



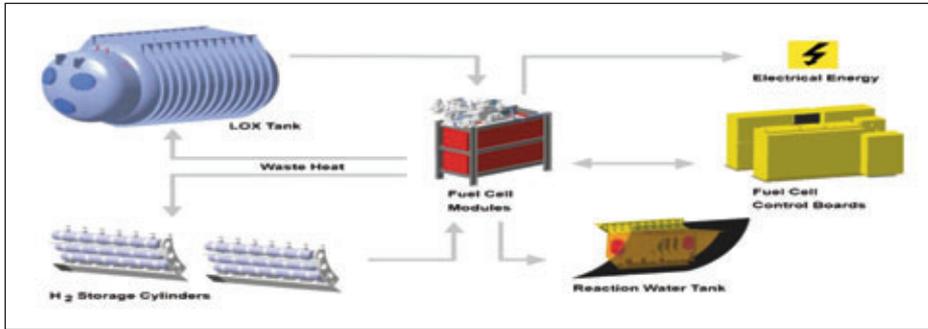
SISTEMA AIP. *U-212*

Carlos LOSCERTALES SAIZ



El presente artículo pretende realizar un estudio técnico del sistema *AIP* de los submarinos *U-212*. Según se lea el mismo, se tendrá la tentación de preguntarse por el *S-80*; lamentamos decir que no habrá datos sobre el mismo, la confidencialidad manda. En cualquier caso estamos seguros de que la espera merece la pena.

En la actualidad existen varios tipos de submarinos *AIP* (*Air Independent Propulsion*): Mesma, Stirling, Pila de Combustible... Dentro de este último grupo, hay dos desarrollos diferenciados. Por un lado tenemos el Sistema *AIP* del *S-80*, en el que el hidrógeno que alimenta la pila de combustible se obtiene por un reformado de etanol. Por otro, está el Sistema *AIP* de los submarinos alemanes *U-212*, en el



Esquema simplificado AIP U-212.

que el hidrógeno que alimenta la pila de combustible se almacena directamente en tanques de hidruros metálicos.

Los elementos principales que componen el sistema AIP alemán se representan en la figura anterior y se describen a continuación.

Almacenamiento de hidrógeno

Los submarinos alemanes U-212 almacenan el hidrógeno en tanques exteriores de hidruros metálicos. A continuación se realizará una explicación general de esta clase de almacenamiento y una descripción de la instalación en el U-212.

¿Qué son los hidruros metálicos y cómo trabajan?

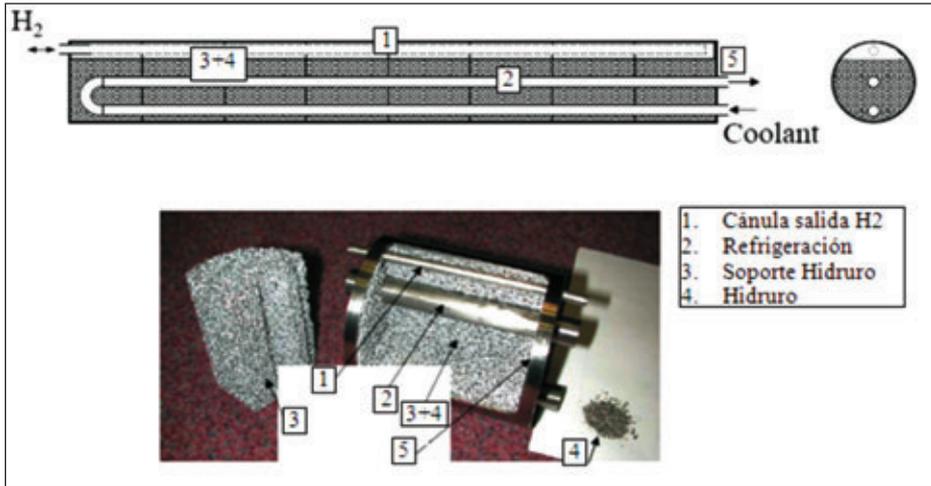
Cuando un metal (Li, Mg...) o aleación metálica (Mg-Ni...) se somete a la acción del hidrógeno gaseoso a temperatura y presión constantes, se produce un fenómeno de almacenamiento de hidrógeno en el metal que da lugar a una nueva estructura metálica (hidruro metálico) y un desprendimiento de calor.



Para cada presión de trabajo, con un mismo metal, se formará un tipo de estructura (MH_x). A presiones mayores, dicha estructura cambia, siendo más compleja y almacenándose más cantidad de hidrógeno. La temperatura de trabajo tiene un efecto negativo al aumentar la presión de trabajo necesaria para almacenar una misma cantidad de hidrógeno. Es por esto, con el factor añadido de que tratamos con una reacción exotérmica, por lo que el proceso

de carga de hidrógeno (formación de hidruro) debe realizarse con un sistema de refrigeración adecuado para que la presión de trabajo necesaria no se dispare.

El proceso de liberación de hidrógeno, desorción, es inverso. Debemos suministrar calor al sistema hidruro para que se libere hidrógeno a una presión algo menor que la presión de trabajo en la carga.



Componentes básicos del cartucho de hidruros metálicos.

En general, las presiones de trabajo no deben ser mayores de unas decenas de atmósferas, por seguridad y para no necesitar recipientes de alta resistencia mecánica, ni menores que la presión atmosférica, lo que exigiría un sistema de extracción del hidrógeno.

¿Por qué hidruros metálicos?

Las principales ventajas de los hidruros metálicos frente a cualquier otro medio de almacenamiento de hidrógeno puro son:

- Densidad en hidrógeno. Para un volumen dado de tanque, se almacena más masa de hidrógeno.
- El almacenamiento es más seguro, ya que la presión de trabajo es menor que en tanques de gas de hidrógeno, y en caso de ruptura, solo una pequeña fracción (el hidrógeno en estado gaseoso) saldría al exterior.

	<i>g H/l</i>
<i>Hydrogen at 200 bar</i>	17
<i>Magnesium Hydride</i>	101
<i>Hydride of Fe-Ti</i>	96
<i>Hydride of La-Ni</i>	89
<i>Liquid Hydrogen</i>	70

Tipos de hidruros y elección

No todos los hidruros son válidos para el almacenamiento y descarga de hidrógeno. Entre los siguientes parámetros debe ser alcanzada una solución de compromiso:

- Capacidad almacenamiento. El tanto por ciento en peso de hidrógeno respecto al peso del metal y del tanque en general debe ser lo más elevado posible.
- Estabilidad de los hidruros. Los hidruros muy estables se forman con presiones de trabajo bajas, pero se necesitará un gran aporte de calor para su descomposición y obtener presiones de suministro adecuadas. Por otro lado, hidruros inestables, con facilidad de descomposición, necesitarán grandes presiones de trabajo para el proceso de carga o formación que complican el diseño estructural del tanque.

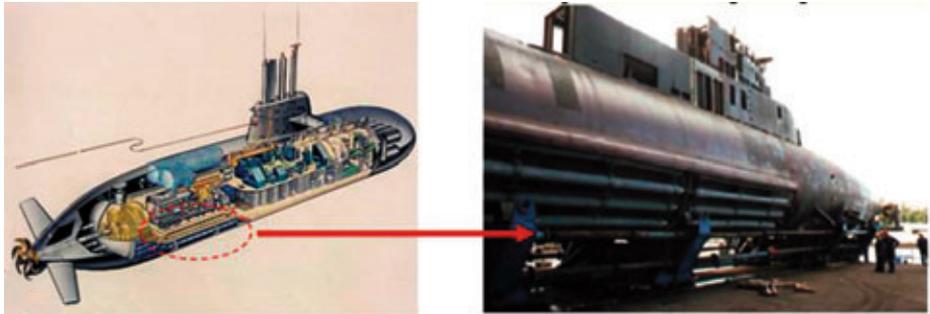
Para el caso de un sistema embarcado y conectado a una pila de combustible se puede estimar que el rango de trabajo estará acotado por:

- Presión de carga del hidrógeno. Limitada principalmente por la presión resistente de los tanques, no superior a unas decenas de bares.
- Presión de suministro de hidrógeno (presión de descarga). Presión no inferior a un bar.
- Temperatura del tanque en el proceso de carga. Temperatura no inferior a unos grados centígrados (agua de mar refrigeración).
- Temperatura del tanque en el proceso de descarga. Temperatura no superior a 100-120°C, temperatura máxima de salida de agua de refrigeración de una pila PEM estándar.

Dado el «mapa» de hidruros comercialmente conocidos y el rango de operación estimado para el *U-212*, los compuestos empleados podrían ser lantánido-níquel, hierro-titanio o vanadio. La capacidad de almacenamiento de hidrógeno en tanto por ciento en peso del compuesto sería de 1.9, 1.3 o 3.5, respectivamente.

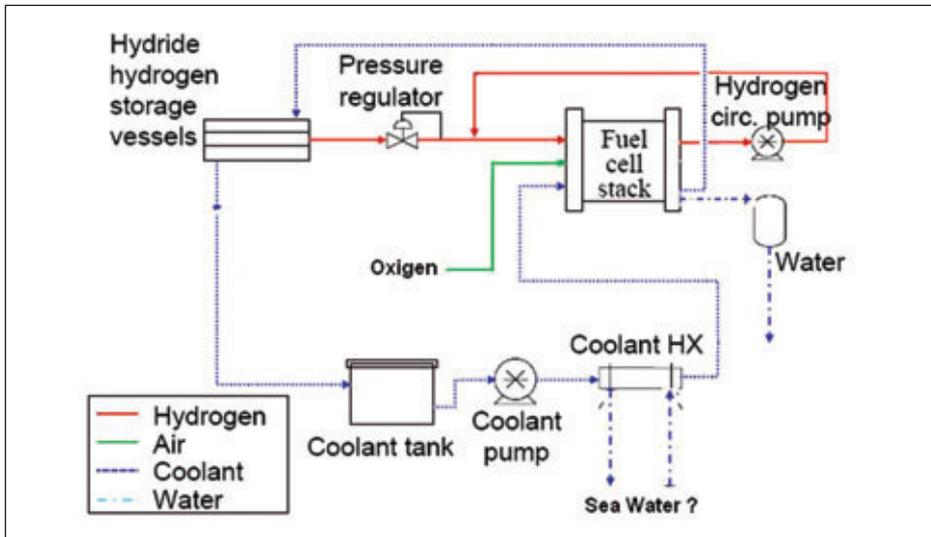
Hidruros metálicos. Estudio del caso 212

La localización de los tanques de hidruros a bordo se presenta en la figura siguiente:



Tanques de hidruros metálicos.

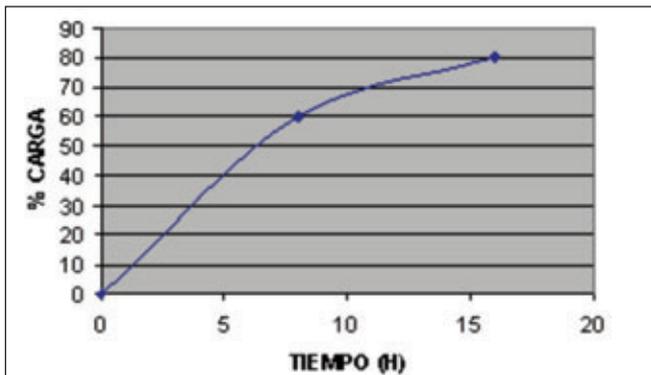
Para la descarga del hidrógeno, alimentación AIP, los tanques de hidruros son calentados con el agua de refrigeración de la pila de combustible. El calor que se puede obtener de esta, sin considerar calentadores adicionales, es limitado, ya que su temperatura de operación no superará los 80-100°C.



Esquema de la instalación U-212.

Las principales características estimadas, que afectan a la definición de la instalación de a bordo se enumeran a continuación:

- Capacidad de tanques: 2.000 kg de hidrógeno. Los tanques están divididos en tres grupos de 12 «unidades» cada uno. Cada unidad alberga unos 55 kilos.
- Presión de carga: superior a los 60 bares. En principio la presión estará relacionada con la capacidad de refrigeración de los tanques. Parece que la presión de suministro podría llegar a 200 bares máximo (aguas de mar calientes).
- Tiempos característicos: el caudal medio de carga es aproximadamente unos 100kg/h, que proporcionaría tiempo de carga de unas 20 horas. En la realidad el proceso físico no es lineal, siendo mucho más efectivo en los primeros escalones. Así, con las recargas conocidas de este tipo de submarinos, podemos obtener una gráfica de tiempo de carga:



Tiempo de carga de hidrógeno.

Con los datos anteriores, nos aventuramos a hacer las siguientes suposiciones:

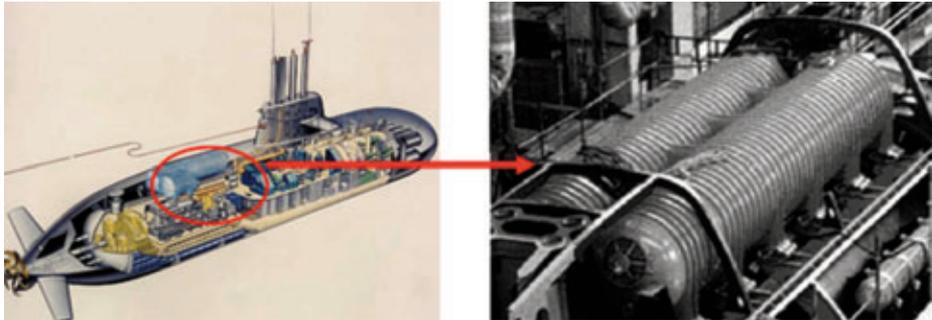
- Los hidruros empleados son inestables: altas presiones de formación, tiempos de formación largos. Este tipo de hidruros complica el proceso de carga pero facilita el de descarga.
- La capacidad estimada (kg) de cada unidad de almacenamiento excede ampliamente los desarrollos comerciales encontrados. Nos encontramos, sin duda, ante un nuevo desarrollo en cuanto a diseño de contenedor e hidruro empleado (más capacidad gravimétrica).

- Con lo anterior, suponiendo un entorno máximo de capacidad gravimétrica del hidruro alrededor de 7 por 100, se puede considerar que los hidruros empleados, sin considerar el peso de envuelta de tanque y auxiliares, pesan 28-30 toneladas.

Almacenamiento de oxígeno

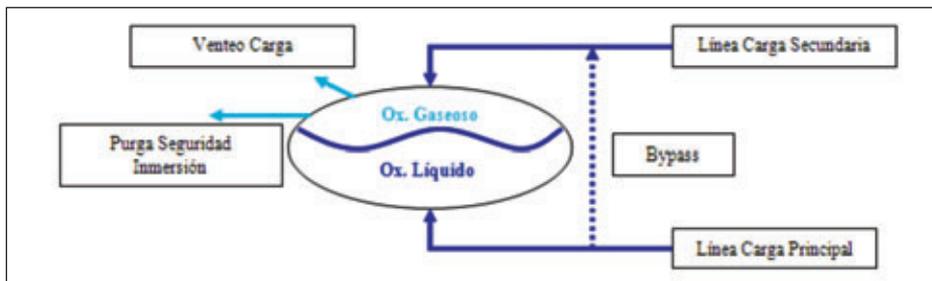
Los submarinos *U-212* cuentan con dos tanques criogénicos de almacenamiento de oxígeno líquido idénticos, situados en la superestructura hacia popa (tanques resistentes), tal y como se aprecia en la figura siguiente.

Son tanques exteriores al casco resistente por lo que serán resistentes a la presión de cota y estarán sometidos a las condiciones ambientales del exterior. Su capacidad estimada es de 19 t, unos 16.000 litros en total. Las dimensiones rondarían los 10 metros de largo y uno de diámetro.



Disposición de los tanques de oxígeno líquido.

La configuración básica de la instalación es la siguiente:



Esquema básico instalación.



Venteo de oxígeno U-212.

Los tanques se cargan por la «línea de carga principal» con el «venteo de carga» abierto para que todo el oxígeno que se evapora en el proceso se evacue y no se presurice el tanque. En los primeros pasos de la carga este fenómeno es considerable.

Si la vaporización de oxígeno durante la carga es muy elevada, el tanque se irá presurizando. Para controlar el aumento desmedido de presión se puede utilizar la «línea secundaria de carga» que, al

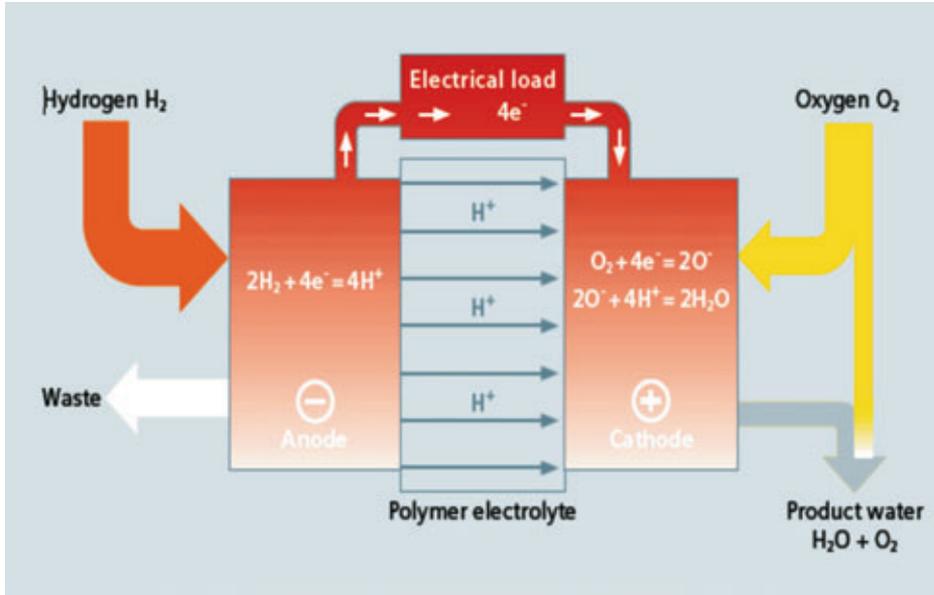
inyectar oxígeno líquido por la parte superior, licúa parte de la fase gaseosa y reduce la presión. La presión de control en la carga es de 22 bares.

En condiciones normales de operación, líneas de carga y venteo cerradas, el tanque se irá presurizando o no en función del consumo, nivel de oxígeno líquido y condiciones ambientales del exterior. El control de la presión en el interior se podría realizar por consumo de oxígeno o por recirculación de oxígeno líquido por el *bypass*, produciendo un efecto idéntico al que tenía lugar al utilizar la «línea secundaria de carga». En cualquier caso, ante una subida de presión continuada se evacuaría oxígeno al mar por la «línea de purga en inmersión».

La presurización (no deseada) depende directamente de la pérdida térmica (entrada de calor) del tanque y de la masa de oxígeno líquido que alberga. Este calor depende linealmente de la superficie de los tanques, y de las condiciones ambientales (temperatura exterior) en las que se encuentra. En este sentido, algo debe haber de «fondo». El submarino 214, modernizado respecto al 212 y comercializado a países de aguas más cálidas, aloja los tanques en su interior (como el S-80).

Pila de combustible

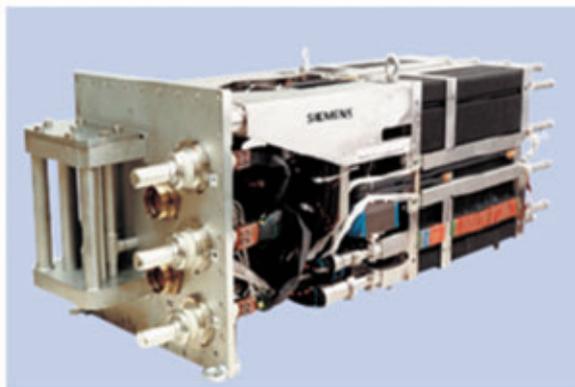
Los submarinos alemanes cuentan con una pila tipo PEM (*Proton Exchange Membrane/Polymer Electrolyte Membrane*) de ánodo cerrado. Los consumibles utilizados, oxígeno e hidrógeno puros, permiten que la única salida de la pila sea agua. Es decir, no existirán desechos ni impurezas que largar al mar.



Pila PEM de ánodo cerrado.

La pila instalada es un desarrollo de Siemens, denominado comercialmente BZM 34. Una imagen de un *stack* (modulo unidad) y sus características técnicas se presentan a continuación:

	BZM 34
Rated Power	34 kW
Number of Cells	72
Rated Current	650 A
Rated Voltage	52.3 V
Hydrogen Pressure	2.3 bar a
Oxygen Pressure	2.6 bar a
Working Temperature	70 - 80°C
Size	47x47x143 cm3
Weight (incl. press. container)	650 kg
Efficiency at full load	62%
Efficiency at 20% load	72%



Módulo pila PEM U-212.

La potencia nominal del *stack* es de 34 kw. De la documentación encontrada se sabe que podría llegar a dar potencias superiores a 55 kw en casos de «sobrecarga».

Al funcionar directamente con hidrógeno y oxígeno puros, suponemos que el sistema alemán está preparado para suministrar una potencia regulable. Regulación obtenida alimentando con mayor o menor cantidad de reactivos (hidrógeno y oxígeno).

Respecto a la arquitectura y el conexionado al bus de continua del barco, aspecto que condiciona en gran medida la operatividad del sistema, se tiene información algo confusa:

- Tanto la información técnica disponible y pública como las propias dotaciones de los barcos de esta clase que han hecho escala en España, han confirmado que el «Sistema Pila de Combustible» consta de ocho módulos (*stacks*) más uno de *backup* que se conecta ante un fallo en cualquiera del resto.
- Diversos artículos encontrados y la propia información comercial de Siemens indican que el «Sistema de Pila de Combustible» se conecta

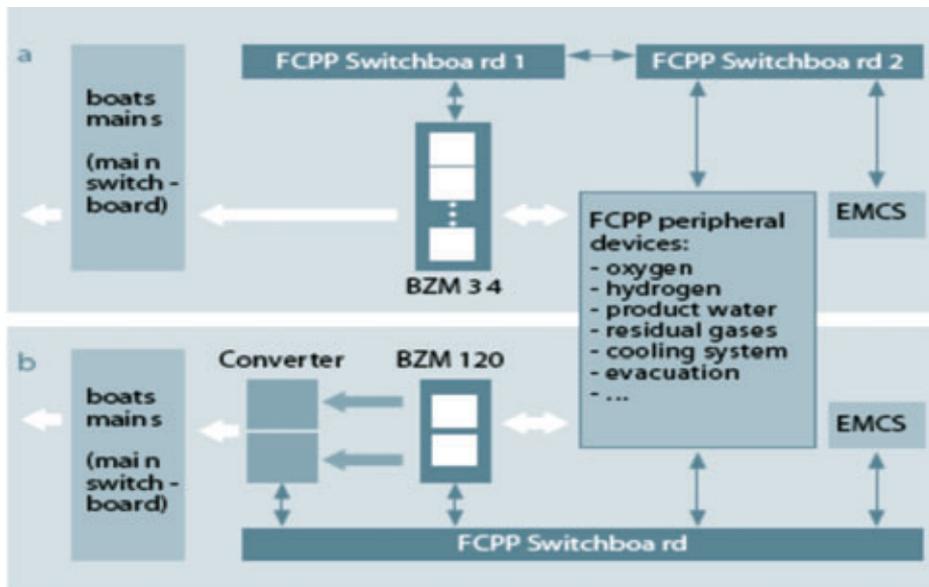
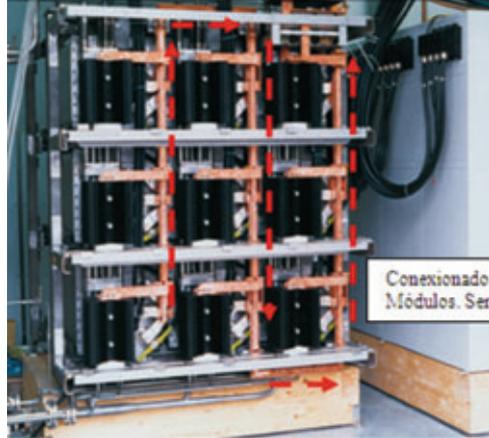


Fig. 10: Two types of fuel cell power plants (FCPP)
a: fuel cell battery with BZM 34; direct coupling of FC voltage to boats mains
b: fuel cell battery with BZM 120; coupling via converter

Arquitectura U-212-U-214.

directamente al *bus* de continua del buque, sin convertidores. Caso distinto sería el *U-214*, que con *stacks* de mayor potencia (BZM 120, 120 kw) cuenta con convertidores o adecuadores de potencia.

- Con todo lo anterior parece poco probable la capacidad de carga de las baterías. De no tenerla, parece que lo más sencillo sería que el «Sistema Pila de Combustible» fuera



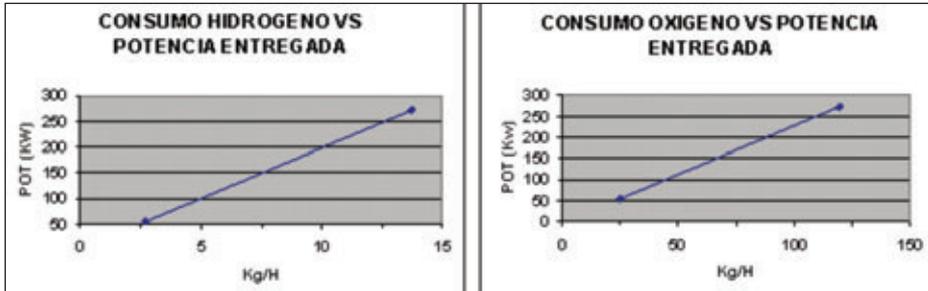
Conexión de bornes de la pila *U-212*.

independiente de las baterías. Así, bajo AIP, la demanda eléctrica la cubriría la pila de combustible.

- Aún así dotaciones del submarino alemán, consultadas informalmente, aseguraron que el sistema carga baterías. Analizaremos este aspecto más adelante.
- El conexionado de los *stacks*, por tanto, deberá ser aquel que genere tensiones elevadas de salida para acoplarse directamente al *bus* de CC del barco y elementos principales de consumo (motor eléctrico...).
- Un conexionado interno probable de los *stacks* sería un conexionado en serie. La regulación de potencia para atender la demanda del buque se podría hacer conectando o desconectando (cortocircuitando) módulos, o con todos conectados regulando la potencia entregada por ellos (20-100 por 100).

Con las suposiciones anteriores, el dimensionamiento técnico del «Sistema Pila de Combustible» alemán podría ser:

- Rango de potencia entregada: 270 kw (carga nominal)-55 kw (20 por 100 carga).
- Rango de consumo de hidrógeno y oxígeno: para las potencias suministradas, configuración de *stacks* y celdas estimadas, los consumos teóricos serían:



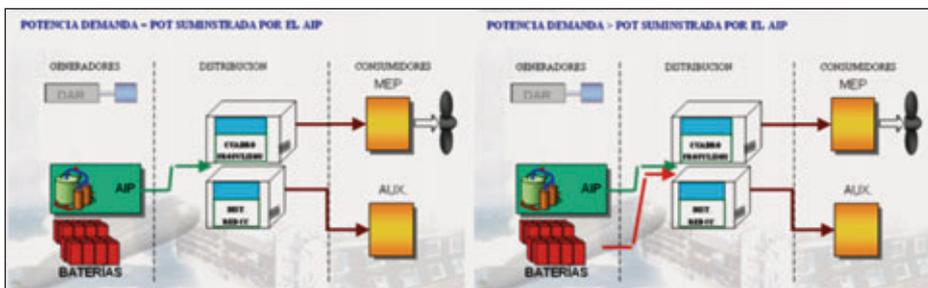
Rango de consumos.

La degradación de la pila de combustible, pérdida de voltaje en las celdas y, en consecuencia, pérdida de potencia entregada, es de alrededor de 0.2 v (130 vatios) por *stack* cada 1500 h.

Desconocemos la vida útil de la pila del *U-212*; sin embargo, a pesar de ser una pila con menor degradación que la del *S-80* por la ausencia de impurezas, por el «estado del arte» de la tecnología en las fechas de su desarrollo (años 90) no creemos que sobrepase los requisitos impuestos a la del *S-80*.

Integración AIP. Propulsión y autonomía

La planta AIP genera una potencia variable (270-55 kw). Por tanto, con esta capacidad de ajuste de energía la posibilidad de «carga de baterías» pierde su sentido. No resultaría eficiente hacer trabajar a la planta AIP a un régimen mayor que permita la carga de baterías, para posteriormente reutilizar esa misma energía. Los rendimientos de carga y descarga implican «perder kilovatios» que se tienen almacenados en forma de hidrógeno y oxígeno. Por

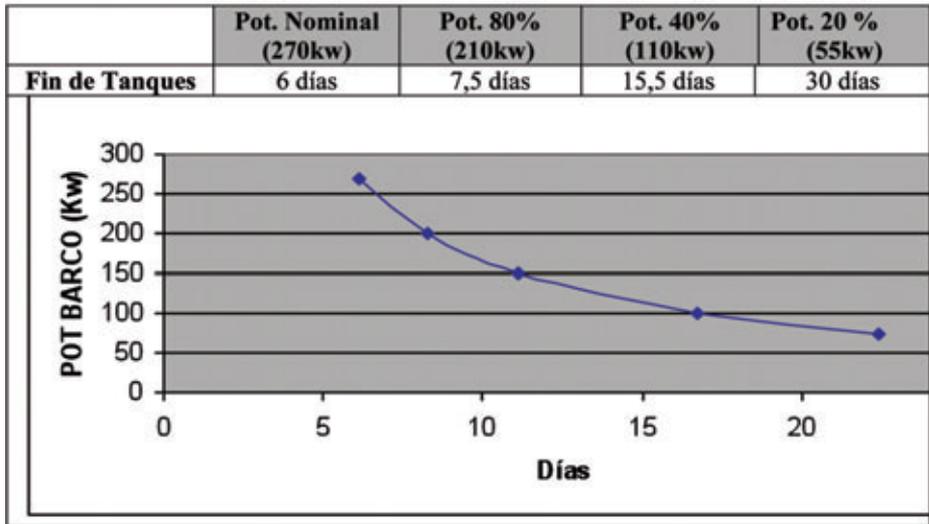


Arquitectura *U-212*.

tanto, entendemos que la planta AIP suministrará potencia a la red y, en caso de que no fuese suficiente, las baterías entrarían de apoyo.

Se destaca que el submarino *U-212* solo tiene un motor diésel-generador, por lo que la fiabilidad del sistema AIP tiene que ser altísima.

La autonomía AIP del submarino *U-212*, entendida como consumo AIP hasta fin de existencias (hidrógeno-oxígeno), con los datos manejados en este informe son:



Para obtener la autonomía en inmersión AIP hay que casar esta capacidad (kw) de generar potencia con la demandada por el buque. Con la consideración realizada sobre la «independencia del AIP respecto a las baterías», la autonomía máxima en inmersión AIP será la de «fin de existencias hidrógeno-oxígeno» para una potencia dada demandada por el buque.

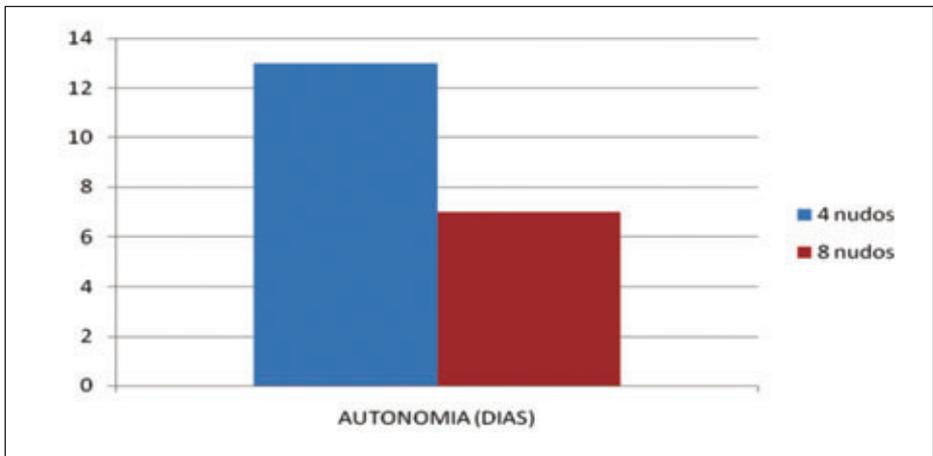
La estimación de la autonomía en inmersión AIP no es fácil. No se tienen datos de los consumos reales de los auxiliares del *U-212*. Para afrontar este «vacío» realizamos las siguientes aproximaciones:

- La potencia consumida por el motor eléctrico principal del *U-212* la estimaremos en función de su punto máximo: 1700 kw-20 nudos
- La potencia consumida por los auxiliares del *U-212* la aproximaremos a partir de la del *S-80* escalando con el desplazamiento en inmersión.
- La potencia consumida por los auxiliares del AIP *U-212* la aproximaremos en base a los equipos comunes en el *S-80*.

Los resultados que obtenemos para el *U-212* son los siguientes:

	MEP	AUX	AUX AIP	POT. TOTAL
4 nudos	20 kw	85kw	20kw	125kw
8 nudos	135kw	85kw	20kw	240kw

Con todo lo anterior, las estimaciones de autonomía en inmersión AIP para cuatro y ocho nudos son:



Es importante resaltar que la estimación de autonomía anterior es la máxima, es decir, hasta fin de existencias del hidrógeno y oxígeno. La existencia de un único motor diésel, en condiciones operativas normales, puede provocar que se reserve un determinado porcentaje de hidrógeno y oxígeno para asegurar el tránsito de vuelta ante un fallo de dicho motor.