

PILAS DE COMBUSTIBLE DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA SUBMARINOS

Anthony Covarrubias Castro*

Pauline Sibille**

Resumen

La evolución de la guerra submarina ha impuesto un desafío tecnológico permanente, siendo los sistemas de propulsión anaeróbicos uno de estos ejemplos, buscando entregar a los submarinos convencionales una tasa de indiscreción cada vez menor en beneficio de mantener la ventaja de la sorpresa en el escenario táctico. Si bien existe bastante bibliografía relacionada con estos sistemas, el presente trabajo pretende ilustrar lo último en desarrollo actualmente disponible y que se conoce con el nombre de Pilas de Combustible de Segunda Generación (FC2G).

Palabras clave: Sistema de propulsión anaeróbico; AIP; MESMA; pilas de combustible.

Una de las principales características de un submarino es su invisibilidad, pero ésta no es permanente, y cada vez que debe subir a profundidad de periscopio se expone a un periodo de vulnerabilidad particularmente crítico para un submarino convencional cuando debe cargar sus baterías. De ahí que uno de los mayores requerimientos, desde el punto de vista operativo, es disminuir la tasa de indiscreción, aumentando su autonomía sumergido sin necesidad de subir a profundidad de periscopio para cargar sus baterías. Esta restricción que si bien en alguna medida se ha logrado mitigar con evidentes mejoras en los sistemas de propulsión, la capacidad de las baterías y por cierto la capacidad de carga de los diésel alternadores, sigue siendo un problema sin resolver y por lo tanto los grandes constructores de submarinos siguen invirtiendo en investigación y desarrollo, siendo los sistemas de Propulsión Independiente del Aire (conocidos como AIP por su sigla en inglés) una de las respuestas a esta necesidad.

Evolución de los actuales sistemas AIP

De los sistemas desarrollados y en servicio actualmente, podemos destacar el AIP *Stirling*, de origen sueco y el precursor en sistemas anaeróbicos para submarinos; el MESMA (Módulo de Energía Submarina Autónomo por su sigla en francés) desarrollado a partir de la tecnología utilizada en submarinos nucleares, reemplazando la fisión nuclear por una fuente de calor generada por la combustión de petróleo diésel y las pilas de combustible FC (*Fuel Cells*, por su sigla en inglés), solución por la que optaron los astilleros alemanes y que basan su producción de electricidad en una conversión electroquímica a partir del hidrógeno y el oxígeno, siendo uno de los sistemas más populares hoy en día, no exentos de problemas y limitaciones. Es así como desde el punto de vista de la seguridad, los sistemas de pilas de combustible deben almacenar entre 130 y 160 toneladas de hidruros para lograr una autonomía que va desde los 9 a 12 días aproximadamente

* Capitán de Fragata (R.), Magister en Ciencias Navales y Marítimas. Colaborador de la Revista de Marina desde 1999. (covarrubias104@gmail.com).

** Ingeniero de ENSTA Bretagne, Francia (École Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne). Directora de Programa FC2G Naval Group.

para un submarino de unas 1.700 toneladas, lo cual para cualquier submarinista es un tema delicado y de alto riesgo para la seguridad del submarino y su dotación, teniendo además como consecuencia, la necesidad de pensar en diseños de submarinos de doble casco o con estanques dedicados al almacenamiento de hidruros entre el casco de presión y la superestructura, con el consiguiente impacto en el diseño del submarino y por ende un considerable aumento en los costos.

Desde un punto de vista logístico, debemos considerar que de las 130 a 160 toneladas de hidruros a transportar por un sistema FC, sólo un 2% máximo representa hidrógeno utilizable en las pilas de combustibles, debiendo ser además de una alta pureza, de lo contrario el porcentaje utilizable descende, lo cual es poco eficiente y de alto costo. A esto debemos agregar lo que significa el soporte logístico que se debe desplegar para reabastecer de hidrógeno a un submarino con este sistema, el cual se traduce en instalaciones especiales para el tratamiento del gas; camiones acondicionados de acuerdo a las estrictas regulaciones asociadas al transporte de hidrógeno; calificaciones y procedimientos que permitan por una parte mantener las condiciones de pureza del hidrógeno y por otra asegurar la integridad del submarino y de su dotación, en sí una compleja y costosa cadena logística, que por lo demás no está disponible en cualquier puerto.

Como una forma de mitigar estos problemas, se buscó la forma de producir el hidrógeno a bordo a través del reformado de combustible.¹ Para esto, el desafío estaba puesto en la selección del combustible adecuado para responder no sólo a un requerimiento operativo, sino que además cumpliera con las normas de seguridad propias de la construcción y operación de submarinos, en especial de las dotaciones. A su vez, era necesario entregar una respuesta integral a lo que significa sostener logísticamente un sistema AIP, entendiéndose por tal, las instalaciones a bordo y en tierra para tratar y proveer los respectivos combustibles, así como el sostenimiento durante el ciclo de vida del submarino, entre otros.

FC2G AIP de Naval Group

En el caso particular de *Naval Group*, la respuesta a los problemas y restricciones de las pilas de combustible fue el diseño de las FC2G AIP, tomando como base el desarrollo de la tecnología nuclear aplicada a sus submarinos (especialmente en lo que se refiere a las medidas de seguridad en el tratamiento de sistemas de energía) y el MESMA que entró en servicio el año 1996 (cuando aún no se contaba con un desarrollo maduro de las pilas de combustible), y del cual se obtuvo la experiencia necesaria en el manejo del oxígeno líquido. De esta forma se privilegiaba la tecnología de dos sistemas probados operacionalmente en submarinos, sumado a la madurez alcanzada por la tecnología de pilas de combustible (disponible en diferentes aplicaciones industriales) siendo necesario seleccionar un combustible adecuado a los requerimientos operativos, de seguridad y logísticos.

■ Selección del tipo de combustible a utilizar para la producción de hidrógeno

Para definir el combustible se emplearon cinco criterios, conjugando seguridad y rendimiento:

- Almacenamiento seguro.
- Energía y densidad del hidrógeno.
- Complejidad en la producción de hidrógeno.
- Volumen de integración.
- Disponibilidad.

Los combustibles analizados: petróleo diésel, metanol, etanol y gasolina.

➤ Almacenamiento seguro:

Este criterio consideró la toxicidad y el peligro de incendio a bordo. En cuanto a toxicidad, el análisis se concentró en el tiempo de reacción requerido ante una fuga del combustible y los efectos nocivos en la salud de la dotación, mientras que el factor peligro de incendio se basó en la temperatura de inflamación, de acuerdo a las normas de la Unión Europea² y las propias normas de seguridad establecidas por *Naval Group* para la instalación de sistemas a bordo de submarinos. La respuesta al criterio de almacenamiento entregó como resultado que desde el punto de vista de toxicidad y daño nocivo a la salud de la dotación, el metanol representa

1. El proceso de reformado, conocido en las empresas de refinería de petróleo, consiste en convertir petróleo diésel y vapor en hidrógeno gracias a un proceso catalítico especialmente diseñado para este propósito.
2. Clasificación europea 1999/45/CE.

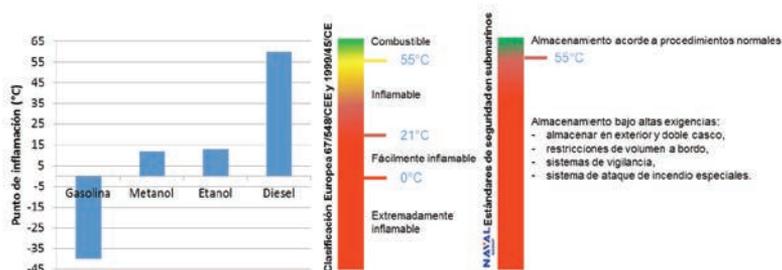


Figura 1 Comportamiento de los combustibles versus temperatura de inflamación.

un alto riesgo dado el corto tiempo de reacción ante una fuga y su alta toxicidad hasta provocar la muerte de personas, comprometiendo incluso la permanencia del submarino sumergido, mientras que el petróleo aún ante una fuga mayor, permite un tiempo de reacción mayor antes de llegar a comprometer la salud de la dotación, sin necesidad de restringir la operación sumergido del submarino y sin el nivel de toxicidad de los otros combustibles analizados. En cuanto a riesgo de incendio, la gasolina es sin duda la que representa el mayor riesgo, seguida tanto del metanol como etanol, los cuales permanecen dentro del rango de los combustibles fácilmente inflamables, con temperaturas cercanas a los 12°C es decir bajo cualquier condición de operación de un submarino, a diferencia del diésel que es el único no inflamable y que requiere de una temperatura superior a los 55°C para recién entrar en la condición combustible de acuerdo a lo que se muestra en la figura 1.

De la figura 1, además debemos desprender la necesidad de un almacenamiento especial para combustibles como la gasolina, etanol y metanol, lo cual se traduce en un impacto directo en el diseño del submarino para cumplir con los estándares mínimos de seguridad tanto para su operación como para su dotación y que desde el punto de vista industrial se traduce en extra costos.

➤ Energía y densidad de H₂:

Para un proceso de producción de hidrógeno, se requiere de un combustible que sirva como fuente de calor para lograr el aumento de temperaturas necesario en el procesamiento de fluidos, manteniéndola durante todo el proceso de

reformado catalítico, además de contener una alta densidad de hidrógeno que permita una adecuada alimentación de las pilas de combustible.

Para lo anterior se analizaron los combustibles en base a su LHV (*Lower Heating Value*, por su sigla en

inglés³), es decir el poder calorífico generado por la oxidación del combustible y que puede ser usado como fuente de energía, LHV (MJ/Kg) en la figura 2, LHV (MJ/L) si consideramos las restricciones de almacenamiento a bordo de submarinos.

En el gráfico de la figura 2 podemos apreciar que el diésel genera mayor poder calorífico que otros combustibles, 130% y 60% más que el metanol y etanol respectivamente.

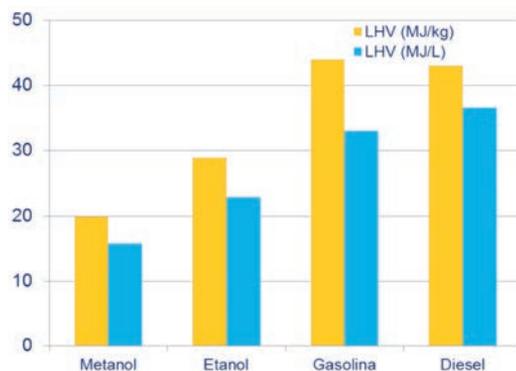


Figura 2 Poder calorífico de los combustibles.

Respecto a la densidad de hidrógeno en los combustibles, ésta es caracterizada en base a la densidad atómica del hidrógeno y describe la cantidad de hidrógeno que puede ser liberado en el proceso de reformación catalítica por cada combustible. Su medición está dada en densidad volumétrica (kgH₂/m³) por ser lo más representativo respecto a las restricciones de almacenamiento a bordo de un submarino. De esta manera tenemos como resultado el gráfico

3. LHV o poder calorífico inferior es la energía efectivamente disponible por unidad de masa de combustible después de deducir las pérdidas con la evaporación del agua.

que se muestra en la figura 3, del cual podemos concluir que el diésel contiene mayor cantidad de hidrógeno que otros combustibles, siendo del orden de 25% y 20% más de hidrógeno contenido en un litro de diésel respecto al etanol y metanol respectivamente.

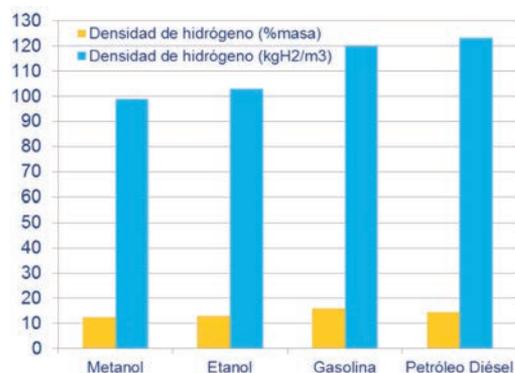


Figura 3 Densidad de hidrógeno en los combustibles.

➤ Complejidad en la producción de H₂:

Respecto a la complejidad en la producción de H₂ se analiza la habilidad de convertir el combustible en hidrógeno de alta calidad, lo cual estará normalmente ligado a la complejidad de la estructura molecular del combustible en la cadena hidrógeno-carbón (largo, linealidad) empleo de mezclas o combustible puro, presencia de impurezas, presencia de átomos de oxígeno en la molécula, entre otros.

En cuanto al proceso de reformación en sí, la complejidad podría estar dada por la temperatura de reformación y la formación de hollín.

Al respecto, la menor complejidad molecular se puede encontrar en el metanol y etanol, mientras que el diésel es el más complejo. En cuanto a la temperatura de reformación, la menor es la del metanol, la cual fluctúa entre los 250°C y 400°C, con un bajo nivel de producción de hollín, mientras que el resto de los combustibles analizados fluctúan entre los 700°C y 900°C, con la consecuente producción de hollín y obviamente un sistema de producción de hidrógeno más complejo.

➤ Volumen de integración

Los requerimientos de volumen de combustible a almacenar dependen de la energía y densidad

(anteriormente descritos) y del volumen de estanques de compensación, pudiendo ser un sistema auto compensado. Respecto a este punto, al momento de resolver el problema asociado a la compensación de la estiba, se debe considerar que las pilas de combustible generan agua desmineralizada, la cual puede ser almacenada o utilizada para compensar el estanque de combustible y que el combustible a compensar no debe ser soluble en agua, lo cual es posible en el caso del diésel, no así el etanol y metanol los cuales son solubles en agua, prácticamente en un 100%.

A partir de estas consideraciones, el diésel y la gasolina permiten un mejor volumen de integración en el empleo de AIP, gracias a su capacidad de compensación con agua producida por las pilas de combustible, aun cuando más adelante veremos que el consumo de combustible no representa un desafío para la compensación de la estiba del submarino.

➤ Disponibilidad del combustible

Para el análisis de esta variable se consideraron dos categorías de combustible, la de los hidrocarburos, donde encontramos la gasolina y el diésel, y la de los alcoholes, donde encontramos el metanol y etanol. Al analizar la disponibilidad de cada una de estas categorías, podemos distinguir que:

- Los hidrocarburos son de fácil adquisición en todo el mundo y por ende no generan una dependencia de proveedores específicos. Por otra parte la pureza de los diésel es cada vez mayor, en parte empujado por la demanda de la industria automotriz y las normas de emisión de gases cada vez más estrictas.
- Respecto a los alcoholes, éstos no se encuentran disponibles ni en calidad ni en cantidad en todas partes, lo cual obliga a depender de una cadena logística específica y por ende vulnerable.

Al considerar el conjunto de criterios empleados para la evaluación del combustible para un sistema FC2G AIP, podemos concluir que el petróleo diésel es el más adecuado, basado en lo siguiente (entre paréntesis criterios o conceptos favorecidos):

- Posee el punto de inflamación más alto, disminuyendo el riesgo de incendio (seguridad).

- Es menos tóxico para la dotación (seguridad).
- Fácil de manipular en cuanto a procedimiento de carga y descarga de a bordo (seguridad/logística).
- Dominio en su empleo y manipulación por parte de las dotaciones (seguridad/entrenamiento).
- Mejor respuesta energética y densidad de hidrógeno (performances).
- Disponibilidad en todo el mundo con altos estándares de pureza (logístico/operacional).

Si bien, desde el punto de vista del proceso de reformado, el emplear petróleo diésel es más complejo, se privilegió invertir en su desarrollo en beneficio de mantener las cualidades antes mencionadas, especialmente en cuanto a seguridad del submarino y su dotación. Hoy es posible afirmar que se logró un sistema robusto y seguro con más de 3.500 horas de funcionamiento.

La figura 4 muestra mediante gráficos el cumplimiento de los criterios evaluados en la selección del combustible para la producción de hidrógeno, considerando que el valor 1 corresponde al menor rendimiento y 5 al mejor, siendo 2 a 4 rendimientos intermedios.



Figura 4 Evaluación de combustibles.

Impacto en el diseño del submarino

Desde el punto de vista del diseño del submarino, las pilas de combustible de segunda generación logran suplir el problema asumido por fabricantes de submarinos con estanques de hidruros, donde la necesidad de aumentar la autonomía del AIP implica mayor cantidad de hidrógeno, es decir mayor cantidad de estanques de hidruros (normalmente instalados en el exterior del casco de presión) con un aumento de peso, un inevitable aumento del desplazamiento

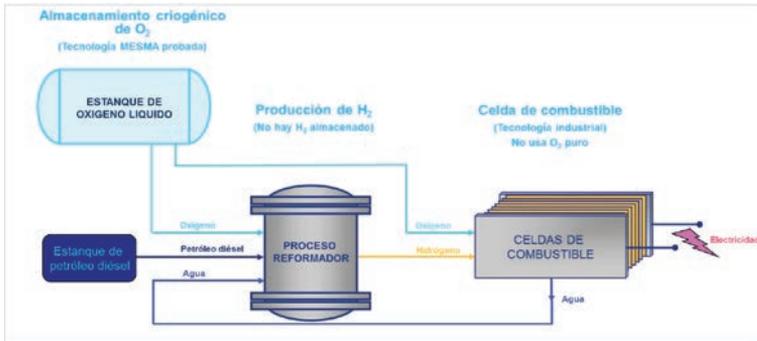
del submarino, (comprometiendo incluso su estabilidad) y sus costos asociados. Para las FC2G, la mayor necesidad de hidrógeno no tiene impacto significativo en la cantidad de petróleo diésel a embarcar, dado que como veremos más adelante, el consumo de petróleo en la generación de hidrógeno es más eficiente respecto al empleo de hidruros, por ende no existe necesidad de estanques adicionales. A su vez, debemos destacar que un aspecto importante en el diseño de un submarino es la seguridad de sus instalaciones, en este caso el empleo de FC2G no requiere de complejos sistemas de almacenamiento de hidrógeno a bordo y por ende no compromete la seguridad del submarino. En términos de espacio, un AIP FC2G, implica una sección de aproximadamente 10 m de eslora, completamente integrado al Sistema de Control Integrado de la Plataforma (SCIP). Hoy esta sección puede ser incorporada inmediatamente a nuevos submarinos, como a su vez a submarinos existentes durante un *overhaul*.

Esquema general de funcionamiento

En la figura 5 se muestra el proceso de generación de electricidad, por parte de pilas de combustible, a partir de la producción de hidrógeno a bordo y el almacenamiento de oxígeno líquido.

Empleo operacional y logística asociada

El empleo de un reformador a base de petróleo diésel, implica aumentar la autonomía sumergido (sin *snorkel*) en cerca de dos semanas, asumiendo un submarino entre 1.700 y 2.000 toneladas, con un requerimiento de 14 toneladas de petróleo y un estanque de aproximadamente 32 toneladas de oxígeno líquido, lo cual desde ya nos hace pensar en las cerca de 130 toneladas sólo de hidruros que requiere un sistema que no produce el hidrógeno a bordo.



■ Figura 5. Esquema de generación de electricidad a partir de la generación de hidrógeno.

Uno de los aspectos a destacar del sistema, es el conocimiento que posee la dotación de un submarino convencional en cuanto a la manipulación del petróleo diésel, sumado a que para lograr dos semanas de autonomía sumergido, las 14 toneladas de diésel representan un bajo consumo si consideramos la demanda de los respectivos periodos de snorkel, sumado a que no representan un desafío para la compensación de la estiba.

En cuanto a discreción acústica, se ha considerado el empleo de estructuras suspendidas, similar a las implementadas en los submarinos de las clases *Scorpena* (SSK) y *Le Triomphant* (SSBN), las que han demostrado exitosamente su contribución, objeto evitar que el ruido generado por el sistema AIP sea transmitido al casco. Por otra parte, los gases de descarga producto del proceso son enfriados previo a ser descargados al mar, reduciendo de esta forma una eventual indiscreción en la firma acústica e infrarroja.

En cuanto a profundidad de operación, no existen restricciones para ser empleado en todo el rango de profundidad del submarino.

Respecto a renovación de la atmósfera, se emplea el mismo oxígeno del sistema para mantener el porcentaje adecuado para la dotación, lo cual implica prescindir de otros sistemas, como velas generadoras o sistemas de inyección; mientras que para el control del CO₂ se considera el empleo de las existentes plantas absorbentes.

No requiere de operadores dedicados y por ende sin impacto en la dotación. El sistema se encuentra integrado al SCIP tanto para su supervisión como explotación.

Otra de las principales ventajas es la disponibilidad inmediata de petróleo diésel, similar al embarcado en los submarinos para el funcionamiento de los motores alternadores, por ende fácil de adquirir no solo en el puerto base sino que en cualquier puerto de despliegue y por tanto con una significativa reducción de costos, a diferencia de lo que significa la cadena

logística de reabastecimiento de hidrógeno, mientras que el oxígeno a utilizar es similar al empleado en hospitales, por lo que tampoco representa un problema su obtención.

Su mantenimiento y ciclo de vida está asociado al del submarino, de modo que aquellas rutinas menores son efectuadas en los periodos de puerto y su mantenimiento mayor durante el periodo de *overhaul*.

Finalmente, la tasa de indiscreción total del submarino se ve reducida en forma global y durante el periodo de empleo de FC2G AIP se reduce sólo al tiempo de exposición necesario para observaciones, empleo de MAE y comunicaciones.

Conclusión

Después de una decena de años de desarrollo, incluyendo cinco de funcionamiento en tierra (escala 1) que le permiten la denominación *ready to sail*, estamos frente a un nuevo avance tecnológico en cuanto a sistemas de propulsión anaeróbicos para submarinos, el cual presenta ventajas tanto operacionales como logísticas para sus utilizadores, reduciendo considerablemente la tasa de indiscreción, como a su vez logra separarse de las limitaciones asociadas al almacenamiento de hidrógeno a bordo, especialmente en cuanto a seguridad y costos, incluyendo aquellas que impactan en el diseño de submarinos de mayor tonelaje para marinas oceánicas. A corto plazo deberemos considerar su empleo en combinación con las baterías de Lito Ion, lo cual sin duda representa un nuevo desafío de desarrollo en beneficio de mantener la característica furtividad de los submarinos.
