

## 3 Descripción de equipos y especificaciones técnicas

---

A continuación se expone el funcionamiento de los equipos que integran el sistema de micro-red y sus respectivas especificaciones técnicas.

### 3.1 Pila de combustible. MES-DEA 1.5

#### 3.1.1 Introducción

Las pilas de combustible obtienen energía eléctrica de un compuesto químico (combustible). Dicho compuesto sufre una reacción electroquímica, que se aprovecha para redirigir una corriente de electrones generada a través de un circuito. El combustible es oxidado en un lugar (ánodo) físico diferente a donde se reduce el comburente (cátodo).

Las pilas de combustible se diferencian de las baterías en varios aspectos. En primer lugar, la batería es un dispositivo de almacenamiento de energía, por ello, la máxima energía disponible en una batería viene determinada por la cantidad de reactantes químicos almacenados en ella. La batería dejará de producir energía eléctrica cuando los reactivos se hayan consumido. Las pilas de combustible, sin embargo, son dispositivos de conversión de energía que tienen la capacidad de producir energía eléctrica continuamente siempre que se alimente a los electrodos de combustible y de comburente.

#### 3.1.2. Antecedentes históricos

La idea originaria se debe al inglés W.R. Grove, quien en 1839 publicó una descripción de una pila de hidrógeno constituida por un conjunto de pares de electrodos de platino acoplados en serie.

Debido a dificultades técnicas de realizar electrodos con buenas prestaciones y fiables; y al gran desarrollo de otros dispositivos de generación de energía como las máquinas de vapor o los motores de combustión interna, esta tecnología quedó prácticamente en el olvido durante aproximadamente un siglo.

En el año 1935 otro inglés, F. T. Bacon retomó el estudio de pilas de combustible realizando el primer Módulo de pila de hidrógeno – oxígeno en Cambridge. Sin embargo sus trabajos se vieron interrumpidos a causa del estallido de la segunda guerra mundial. En 1953 se pudo construir un generador de 1 kW.

Ya en la década de los 60 y 70, los Programas espaciales norteamericanos GEMINI y APOLLO demostraron con éxito la capacidad de las pilas de combustible, de tecnología de polímeros sólidos, y alcalinas respectivamente. Al mismo tiempo se desarrollaron pilas de combustible para aplicaciones terrestres, concentrando los esfuerzos iniciales en la tecnología del ácido fosfórico para generación de potencia “in situ” y distribuida.

Durante la última década, el desarrollo de pilas operando a más altas temperaturas (tecnologías de carbonatos fundidos y de óxidos sólidos), presenta perspectivas muy atractivas para la generación de electricidad de centrales de potencia, presentando un rendimiento de transformación eléctrica en torno al 50%, y un rendimiento total (térmico y eléctrico) que puede situarse entre el 70 y el 80%.

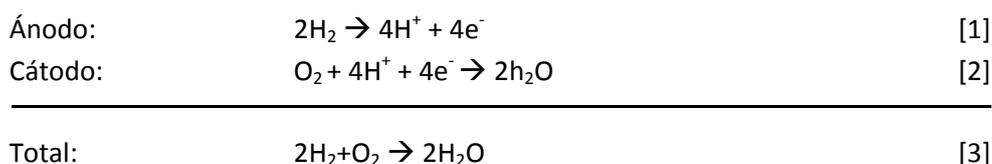
Más recientemente, ha surgido un interés creciente por las aplicaciones de las pilas de combustible para propulsión principalmente en el sector del transporte urbano. Las normativas de reducción de emisión de contaminantes y de dióxido de carbono cada vez más estrictas que vienen entrando en vigor para las grandes ciudades, orientan el desarrollo de los automóviles hacia vehículos de propulsión eléctrica que presenten emisión nula o casi nula.

Las pilas de combustible, por tanto, presentan un amplio espectro de aplicaciones en campos de gran actividad económica, que explican el interés y la implicación de los sectores industrial, eléctrico y gasista al nivel de la investigación, el desarrollo y la financiación de proyectos de esta tecnología.

### 3.1.3 Reacción electroquímica

En cada electrodo de una pila de combustible se lleva a cabo una semirreacción. La suma de ambas semirreacciones nos proporciona la reacción global.

En nuestro caso, en el que la pila de combustible utilizada es de tipo PEM, la reacción se lleva a cabo en medio ácido de la siguiente forma:



Así utilizando oxígeno, o aire, como comburente e hidrógeno, como combustible; mediante una pila de combustible es posible obtener energía eléctrica. El producto químico de la reacción es agua o vapor de agua, además de los reactivos que no hayan reaccionado.

### 3.1.4 Componentes

Las pilas de combustible se encuentran constituidas por varias celdas individuales conectadas eléctricamente en serie. Las **celdas** contienen una matriz con electrolito que se encuentra en contacto a cada lado con un electrodo, **ánodo y cátodo**.

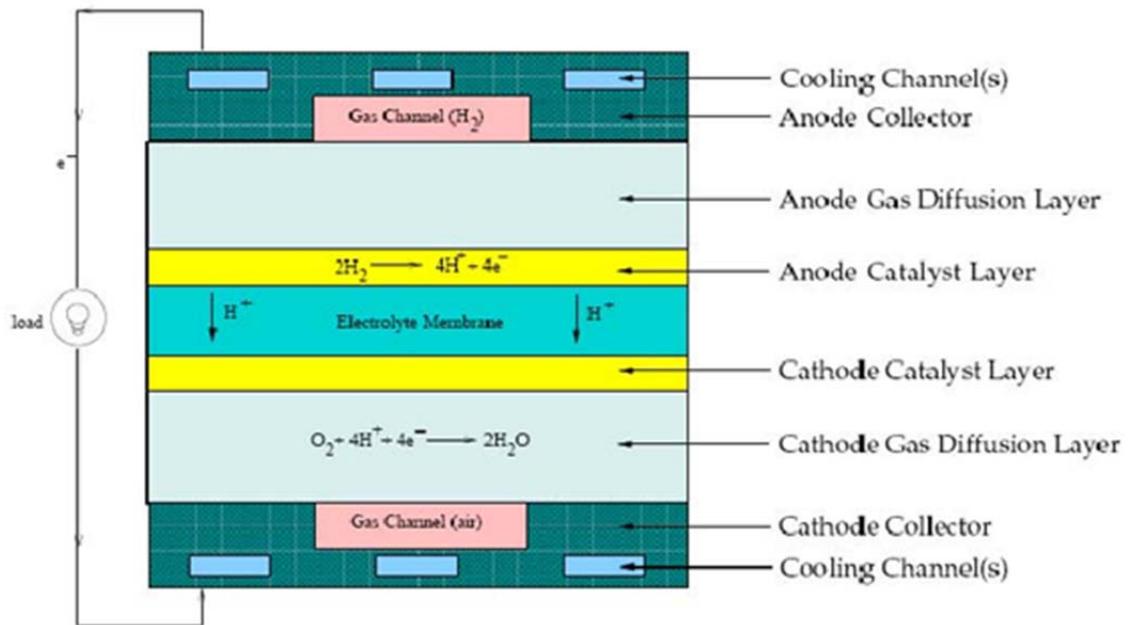


Ilustración 2 - Funcionamiento pila de combustible

Las celdas individuales se conectan a través de una placa separadora (**placa bipolar**). Al conjunto que resulta de la conexión de múltiples celdas en serie junto con las placas bipolares, se le denomina con la palabra inglesa "**stack**". A continuación se detallan los distintos componentes que forman parte de una pila de combustible típica:

### **i. Electrolito**

Medio responsable del transporte de los iones necesario para que se completen las dos semirreacciones en los electrodos.

Existen distintos tipos de electrolitos, que dependiendo de la carga del ion que conduzcan se clasifican en ácidos o alcalinos. Los electrolitos pueden ser disoluciones acuosas ácidas o alcalinas, sales fundidas o sólidos poliméricos o cristalinos con alta permeabilidad iónica. Cada electrolito presenta una temperatura a la que su conductividad iónica es máxima, lo cual, determina la temperatura de operación de la pila de combustible.

El electrolito de la pila de combustible seleccionada para el laboratorio (MES-DEA) es un electrolito sólido polimérico. Se trata de una matriz polimérica capaz de conducir cargas positivas (protones) o más exactamente el ión hidronio  $\text{H}_3\text{O}^+$ . Se le conoce como tipo PEM (*Proton Exchange Membrane* o *Poly Electrolytic Membrane*). Dicha membrana necesita estar lo suficientemente hidratada para mantener una buena conductividad iónica.

### **ii. Electrodo**

Estos a su vez se pueden dividir en dos partes una capa con el catalizador y otra formada por el medio poroso.

Deben permitir el contacto de lo que se conoce como las tres fases: el **gas** que reacciona, el **electrolito** (membrana) (que aporta o recibe los iones necesarios o producidos por la reacción) y el propio **electrodo** (que aporta o recibe los electrones necesarios o producidos por la reacción).

El gas atraviesa el medio poroso hasta llegar a la fina capa con propiedades catalíticas. El objetivo de este medio poroso es que el gas que lo atraviesa se difunda con la mayor homogeneidad posible hacia la capa electrolítica, que es donde se realiza la semirreacción electroquímica. Como catalizador es muy utilizado el platino. Diversas investigaciones buscan otros tipos de catalizadores más baratos y eficientes. El platino puede ser envenenado por impurezas como el CO.

### ***iii. MEA (Membrane Electrode Assembly)***

Al conjunto formado por la membrana con el electrolito y con los electrodos uno a cada lado se le denomina con las siglas en inglés “MEA” (Membrane Electrode Assembly).

### ***iv. Cámaras de gases***

En el lado exterior de los electrodos existen unas cámaras que se ocupan del suministro de gases a los mismos. Dichas cámaras tienen una entrada de gases, y generalmente una salida para el gas que no ha reaccionado.

Pueden ser desde un simple espacio abierto, hasta complejos circuitos de canalización, diseñados para mantener condiciones de presión parcial de dichos gases uniformes en toda la superficie del electrodo.

### ***v. Sellos***

Material normalmente de silicona que acoplado a ambos lados de la MEA aporta estanqueidad al conjunto evitando las fugas de gases.

### ***vi. Placas terminales***

Son las que se sitúan en los extremos de la pila como terminales eléctricos, actuando como colectores de corriente y contribuyendo a dar un grado adecuado de empaquetamiento al sistema.

### ***vii. Placas de cierre***

Suelen ser de material metálico y sobre ellas se insertan los pernos, arandelas y tuercas que actúan sobre todo el conjunto de componentes a modo de cierre y dando lugar a una estructura compacta y sellada.

### ***viii. “Stack”***

La monocelda que hemos visto en el esquema básico es un dispositivo que proporciona una intensidad de corriente que depende del tamaño de los electrodos (que en términos generales está en torno a  $200\text{-}400\text{ mA/cm}^2$ ), pero cuyo voltaje en los bornes de salida no llega en ningún caso al voltio. En función de ello se suelen conectar varias de estas monoceldas en serie hasta alcanzar el voltaje

necesario para la aplicación a la que se vaya a destinar la pila. A este apilamiento de monoceldas en serie se le denomina “stack”.

#### ix. Placas bipolares

Dentro del “stack”, las células individuales se conectan a través de una placa separadora (**placa bipolar**). Su diseño es un punto crítico en la eficiencia de las pilas de combustible, ya que de ella depende la capacidad de poder hacer llegar cada reactante al electrodo adecuado y de distribuir homogéneamente los gases en cada uno de ellos. Además actúa como colector de la corriente eléctrica de la celda y disipa la energía calorífica generada en el proceso electroquímico, evitando puntos calientes.

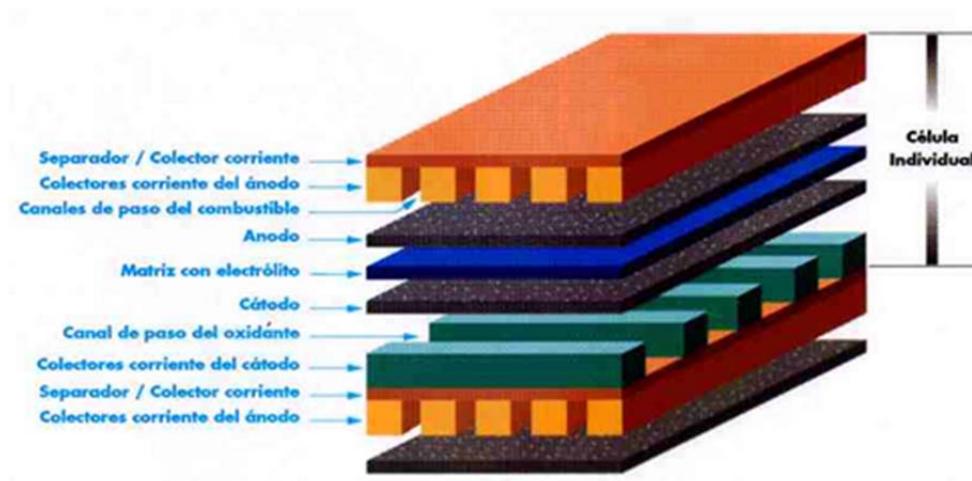


Ilustración 3 - Composición básica de un ‘stack’ típico de una pila de combustible.

Dependiendo del tipo de pila, los colectores pueden tener canales de refrigeración o no.

### 3.1.5 Selección y modo de operación de la pila de combustible MES-DEA 1.5

Las pilas de combustible tipo PEM pueden funcionar básicamente de dos modos distintos, “*flow-through*” y en “*dead-end*”.

En el modo “*flow-through*” la corriente de hidrógeno fluye continuamente a través del ánodo, por lo que sale de este de manera continua. Debido a esto, el hidrógeno que no haya reaccionado se va con la corriente de salida, no aprovechándose así el hidrógeno al máximo, por lo que, para ello, habría que recircular la corriente de salida.

En el modo “*dead-end*” la salida del ánodo se cierra, permaneciendo el hidrógeno en el ánodo hasta que este se ha consumido totalmente o hasta que la concentración de hidrógeno desciende a un nivel en el cual la reacción reduce su cinética a niveles no deseados. Esto conlleva a una mejora de la eficiencia y a una simplificación del sistema. **Por ello para el laboratorio se ha elegido este tipo de sistema al no ser necesario el uso de recirculación y a su mayor eficiencia.**

La gestión de la humidificación en estos tipos de sistemas es vital para mantener la humedad de la membrana y prevenir la condensación del vapor que generalmente se introduce en el ánodo para, mediante hidrógeno saturado en vapor de agua, mantener la humidificación necesaria en la membrana.

Esto ocurre en algunos tipos de pilas de combustible. La humidificación óptima de estas pilas de combustible varía ampliamente conforme la densidad de corriente varía. Por ello, cuando la carga externa varía, la cantidad de vapor introducido al ánodo tiene que variarse para poder operar la pila establemente.

Recientemente hay pilas de combustible que no requieren esta inyección de vapor en el ánodo como consecuencia de la mejora de las membranas electrolíticas que consiguen ser más finas y es suficiente su humidificación mediante el agua generada en el cátodo. Esto sin duda simplifica el proceso, por ello se ha elegido una pila de combustible con estas características.

Por tanto podemos concluir con que la pila seleccionada funciona en modo “dead-end”, consiguiendo mayores eficiencias, junto con la mayor simplicidad del sistema al no necesitar de recirculación, frente a las pilas que operan en modo “flow-through”; y además es una pila que no necesita de inyección de vapor hacia el ánodo.

Se señala que la pila realiza purgas periódicas para regenerar la cámara de gases eliminando residuos.

### **3.1.6 Especificaciones técnicas de la pila de combustible MES-DEA 1.5**

La pila de combustible pertenece a la marca *MES-DEA*. Funciona en modo “*Dead-End*”, lo que significa que todo el hidrógeno que entra en el ánodo se mantiene en la cámara de gases hasta que se consume como se explicó anteriormente, y posteriormente entra una corriente limpia de hidrógeno. Posee 60 celdas y puede generar una tensión entre 36 y 57 V con una corriente de hasta 55 A. El consumo de  $H_2$  es de 0,1 kg/h a plena carga. Lo que supondría una eficiencia del 45% a plena carga. Siendo esta eficiencia el cociente de la energía eléctrica producida entre el poder calorífico inferior consumido de hidrógeno.

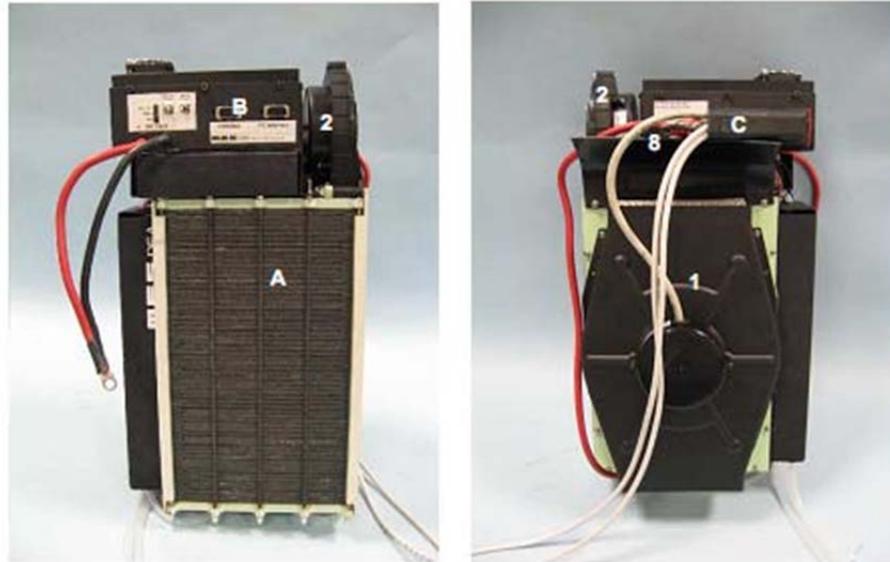
El equipo completo consiste en el “*stack*”, dos ventiladores de refrigeración y un ventilador para propulsar el aire de reacción, tres válvulas de hidrógeno y la unidad de control electrónica.

En la siguiente imagen se muestra la pila de combustible y sus diferentes partes:



Item	Description
A	PEM – Fuel Cell Stack
B	Electronic Control Unit
D	H2 Auxiliary box
2	Reaction air blower
9	Power output terminal + (see next page)
10	Power output terminal - (see next page)
23	External connection cables

Ilustración 4 - Imagen de la pila de combustible con sus diferentes partes indicadas.



Item	Description
A	PEM – Fuel Cell Stack
B	Electronic Control Unit
C	Signal Wiring
1	Cooling air blowers
2	Reaction air blower
3	Hydrogen main valve (H <sub>2</sub> in)

Item	Description
4	Hydrogen purging valve (H <sub>2</sub> out)
5	Hydrogen auxiliary pump (H <sub>2</sub> out)
6	H <sub>2</sub> inlet tube
7	H <sub>2</sub> purging tube
8	Temperature sensor connector
24	Stack H <sub>2</sub> outlet

Ilustración 5 - Imagen de la pila de combustible con sus diferentes partes indicadas.

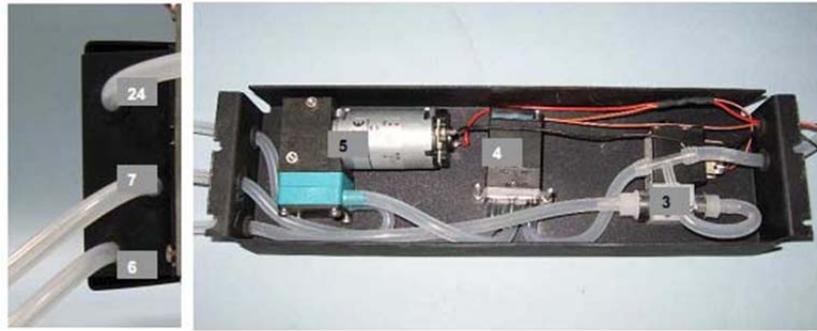


Ilustración 6 - Imagen del sistema de suministro de hidrógeno y aire, y salida de gases.

A continuación se muestra la unidad electrónica de control, (ECU, Electronic Control Unit): La siguiente figura muestra un esquema del sistema de refrigeración de la pila de combustible:



Ilustración 7 - Imagen de la unidad electrónica de control con sus diferentes partes indicadas.



Item	Front Side Description (above)	Item	Back Side Description (below)
9	Power output terminal +	15	Short circuit on/off switch
10	Power output terminal -	16	Status LED's (red, yellow & green)
11	DC In cable +	17	Serial communication port (RS232)
12	DC In cable -	18	CAN Bus port
13	Power On/Off switch	19	Signal cable connector
14	Start/Stop switch	20	Serial Number

Ilustración 8 - Imagen de la unidad electrónica de control con sus diferentes partes indicadas.

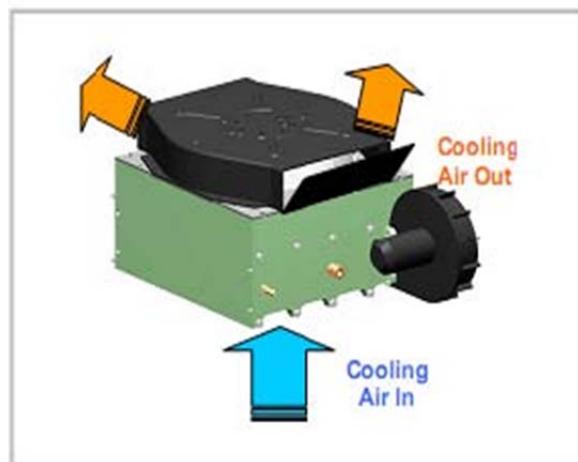


Ilustración 9 - Sistema de refrigeración de la pila de combustible.

### Características:

- Modelo: DEA 1.5 – Prototipo
- Potencia eléctrica máxima: 1,5 kW
- Potencia térmica máxima: 1,5 kW
- Rango de tensión de salida (sin regular): 36 – 57 V (60 celdas)
- Consumo de Hidrógeno (a plena carga): 20 l<sub>n</sub>/min (0,1 kg/h)
- Condiciones de operación:
  - Temperatura máxima del "Stack": 63 °C
  - Sobrepresión de hidrógeno: 0,4 – 0,5 bar

- Presión de aire: Presión ambiental
  - Alimentación de hidrógeno puro: Modo “*Dead End*”
  - Temperatura ambiente: 0 – 35 °C
  - Los gases no necesitan humidificación adicional
- Ciclo de trabajo: Continuo
  - Refrigeración: Forzada por aire
  - Tamaño del Stack (L x A x P) (Longitud x Anchura x Prdeundidad): 410 x 235 x 140 mm
  - Tamaño de la “*ECU*” (L xA xP): 185 x160 x60 mm
  - Tamaño de la “*CBCU*” (L x A x P): 205 x 85 x 35 mm (Cooling Blower Control Unit)
  - Peso del “*Stack*”: 4,5 kg
  - Peso del conjunto: 7 kg
  - Área activa: 61 cm<sup>2</sup>

## 3.2 DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO DE HIDRUROS METÁLICOS HBOND-7000H

### 3.2.1 Introducción

Uno de los elementos clave a resolver para que el uso de hidrógeno con fines energéticos adquiera solidez es el de ser producido a partir de distintas fuentes y a su vez utilizado en diversas aplicaciones. Para ello se precisa de métodos de almacenamiento de hidrógeno que sean capaces de almacenar la producción para su posterior uso, transportar el hidrógeno almacenado desde diferentes puntos, y poder cargar y descargar el hidrógeno de una forma conveniente y segura, desde y hasta el depósito de almacenamiento.

Podemos separar los diferentes sistemas de almacenamiento de hidrógeno en, *sistemas para usos estacionarios*, los cuales pueden emplearse en la generación de energía eléctrica y térmica en el sector residencial, generación descentralizada de electricidad, aplicaciones industriales, etc.; y, por otra parte, *sistemas para uso en aplicaciones móviles* (uso en automoción, consumibles, etc.).

Existen diferentes formas de almacenar hidrógeno:

- Manteniendo el hidrógeno en forma de gas a presión.
- Manteniendo el hidrógeno licuado (almacenamiento criogénico).
- En forma de hidruros metálicos (absorción/desorción de hidrógeno).
- En carbón activado, grafito, lechos de carbón molecular, nanotubos de carbono, fullerenos, etc. (procesos de sorción).
- Compuestos químicos ( $\text{NH}_3$ , tolueno, etc.) (enlace químico).
- Microesferas de vidrio.
- Zeolitas.

De todas estas opciones, únicamente las tres primeras presentan la suficiente fiabilidad como para estar presentes en el mercado y poder ser empleadas con suficientes garantías. El resto de posibilidades se encuentra aún en fases iniciales de investigación.

Un sistema de almacenamiento de hidrógeno ideal debería satisfacer los siguientes requisitos:

- Propiedades termodinámicas apropiadas.
- Cinética rápida (carga y descarga del hidrógeno).
- Elevada capacidad de almacenamiento.
- Buenas propiedades de transferencia de calor.
- Elevadas densidades gravimétricas y volumétricas (ligero en peso y mínimo en espacio).
- Largo tiempo de vida de ciclos carga/descarga.
- Elevada resistencia mecánica y durabilidad.
- Seguridad en condiciones de uso normal, y riesgo aceptable en condiciones anormales.

Otros criterios que deberían ser tenidos en cuenta, según aplicaciones concretas son:

- Pocas necesidades en cuanto a instalaciones auxiliares.
- Tecnología fiable y experimentada.
- Mínimo coste posible.
- Mínimo consumo energético posible.
- Capacidad de almacenamiento durante períodos prolongados de tiempo sin pérdidas apreciables.
- Disponibilidad para operar en diferentes condiciones ambientales.

Más concretamente, para un sistema de almacenamiento mediante hidruros metálicos se desea lo siguiente:

- El hidruro debe ser fácilmente formado y descompuesto.
- La cinética de las reacciones de absorción y desorción ha de ser lo suficientemente rápida para satisfacer los requerimientos de carga y descarga del sistema.
- La presión de equilibrio correspondiente a la temperatura de descomposición del hidruro debe ser en todo momento compatible con los requerimientos de seguridad del sistema.
- Debe mantener óptimas condiciones de operación durante el mayor número posible de ciclos carga/descarga.
- Debe poseer la máxima tolerancia posible a las impurezas gaseosas que aporte el hidrógeno, ya que éstas actúan dificultando las reacciones y disminuyendo la vida útil del sistema.

Otros condicionantes de tipo económico son:

- El coste del hidruro por unidad de almacenamiento ha de ser lo más bajo posible.
- El coste, fabricación e instalación del contenedor y del equipo auxiliar ha de ser lo menor posible, sin disminuir por ello los requerimientos de seguridad.
- Los costes de operación y mantenimiento, así como las necesidades energéticas del sistema, han de ser lo más bajos posible.

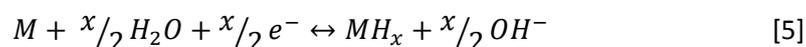
### **3.2.2 Almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos**

Los hidruros pueden obtenerse a partir de un compuesto metálico libre de hidrógeno:



Donde M es el metal

Los hidruros también se pueden formar por descomposición electroquímica del agua:



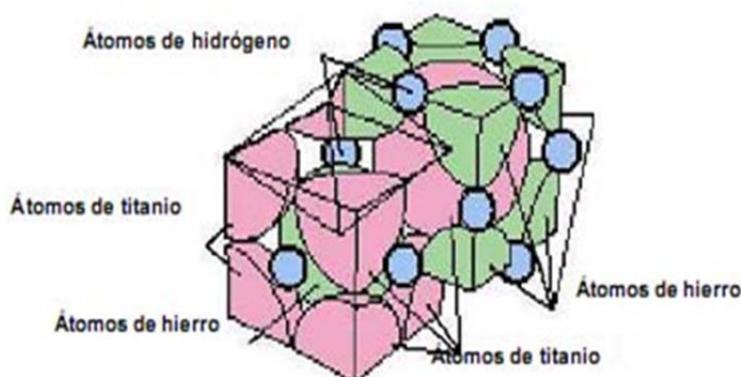
En nuestro caso la reacción que sucede es la primera [4].

La mayoría de los hidruros susceptibles de ser usados como sistema de acumulación de hidrógeno corresponden, fundamentalmente, a compuestos de *metales de transición* y *tierras raras*.

La capacidad de almacenar hidrógeno depende directamente de la estructura electrónica del metal. El hidrógeno interactúa con los electrones de la capa d cuando es absorbido en la estructura metálica. Los experimentos muestran que la capacidad de almacenar hidrógeno de estos sistemas es alta cuando la densidad electrónica de la banda 3d es baja.

La red cristalina formada por la estructura metálica acoge en huecos intersticiales a los átomos de hidrógeno. Por ello es fundamental la cantidad de defectos intersticiales de la red cristalina (huecos, defectos de línea, etc.), ya que son los que proporcionarían la capacidad de almacenar hidrógeno.

La siguiente figura corresponde a una aleación FeTi con átomos de hidrógeno alojados en huecos intersticiales de la red cristalina:



**Ilustración 10 - Átomos de hidrógeno alojados en los intersticios de FeTi.**

La cinética de absorción de hidrógeno en aleaciones de este tipo es muy rápida en comparación con los elementos puros. Éstas se presentan con las fórmulas AB, AB<sub>2</sub>, A<sub>2</sub>B, AB<sub>3</sub>, AB<sub>5</sub> y A<sub>2</sub>B<sub>7</sub>, donde A es un elemento con una gran afinidad por el hidrógeno y, por el contrario, B es un elemento con relativa poca afinidad por el mismo. Ejemplos son: FeTi (AB), ZrV<sub>2</sub> (AB<sub>2</sub>), Mg<sub>2</sub>Ni (A<sub>2</sub>B), LaNi<sub>5</sub> (AB<sub>5</sub>). En nuestro caso se dispone de un sistema de almacenamiento en hidruros metálicos del tipo AB<sub>5</sub>, concretamente se trata de *LaCeNi<sub>5</sub>*.

El proceso de difusión de hidrógeno en el interior del metal se modela normalmente mediante la segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial c_H}{\partial t} - D_H \nabla^2 c_H = 0 \quad [6]$$

Siendo *D* el coeficiente de difusión de la especie H de concentración *c*.

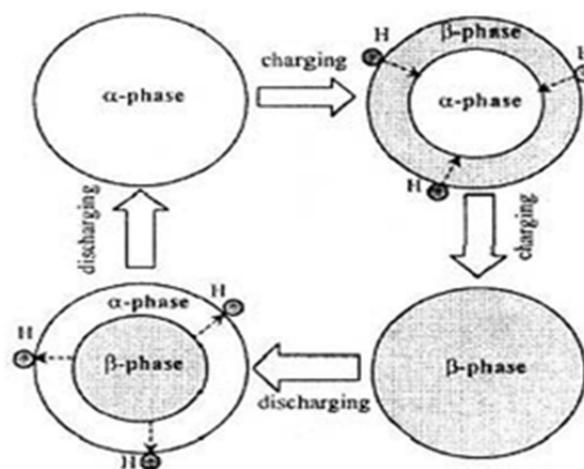
Que para partículas esféricas (expresado en coordenadas esféricas), se expresa como sigue:

$$\frac{\partial c_H(r,t)}{\partial t} - D_H \left[ \frac{\partial^2 c_H(r,t)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c_H(r,t)}{\partial r} \right] = 0 \quad [7]$$

Siendo  $D$  el coeficiente de difusión de la especie H de concentración  $c$ .

Que para partículas esféricas (expresado en coordenadas esféricas), se expresa como sigue:

El hidrógeno es alojado en forma de átomos en los huecos intersticiales de la matriz metálica. Esta matriz se expande durante la absorción de hidrógeno, a menudo perdiendo parte de su elevada simetría. Como consecuencia de la coexistencia de la fase no expandida (fase  $\alpha$ ) y la fase expandida anisotrópicamente (fase  $\beta$ ), se forman defectos de red y tensiones internas, que provocan rupturas en la quebradiza estructura metálica. En la fase  $\alpha$  sólo una pequeña parte del hidrógeno se encuentra absorbido. En la fase  $\beta$  el hidruro se encuentra totalmente formado. Por ejemplo,  $Mg_2Ni$  forma hidruros de  $Mg_2NiH_{0.3}$  y  $Mg_2NiH_4$ . La siguiente figura muestra como el hidruro pasa de una fase a otra durante los ciclos de carga y descarga.



**Ilustración 11 - Representación de las fases  $\alpha$  y  $\beta$  en carga y descarga.**

Según la regla de las fases de Gibbs, la zona donde coexisten simultáneamente las fases  $\alpha$  y  $\beta$  debería tener pendiente nula.

Las curvas que caracterizan dicho comportamiento son las isothermas de presión y concentración de  $H_2$  (curvas PCT o PCI). La siguiente figura muestra dichas curvas de un hidruro ideal para tres temperaturas diferentes.

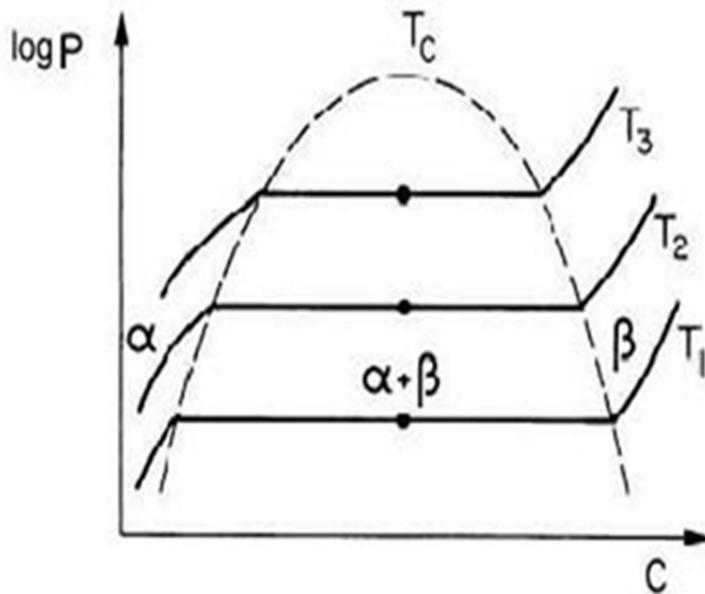


Ilustración 12 - Curvas PCI (PCT) de un hidruro ideal para tres temperaturas.

La absorción o desorción de hidrógeno por un hidruro metálico se encuentra asociada con un calor (30 W/mol hidrógeno), que debe ser evacuado o administrado, respectivamente. Conforme inicialmente el hidrógeno difunde entre los intersticios del metal, la presión de equilibrio aumenta rápidamente, análogamente a la adsorción física. Posteriormente se llega a una meseta en la que la presión permanece constante, hasta que los sitios físicos se encuentran saturados y la presión vuelve a incrementarse rápidamente con el aumento de concentración. Se puede formar una segunda fase de hidruro metálico según el tipo de hidruro metálico. Se observa entonces una segunda meseta a mayor presión y concentraciones que la anterior.

Durante la deshidrogenación, se observan menores valores de presión en función de la concentración, presentando un efecto de *histéresis*.

**La longitud de la meseta plana de la curva PCI determina la cantidad de hidrógeno que reversiblemente puede ser almacenado con pequeñas variaciones de presión (zona  $\alpha + \beta$ ).** Por tanto, *la presión correspondiente a la meseta es la presión a la cual los hidruros absorben/desorben grandes cantidades de hidrógeno de forma reversible.* Así, los diagramas PCI indican la máxima capacidad de almacenamiento alcanzable y condiciones termodinámicas para la reacción reversible.

Para muchas aplicaciones, la “presión de meseta” debe estar cercana a la presión ambiental, lo que a su vez permite el uso de contenedores de bajo peso. El comportamiento PCI real se muestra en la figura 16 para el alanato  $\text{NaAlH}_4$  dopado con Ti.

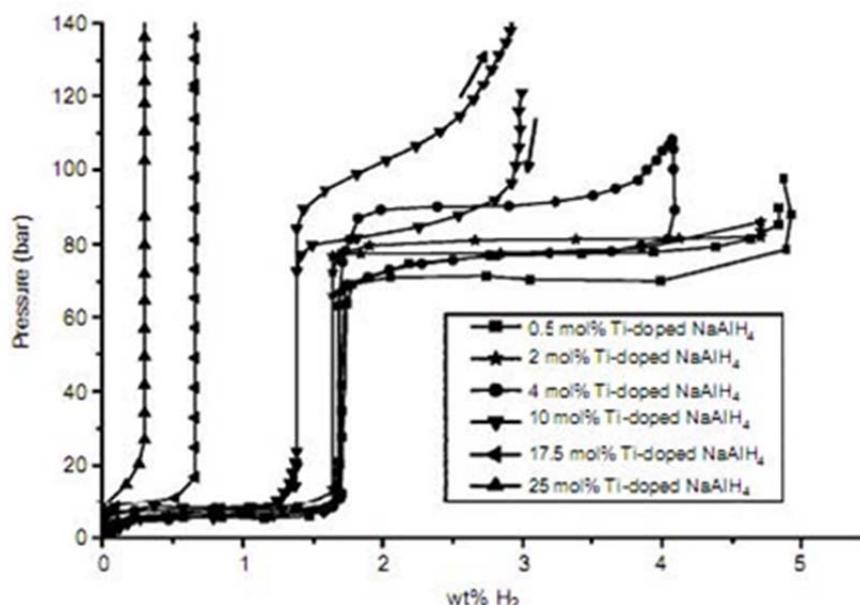
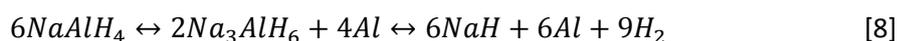


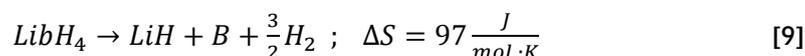
Ilustración 13 - Efecto del dopado de NaAlH<sub>4</sub> con Ti en las curvas PCI

La presencia de dos mesetas a dos presiones distintas en la figura superior se debe a las etapas de descomposición del hidruro complejo tratado en la figura (formulación 8).



Se observa que para que el sistema sea apropiado para almacenar hidrógeno es imprescindible la existencia de defectos donde el átomo de hidrógeno pueda alojarse. Al ir cubriendo dichas posiciones con otra sustancia, la estructura va perdiendo su capacidad de almacenamiento de hidrógeno. La presión de meseta puede ser variada según las necesidades mediante el empleo de diferentes aleaciones metálicas. Así los “hidruros complejos” emplean diferentes metales en forma de aleación.

La presión de equilibrio depende fuertemente de la temperatura y se encuentra relacionada con los cambios en la entalpía y entropía. *El cambio entrópico se corresponde mayoritariamente al cambio de hidrógeno gas (molecular) a hidrógeno disuelto*, que es aproximadamente 130 J/mol K para la mayoría de sistemas hidrógeno-metal bajo consideración. Pueden obtenerse menores valores de cambio de entropía ( $\Delta S$ ) en distintos hidruros complejos, como por ejemplo, considerando la siguiente reacción:



*La temperatura de operación de un sistema de hidruros metálicos es fijada mediante la presión de meseta en equilibrio termodinámico y la velocidad de la reacción global.*

Para una temperatura dada, la presión de meseta representa un punto en un gráfico Presión-Temperatura (Van't Hoff), donde el logaritmo de la presión representado frente a la temperatura recíproca es lineal con una pendiente negativa. La pendiente está relacionada con el calor de reacción, que es, el calor de hidrogenación.

Teniendo en cuenta que,

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 \quad [10]$$

$$\Delta G^0 = -RT \cdot \ln k \quad [11]$$

Combinando [11] con [10] podemos llegar a,

$$\ln k = -\frac{\Delta H^0}{R} \left[ \frac{1}{T} \right] + \frac{\Delta S^0}{R} \quad [12]$$

Por lo tanto, al representar valores de logaritmo neperiano de la constante de equilibrio medidos para cierto equilibrio en función del inverso de la temperatura se obtiene una línea recta, cuya pendiente negativa es igual a la variación de la entalpía dividida entre la constante de los gases, y la ordenada en el origen es igual a la variación de entropía dividida entre la constante de los gases.

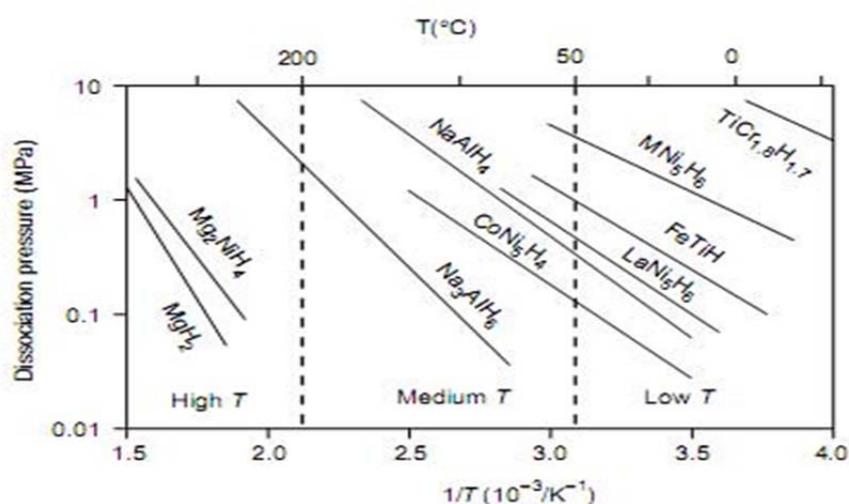


Ilustración 14 - Isocoras de Van't Hoff

De la figura se desprende que hay sólo unos pocos hidruros metálicos que muestran una presión de equilibrio de 0.1 MPa a temperaturas ligeramente superiores a la temperatura ambiente, un aspecto altamente deseable en aplicaciones móviles.

La temperatura de disociación de los hidruros, es decir, la temperatura a la que se alcanza una presión de equilibrio de hidrógeno a 1 atmósfera de presión, varía entre -35 y 1000 °C (258,15 – 1.273,15 K), y el calor de disociación en el rango de 30 a 70 kJ/mol H<sub>2</sub>. Existe una fuerte relación entre ambas magnitudes, los hidruros de mayor temperatura de disociación tienen los mayores calores de formación (se observa una pendiente más acusada). La relación no es exacta, ya que la entropía de la reacción de disociación difiere algo de unos hidruros a otros.

*Son aconsejables baja temperatura de disociación y bajo calor de reacción si se desea que un hidruro pueda emplearse como sistema de almacenamiento.*

### 3.2.3 Contenedor de hidruros metálicos HBOND-7000 H. Selección.

En el laboratorio se dispone de un almacenamiento de hidrógeno mediante hidruros metálicos con el fin de experimentar con su capacidad de operación, además de sus capacidades de almacenamiento. Pertenece a la empresa LabTech y es el Modelo HBond-7000H. Contiene una aleación de  $\text{LaCeNi}_5$ , por lo tanto como se puede observar en la anterior figura, se trata de un hidruro que funciona a baja temperatura, apto para el laboratorio.



**Ilustración 15 - Depósito de hidruros metálicos HBond-7000H**

Las aleaciones derivadas de  $\text{LaNi}_5$  muestran algunas propiedades prometedoras incluyendo velocidad y reversibilidad en los procesos de sorción con pequeños ciclos de histéresis, presión de meseta de unos pocos bares a temperatura ambiente, y buen número de ciclos soportados. La densidad volumétrica en hidrógeno (medido cristalográficamente) de  $\text{LaNi}_5\text{H}_{6,5}$  a 2 bar iguala aquella del hidrógeno molecular a 1800 bar; pero la principal ventaja es que todo el hidrógeno desorbe a una presión de 2 bar. Por ello para el laboratorio se ha decidido optar por este tipo de hidruros.

Su capacidad de almacenamiento es de  $7 \text{ Nm}^3$  por lo que teniendo en cuenta el consumo de la pila de combustible cuando esta se encuentra funcionando a plena carga ( $0,12 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ), un depósito lleno es capaz de hacer funcionar la pila de combustible a plena carga durante 58,3 horas, lo que supone casi dos días y medio de funcionamiento. Para asegurarnos de que ello es posible también hay que tener en cuenta la cinética de desorción del hidrógeno del tanque de hidruros metálicos, que debe de ser al menos igual al ratio de consumo de hidrógeno de la pila de combustible. La velocidad nominal de entrega de hidrógeno del sistema de almacenamiento se encuentra en el rango de  $4,4 - 7 \text{ Nm}^3/\text{h}$  para temperaturas de 40 y 70 °C respectivamente.

La presión de entrega del hidrógeno se produce a 2 bar, siendo la presión de operación de la pila de combustible de 1,5 bar. Para ello se ha dotado a la entrada de la pila de combustible de un regulador de presión, que se ajustará a 1,5 bar. El hidrógeno a la salida del hidruro metálico es de alta pureza (normalmente  $> 99,9\%$ ). Ello permite que el hidrógeno almacenado en estos hidruros metálicos sea utilizable en multitud de aplicaciones. El hidrógeno de alta pureza que nos proporciona nos asegura que

la pila MES-DEA no sufra envenenamiento como consecuencia de un hidrógeno con trazas de compuestos como el CO.

Hay mucha experiencia con la manufacturación de hidruros metálicos tipo AB<sub>5</sub>, ya que se producen más de un billón americano de baterías de este tipo de hidruros metálicos cada año.

Estos sistemas de almacenamiento son muy seguros de manejar. Pero a causa de su alto peso, el almacenaje en hidrógeno permanece por debajo de 2% en peso. Lo que supone el mayor inconveniente para este tipo de almacenamiento. En la siguiente figura se ilustra la alta densidad de energía por volumen debido al contenido de hidrógeno almacenado en hidruros metálicos, así como su baja densidad de energía por masa, como consecuencia del sistema de almacenamiento.

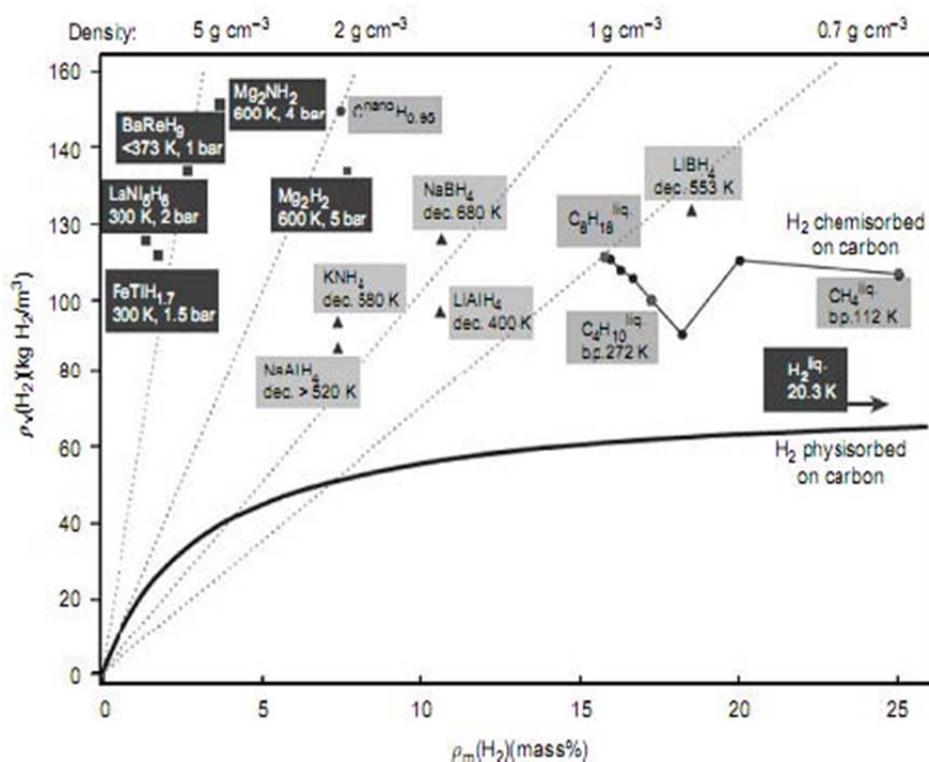


Ilustración 16 - Hidrógeno almacenado por masa y volumen.

En la siguiente tabla se muestran las capacidades de almacenamiento en peso actuales, así como sus entalpías de formación de hidruro metálico:

Contenido Energético de Varios Tipos de Hidruros Metálicos					
Tipo	Compuesto	Hidruro formado	Capacidad H <sub>2</sub> (% peso)	Densidad energética (kJ/kg Hidruro)	Entalpía de formación (kJ/mol H <sub>2</sub> )
AB <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub>	LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	1,3	1.850	30,1
AB	TiFe	TiFeH	1,7	2.560	28,1
AB <sub>2</sub>	ZrMn <sub>2</sub>	ZrMn <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,7	2.419	53,2
A <sub>2</sub> B	Mg <sub>2</sub> Ni	Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	7,0	10.000	64,5

Metal	Mg	MgH <sub>2</sub>	7,7	11.000	74,2
-------	----	------------------	-----	--------	------

Tabla 1 - Contenido Energético de Varios Tipos de Hidruros Metálicos.

Se puede observar que el principal inconveniente del almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos es la baja densidad energética por masa (baja cantidad de energía por unidad de masa). Esto presenta un inconveniente para aplicaciones en transporte, si bien existen transportes como barcos, submarinos, etc. en los que dicha característica tiene menor repercusión. En sistemas estacionarios como en nuestro caso esto en principio no supone ningún problema.

El sistema de almacenamiento de hidruros metálicos del que se dispone en el laboratorio es una aleación basada en el tipo AB<sub>5</sub> que contiene Lantánido, Cerio y Níquel. Concretamente (LaCe)<sub>5</sub>Ni.

La entalpía de formación de hidruro proporcionada por el fabricante es de -30,8 kJ/mol H<sub>2</sub>. Lo que se ajusta al valor normal presentado en bibliografía para este tipo de compuestos (tipo AB<sub>5</sub>).

El hidruro se encuentra triturado, formando un polvo cuyas partículas tienen un diámetro inferior a 0,1 mm. Esto en principio favorecerá las reacciones de absorción/desorción. En la figura siguiente se observa el efecto de la superficie del hidruro sobre las curvas PCI.

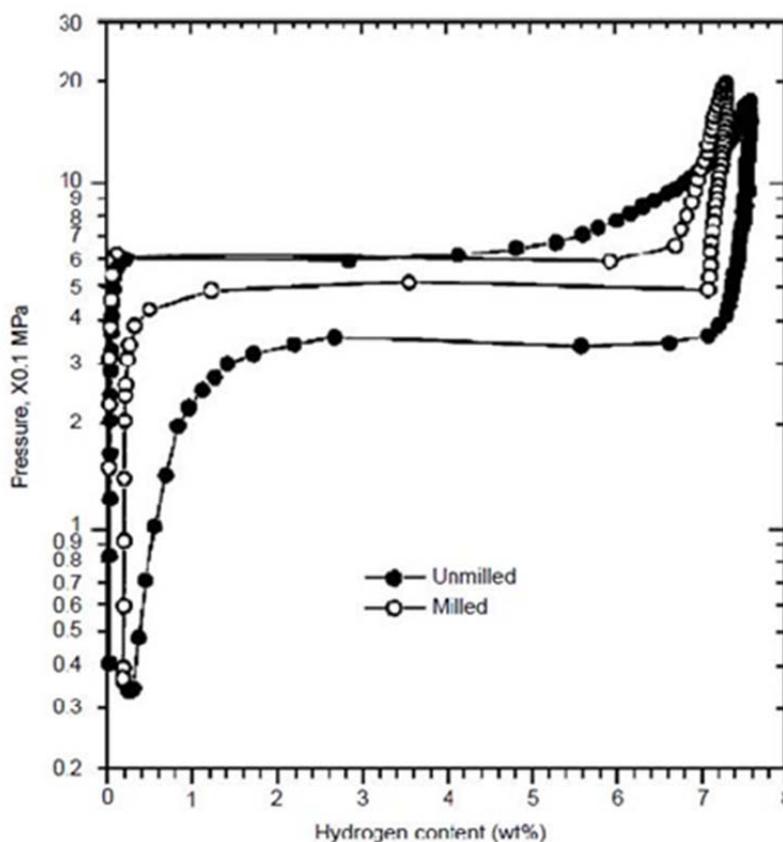


Ilustración 17 - Curvas PCI para el hidruro formado por el MgH<sub>2</sub>

Se observa como el ciclo de histéresis para la aleación metálica se reduce al emplearse el compuesto de forma triturada. Es notable el aumento de presión para el camino de regreso dentro del ensayo del ciclo de histéresis, reduciéndose así la histéresis producida.

### 3.2.4 Especificaciones técnicas del contenedor HBOND-7000H

Nº	Especificaciones Técnicas del tanque de hidruros metálicos HBOND-7000H	Requerido
1	Capacidad nominal de almacenamiento de hidrógeno	Mínimo 7 Nm <sub>3</sub> H <sub>2</sub>
2	Presión de Carga	5 bar g
3	Temperatura de Carga	≤ 30 °C
4	Velocidad de Carga del Hidrógeno	7 Nm <sub>3</sub> /h H <sub>2</sub>
5	Pureza del hidrógeno de entrada al tanque	≥99.9 %
6	Contenido en oxígeno del hidrógeno de entrada al tanque	≤ 10 ppm
7	Punto de Rocío a Presión Atmosférica para el Hidrógeno (entrada)	≤ -40 °C
8	Velocidad Nominal de descarga del Hidrógeno	4.4 Nm <sub>3</sub> /h H <sub>2</sub>
9	Velocidad Máxima de Descarga del Hidrógeno (*)	7 Nm <sub>3</sub> /h H <sub>2</sub> (con agua caliente)
10	Presión de Entrega del Hidrógeno	Mínimo 2 bar g
11	Temperatura del Agua de Refrigeración	25 °C
12	Temperatura del Agua para calefacción del tanque	40-70 °C
13	Flujo de agua caliente hacia el tanque caliente	0.1 m <sup>3</sup> /h
14	Número de ciclos completos (carga/descarga)	1000 ciclos
15	Instalación	Interior/Exterior
16	Temperatura ambiente mínima de diseño	-40 °C
17	Presión de la válvula de seguridad	25 bar

Pertenece a la empresa LabTech Int. LTD.

<b>Modelo:</b>	<b>HBOND-7000H</b>
Capacidad de Hidrógeno:	7000 Normal litros de Hidrógeno
Diámetro:	186 mm
Longitud:	1400 mm
Peso:	90 kg (46 kg Metal Hidruro)
Material del Recipiente:	SS alloy type 317
Intercambiador de Calor:	(interno): SS

Composición:

(LaCe)Ni <sub>5</sub>	%
La + Ce	67,9
Ni	31,1

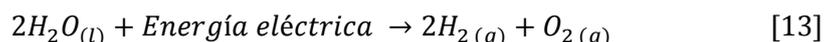
Tabla 2: Composición de hidruros metálicos del sistema de almacenamiento

La entalpía de formación de hidruro proporcionada por el fabricante es de -30,8 kJ/mol H<sub>2</sub>. El hidruro se encuentra triturado, formando un polvo cuyas partículas tienen un diámetro inferior a 0,1 mm.

### 3.3 Electrolizador de agua

#### 3.3.1 Introducción

El principio que rige el funcionamiento de un electrolizador es el mismo que rige el funcionamiento de una pila de combustible con la diferencia de que la reacción electroquímica se dará en sentido contrario. Por tanto será necesario aportar energía para separar dos moléculas de agua en dos moléculas de hidrógeno y en una molécula de oxígeno, esta energía se aporta en forma de energía eléctrica.

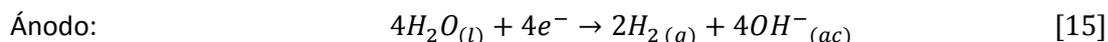
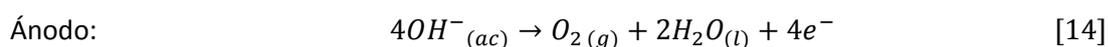


El descubrimiento de la electrolisis del agua fue en medio ácido, y posteriormente se fueron utilizando diferentes métodos como lo es en medio básico. Actualmente la electrolisis de agua en medio ácido se realiza mediante el uso de la tecnología de membrana polimérica de intercambio de protones en estado sólido (electrolizadores tipo PEM). Las semirreacciones implicadas en un electrolizador tipo PEM son las mismas que las que se llevan a cabo en una pila de combustible tipo PEM (expuesto anteriormente), pero en sentido inverso.

La electrolisis mediante electrolizadores tipo PEM presenta como ventajas una mayor seguridad y fiabilidad al no existir un fluido en movimiento, una mayor pureza de los gases obtenidos, y una mayor densidad de corriente.

Sin embargo, el empleo de electrolisis alcalina conlleva menos costes de inversión que el empleo de electrolisis mediante PEM. La pureza del hidrógeno proporcionada por un electrolizador alcalino es más que suficiente para las necesidades requeridas tanto por los hidruros metálicos como por la pila de combustible, y debido a la diferencia de coste entre un electrolizador tipo PEM y uno alcalino (coste del electrolizador PEM varias veces superior al coste del electrolizador tipo alcalino), se ha optado por implantar un electrolizador alcalino.

Las semirreacciones que se llevan a cabo en los electrodos de un electrolizador alcalino son:



El voltaje que se requiere entre el ánodo y el cátodo, así como los flujos máxicos producidos de hidrógeno y oxígeno, son las características principales que definen el comportamiento de una celda del electrolizador. Un electrolizador alcalino bipolar consta de una serie de celdas conectadas eléctricamente en serie.

El hidrógeno se genera en el cátodo. Los aniones hidroxilo (OH<sup>-</sup>), generados en el cátodo, atraviesan la membrana porosa hasta llegar al ánodo donde se disocian moléculas de agua y de oxígeno (dos moléculas de agua y una de oxígeno por cada cuatro iones hidroxilos), cediendo electrones (dos electrones por cada molécula de agua generada). El oxígeno se escapa del compartimento anódico en forma gaseosa.

Los electrolizadores que trabajan a presión atmosférica son principalmente de tipo unipolar, mientras que las unidades que trabajan a presión son de tipo bipolar. Las principales ventajas de los electrolizadores bipolares frente a los unipolares son: menor espacio disponible y embarrados eléctricos más pequeños. Las ventajas de los electrolizadores unipolares frente a los bipolares se centran en la menor existencia de corrientes parásitas colaterales, las cuales, disminuyen la eficiencia del electrolizador.

### 3.3.2 Especificaciones técnicas

El electrolizador es el SPE Hydrogen Generator Assembly de United Technologies Hamilton Standard, siendo el equipo más antiguo que dispone el laboratorio, teniendo una antigüedad cercana a las 2 décadas.



Ilustración 18 - Vista frontal del electrolizador

El equipo es un electrolizador de una presión moderada (7 bar), basado en la tecnología de electrolisis del agua SPE.

El stack es un ánodo líquido SPE consistente en seis células.

Potencia máxima	1 kW
I máxima	80A
Presión máxima de H2	690kPa
Presión máxima de O2	138 kPa

Tabla 3: Datos básicos electrolizador

I (A)	H2 (grs/h)	O2(grs/h)	Voltaje (V)
10 Amps	2,3	17,9	9,42
25 Amps	5,6	44,8	9,90

<b>40 Amps</b>	9,0	71,6	9,96
<b>60 Amps</b>	13,5	107,4	10,20
<b>80 Amps</b>	18,0	143,3	10,32

Tabla 4 : Datos para diferentes corrientes del electrolizador.

### 3.4 Convertidor DC/DC de pila de combustible

#### 3.4.1 Introducción

Se trata de un convertidor de potencia, prototipo de la compañía WindInertia technologies S.L., que transforma la corriente continua que genera la pila, en corriente continua que vuelca en el Bus de Corriente, a la tensión del Bus de Corriente.

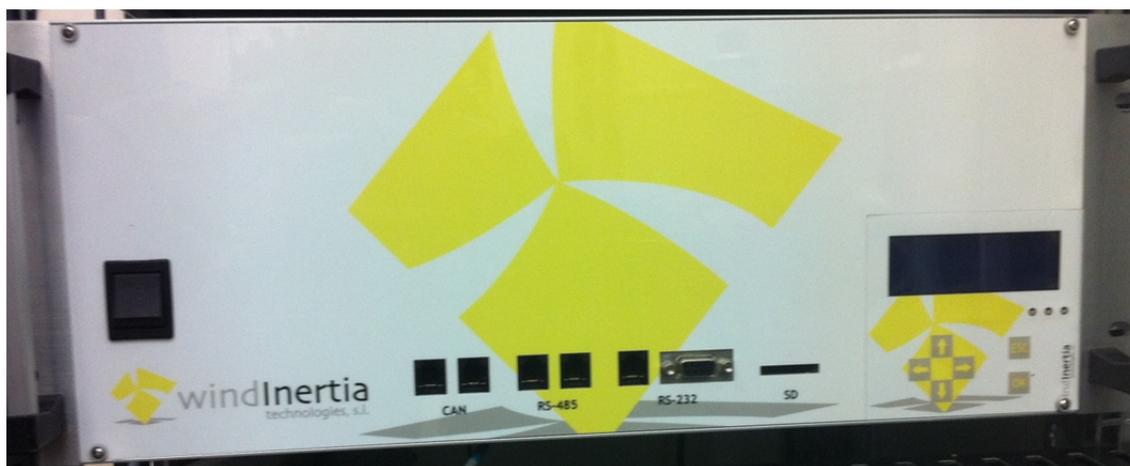


Ilustración 19 - Vista frontal de convertidor de pila de combustible

El convertidor desde el punto de vista de la pila funciona como una carga que demanda una corriente, aunque tenga dos modos de funcionamiento, consigna de potencia y consigna de corriente, el control se realiza sobre la corriente. Y desde el punto de vista del Bus de Corriente funciona como una fuente de energía, que suministra una potencia a la tensión del Bus de Corriente.

El convertidor de la pila de combustible, se puede definir como reductor-elevador, ya que es capaz de aumentar la tensión, así como disminuir la tensión para adaptarla a la tensión del Bus de corriente.

El convertidor puede ser puesto en marcha desde el propio teclado que dispone, en modo local, o a través de comunicación CANbus. Además tiene configurado por defecto unas tensiones, corrientes y potencias máximas y mínimas, también está limitada la pendiente de solicitud de potencia, siguiendo esta una rampa. Los equipos están protegidos mediante software, y mediante fusibles contra sobrecorrientes.

#### 3.4.2 Especificaciones técnicas

Potencia máxima	3000 W
Tensión máxima Bus de Corriente	75 VDC
Tensión máxima Pila de combustible	75 VDC
Corriente máxima Bus de Corriente	40 A
Corriente máxima Pila de combustible	40 A

Rendimiento máximo	96%
--------------------	-----

Tabla 5: Especificaciones técnicas del convertidor de la pila de combustible

## 3.5 Convertidor DC/DC del electrolizador

### 3.5.1 Introducción

Se trata de un convertidor de potencia, prototipo de la compañía WindInertia technologies S.L., que transforma corriente continua proveniente del Bus de Corriente, en corriente continua que alimentará al electrolizador.



Ilustración 20 - Vista frontal del convertidor del electrolizador

El convertidor desde el punto de vista del Bus de Corriente funciona como una carga que demanda una corriente, aunque tenga dos modos de funcionamiento, consigna de potencia y consigna de corriente, el control se realiza sobre la corriente. Y desde el punto de vista del electrolizador funciona como una fuente de energía, que suministra una potencia a la tensión de polarización del electrolizador.

El convertidor del electrolizador, se puede definir como reductor, ya que únicamente puede disminuir la tensión del Bus de Corriente para adaptarla a la tensión de polarización del electrolizador.

El convertidor puede ser puesto en marcha desde el propio teclado que dispone, en modo local, o a través de comunicación CANbus. Además tiene configurado por defecto unas tensiones, corrientes y potencias máximas y mínimas, también está limitada la pendiente de solicitud de potencia, siguiendo esta una rampa. Los equipos están protegidos mediante software, y mediante fusibles contra sobrecorrientes.

### 3.5.2 Especificaciones técnicas

Potencia máxima	3000 W
Tensión máxima Bus de Corriente	75 VDC
Tensión máxima Electrolizador	25 VDC
Corriente máxima Bus de Corriente	40 A
Corriente máxima Electrolizador	80 A
Rendimiento máximo	96%

Tabla 6: Especificaciones técnicas del convertidor del electrolizador

## 3.6 Fuente de alimentación. LBS 60-100

### 3.6.1 Introducción

La fuente de alimentación es un convertidor AC/DC, y que por tanto, transforma la corriente alterna en continua. Tiene una toma de corriente trifásica de donde se nutre.

Esta fuente es la que proporcionará al sistema la potencia disponible. Se trata de simular la producción eléctrica de un campo fotovoltaico. También se puede simular la generación de electricidad de un campo eólico.

### 3.6.2 Especificaciones técnicas

Se trata de una fuente de alimentación Programable. El equipo pertenece a la firma *Powerbox* y es capaz de proporcionar una potencia de 6 kW, de energía eléctrica en corriente continua.

Para realizar la Programación vía software mediante computador se emplea una tarjeta de comunicación GPIB de *National Instruments*. El Modelo de la tarjeta es "NI PCI-GPIB" y es compatible con Windows 2000/XP.

La conexión entre la tarjeta y la fuente de alimentación se realiza mediante un cable específico para el tipo de conexión GPIB.

Así mediante un Programa como por ejemplo LabView®, que es el que se está empleado, se puede realizar un control sobre la fuente de alimentación.

Además incorpora dos puertos de programación analógica, funcionan de 0-10 Volts, una es la consigna de tensión máxima de la fuente, y el otro la consigna de corriente máxima, siendo el rango de funcionamiento, 0-60V y de 0-100A respectivamente. Además tiene dos puertos de salida analógica también de 0 a 10 Volts, que da información de tensión y corriente a la que está funcionando la fuente de alimentación.

A continuación se muestra una imagen de la fuente de alimentación:



**Ilustración 21 - Fuente programable**

Presenta las siguientes especificaciones eléctricas:

<b>Modelo 60-100</b>	
<b>Índices de salida:</b>	
Tensión de salida <sup>a</sup>	0 – 60 V
Intensidad de salida <sup>b</sup>	0 – 100 A
Potencia de salida	6000 W
<b>Regulación de la línea: <sup>c</sup></b>	
Tensión (0.01% de $V_{max}$ )	6 mV
Intensidad (0.05% de $I_{max}$ )	50 mA
<b>Regulación de la carga: <sup>d</sup></b>	
Tensión (0.05% de $V_{max}$ + 5 mV)	35 mV
Intensidad (0.1% de $I_{max}$ + 20 mA)	120 mA
<b>Precisión de Medida:</b>	
Tensión (0.15% de $V_{max}$ )	90 mV
Intensidad (0.5% de $I_{max}$ )	500 mA
<b>Ruido de Salida (0 – 20 MHz):</b>	
Tensión (p-p)	100 mV
<b>Rizo de salida (rms):</b>	
Tensión	15 mV
Intensidad <sup>c</sup>	450 mA
<b>Rango de Ajuste de OVP:</b> (0% to 103% de $V_{max}$ )	
	0 – 61.8 V
<b>Eficiencia: <sup>f</sup></b>	
	0.89
<b>Desviación (30 minutos): <sup>g</sup></b>	
Tensión (0.04% de $V_{max}$ )	24 mV
Intensidad (0.6% de $I_{max}$ )	600 mA
<b>Desviación (8 horas): <sup>h</sup></b>	
Tensión (0.02 % de $V_{max}$ )	12 mV
Intensidad (0.04 % de $I_{max}$ )	40 mA
<b>Coeficiente de temperatura: <sup>i</sup></b>	
Tensión (0.04 % de $V_{max}/^{\circ}C$ )	24 mV
Intensidad (0.06 % de $I_{max}/^{\circ}C$ )	60 mA

- a) La tensión mínima de salida es <0,3% de la tensión de salida fijada a cero.
- b) La tensión mínima de salida es <0,2% de la corriente de salida fijada a cero cuando se mide con carga.
- c) Para una variación de la tensión de entrada (corriente alterna), con carga constante.
- d) Para una variación de la carga de 0 – 100 %, con tensión nominal constante en la línea.
- e) El ruido de corriente se mide de 10 – 100 % de la tensión de salida, a intensidad máxima, y operando la unidad en modo intensidad constante.
- f) Eficiencia típica con tensión de entrada nominal y potencia máxima de salida.
- g) Desviación máxima durante 30 minutos con línea, carga, y temperatura, constante después de encendido.
- h) Desviación máxima durante 8 horas con línea, carga, y temperatura, constante después de 30 minutos de calentamiento.

- i) Cambio en la salida en función del cambio de la temperatura ambiente expresada en °C, con línea y carga constantes.

**Tabla 7: Especificaciones técnicas de la fuente programable**

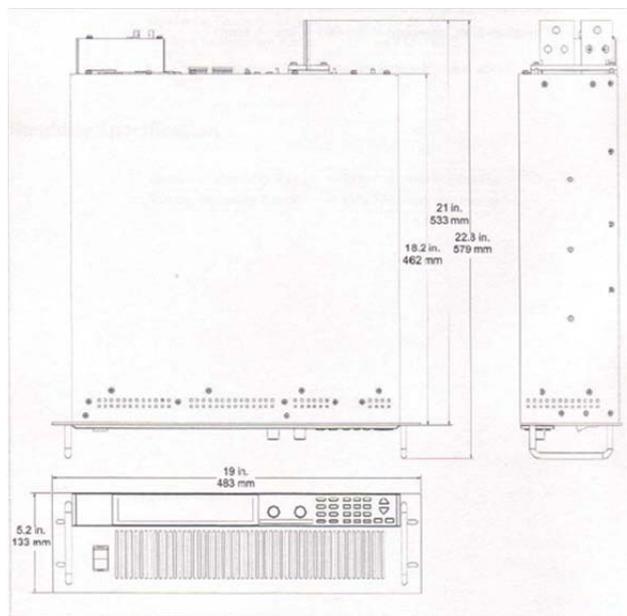
Eficiencia

- 89% de eficiencia a voltaje nominal de la línea y a temperatura ambiente
- Mínimo de 82% de eficiencia.

**Especificaciones mecánicas**

Peso: 34 kg.

Dimensiones: A continuación se presentan las dimensiones con la fuente acotada.



**Ilustración 22 - Plano acotado de la fuente programable**

## 3.7 Carga electrónica. PLA 2.5k-60-1000

### 3.7.1 Introducción

La carga electrónica programable se ha adquirido a la empresa AMREL. La función de la carga electrónica es absorber la corriente generada por la pila de combustible, y una vez acoplada al sistema, simular la demanda de energía eléctrica, tanto en el caso de que estemos ante una instalación aislada como en el caso de que se esté simulando una planta de generación conectada a la red eléctrica.

A continuación se muestra una imagen del equipo.



Ilustración 23 - Vista frontal de la carga electrónica

La carga se puede operar tanto de forma local (desde el teclado del panel frontal del equipo) como de forma remota.

La carga puede funcionar en cuatro modos de operación, estos son, voltaje, corriente, resistencia o potencia constante. Para complementar estas funciones, la carga se encuentra provista de un generador transitorio interno, para simular operaciones dinámicas. En los modos de operación transitorios se puede trabajar a frecuencia transitoria, carga cíclica transitoria, y transitorios de alta velocidad. Además dispone de 32 Programaciones diferentes.

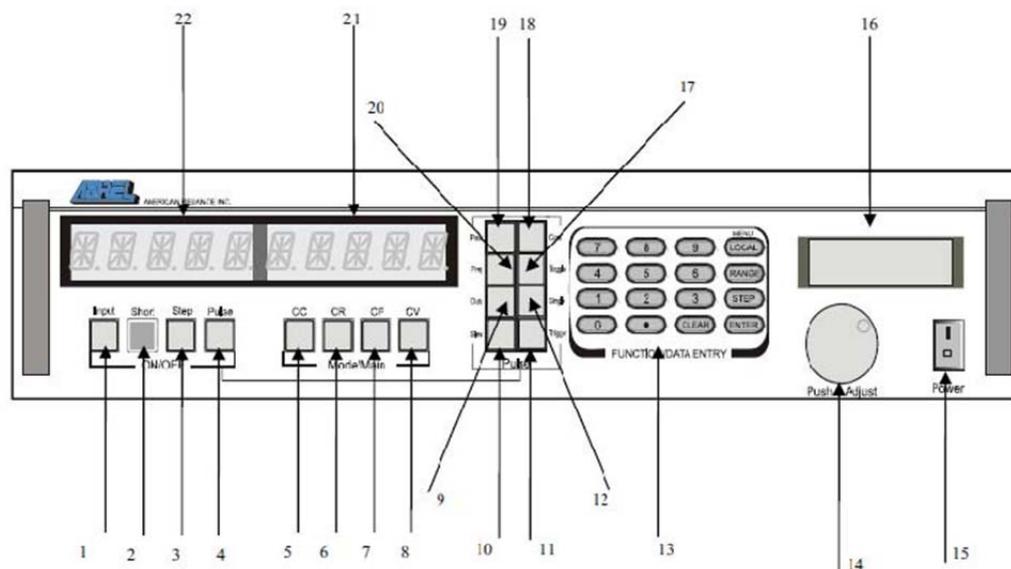
La fuente dispone de protecciones Programables, estas son, protección por sobre-voltaje (OVP, Over Voltage Protection), sobre-intensidad (OCP, Over Current Protection), sobre-potencia (OPP, Over Potencia Protection). Además dispone de protección por exceso de temperatura (OTP, Over Temperature Protection) y del hardware adecuado para proteger la carga bajo diversas condiciones inestables (transitorios).

Cuando la carga electrónica se enciende, en la pantalla aparece el mensaje "LCL" para establecer comunicación local (vía teclado del equipo). Cuando la carga se conecta vía GPIB, USB, Ethernet o RS-232, la pantalla entonces muestra información acerca de esta conexión mostrando las siglas GPIB/ETHER/RS-232/USB para informar al usuario que el teclado de la carga se encuentra deshabilitado y que en ese momento la carga está siendo controlada remotamente. Para pasar la carga al modo de operación local se puede presionar la tecla "LOCAL" y se cambiará el control remoto por acceso local.

La carga puede ser controlada mediante 1 puerto analógico de 0 a 10 Volts, para controlar el modo de

funcionamiento (Control de potencia, resistencia, corriente, tensión) en el rango adecuado (hidh, mid, low). Además dispone de dos puertos de salida analógicos que envía información de la tensión y la corriente a la que está operando la carga electrónica.

### 3.7.2 Especificaciones técnicas

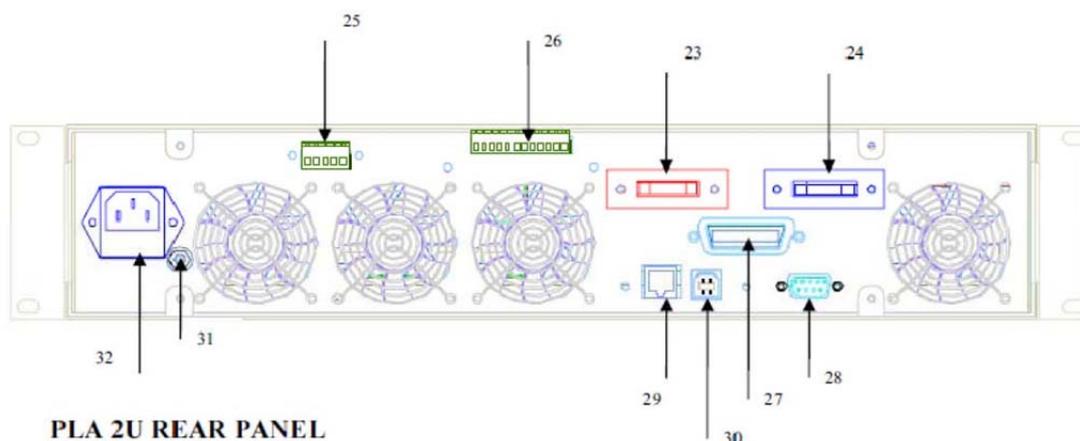


**Note:** Please refer to the Specifications for detailed unit dimensions

#### Front Panel Descriptions

- |   |  |
|---|--|
| 1. Input ON/OFF Button                    | 12. Single                                   |
| 2. Short ON/OFF Button                    | 13. Front Panel Keypad                       |
| 3. Step ON/OFF Button                     | 14. Encoder                                  |
| 4. Pulse (Transient) ON/OFF Button        | 15. Power ON/OFF Button                      |
| 5. Constant Current Mode Selection        | 16. LCD Display                              |
| 6. Constant Resistance Mode Selection     | 17. Toggle Transient Operation Selection     |
| 7. Constant Power Mode Selection          | 18. Continuous Transient Operation Selection |
| 8. Constant Voltage Mode Selection        | 19. Transient Level Setting                  |
| 9. Slew Rate Duty Cycle Setting           | 20. Transient Frequency Setting              |
| 10. Slew Rate Rising/Falling Time Setting | 21. Current & Warning Signal LED Display     |
| 11. Manual Trigger Button                 | 22. Voltage LED Display                      |

Ilustración 24 - Esquema del panel frontal de la carga electrónica



**PLA 2U REAR PANEL**

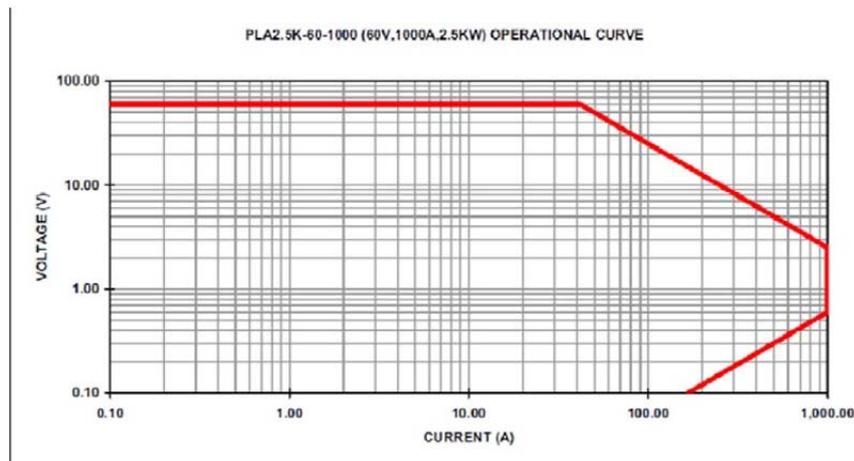
Rear Panel Descriptions

- 23. (+) Positive input terminal.
- 24. (-) Negative input terminal.
- 25. Relay connector.
- 26. External programming port.
- 27. Standard GPIB interface connector.
- 28. Standard RS-232 interface connector.
- 29. Standard RJ45 for Ethernet (LAN).
- 30. Standard USB interface connector.
- 31. Chassis / Line ground lug screw.
- 32. AC power inlet with external fuse holder.

Ilustración 25 - Esquema del panel trasero de la carga electrónica

<b>PLA2.5K-60-100</b>			
<b>Modo de Voltaje Constante</b>		<b>Modo de Potencia Constante</b>	
CVH Rango	Rango Tiempo Transitorio	CPL Rango	0,000 – 250,0 W
CVM Rango	Coefficiente de temperatura		@ I ≤ 100,0 A
CVL Rango	0,000 – 6,000 V	Rango Tiempo Transitorio	Igual que en modo CC
		300 ppm/°C de la potencia	
• Banda rápida (default,Osc1)	0,500 – 51,19 ms	<b>Programa</b>	
• Banda lenta(osc2,osc3)	0,500 – 511,9 ms	CPH Resolución	0,156 W
Coefficiente de temperatura	100 ppm/°C del voltaje	CPM Resolución	0,078 W
<b>Precisión</b>		CPL Resolución	0,016 W
CVH Resolución	3,750 mV	CPH Precisión	1,00% ± 12,50 W
CVM Resolución	1,875 mV		@ I > 50,00 A
CVL Resolución	0,375 mV		& V > 6,000 V
CVH Precisión	0,05% ± 0,060 V	CPM Precisión	1,00% ± 12,50 W
CVM Precisión	0,05% ± 0,060 V		@ I > 10,00 A
CVL Precisión	0,05% ± 0,060 V		& V > 6,000 V
Precisión tiempo transitorio	10,0% ± 50% del tiempo mínimo	CPL Precisión	1,00% ± 12,50 W
<b>Modo de Corriente Constante</b>			@ I > 1,000 A
CCH Rango	0,000 – 1,000 A		& V > 12,00 V

CCM Rango	0,000 – 500,0 A	Precisión tiempo transitorio	10,0% ± 50% del tiempo mínimo
CCL Rango	0,000 – 100,0 A	<b>Modo de Resistencia Constante</b>	
Rango Tiempo Transitorio		CRH Rango	0,600 – 30,00 Ohm
• Banda rápida (default,Osc1)	0,500 – 51,19 ms		@ I > 100,0 A
• Banda lenta (osc2,osc3)	0,500 – 511,9 ms	CRM Rango	0,060 – 15,00 Ohm
Voltaje mínimo(I <sub>max</sub> )	0,600 V	CRL Rango	0,0006 – 0,060 Ohm
Coeficiente de temperatura	100 ppm/°C del voltaje	Rango Tiempo Transitorio	
<b>Precisiones</b>		CRM/CRH	Igual que en modo CC
CCH Resolución	62,50 mA	CRL	Igual que en modo CV
CCM Resolución	31,25 mA	Coeficiente de temperatura	
CCL Resolución	6,250 mA	CRM/H	300 ppm/°C de la resistencia mínima
CCH Precisión	0,05% ± 1,000 A	CRL	300 ppm/°C de la resistencia máxima
CCM Precisión	0,05% ± 1,000 A	<b>Programa</b>	
CCL Precisión	0,05% ± 1,000 A	CRH Resolución	0,1042 mS
Precisión tiempo transitorio	10,0% ± 50% del tiempo mínimo	CRM Resolución	1,0417 mS
<b>Protección Programable</b>		CRL Resolución	0,0038 mΩ
Potencia(OPP)		CRH Precisión	1,00% ± 8,333 mS
• Rango	3,438 – 2,750 W		@ I > 1,000 A
• Resolución	0,344 W		& V > 12,00 V
• Precisión	0,20% ± 0,079 V	CRM Precisión	1,00% ± 33,33 mS
Voltaje(OVP)			@ I > 10,00 A
• Rango	0,039 – 63,00 V		& V > 6,000 V
• Resolución	0,004 V	CRL Precisión	1,00% ± 0,120 mΩ
• Precisión	0,20% ± 0,079 V		@ I > 100,0 A
Intensidad(OCP)			& V > 0,060 V
• Rango	0,656 – 1,050 A	Precisión tiempo transitorio	10,0% ± 50% del tiempo mínimo
• Resolución	0,066 A	<b>Externo</b>	
• Precisión	0,20% ± 1,313 A	Impedancia de entrada	400,0 ± 1% kΩ
Apagado por baja tensión		VMON Precisión	0,10% ± 0,060 V
• Modo	Input On/Continuo	IMON Precisión	0,10% ± 1,000 A
• Rango	0,045 – 60,00 V	<b>Otros</b>	
• Resolución	0,015 V	Modo Transitorio	
• Precisión	2,00% ± 0,075 V	• Rango de frecuencias	0,100 – 10,000 Hz
<b>Protección</b>		o Precisión	0,1 %
Protección de sobre potencia(OP)	2,750 ± 52,38 W	• Rango de operación	1,000 – 100,0 %
Protección de sobre-	63,00 ± 1,200 V	o Precisión	0,1 %



voltaje(OV)			
Protección de sobre-intensidad(OC)	1,100 ± 10,48 A	Interfaz remota	GPIB/RS-232/ETHERNET/USB
Protección de sobre-temperatura(OTP)	90,00 ± 5,000 °C	Potencia admisible (por temperatura de la fuente) para mayores temperaturas ambientales.	(-1,67% Potencia/°C
<b>Resistencia dieléctrica</b>		<b>General</b>	
Circuito primario al chasis	1500 VAC durante 1 min	Entrada AC	85~240 Vac 48~62 Hz
Circuito primario a la carga terminal	1500 VAC durante 1 min	Consumo Potencia	130 VA
Carga terminal al chasis	1500 VDC durante 1 min	Temperatura de operación	5 ~ 40 °C
<b>Modo de Potencia Constante</b>		Dimensiones	17(W)x5,24(H)x24,5(L)
CPH Rango	0,000 – 2,500 W	Peso	70 LBS (31.752 kg)
CPM Rango	0,000 – 1,250 W		
	@ I ≤ 500,0 A		

Tabla 8: Especificaciones técnicas de la carga electrónica

A continuación se muestra la curva de operación de la carga electrónica:

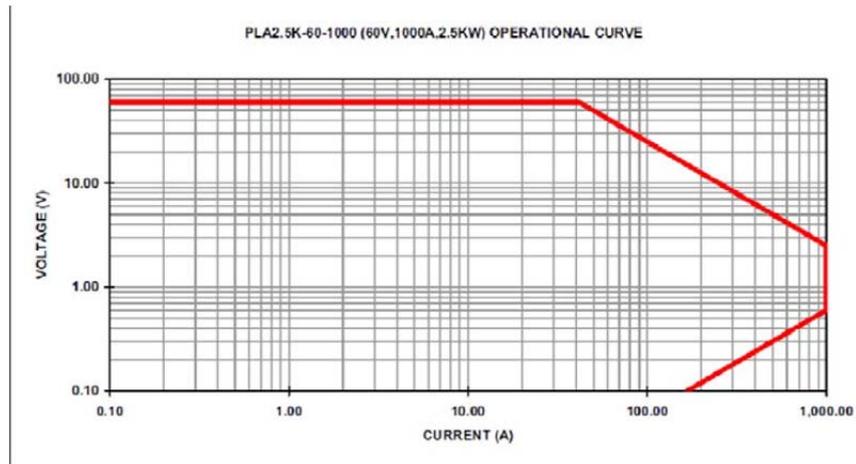


Ilustración 26 - Curva operacional de la carga electrónica

## 3.8 Baterías

### 3.8.1 Introducción

Una batería es un elemento acumulador eléctrico que almacena energía eléctrica mediante procesos electroquímicos. Es un generador eléctrico secundario. No produce energía eléctrica en sí, sino que libera la que anteriormente se ha almacenado durante su carga. El número de cargas y descargas vendrá limitado por su vida útil.



Ilustración 27 - Imagen de conjunto de baterías

La principal virtud de las baterías es la mayor densidad de energía que poseen frente a muchos otros almacenadores, pero tienen ciertas desventajas o restricciones. Una de ellas es la baja velocidad de carga y descarga permitida. Una batería tiene restricciones de tiempos y corrientes de carga y descarga. Por su naturaleza, no son dispositivos capaces de absorber grandes puntas de potencia en las cargas ni proporcionarlas en las descargas sin que ello no repercuta negativamente en su vida útil. Su rendimiento no es muy elevado, del orden del 80%, debido a su resistencia interna, la cual es notable en los procesos de carga y descarga del dispositivo. Otra característica desfavorable es la propia autodescarga con el tiempo debida a la resistencia de fuga. Algunos tipos de baterías presentan el llamado “efecto memoria”, en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad de almacenamiento, debido a corrientes elevadas, altas temperaturas, al envejecimiento del dispositivo, imposibilitando el aprovechamiento de toda su energía. Un inconveniente no menos importante es la alta toxicidad de los metales pesados que forman parte de algunos tipos de baterías, que constituyen un problema medioambiental grave. Se están intentando reducir esta toxicidad con la sustitución por nuevas sustancias menos contaminantes.

Entre los tipos de baterías existen de Plomo-Ácido, NaS, Ni-Cd, Ni-Mh, Li-ión y otras varias. Entre ellas, las baterías de plomo han sido las más desarrolladas y utilizadas en sistemas de potencia. El resto de baterías están siendo utilizadas en aplicaciones donde las restricciones de tamaño y peso son críticas. Las baterías de ión litio son las que mayores ventajas presentan, en cuanto a densidades de energía y potencia específica, eficiencia en el almacenamiento, mayor rendimiento en la descarga, ausencia de efecto memoria, pero por contra, dichos dispositivos son caros, y aunque prometen en un futuro próximo, su tecnología aún le queda por madurar. En la actualidad se están llevando a cabo proyectos

de investigación cuyo objetivo es el aprovechamiento de las ventajas de este tipo de baterías y el desarrollo de la tecnología.

Las baterías más utilizadas en sistemas de almacenamiento de energía de fuentes de energía renovables (solar, eólica...) son las baterías estacionarias. Son baterías de plomo-ácido de bajo contenido de antimonio. Éstas poseen unos 2000 ciclos de vida cuando la profundidad de descarga es de un 20% (es decir que la batería estará con un 80% de su carga) y unos 1200 ciclos cuando la profundidad de descarga es del 50%. Estas baterías tienen un autodescarga menor del 3% y una eficiencia del 75%. Pueden soportar descargas del 80% y tener una vida de unos 15 años. Son utilizadas en instalaciones de grandes potencias.

Estas baterías se comercializan en celdas unitarias de 2V, o en bancadas que suelen ser de 12V ó 24V que no es más que una asociación encapsulada de celdas unitarias. Estas celdas son capaces de dar altas tasas de energía (Ah). Se puede conseguir la tensión de trabajo deseada mediante la asociación en serie de estos dispositivos.

En la Tabla se muestra un cuadro comparativo entre las distintos tipos de baterías comerciales más importantes.

Tipo de batería	Capacidades máximas	$\eta$	Precio (€/kWh)	Nº ciclos carga y descarga	Auto-descarga	Observaciones
Plomo-Ácido	10MW 40MWh	≈75%	50-150	1500	2-5% Al mes	Pesadas, baja energía específica
Níquel Cadmio (NiCd)	30MW 10MWh	≈75%	200-600	3000	5-20% al mes	Alta descarga, baja energía específica
Sulfuro de sodio (NaS)	10MW 70MWh	≈89%	-	2500	0%	Incorporan calentadores: temperaturas de operación ≈ 325°C
Ión-Litio	En desarrollo	≈99%	700-1000	3000	1% al mes	Alta energía específica, alto coste

Tabla 9: Comparativa de los distintos tipos de baterías

### 3.8.2 Especificaciones técnicas

El grupo de baterías está compuesto por 24 monoblocs de la marca Classic de Exide Technologies, modelo Enersol T 370, de ácido plomo. Con una capacidad nominal de 376 Ah a 25°C cada batería, son baterías de muchos ciclos ya que están preparadas para sistemas fotovoltaicas, además de ser de bajo mantenimiento y reciclables.



Ilustración 28 - Baterías Enersol T 376

<b>Tensión nominal (V)</b>	2
<b>Capacidad Nominal <math>C_{120}</math> 1.80 Vpe 25°C Ah</b>	376
<b>Capacidad Nominal <math>C_{10}</math> 1.80Vpe 25°C Ah</b>	280
<b>Resistencia interna (Ohm)</b>	0.701
<b>Intensidad de cortocircuito (A)</b>	2900

Tabla 10: Especificaciones técnicas de las baterías

## 3.9 AUTÓMATA PROGRAMABLE. M340

### 3.9.1 Introducción

El autómata programable o PLC usado es uno del grupo Schneider Electric, de la serie Modicon M340. La CPU elegida es la BMC P34 20302, la fuente de alimentación es la CPS 2000, un módulo de entradas digitales DDI1602, un módulo de salidas digitales DDO1602, tres módulos de entradas analógicas AMI 0402 y 2 módulos de salidas digitales AMO 0210.



Ilustración 29 - Vista frontal del PLC

Es el encargado del control de todo el sistema, y de integrar todos los equipos del laboratorio además de ejecutar las órdenes programadas. Este modo de operación puede estar orientado a optimizar el beneficio monetario, supuesta la explotación del sistema; o bien poseer una optimización en pro de la mayor eficiencia energética posible. La Programación de este autómata forma parte de los trabajos previstos a realizar en el laboratorio con posterioridad, y es algo que se sale del ámbito de estudio del presente trabajo.

### 3.9.2 Especificaciones técnicas

#### BMX CPS2000

Es la fuente de alimentación, que suministrará energía a la CPU y a las tarjetas de entrada y salida.



Ilustración 30 - BMX CPS2000

Tensión de alimentación	100-240VAC
Potencia máxima	20W
Tensión suministro	3.3VDC , 24 VDC

Tabla 11: Especificaciones técnicas del módulo CPS2000

### BMX P34 20302

Es la CPU del PLC, se encarga de procesar, ejecutar el programa, almacenar datos, y las comunicaciones. El dispositivo se puede comunicar via Ethernet, CANOpen y USB.



Ilustración 31 - CPU P34 20302

Capacidad E/S digitales (1 rack)	704
Capacidad E/S analógicas (1 rack)	66
Ram interna	4096 kb

Tabla 12: Especificaciones CPU P34 20302

### BMX DDI1602

Módulo de 16 entras digitales, tipo PNP de 24VDC.



Ilustración 32 - Módulo DDI 1602

**BMX DDO1602**

Módulo de 16 salidas digitales de estado sólido, de 24VDC.



Ilustración 33 - Módulo DDO1602

**BMX AMI0402**

Módulo de 4 entradas analógicas, con convertidor A/D de 24 bits. Se dispone de 4 módulos AMI0210



Ilustración 34 - Módulo AMI 0402

Tensión	+/- 10 VDC
Tensión	0-10 VDC
Tensión	0-5 VDC
Tensión	1-5 VDC
Tensión	+/-5 VDC

Corriente	4-20 mA
Corriente	0-20 mA
Corriente	+/- 20 mA

Tabla 12: Tipos de entradas admisibles en AMI 0402

BMX AMO0210

Módulo de 2 salidas analógicas, con convertidor A/D de 24 bits. Se dispone de 2 módulos AMO0210



Ilustración 35 - AMO 0210

Tensión	+/- 10 VDC
Corriente	0-20 mA
Corriente	4-20 mA

Tabla 13: Salidas admisibles para el AMO0210

### 3.10 Sistema de purificación de agua

El purificador, del fabricante Millipore Elix 3, proporciona un agua con las siguientes características:

- Calidad del agua: Tipo II
- Caudal L/h (+/-15% a 7°C < T < 30 °C): 3
- Conductividad, compensada a 25 °C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): < 0,2
- Resistividad,  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$  (25 °C): 5 – 15



Ilustración 36 - Sistema de purificación de agua

Con esto nos aseguramos de que se satisface la demanda de agua desionizada requerida por el electrolizador que es de 0,4 L/h y cuya conductividad inferior a 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Además es acompañado de un depósito de agua desionizada de 30 litros.

- Calidad del agua: Tipo II
- Caudal L/h (+/-15% a 7°C < T < 30 °C): 3
- Conductividad, compensada a 25 °C ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ): < 0,2
- Resistividad,  $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$  (25 °C): 5 – 15

## **3.11 Elementos de medidas y actuadores**

### **3.11.1. Instrumentos de medida**

Son los elementos encargados de realizar la lectura apropiada de sobre una propiedad física o química. Esta lectura es transmutada en una señal capaz de ser enviada y reconocida por un dispositivo de control. Se diferencian dos tipos de elementos de medida en virtud de la señal que estos envían; analógicos y digitales, según emitan una señal analógica o digital respectivamente.

Dentro de los dispositivos que emiten señal analógica se diferencian dos grupos, según trabajan en tensión o en intensidad. Los elementos de medición empleados trabajan en intensidad, debido a que estos son menos afectados por el ruido electromagnético, proporcionando una señal más robusta.

#### 3.11.1.1. Transductores de presión

Su función es la de medir la presión de hidrógeno antes de entrar al sistema de almacenamiento y a la salida. Proporciona una señal de salida comprendida en un rango de entre 4 y 20 mA. Por tanto se trata una señal de tipo analógico. La tensión de alimentación va de 12 a 36 Vd.c. En la siguiente figura podemos observar una figura del Modelo en concreto.



**Ilustración 37 - Transductor de presión**

#### 3.11.1.2. Termopares

Su objetivo es el de medir la temperatura. Se trata de una vaina metálica que contiene dos cables, cada uno de diferente material conductor. La energía térmica induce una tensión diferente para cada conductor, creándose así una diferencia de potencial entre los dos cables. En función del potencial existente entre ambos conductores podemos conocer la temperatura a la que se encuentra la vaina. Las dimensiones de la vaina son de 1 mm de diámetro por 150 mm de longitud y cuyo material se compone de acero inoxidable AISI 321. A continuación se muestra una imagen del termopar descrito:



**Ilustración 38 - Termopar tipo T**

Se encuentran situados a la entrada y salida del circuito de refrigeración/calefacción del depósito de hidruros metálicos, a la entrada/salida de hidrógeno del mismo, y a la entrada (conducto de hidrógeno) de la pila de combustible.

#### 3.11.1.3. Caudalímetro de agua

Se encuentra situado a la entrada del sistema de refrigeración/calefacción del sistema de almacenamiento de hidrógeno. Su objetivo es el de medir el caudal de agua que circula por él. El material del cuerpo del sensor es de acero inoxidable AISI 316.



**Ilustración 39 - Caudalímetro de agua**

Es apto para medir caudales con un rango de 2 – 30 litros por minuto.

#### 3.11.1.4. Caudalímetro másico de H<sub>2</sub>

Con objeto de estudiar el rendimiento real de la pila de combustible en funcionamiento real, así como la cinética de desorción del sistema de almacenamiento, se instala un medidor de la cantidad de hidrógeno empleado. El medidor instalado introduce pérdidas de carga mínimas y carece de elementos móviles. Es un medidor de tipo másico MASS-STREAM® perteneciente a M+W Instruments GmbH, especialmente diseñado para medir H<sub>2</sub>. El sensor y el cuerpo son de acero AISI 316L.

Especificaciones principales	
Tensión de suministro	24 Vdc
Señales de salida	0-5 Vdc o 4-20 mA activos
Presión máxima	10 bar

**Tabla 14: especificaciones del caudalímetro másico de H<sub>2</sub>**

### 3.11.2. Elementos de actuación

Se encuentran encargados de ejecutar las órdenes que son enviadas desde el centro de control (autómata).

#### 3.11.2.1. Electroválvulas

Se emplean para controlar el caudal de hidrógeno por la conducción y de agua en el circuito de refrigeración/calefacción. Se han instalado válvulas solenoides de 24Vdc. Que soportan una presión máxima de 20 bar y un rango de temperatura de funcionamiento de 1 a 50 °C.



Ilustración 40 - Electroválvula

El tipo de válvula adquirida es de tipo “normalmente cerrada”, por lo que en estado de reposo mantiene el flujo cortado, mientras que mediante una señal eléctrica proveniente del PLC, excita la bobina de un electroimán, que cierra un contacto alimentado por una fuente de alimentación externa de 24VDC, este relé excita un electroimán que acciona el asiento de la válvula permitiendo el paso de hidrógeno (no es de acción proporcional, sino que es todo-nada).

El uso de relé intermedio, es debido a la alta potencia eléctrica necesaria para las electroválvulas de agua, incapaz de suministrarla el PLC.

#### 3.11.2.2. Regulador de presión

Este elemento se ajusta manualmente. Se gira la rosca hasta regular la presión de salida a la presión deseada, y el sistema se queda tarado para que la presión de salida sea siempre la presión indicada.

General	
Material	316 Stainless Steel
Capucha de ensamblaje	Estándar
Rango de salida	0 a 1,7 bar
Rosca	¼" Hembra NPT

Tabla 15: Especificaciones del regulador de presión



**Ilustración 41 - Regulador de presión**

### 3.12 Pasarela de comunicación CAN/CANOpen

La pasarela de comunicación convierte los mensajes que llegan por CAN bus en el protocolo de comunicación CANOpen (TPDO), añadiéndole la capa de aplicación, y viceversa, mandando los mensajes que le llegan desde CANOpen (RPDO) a CAN bus.

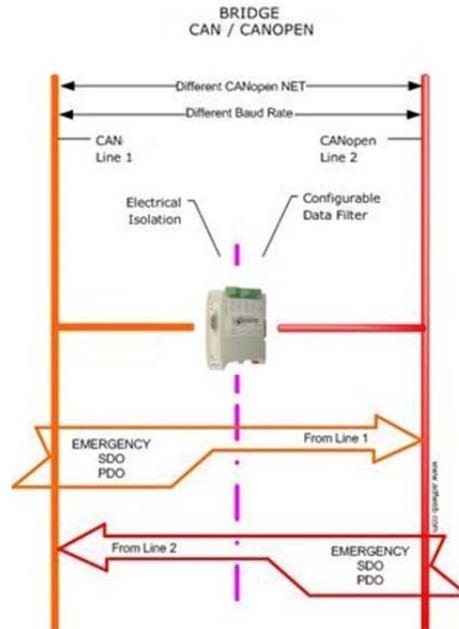


Ilustración 42 - Pasarela de comunicación CAN/CANOpen

La pasarela dispone de unos switches para conectar/desconectar resistencias terminales de 120 Ohms para los respectivos buses.

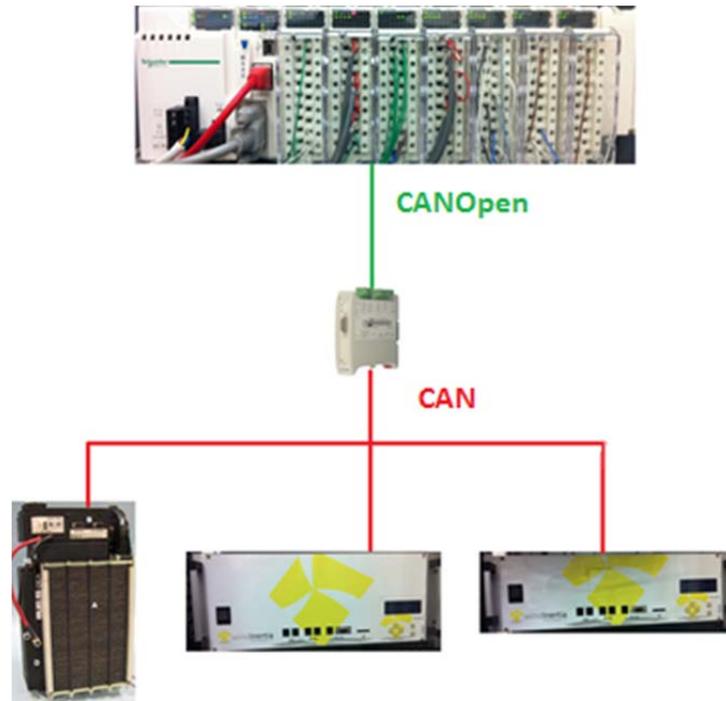


Ilustración 43 - Esquema de buses de campo

### 3.13 BUS DE CORRIENTE

El Bus de Corriente es un Bus de corriente continua, en el cual están conectados la fuente de alimentación programable, la carga electrónica, los convertidores DC/DC y las baterías.

Cada dispositivo suministrará o demandará energía según su función. Las baterías actúan como regulador del bus, la energía en exceso o en defecto será asimilada por las baterías. Además es quien regula la tensión del bus, todo el Bus de Corriente estará a la tensión de las baterías. La tensión de las baterías será función del estado de carga, la corriente que circule por ella y de la temperatura.

Se dispone de los dispositivos demandantes de energía, carga electrónica y convertidor del electrolizador entre los dispositivos suministradores de energía, fuente de alimentación, convertidor de pila de combustible y baterías.

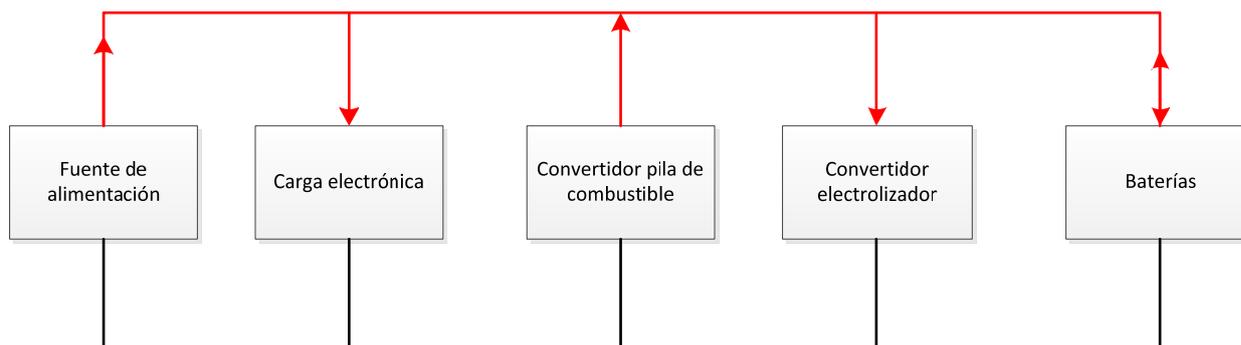


Ilustración 44 - Esquema del bus de corriente

### 3.13.1 Cableado

Para la selección de los cables del Bus de Corriente se eligió el más restrictivo para todo el BUS. El aislamiento será de PVC de Alta Seguridad(AS) debido al ambiente explosivo del Hidrógeno, el conductor de cobre.

	I prevista	Instalación	Factor de corrección	I admisible	Sección (mm <sup>2</sup> )
Fuente	100 A	E-12 <sup>(1)</sup>	1	100 A	16
Carga	100 A	E-12 <sup>(1)</sup>	1	100 A	16
Conv. Pila	40 A	E-12 <sup>(1)</sup>	1	40 A	8
Conv. Electrolizador	40 A	E-12 <sup>(1)</sup>	1	40 A	8
Baterías	100 A	B1-10 <sup>(2)</sup>	0.85	118 A	25

(1) E-12: Cables unipolares separados mínimo D

(2) B1-10: Conductores aislados en tubo en montaje superficial

Tabla 16: Resumen de elección de cables

Por lo que el cableado será de cobre, con aislamiento de PVC recubierto de material de Alta Seguridad (AS)

### 3.13.2 Protecciones

Se protegerá el Bus de Corriente desde las tres fuentes de energía, Fuente programable, Pila de combustible y baterías. Con equipos de protecciones frente a sobrecorrientes.

#### Fuente programable:

La instalación desde la fuente programable estará protegida por dos interruptores magnetotérmicos monopolares del fabricante ABB, cuya tensión de funcionamiento es de 60 VDC/ 440 VAC, Corriente nominal de 100 A, y curva de disparo tipo C.



**Ilustración 45 - Magnetotérmico de fuente programable**

Pila de combustible:

La instalación desde la pila de combustible estará protegida por un interruptor magnetotérmicos bipolar del fabricante ABB, cuya tensión de funcionamiento es de 125 VDC/ 440 VAC, Corriente nominal de 50 A, y curva de disparo tipo B.



**Ilustración 46 - Magnetotérmico pila de combustible**

Baterías:

La instalación desde las baterías estará protegida por un interruptor magnetotérmicos bipolar del fabricante ABB, cuya tensión de funcionamiento es de 800VDC, Corriente nominal de 100 A.



**Ilustración 47 - Magnetotérmico de las baterías**

### **3.14 Protecciones alterna**

#### **3.14.1 Sobrecorriente**

Tanto los circuitos trifásicos como monofásicos de alterna, estarán protegidos contra sobrecorrientes, por uno de los cuadros de protección del laboratorio.



**Ilustración 48 - Caja de protecciones**

Ambos circuitos, trifásico y monofásico, están protegidos para una corriente nominal de 16 A.

#### **3.14.2 Contactos indirectos**

El circuito de monofásica alterna está protegido por un interruptor diferencial de 25 A y sensibilidad 30 mA.



**Ilustración 49 - Interruptor diferencial**

### 3.15 Cableado de señales

Para las señales analógicas y para los buses de comunicación CAN y CANOpen se utilizar un cable bipolar apantallado

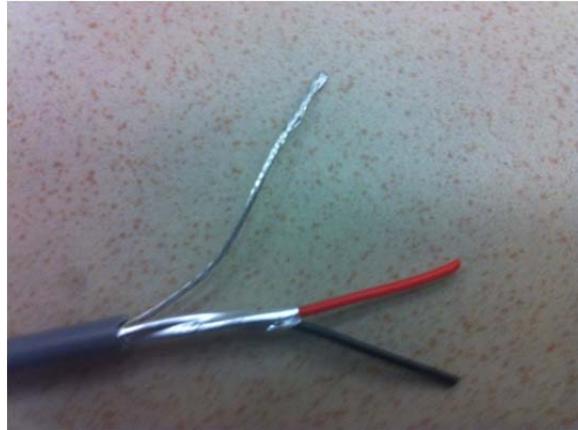


Ilustración 50 - Cable apantallado

Para el resto de señales se ha utilizado según la función cable bipolar o monopolar.

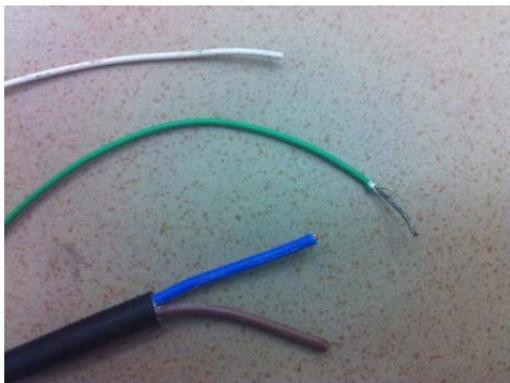


Ilustración 51 - Cables de alimentación

### 3.16 Fuentes de alimentación auxiliares

Se utilizara dos fuentes auxiliares para alimentar circuitos de 24 VDC y 12VDC

#### 3.16.1 Fuente de alimentación de 24VDC

Se dispone de una fuente regulable de 360W, 36 VDC y 10 A. Que estará configurada para alimentar circuitos a 24 VDC. Esta fuente se alimenta de 220VAC.

Estos circuitos son señales de entrada digitales para el PLC, salidas digitales del PLC a través de relés, pasarela CAN/CANOpen.



Ilustración 52 - Fuente de alimentación auxiliar de 0-36VDC

#### 3.16.2 Fuente de alimentación de 12VDC

Se dispone de una fuente de tensión de salida fija de 12 voltios continua, 42 W y 3'5A, para alimentar a la pila de combustible en modo STAND-BY. Esta fuente se alimenta de 220VAC.



Ilustración 53 - Fuente auxiliar de 12VDC

### **3.17 Seta de emergencia**

Se dispone de una seta de emergencia, la cual dispone de dos contactos, uno normalmente cerrado que va hasta el PLC, y otro normalmente abierto que llega a un contacto de emergencia de la fuente programable.



**Ilustración 54 - Seta de emergencia**

Al pulsarlo apaga directamente la fuente programable, y activa un protocolo de emergencia en el PLC.

### **3.18 Conducciones de hidrógeno**

A causa del pequeño tamaño de la molécula de hidrógeno, ésta presenta cierta facilidad de interacción con estructuras cristalinas. Esta interacción favorece la creación de líneas de tensión que, en determinadas circunstancias de operación, pueden producir la rotura del material, lo que se denomina “fragilización” producida por hidrógeno. Esto se da por ejemplo en ciertos tipos de aceros que presentan estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (acero ferrítico por ejemplo) que no son apropiados para su utilización con hidrógeno. Los metales más adecuados para su uso con hidrógeno son aquellos que presentan una estructura cúbica centrada en la cara, como el acero austenístico, el aluminio, el níquel, etc.).

Teniendo en cuenta este hecho; se ha empleado para las todas las conducciones acero AISI 316 de 10 mm de diámetro, que además es amagnético, evitándose así que se cargue eléctricamente. Los racores empleados son del mismo material.

Para sellar las tuberías se ha empleado un sellante anaeróbico para roscas recomendado para gases de la marca Tangit Metalock®. Este sellante cumple con las normas internacionales:

- ✓ EN 751-1 (gas y agua caliente hasta 130 °C)
- ✓ BS6920 (agua potable)

### **3.19 Sistema de calefacción/refrigeración de agua. Calentador de agua**

Se posee un termo eléctrico, conectado a los hidruros metálicos con el fin de proporcionarles agua caliente para calentarlos cuando se necesite operar el sistema de almacenamiento para desorber el hidrógeno del depósito.



**Ilustración 55 - Termo eléctrico**

El depósito tiene una capacidad de 75 litros.

### **3.20 Sistema de aporte de nitrógeno**

Se utiliza nitrógeno para inertizar el electrolizador, pila de combustible, y los circuitos de gases en los arranques y paradas del sistema.

Se dispone de una rampa compuesta por dos botellas de 50 litros capaces de almacenar 10 Nm<sup>3</sup> de nitrógeno técnico a una presión de 300 bar (código de la botella X50S, antigua referencia B50) (número UN 1066, etiqueta 2.2).



**Ilustración 56 - Sistema de nitrógeno**

La rampa dispone de dos válvulas reductoras de presión con entrada a 300 bar y salida a 15 bar. La presión de salida es regulable.

El canalizado se realizó en tubería de acero AISI 316 y de sección 10 mm.



**Ilustración 57 - Punto de consumo de nitrógeno**

En las proximidades a los puntos de consumo se instalaron reductores de segunda expansión que permiten realizar un ajuste de presión de nitrógeno entre 0 y 10 bar.

La conexión al equipo de consumo se realizó con latiguillo flexible.

### 3.21 Sistema de extinción de incendios y seguridad

Podemos clasificar los tipos de fuego en las siguientes clases:

**Clase A** Se denominan fuegos de clase A los que se producen en combustibles sólidos que producen brasas, por ejemplo: papel, cartón, madera, plásticos, etc.

**Clase B** Se denominan fuegos de clase B los que se producen en combustibles líquidos, por ejemplo: aceites vegetales, derivados del petróleo, etc.

**Clase C** Se denominan fuegos de clase C los que se producen en gases, por ejemplo: butano, acetileno, metano, propano, hidrógeno, etc.

**Clase D** Se denominan fuegos de clase D los que se producen en metales y aleaciones, por ejemplo: magnesio, potasio, sodio, etc.



Ilustración 58 - Extintor tipo ABC

En el laboratorio se dispone de un extintor de polvo apto para apagar fuegos de tipo A, B y C.

Además, como elemento, el laboratorio dispone en los techos de un sistema de detección de humo, el cual al detectar la presencia de humos se activa emitiendo un spray de agua.

Además del sistema de extinción en sí mismo, son importantes las medidas preventivas. A este efecto cabe recordar que se dispone de un sistema de inertización de nitrógeno, con el cual se debe de inertizar la línea después de las paradas.

Otro equipo puede llegar a ser un elemento importante de prevención es un detector de hidrógeno. Por ello se dispone de uno en el laboratorio. Este dispositivo emite una señal acústica cuando detecta la presencia de este gas en el ambiente.



**Ilustración 59 - Detector de fugas de H2 portatil**

Igualmente a efectos de seguridad del sistema, en la línea instalada que conecta el sistema de almacenamiento con el electrolizador y la pila de combustible dispone de una válvula de seguridad, la cual debe aliviar la presión cuando la línea supera los 1,6 bares de presión.



**Ilustración 60 - Válvula de seguridad**