquier stack de más de 1.000 W de potencia nominal. En particular se elegirá el stack de mayor potencia desarrollado en este documento, el stack de 5 kW mostrado en la Figura 105, cuyas especificaciones vienen desarrolladas en el Anexo II: Especificaciones de los SPC.

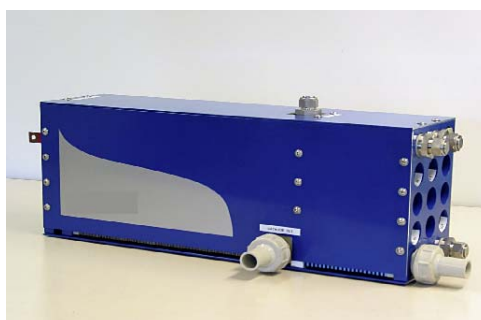


Figura 105.- Stack de 5 kW

En la Tabla 26 se desarrollan las características de operación de este stack en el punto nominal y los rangos de operación que se pueden ver representados en la Tabla 26.

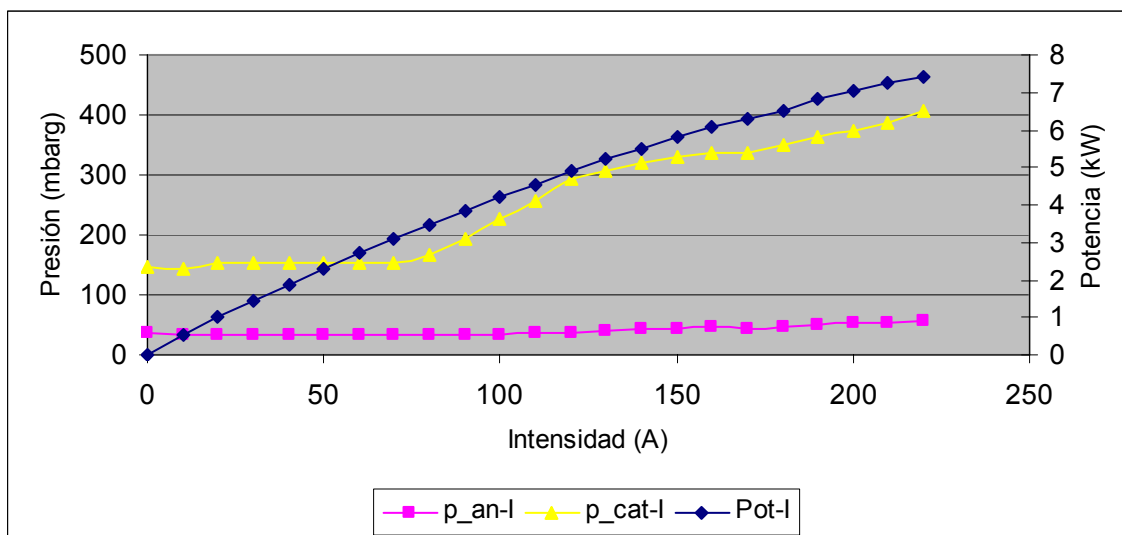


Figura 106.- Gráfica que representa los rangos de operación del stack de 5 kW

| Parámetros                                         | Stack 5 kW                                               |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Potencia nominal                                   | 5 kW                                                     |
| Potencia máxima                                    | 8 kW                                                     |
| Tensión nominal                                    | 43 V                                                     |
| Tensión de operación                               | 30 – 58 V                                                |
| Intensidad nominal                                 | 120 A                                                    |
| Intensidad de operación                            | 0 – 270 A                                                |
| Flujo de hidrógeno nominal                         | 62 lpm H <sub>2</sub>                                    |
| Caída de presión en el ánodo                       | 0'07 barg                                                |
| Flujo de aire nominal                              | 240 lpm aire                                             |
| Caída de presión en el cátodo                      | 0'3 barg                                                 |
| Refrigeración                                      | Circuito de agua desionizada<br>conductividad < 17 µS/cm |
| Caída de presión en<br>el sistema de refrigeración | < 0'5 barg                                               |
| Ventilación                                        | Compresor                                                |
| Humidificación                                     | 100 % de las corrientes<br>de H <sub>2</sub> y de aire   |
| Temperatura de operación                           | 65 °C                                                    |
| Presión de operación                               | ~ Atmosférica                                            |
| Diferencia de presión en los MEAs                  | < 0'3 barg                                               |
| Emisiones                                          | ~ 12'7 kg/h de agua                                      |
| Dimensiones                                        | 183 x 263 x 685 mm                                       |
| Peso                                               | 39 kg                                                    |

Tabla 26.- Características de operación del stack de 5 kW

Se distinguen cuatro sistemas que adecuan las condiciones necesarias para que el stack funcione según las condiciones de operación dadas por el fabricante en la Tabla 26, que son los siguientes:

- Sistema de inyección del gas (hidrógeno) en el circuito del ánodo.
- Sistema de inyección del gas (aire) en el circuito del cátodo.
- Sistema de humidificación de los gases, para el ánodo y el cátodo.
- Sistema de refrigeración.

Cada uno de estos sistemas se encarga de adecuar las condiciones de presión, temperatura, flujo y humedad, de cada uno de los circuitos que se han diferenciado a lo largo del estudio realizado en este documento. Por lo que se distinguirá entre cada uno de ellos para su estudio.

El sistema de humidificación se ha considerado como un sistema independiente, a pesar de que este sistema tiene la función de adecuar los gases de entrada al ánodo y al cátodo, formando parte del sistema de inyección de gases. Pero dado que es un sistema complejo y que desde el punto de vista del control permite una gestión independiente, ya que está constituido por varios sensores y actuadores, puede ser estudiado como otro subsistema que tiene la función de adecuar la humedad relativa en los sistemas de inyección.

## **6.1 Sistema de Inyección de Hidrógeno en el Ánodo**

Los principales parámetros a controlar en el sistema de inyección de hidrógeno en el ánodo, según la Tabla 26, son el flujo de hidrógeno para aumentar la autonomía del sistema de almacenamiento de combustible, la temperatura de dicho flujo, la presión de entrada al stack y la humedad (Figura 79). Para ello se usarán una serie de actuadores y sensores que serán controlados por el Sistema de Control y Seguridad (SCS). El sistema de humidificación que adecuará la corriente de entrada en el ánodo se desarrollará en el Apartado 6.3. de este documento, por lo que no se profundizará en él en este punto.

De la Tabla 26, se puede deducir que las condiciones a las que se debe adecuar el flujo de entrada al ánodo son:

- El flujo debe estar comprendido entre los 62 lpm de  $H_2$  en el punto nominal de funcionamiento y los 114 lpm  $H_2$  máximos.

- La presión de operación a la entrada del ánodo está comprendida entre 0'04 barg y 0'06 barg (Figura 81). Y la caída de presión entre la entrada y la salida del ánodo no puede ser superior a 0'07 barg, esta situación no se dará, debido a que la presión de entrada es controlada de forma que no se sobrepase 0'07 barg, y dado que la purga se abre al ambiente esta caída de presión siempre será inferior a 0'07 barg. De no ser así la dirección del flujo cambiaría y entraría aire por la purga (se haría el vacío en el ánodo y esta situación no se da ya que la purga está abierta al ambiente).
- La temperatura de operación debe estar comprendida entre los 60 °C y los 65 °C.
- El flujo de entrada debe estar humidificado al 100 % HR.

Debido a la potencia del stack en estudio, 5 kW, el Sistema de Almacenamiento de Combustible (SAC) utilizado es hidrógeno almacenado en botellas a presión. Se podría haber optado por otros tipos de almacenamientos, como los hidruros metálicos, pero plantean el inconveniente de ser muy pesados. El hidrógeno almacenado en botella a presión se encuentra a 200 bar; para adecuar la presión a la de operación del stack, se deberá hacer uso de varias etapas de regulación. La primera etapa se realiza mediante el regulador de presión mostrado en la Figura 107 , cuyas principales características son que lleva incorporado una válvula de seguridad, es de dos estados y tiene un precio de 663 €, como se puede ver en el Anexo III. La segunda etapa de regulación se lleva a cabo mediante el regulador de la Figura 108; como se puede observar, este regulador permite presiones de entrada hasta de 4 bar y es capaz de regular entre un rango de 0 y 3'5 barg. Este regulador tiene un precio de 430 €. Con estos dos reguladores se consigue bajar la presión de salida del SAC (200 barg) a la presión de operación del stack (0'07 barg).



Figura 107.- Regulador de alta presión. Primera etapa

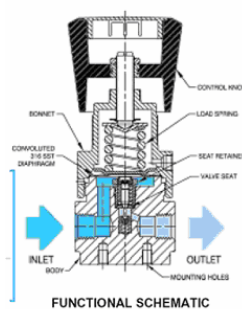


Figura 108.- Regulador de presión, ajuste fino. Segunda etapa

Estos reguladores de presión son elementos neumáticos, con un funcionamiento manual sin consumo eléctrico, por lo que el SCS no tendrá ningún control sobre ellos. La forma en la que el SCS actúa en caso de que la presión en el ánodo sea superior a los valores establecidos en la Tabla 26, es actuar sobre la válvula de entrada del sistema de inyección de hidrógeno, mostrada en la Figura 110.

El control de la presión a la entrada del ánodo, consiguiendo que no se supere el valor recomendado por el fabricante en la Tabla 26, es formar un sistema de medida, evaluación y actuación. Mediante el sensor de presión representado en la Figura 113, se mide la presión a la entrada del hidrógeno en el ánodo. La señal generada por el sensor es comparada y evaluada por el SCS, y siempre que esta señal corresponda a un nivel de presión menor de 0'07 barg, la válvula todo – nada de la entrada, permanecerá abierta. En caso de que este valor de presión sea sobrepasado, el SCS dejará de excitar la válvula de entrada, cerrándola. Para conseguir que la presión reducir la presión del sistema, el usuario deberá manipular los reguladores de presión, hasta conseguir una presión adecuada de funcionamiento.

Se muestra a continuación el sensor seleccionado para medir la presión a la entrada del ánodo (Figura 109), que como se verá más adelante, será igual al usado para medir la presión en el Sistema de Inyección de Aire en el cátodo, ya que opera con presiones similares y proporciona homogeneidad al SPC. Dado que este sensor ya ha sido estudiado en el Apartado 5.1, sólo se hará mención a sus características más relevantes (Tabla 27); se puede consultar el catálogo suministrado por el fabricante en el Anexo I.



Figura 109.- Sensor de presión de Bürkert

|                      |                                 |
|----------------------|---------------------------------|
| Tipo de Transductor  | Capacitivo; tecnología cerámica |
| Rango de Presión     | 0 a 1 barg                      |
| Medida               | Presión Relativa                |
| Material             | Acero Inoxidable                |
| Señal de salida      | 4 – 20 mA                       |
| Consumo              | 10 – 30 V <sub>DC</sub>         |
| Rango de Temperatura | -30 a 100 °C                    |
| Dimensiones          | h = 27 mm; $\Phi$ = 110 mm      |
| Peso                 | 200 g                           |

Tabla 27.- Características técnicas del sensor de presión

El sistema de inyección de hidrógeno estará formado según se muestra en la Figura 113, por una válvula todo o nada de Asco y modelo 8262G12 como la mostrada en la Figura 110, cuya misión es cortar el suministro de hidrógeno en caso de que se produzca algún fallo en el sistema.

Se usará una válvula todo o nada, similar a la de la entrada, en la purga de la corriente del ánodo; el flujo máximo que podrá circular por ella es el de entrada. Además unificará y homogeneizará el sistema desde el punto de vista de gestión de señales eléctricas y desde un punto de vista mecánico, ya que tendrá unas características físicas (peso, volumen y rango de funcionamiento) similares. Esta válvula permanecerá cerrada para que la eficiencia de la reacción en el stack aumente y abrirá cada cierto tiempo (según se determine empíricamente que la eficiencia del stack mejora) para expulsar el agua generada de la reacción, que en este caso es de 12'7 kg/h.



Figura 110.- Válvula todo o nada utilizada en la alimentación del ánodo y en la purga

Las características técnicas de estas válvulas son mostradas en la Tabla 28, donde se puede observar que cumplen los requisitos

|                    |                        |
|--------------------|------------------------|
| Fabricante         | Asco                   |
| Modelo             | 8262G12                |
| Actuación          | Todo - Nada            |
| Material           | Acero inoxidable       |
| Tensión            | 0 – 12 V <sub>DC</sub> |
| Consumo            | 10 W                   |
| Máxima temperatura | 80 °C                  |
| Máxima presión     | 11 barg                |
| Dimensiones        | 64 x 30 x 43 mm        |
| Peso               | 450 g                  |
| Precio             | 523 €                  |

Tabla 28.- Características técnicas de la válvula todo – nada

El flujo será medido y controlado por un controlador de flujo másico (MFC), como el mostrado en la Figura 111, el sensor y el actuador van integrados en un mismo elemento, lo que permiten ahorrar espacio en el SPC. Sus características técnicas más relevantes se muestran en la Tabla 29. En esta tabla se puede ver que el rango de medida y control del MFC es de 5 a 250 lpm, conteniendo el flujo de hidrógeno que debe ser controlado desde su punto de funcionamiento nominal, hasta el máximo.



Figura 111.- MFC de Bronkhorst empleado en el ánodo modelo F-202AC

|                      |                               |
|----------------------|-------------------------------|
| Rango de medición    | 5 – 250 lpm                   |
| Medida y control     | Flujo másico (hidrógeno/aire) |
| Tiempo de Respuesta  | < 2 s                         |
| Precisión            | 0'2 % FS                      |
| Material             | Acero inoxidable              |
| Señal de salida      | 4 – 20 mA                     |
| Consumo              | 24 V <sub>DC</sub> ; 190 mA   |
| Rango de Temperatura | -10 a 70 °C                   |
| Límite de presión    | 64 barg                       |
| Dimensiones          | 162 x 139 x 59 mm             |
| Peso                 | 2'1 kg                        |
| Precio               | 2.236'45 €                    |

Tabla 29.- Características del MFC para el ánodo

El MFC actúa como una caja negra que da dos señales, una asociada a la medida tomada del flujo y otra asociada a la señal de excitación que hace que la válvula proporcional que lleva integrada actúe sobre el flujo de forma continua, haciendo que el flujo medido coincida con el valor de referencia.

Por último, se debe conseguir medir y controlar la temperatura, de tal forma que el SPC opere entre 60 y 65 °C, temperatura recomendada por el fabricante. Para ello se hará uso de un termopar (Figura 112) que tomará la medida y enviará una señal al SCS, donde comparará dicha señal con una de referencia. Si la señal comparada no está dentro de un rango admisible, el SCS enviará una señal al actuador; en este caso el Sistema de

Humidificación tiene la función de humidificar y calefactar el gas a la temperatura requerida. Este sistema entrará en funcionamiento, no sólo cuando la humedad no esté dentro de un rango admisible, sino cuando la temperatura del gas no sea la adecuada.

Se debe tener en cuenta que el sensor de temperatura representado en la de la Figura 113, es analizado de modo ilustrativo en este Apartado, desarrollando su interacción en el Apartado 6.3., con los distintos sensores y actuadores a través de los que se consigue regular la temperatura del hidrógeno a la entrada del ánodo.



Figura 112.- Termopar tipo J ofrecido por RS Amidata

|                      |                                  |
|----------------------|----------------------------------|
| Tipo de Transductor  | Termopar tipo J                  |
| Medida               | Temperatura                      |
| Rango de Temperatura | -60 a 350 °C                     |
| Material             | Acero inoxidable, punta de plata |
| Tiempo de respuesta  | < 1'2 s                          |
| Dimensiones          | Ø = 4'5 mm; L = 150 mm           |
| Peso                 | < 10 g                           |
| Precio               | 16'08 €                          |

Tabla 30.- Características técnicas del termopar tipo J

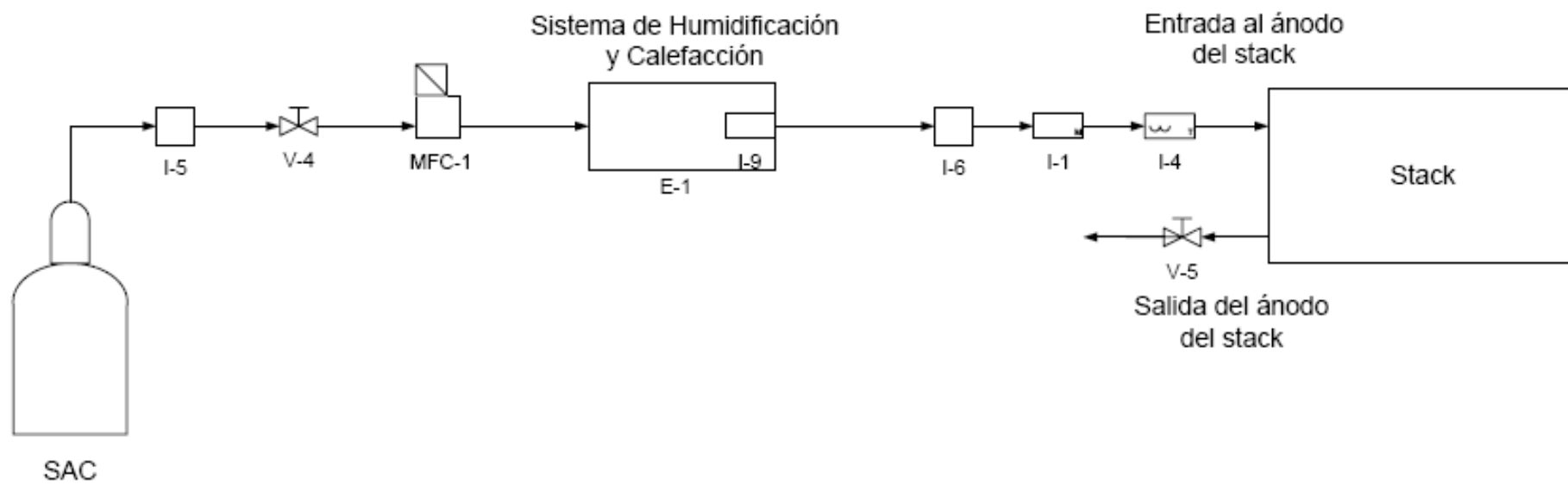


Figura 113.- Sistema de inyección de hidrógeno en el ánodo

Por lo que, como se muestra en la Figura 113, los elementos que componen el Sistema de Inyección de Hidrógeno en el ánodo son los de la Tabla 31. En esta tabla se muestra un resumen de dichos elementos, su función (si son medidores o actuadores), y el tipo de señal que emiten o reciben.

| Leyenda | Elemento                                | Tipo                  | Función                                                                        | Señal                                       |
|---------|-----------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| I-5     | Regulador de presión del alta           | Actuador              | Primer paso de regulación de la presión desde 200 barg a 7 barg                | No aplica                                   |
| V-4     | Válvula todo-nada                       | Actuador              | Abre o cierra dejando pasar o no el hidrógeno al stack                         | Digital en tensión 0–12V <sub>DC</sub>      |
| MFC-1   | Controlador de flujo másico             | Sensor / Actuador     | Mide y controla el flujo de hidrógeno introducido en el ánodo                  | 2 señales analógicas en corriente 4 a 20 mA |
| E-1     | Sistema de Humidificación y Calefacción | Sensores / Actuadores | Controla los parámetros de temperatura y humedad del flujo de entrada al ánodo | Apartado 6.3.                               |
| I-9     | Higrómetro                              | Sensor                | Mide la humedad relativa                                                       | Apartado 6.3.                               |
| I-6     | Regulador de presión de baja            | Actuador              | Regula la presión dentro de un rango de 0 a 1 barg                             | No aplica                                   |
| I-1     | Sensor de presión                       | Sensor                | Mide la presión del hidrógeno                                                  | Analógica en corriente 4 a 20 mA            |
| I-4     | Termopar                                | Sensor                | Mide la temperatura del hidrógeno                                              | Excitado por corriente                      |
| V-5     | Válvula todo-nada                       | Actuador              | Apertura y cierre para la correcta operación del stack                         | Digital en tensión 0–12V <sub>DC</sub>      |

Tabla 31.- Resumen de Sensores y actuadores del circuito de ánodo

## 6.2 Sistema de Inyección de Aire en el Cátodo

Las condiciones de operación para la entrada de aire en el cátodo, según la Tabla 26 dada por el fabricante, son:

- El flujo debe estar comprendido entre los 240 lpm de aire en el punto nominal de funcionamiento y los 440 lpm aire máximos.
- La presión de operación a la entrada del ánodo está comprendida entre 0'29 barg y 0'4 barg (Figura 81). Y la caída de presión entre la entrada y la salida del ánodo no puede ser superior a 0'3 barg.
- La temperatura de operación debe estar comprendida entre los 60 °C y los 65 °C.
- El flujo de entrada debe estar humidificado al 100 % HR.

En la Figura 115 se observan los elementos que hacen posible conseguir las condiciones de operación de flujo de aire a la entrada del ánodo del SPC.

Para impulsar el aire del ambiente al cátodo será necesario un compresor (Figura 114) que consiga las condiciones de presión y flujo requeridas para el correcto funcionamiento del stack. Este compresor, según la Tabla 32, es capaz de suministrar el flujo máximo que requeriría el stack en su funcionamiento de máxima potencia 440 lpm.



Figura 114.- Compresor de Busch para la entrada de aire al cátodo

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Fabricante        | Busch              |
| Modelo            | Seco SV 1040 C     |
| Flujo de aire     | 0 – 660 lpm        |
| Rango de presión  | 0'2 – 1 barg       |
| Velocidad de giro | 1.500 rpm          |
| Consumo           | 1'25 kW            |
| Dimensiones       | 545 x 289 x 282 mm |
| Peso              | 38 kg              |
| Precio            | 794 €              |

Tabla 32.- Características técnicas del compresor de Bush

El flujo aportado por el compresor deberá ser medido y controlado por el MFC de la Figura 96, cuyas características vienen dadas en el Anexo I, y son similares a las de este MFC que vienen dadas en la Tabla 20. Con la salvedad de que el rango de funcionamiento es de 25 a 1250 lpm, para poder abarcar el rango de flujo necesario en el cátodo. Por lo que el modelo, según el catálogo de Bronkhorst, es el F-203AC.

Por homogeneidad del sistema la válvula todo – nada de que se dispondrá será la misma que para el Sistema de Inyección de Hidrógeno (Figura 110 y Tabla 28), cuyas características vienen dadas en el Anexo III.

Hasta el momento los actuadores descritos se ocupan de regular flujo y presión, para lo que se deberá disponer de una serie de sensores que envíen una señal al SCS, donde será comparada con unas de referencia. De forma que se compruebe que los actuadores controlan, dentro de los rangos de funcionamiento del stack, el flujo de aire. Por lo que se dispondrá de un sensor de presión, que por homogeneidad del sistema de forma mecánica y de trabajo, se tomará el sensor de la Figura 109, cuyas características vienen dadas en la Tabla 27.

El modo de actuar será el siguiente: el compresor comienza a funcionar generando un flujo que es inyectado en el ánodo. El MFC se encarga de medir y controlar que el flujo sea el adecuado, en caso de un exceso. En caso de que el sensor del MFC detecte que es insuficiente se envía una señal al SCS que se traduce en enviar una señal al

compresor que actuará aumentando su velocidad de giro, en caso de medir un flujo mucho mayor que el de la señal de referencia.

La presión que el compresor introduce será regulada en un único paso, ya que se pretende pasar de una presión de 1 barg máximo a 0'4 barg, usándose el regulador manual de la Figura 108.

Por último, hay que regular los parámetros de humedad y temperatura. La humedad del flujo de aire será regulado por un sistema similar al desarrollado para el flujo de hidrógeno, que será estudiado en el Apartado 6.3. Y la temperatura deberá oscilar entre los 60 °C los 65 °C. Para su control se procederá, al igual que para el control del resto de parámetros a un sistema de bucle cerrado con el SCS. Siendo necesario la calefacción de los gases de entrada (que se realiza con el Sistema de Humidificación y Calefacción desarrollado en el Apartado 6.3.), y para su medida se usará un termopar similar al usado para el Sistema de Inyección de Hidrógeno en el Ánodo. (Figura 112 y Tabla 30). Se debe tener en cuenta que aunque se haga referencia y se represente en el gráfico de la Figura 115, este sensor en este apartado, el desarrollo de su funcionamiento en interacción con los actuadores se realizará en el Apartado 6.3. de este documento, ya que es el conjunto de este equipo el que es capaz de regular la temperatura del aire a la entrada del cátodo.

Una vez controlados todos los parámetros de entrada de los flujos de hidrógeno y de aire, comienza a operar el stack, generando agua que sale por la purga cuando, dicha válvula abre. El agua generada, 12 kg/h, puede ser condensada y almacenada en un depósito, para después ser impulsada al Sistema de Humidificación y Calefacción, cuando éste lo necesite, como se verá posteriormente. La bomba usada para esta recirculación del agua proveniente del stack es similar a las que se usará en el Sistema de Refrigeración, por homogeneidad en el sistema (Figura 121 y Tabla 29).

El agua es condensada mediante un condensador, este elemento no es más que un intercambiador de calor, que se encarga de que el agua que se encuentra en estado vapor condense, el aire es expulsado al ambiente y el agua condensada se almacena en el depósito mostrado en la Figura 115. Este equipo no incorpora un consumo de energía elevado en el sistema, por lo que no se tendrá en cuenta a la hora de realizar el balance energético. El equipo comienza a funcionar en el momento en el que el stack comienza a funcionar y la válvula de purga deja pasar el aire y el agua resultantes de la reacción.

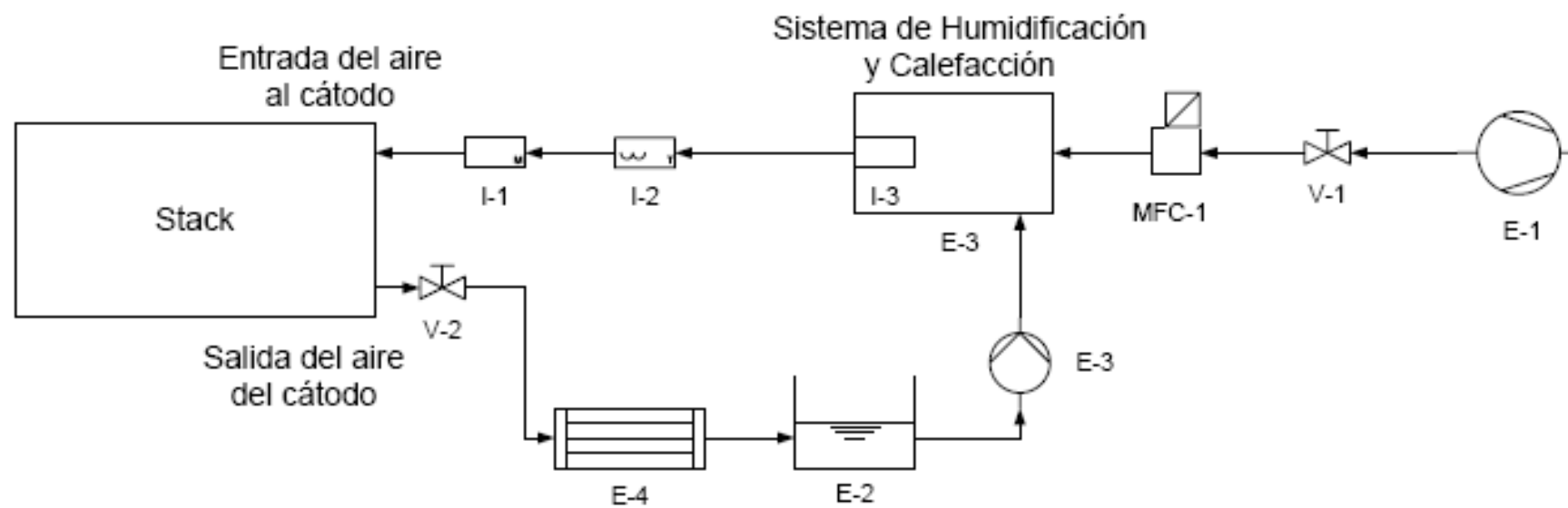


Figura 115.- Sistema de inyección de aire en el cátodo

| Leyenda | Elemento                                      | Tipo                     | Función                                                                                                      | Señal                                                |
|---------|-----------------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| E-1     | Compresor                                     | Actuador                 | Impulsar aire en el cátodo                                                                                   | Digital en tensión<br>220 V <sub>AC</sub> ; 50 Hz    |
| V-1     | Válvula todo-<br>nada                         | Actuador                 | Deja pasar o no el aire en el<br>cátodo                                                                      | Digital en tensión<br>0 – 12V <sub>DC</sub>          |
| MFC-1   | Controlador<br>de flujo<br>másico             | Sensor /<br>Actuador     | Mide y controla el flujo de<br>aire introducido en el cátodo                                                 | 2 señales<br>analógicas en<br>corriente 4 a 20<br>mA |
| E-3     | Sistema de<br>Humidificación<br>y Calefacción | Sensores /<br>Actuadores | Mide y actúa sobre los<br>parámetros de temperatura y<br>humedad del flujo de aire                           | Apartado 6.3.                                        |
| I-3     | Higrómetro                                    | Sensor                   | Mide la humedad relativa del<br>flujo de aire a la entrada del<br>cátodo                                     | Apartado 6.3.                                        |
| I-2     | Termopar                                      | Sensor                   | Mide la temperatura del aire<br>a la entrada del cátodo                                                      | Excitado por<br>corriente                            |
| I-1     | Sensor de<br>presión                          | Sensor                   | Mide la presión del aire a la<br>entrada del cátodo                                                          | Analógica en<br>corriente 4 a 20<br>mA               |
| V-2     | Válvula todo-<br>nada                         | Actuador                 | Deja pasar o no los<br>productos sobrantes de la<br>reacción en el cátodo (agua<br>y aire)                   | Digital en tensión<br>0 – 12V <sub>DC</sub>          |
| E-4     | Condensador                                   | Actuador                 | Condensa el agua que se<br>encuentra en forma de vapor<br>debido al calor absorbido y<br>baja su temperatura | No aplica                                            |

| Leyenda | Elemento | Tipo      | Función                                                                              | Señal                                        |
|---------|----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| E-2     | Depósito | No aplica | Depósito de almacenamiento de agua desionizada                                       | No aplica                                    |
| E-3     | Bomba    | Actuador  | Bomba de 10 lpm que impulsa el agua desionizada necesaria para humidificar los gases | Digital en tensión<br>0 – 12 V <sub>DC</sub> |

Tabla 33.- Sensores y actuadores del circuito de cátodo

### 6.3 Sistema de Humidificación

Este sistema (Figura 116) se ha diseñado para controlar la humedad y temperatura de las corrientes de hidrógeno y aire a la entrada del stack.



Figura 116.- Sistema de humidificación de gases

El sistema de humidificación y calefacción está constituido por una serie de sensores y actuadores que hacen alcanzar las condiciones de operación fijadas por el fabricante (100 % HR y 60 °C), mostrándose un esquema del mismo en la Figura 117.

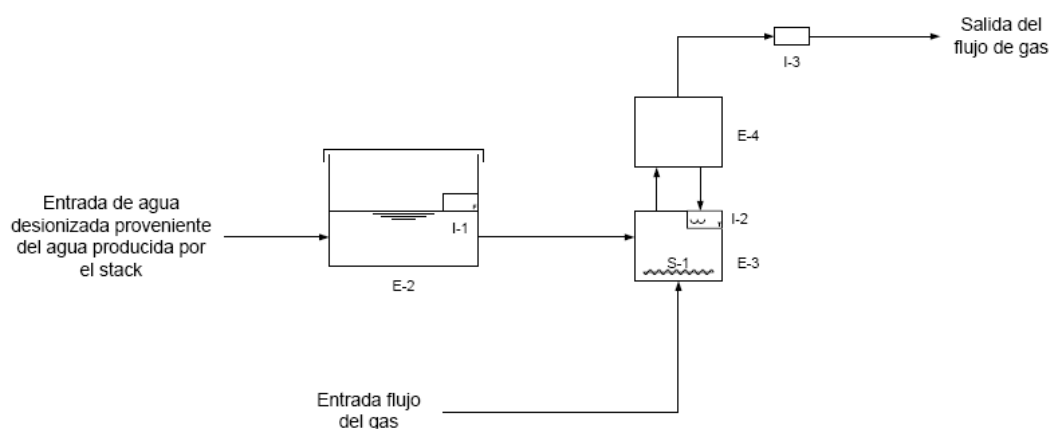


Figura 117.- Diagrama del sistema de humidificación y calefacción de los gases

| Leyenda | Elemento              | Tipo      | Función                                                                            | Señal                                       |
|---------|-----------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| E-3     | Depósito calefactor   | No aplica | Contener el agua donde se calienta a la temperatura de 60 °C                       | No aplica                                   |
| S-1     | Resistencia           | Antuador  | Resistencia de 150 $\Omega$ , que calienta el agua del depósito calefactor a 60 °C | Analógica en corriente                      |
| I-2     | Termopar              | Sensor    | Mide la temperatura del agua en el depósito calefactor                             | Excitado en corriente                       |
| E-4     | Depósito de expansión | No aplica | Almacenar el gas humidificado y caliente                                           | No aplica                                   |
| I-3     | Higrómetro            | Sensor    | Mide la humedad relativa de la corriente de gas                                    | Digital en tensión<br>0 – 5 V <sub>DC</sub> |
| E-2     | Depósito de rellenado | No aplica | Contiene agua al mismo nivel que el depósito calefactor                            | No aplica                                   |
| I-1     | Sensor de nivel       | Sensor    | Mide el nivel de agua en el depósito de rellenado                                  | Digital en tensión<br>0 – 5 V <sub>DC</sub> |

Tabla 34.- Sensores y actuadores del circuito de humidificación y calefacción

El fabricante fija un rango de temperatura de operación entre 60 °C y 65 °C, pero dado que la reacción que se produce en el stack es exotérmica, y que la eficiencia de dicha reacción está en torno al 50 %, se desprende calor; motivo por el que hay que refrigerar el stack y por el que se opta por introducir los gases a una temperatura entre 55 °C y 60 °C, inferior a la especificada por el fabricante.

El sistema de la Figura 117 está constituido por:

- Tres depósitos. Uno depósito de rellenado de agua desionizada cuya función es rellenar el depósito calefactor, que consta de una resistencia con la que calienta a 60 °C el agua para humidificar el gas; y por último un tanque de expansión en el que el gas

humidificado y calentado ocupa un mayor volumen, evitando tensiones y posibles averías en los conductos del sistema.

La resistencia que calienta el depósito calefactor es de  $165\ \Omega$  y proporciona una tensión de 110 V máximo. Por lo que, el calor aportado por esta resistencia es controlado en intensidad entre un rango de 0 a 900 mA

- Dos sensores de temperatura (Figura 112 y Tabla 30), ambos sensores son similares ya que pretenden medir temperaturas del mismo orden, aunque uno de ellos se usa para medir la temperatura del agua desionizada en el depósito calefactor, y otro es usado para medir la temperatura del hidrógeno a la salida del depósito de expansión.
- Un sensor de nivel (Figura 118), teniendo que medir el punto en el que el nivel del depósito de rellenado es de 1 l, ya que (Tabla 35) se encarga de mantener el depósito calefactor lleno mediante equilibrio entre ambos, y la capacidad de éste último es de 1 l.



Figura 118.- Sensor de nivel de R.S. Amidata

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Fabricante           | R.S. Amidata          |
| Medida               | Nivel                 |
| Rango de Temperatura | - 25 °C a 80 °C       |
| Consumo              | ~ 0 W                 |
| Señal de salida      | 0 a 5 V <sub>DC</sub> |
| Material             | Acero inoxidable      |
| Tiempo de respuesta  | < 1 s                 |
| Dimensiones          | Ø = 19 mm; L = 19 mm  |
| Precio               | 20'73 €               |

Tabla 35.- Características del sensor de nivel

- Un sensor de humedad relativa (Figura 98), situado a la salida del tanque de expansión, donde se pretende medir unas condiciones de humedad relativa del 100 % a una

temperatura en torno a los 60 °C, rangos de operación adecuados para este sensor (Tabla 22).

- Una bomba para impulsar agua desionizada al depósito de rellenado. Su función es que el nivel de agua de este depósito no sea inferior a la del sensor. Esta bomba no ha sido incluida en el diagrama de la Figura 117, ya que ha sido considerada en el esquema de la Figura 115, en el circuito de inyección de aire al cátodo; para el ánodo sería igual.

La gestión de las señales en este equipo son en bucle cerrado, es decir, los sensores transforman la medida en un señal eléctrica que se envía a un Sistema de Control. Esta señal es comparada con una señal de referencia, si no se encuentra dentro de un rango de valores admisible, el Sistema de Control envía una señal al actuador correspondiente hasta que la medida tomada por el sensor esté dentro del rango admisible definido para la operación del sistema.

El sistema de la Figura 117 sigue un proceso de operación en el que, en el estado inicial la bomba debe activarse para llenar el depósito de agua de rellenado y el depósito calefactor; mientras el sensor de nivel no detecte el nivel del agua, la bomba seguirá activa impulsando agua a ambos depósitos. Una vez coincida la señal enviada por el sensor con la de referencia, la bomba para. Simultáneamente al llenado del tanque calefactor, el sensor de temperatura que hay situado en él, detecta que la temperatura no es de 60 °C, por lo que se conecta la resistencia hasta el momento en el que esta temperatura es alcanzada.

El gas es introducido en el depósito calefactor, el cual, tiene una capacidad suficiente para humidificar al 100 % dicha corriente de gas. Al salir del tanque de expansión hay dos sensores uno para medir la humedad relativa y comprobar si las dimensiones del depósito calefactor son suficientes y otro de temperatura. Este último sensor debe medir una temperatura superior a 55 °C (no podrá ser superior a 60 °C, ya que es el valor hasta el que es calentado el agua del depósito), si la temperatura es inferior a este valor la resistencia del depósito calefactor se activa y calienta el agua hasta que el sensor del depósito calefactor mida 60 °C.

Debido a que en el proceso de humidificación, el agua del depósito de calefacción se consume y como consecuencia el nivel del depósito de agua de rellenado baja, activándose la bomba que equilibra el agua de los dos depósitos constantemente.

El stack produce unos 12 l/h de agua debida a la reacción que se produce en él. Este agua puede ser utilizada para la humidificación de los gases obteniendo un ahorro energético, ya que sale del cátodo con una temperatura superior a la ambiente, por lo que habrá que realizar un aporte de energía inferior para que alcance la temperatura deseada. Además de aportar un suministro de agua continua para compensar el consumo del circuito de humidificación y calefacción.

## 6.4 Sistema de Refrigeración

El sistema de refrigeración es el encargado de mantener la temperatura del agua de refrigeración del stack a 60 °C (dato suministrado por el fabricante). El agua de refrigeración entra al stack a 60 °C y sale de éste a 70 °C, lo que implica que la caída de temperatura que tiene lugar es de 10 °C. Además de refrigerar el agua este sistema se debe de encargar de calentar el agua inicialmente; pasando de la temperatura ambiente a la de operación, 60 °C.

Para ello este sistema consta de dos circuitos diferenciados en los que existe un intercambio de calor. Uno en el que el intercambio de calor se produce entre el fluido de trabajo (agua desionizada) y el fluido refrigerante (mezcla de agua con glicol) mediante un intercambiador de calor tubular; y el producido en un radiador, en el que los fluidos de trabajo son el agua con glicol y el aire impulsado por unos ventiladores.

Se puede distinguir dos casos que se corresponden con los posibles dos estados de operación del equipo:

- Calentamiento inicial a 60 °C del fluido de trabajo, para ello se estima el calor que es necesario aportar mediante la Ecuación 45. Para ello se ha tenido en cuenta que el punto de funcionamiento del stack es de 5 kW, considerando cada kilovatio como un litro de agua, el stack puede ser simulado por 5 l de agua desionizada. Por lo que la masa de agua (m) es de 5000 g. Siendo la capacidad calorífica del agua (c) 4'2 J/g K, y el salto de temperatura considerado de 35 K ( $dT = T_{\text{agua}} - T_{\text{amb}} = 60 - 25$ ). Por lo que el calor necesario es de 735 KJ

$$Q = c \cdot m \cdot dT$$

Ecuación 45

Empleando un tiempo de calentamiento inicial de 15 min, la potencia necesaria es de 800 W.

El calentamiento del agua del circuito de refrigeración del stack se lleva a cabo mediante celdas peltier (Figura 119) suministradas por R. S. Amidata. Dado que la potencia de calentamiento estimada es de 800 W, se necesitarán 6 celdas peltier de 8 A a 12 V (consumo de ~ 96 W, Tabla 36). Las celdas peltier estarán siempre en funcionamiento, cuando la temperatura sea inferior a 60 °C y se apagarán cuando la temperatura alcance este valor.



Figura 119.- Celda peltier de R.S. Amidata modelo PF-127-14-11-S

|                                              |                  |
|----------------------------------------------|------------------|
| Fabricante                                   | Supercool        |
| Modelo                                       | PF-127-14-11-S   |
| Caída de T máx<br>(respecto a la $T_{amb}$ ) | 71 °C            |
| Corriente máxima                             | 8'4 A            |
| Voltaje máximo                               | 15'7 V           |
| Potencia máxima                              | 131'88 W         |
| Temperatura máxima                           | 150 °C           |
| Dimensiones                                  | 40 x 40 x 3'8 mm |
| Precio                                       | 41'22 €          |

Tabla 36.- Características técnicas de la celda peltier modelo PF-127-14-11-S

En este calentamiento inicial el segundo circuito de intercambio de calor, correspondiente al radiador, permanecerá desconectado hasta que el stack comience el funcionamiento; y, por tanto, la temperatura del agua de refrigeración deba ser disminuida. Momento en el que se da el otro estado de operación posible.

- Refrigeración del agua proveniente del stack de 70 °C a 60 °C. Para ello se hace uso de los dos circuitos de intercambio de calor, según se muestra en la Figura 124. Como se puede observar en esta figura el sistema de refrigeración está formado por:

- Dos tanques de expansión. Uno para compensar las posibles pérdidas en el circuito de agua desionizada proveniente del stack. Y otro para el circuito del refrigerante (agua con glicol).
- Un intercambiador de placas (Figura 120), suministrado por Recal CL. Este intercambiador se ha seleccionado teniendo en cuenta el calor que debe aplicarse a todo el circuito de agua desionizada según la Ecuación 45, y teniendo en cuenta que la variación de la temperatura es de 10 K ( $dT = T_{\text{sal stack}} - T_{\text{ent stack}} = 70 - 60$ ), por lo que el calor necesario para toda la masa de agua del circuito de refrigeración es de 210 KJ. Tomando 5 minutos, como el tiempo necesario para realizar la transferencia de calor, se obtiene una potencia de 700 W (601'92 kcal/h). Consultando el catálogo del fabricante (Anexo III), se escoge el intercambiador de calor modelo B35 que tienen un rango de transmisión de calor de 400 kcal/h a 800 kcal/h (Tabla 37). Este intercambiador tendrá capacidad de intercambio suficiente, ya que la estimación se ha hecho teniendo en cuenta una transferencia de calor estanca, y el flujo se encuentra en constante movimiento impulsado por la bomba. Este movimiento del flujo mejora la transferencia térmica debido a las turbulencias.



Figura 120.- Intercambiadores de calor de placas

- Dos bombas como las mostradas en la Figura 121, una para el circuito de agua desionizada impulsando el agua desde el depósito de expansión al intercambiador de calor; y otra para el circuito del refrigerante, que es un circuito cerrado. La capacidad de estas bombas viene delimitada por el flujo que es necesario bombear al stack, que viene dado por el fabricante.



Figura 121.- Bomba suministrada por Conrad Electronic

|                       |                   |
|-----------------------|-------------------|
| Fabricante            | Recal CL          |
| Modelo                | B35               |
| Flujo máx             | 500 lpm           |
| Máx. P a 155 °C       | 31 bar            |
| Min. T                | - 196 °C          |
| Área de transferencia | 23 m <sup>2</sup> |
| Material              | Acero             |
| Dimensiones           | 243 x 393 x 50 mm |
| Peso                  | 6'7 kg            |
| Precio                | 440 €             |

Tabla 37.- Características técnicas del intercambiador modelo B35

|                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| Fabricante              | Conrad                |
| Flujo máximo            | 10 lpm                |
| Intensidad de operación | 1 – 1'5 A             |
| Tensión de operación    | 12 V <sub>DC</sub>    |
| Tiempo de operación     | 100 %                 |
| Dimensiones             | Ø = 38 mm; H = 140 mm |
| Peso                    | 150 g                 |
| Precio                  | 17'95 €               |

Tabla 38.- Características técnicas de la bomba de Conrad

- Tres sensores de temperatura, similares a los empleados para toda la aplicación, ya que miden temperaturas similares, en torno a los 65 °C (Figura 112 y Tabla 30). Un sensor de temperatura se encarga de medir la temperatura del agua desionizada a la salida del stack y otro a la entrada de éste. Y el tercer sensor se incorpora, junto con las celdas peltier con un controlador PID como el mostrado en la Figura 122, con ello se consigue mantener la temperatura en el punto deseado (60 °C). Este dispositivo tiene un consumo de 4W (Tabla 39).



Figura 122.- Controlador PID para el sensor de temperatura de las Peltier

|                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| Fabricante      | Ise, Inc.         |
| Modelo          | West 6500         |
| Tipo termopar   | J, K, T, L y N    |
| Señal de salida | $> 10 V_{DC}$     |
| Consumo         | 4 W               |
| Dimensiones     | 4'8 x 4'8 x 12 cm |
| Precio          | 155 €             |

Tabla 39.- Características técnicas del PID

- Un radiador como el de la Figura 123, con un precio entorno a los 80 €.



Figura 123.- Radiador comercial

El Sistema de Refrigeración sigue un sistema de gestión de las señales en bucle cerrado. El modo de operación de este sistema viene dado por un calentamiento inicial del agua de refrigeración a 60 °C mediante las celdas Peltier y la impulsión del agua desionizada por la bomba; el sensor de temperatura y el PID que lo controlan hacen que las celdas estén aportando calor siempre que la temperatura medida por este sea inferior a 60 °C, si es superada las celdas se apagan. Una vez se ha calentado el agua desionizada a 60 °C, es decir, el sensor de temperatura situado a la salida del circuito de refrigeración mide 60 °C,

comienza a operar el stack, calentándose el agua desionizada del circuito de refrigeración. En el momento en el que el sensor de temperatura situado a la salida del stack del circuito de agua desionizada mide 70 °C, se enciende el radiador y la bomba del circuito del refrigerante. De tal forma que los dos circuitos de intercambio de calor, comentados con anterioridad están en funcionamiento. El circuito de agua desionizada alcanza la caída de temperatura deseada en el intercambiador de calor, al intercambiar la temperatura con el refrigerante. Mientras que en el radiador baja la temperatura del refrigerante para poder seguir intercambiando calor con el agua desionizada proveniente del stack.

A la entrada del stack, el circuito de refrigeración mide la presión (con un sensor de presión como el mostrado en la Figura 108, con las características de la Tabla 27) y la temperatura del agua desionizada (con un sensor de temperatura Figura 90 y Tabla 14), para corroborar que son las condiciones adecuadas recomendadas por el fabricante. En caso de que la presión sea mayor de la recomendada por el fabricante, menos de 1 barg, la bomba de impulsión de agua disminuye su velocidad de giro.

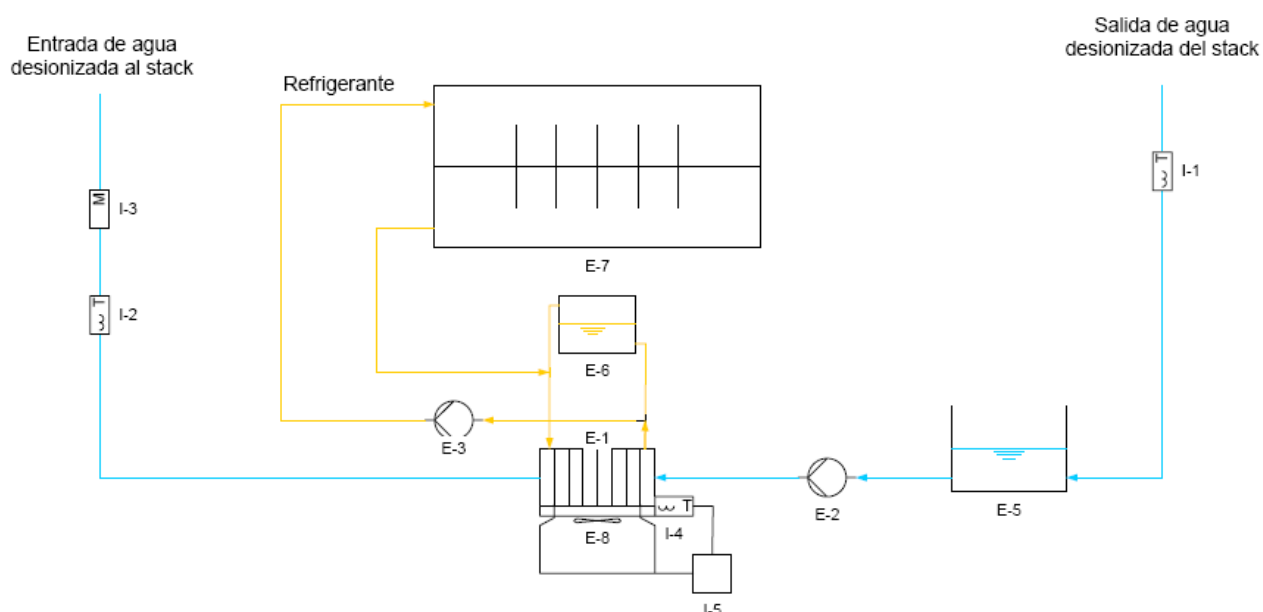


Figura 124.- Sistema de refrigeración

| Leyenda | Elemento                          | Tipo      | Función                                                                                                                                                      | Señal                                     |
|---------|-----------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| I-1     | Termopar                          | Sesor     | Medir la temperatura del circuito de agua desionizada a la salida del stack                                                                                  | Excitado en corriente                     |
| I-2     | Termopar                          | Sensor    | Medir la temperatura del circuito de agua desionizada a la entrada del stack                                                                                 | Excitado en corriente                     |
| I-3     | Sensor de presión                 | Sensor    | Medir la presión del circuito de agua desionizada a la entrada del stack                                                                                     | Analógica en corriente 4-20mA             |
| I-4     | Termopar                          | Sensor    | Medir la temperatura de las celdas peltier                                                                                                                   | Excitando en corriente                    |
| I-5     | Controlador PID                   | No aplica | Sistema de control que junto con un actuador (celdas Peltier, E-8) es capaz de mantener la temperatura constante, variable medida mediante un termopar (I-4) | Digital en tensión 0 – 10 V <sub>DC</sub> |
| E-1     | Intercambiador de calor de placas | Actuador  | Intercambio de calor entre el fluido de trabajo (agua desionizada) y el refrigerante (agua con glicol)                                                       | No aplica                                 |
| E-2     | Bomba                             | Actuador  | Impulsión del fluido en el circuito de agua desionizada                                                                                                      | Digital en tensión 0 – 12 V <sub>DC</sub> |
| E-3     | Bomba                             | Actuador  | Impulsión del fluido en el circuito del refrigerante                                                                                                         | Digital en tensión 0 – 12 V <sub>DC</sub> |

| Leyenda | Elemento              | Tipo      | Función                                                                                             | Señal                            |
|---------|-----------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| E-5     | Depósito de expansión | No aplica | Acumulación de agua desionizada para compensar posibles pérdidas en el circuito de agua desionizada | No aplica                        |
| E-6     | Depósito de expansión | No aplica | Acumulación de refrigerante para compensar posibles pérdidas en el circuito                         | No aplica                        |
| E-7     | Radiador              | Actuador  | Intercambiar calor con el refrigerante, para que mantener su temperatura                            | No aplica                        |
| E- 8    | Celdas Peltier        | Actuador  | Calentar el agua desionizada a 60 °C                                                                | Analógica en corriente 0 – 8'4 A |

Tabla 40.- Sensores y actuadores del circuito de refrigeración

## 6.5 Stack

Además del control de los parámetros que afectan a las interfaces con el stack, se deben tener en cuenta que las condiciones en el propio stack son las especificadas por el fabricante. Además de medir los parámetros objetivo de todo el SPC, es decir, la energía eléctrica que es capaz de suministrar el dispositivo.

| Elemento              | Número | Tipo   | Tipo de señal                   |
|-----------------------|--------|--------|---------------------------------|
| Tensión de celda      | 70     | Sensor | Analógico en tensión (0-1 V)    |
| Tensión de electrodos | 1      | Sensor | Analógico en tensión (0 – 60 V) |
| Termopar              | 2      | Sensor | Excitado por corriente          |

Tabla 41.- Sensores en el Stack

La tensión de celda se refiere a la diferencia de tensión entre dos celdas consecutivas, está en torno a los 0'8 V. Los fabricantes de pilas de combustible no recomiendan someter al stack a un estado en el que la tensión de celda sea inferior a 0'4 V; se podría provocar un daño irreparable en las membranas. Dado que la tensión global es la suma de las tensiones de celda, la potencia nominal del stack disminuiría.

Como consecuencia de la tensión mínima de celda, el fabricante recomienda una tensión mínima en bornas del stack y una intensidad máxima que no deben ser demandados. Según la tabla la tensión mínima es de 30 V y la intensidad máxima de 220 A. Para medir estas magnitudes se hará uso de los sensores efecto Hall desarrollados en el Apartado 5.5.

Para la medida de la tensión en bornas del stack se hace uso del sensor de la Figura 103, con las características técnicas mostradas en la Tabla 25. Y para la corriente se usa el sensor de la Figura 102 y Tabla 24, modelo HAS 300-S con un rango de medida de 0 A hasta 300 A. El modo de operar del sistema en caso de que alguno de estos parámetros sobrepasen a los valores límites es dejar de demandar carga al stack, hasta que la medida de dichos parámetros a través de los sensores estén dentro de un rango admisible.

Para medir la temperatura en las celdas del stack, se usa el termopar de la Figura 91 , que es tipo J y autoadhesivo, pudiendo adherirlo a las celdas sin necesidad de dañarlas. Se colocan dos termopares distribuido en distintos puntos del stack, para conocer la uniformidad de la temperatura en el stack.

## **6.6 Gestión del Sistema de Control (SCS)**

Desde el Sistema de Control y Seguridad, se pretende controlar todas las señales que interactúan en el sistema, para ello se realiza un tabla resumen (Tabla 42), que indica la dirección de salida o entrada con respecto al control, el tipo de señal a controlar (si es analógica o digital), el rango de control de la señal, el número de señales, y los dispositivos empleados.

| Elemento              | Nº<br>Elemnt. | Nº<br>señales | Tipo de<br>señal | Señal     | Dirección                          | Rango                          |
|-----------------------|---------------|---------------|------------------|-----------|------------------------------------|--------------------------------|
| Válvula todo-<br>nada | 4             | 4             | Digital          | Tensión   | Salida                             | 0 – 12 V <sub>DC</sub>         |
| MFC                   | 2             | 4             | Analógica        | Corriente | Entrada/Salida<br>(sensor/válvula) | 4 a 20 mA                      |
| Sensor de<br>presión  | 3             | 3             | Analógica        | Corriente | Entrada                            | 4 a 20 mA                      |
| Sensor de<br>nivel    | 2             | 2             | Digital          | Tensión   | Entrada                            | 0 – 5 V <sub>DC</sub>          |
| Termopar              | 7             | 7             | Analógica        | Corriente | Entrada                            | -60 °C a<br>350 °C             |
| Sensor de<br>humedad  | 2             | 2             | Digital          | Tensión   | Entrada                            | 0 – 5 V <sub>DC</sub>          |
| Resistencia           | 1             | 1             | Analógica        | Corriente | Salida                             | 0 a 900 mA                     |
| Bomba                 | 5             | 5             | Digital          | Tensión   | Salida                             | 0 – 12 V <sub>DC</sub>         |
| PID                   | 2             | 2             | Digital          | Tensión   | Salida                             | 220 V <sub>AC</sub> a<br>50 Hz |
| Compresor             | 1             | 1             | Digital          | Tensión   | Salida                             | 220 V <sub>AC</sub> a<br>50 Hz |
| Celda Peltier         | 6             | 6             | Analógico        | Corriente | Salida                             | 0 a 8 A                        |

Tabla 42.- Número total de señales a gestionar por el SCS