

SISTEMAS DE PROPULSIÓN INDEPENDIENTE DEL AIRE PARA SUBMARINOS

Boris Nagorny*

Peter Hauschildt**

El primer requisito para un sistema de propulsión independiente del aire (AIP), era y sigue siendo el de aumentar la autonomía operando sumergido, mientras se mantienen la discreción y la operatividad en el nivel de los mejores submarinos convencionales.



La introducción de la Propulsión Independiente del Aire (en inglés AIP) en submarinos no nucleares permite que sus misiones se desarrollen en estado continuo de sumersión durante varias semanas, totalmente independientes del acceso al aire exterior. Por tanto, el abanico de posibles escenarios de misiones del submarino se ve muy ampliado, mientras el riesgo de detección por parte del adversario disminuye. Entonces, ¿Cuáles son las exigencias para ese tipo de sistema AIP, cómo son sus principales características y están

los distintos sistemas a la altura de lo que les exijan sus operadores?

Requisitos de un sistema AIP

El submarino convencional con propulsión diesel-eléctrico tal y como lo conocemos desde principios del siglo XX, forma la base de todos los sistemas de AIP que se han desarrollado hasta ahora. Para su operación en sumersión, éstos disponían únicamente de la energía almacenada en sus baterías

de plomo. Con esta técnica, un submarino era capaz de permanecer sumergido durante unos pocos días como máximo, dependiente de su velocidad y de otros consumidores de energía instalados a bordo.

Por otra parte, la última generación de estos submarinos consiguió desarrollar un grado furtivo e indetectable en operaciones sumergidos muy superior a la de los submarinos nucleares. Entonces, el primer requisito para un

* Físico, Departamento Desarrollo & Investigación, TKMS.

** Ingeniero Naval Mecánico, Vicepresidente Desarrollo & Investigación, Diseño Conceptual, Armada de Alemania, TKMS.

sistema AIP era y sigue siendo el de aumentar la autonomía sumergida mientras se guarden la discreción y la operatividad en el nivel de los mejores submarinos convencionales.

Estos requisitos, en resumen, son los siguientes:

- Operación sin contacto con la superficie durante largos periodos.
- Alta eficiencia / poca transmisión de calor al agua del mar.
- Poco ruido emitido.
- Baja señal magnética.
- Pequeño tamaño.
- Peso bajo.

Sistemas AIP actualmente disponibles

Existen diversos sistemas AIP con cierto grado de desarrollo y madurez, teniendo en cuenta los requisitos anteriormente indicados. Una característica común a todos los sistemas es el contingente de potencia, que no permite al submarino la operación continua sumergida a alta velocidad, limitándolo a velocidades más lentas para operaciones silenciosas, (la velocidad más usual de operación de un submarino, pues permite aprovechar al máximo los sensores instalados a bordo). Esta semejanza resulta del hecho que el oxígeno que consumen todos los sistemas AIP ocupa mucho espacio y ejerce mucha influencia sobre el tamaño global de los sistemas. En todos los sistemas que a continuación se describen, el oxígeno está almacenado como líquido a temperaturas por debajo de 100K en depósitos similares especialmente aislados de doble pared, siendo la presión de almacenamiento la única diferencia.

Turbinas de vapor de ciclo cerrado

Esta tecnología tiene su origen en la técnica de los submarinos nucleares. Las principales diferencias se encuentran en la potencia máxima, que es por mucho inferior para el sistema AIP, y en el método de generar calor, tratándose

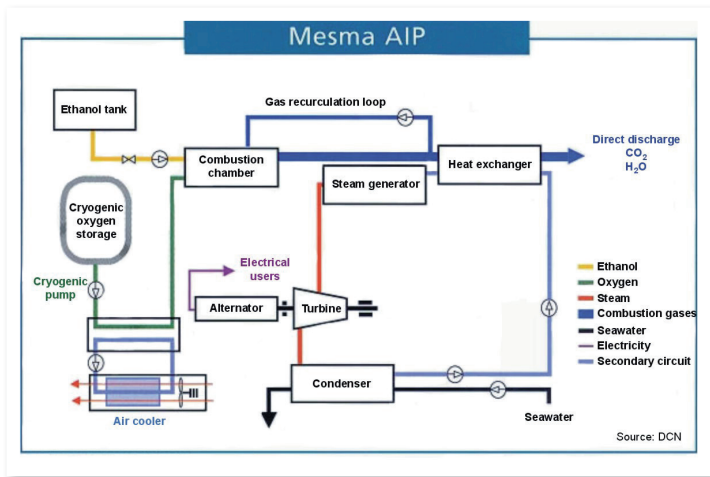


Figura 1: Sistema MESMA.

de combustión de carburantes y no de la fisión nuclear. El sistema más conocido en el mercado, ofrecido por el astillero francés DCNS, se llama MESMA (Module d'Energie Sous-Marine Autonome).

En la cámara de combustión se consumen etanol y oxígeno a una presión de 60 atm. Los gases producidos pasan al generador de vapor en el cual se genera el vapor saturado para el ciclo de vapor. Una parte de los gases de combustión se recicla con un ventilador para controlar la combustión, el resto se enfría en el intercambiador de calor aprovechando el agua de alimentación del ciclo de vapor. El contenido de agua en los gases de combustión se condensa y queda almacenada a bordo para compensar peso, mientras el resto de gas (principalmente CO₂) se expulsa al agua, sin la necesidad de contar con un compresor de alta presión de gas adicional, producto de la alta presión del gas.

En el circuito secundario, el vapor generado impulsa la turbina, la cual tiene conexión mecánica a un alternador. Después de pasar por la turbina, el vapor se condensa y luego es presurizado por el compresor de alimentación de agua antes de calentarse y volver a vaporizarse.

El astillero DCNS vendió un sistema MESMA a la Marina de Paquistán el año 1994. El tercer submarino Agosta-90B de Paquistán, S 139 "Hamza", dispone del sistema AIP MESMA de DCNS y a su vez comenzó la conversión de dos naves más antiguas del tipo Agosta-90B con el sistema

AIP MESMA durante su reacondicionamiento en el año 2011.

Sistema de motores diesel de ciclo cerrado

Esta tecnología, conocida por CCD, surge como desarrollo especial de motores estándar diesel. Varias empresas en todo el mundo han trabajado o siguen perfeccionando este tipo

de combustión, se mezcla al oxígeno un gas no reactivo como el argón. La cantidad necesaria de agua de mar está controlada por el sistema de suministro de agua para asegurar que el sistema CCD pueda operar independientemente de la profundidad de sumersión y con eficiencia de energía. ThyssenKrupp Marine Systems dispone de un sistema demostrador en tierra con todos los subsistemas y un concepto de control que permite que el motor opere siempre

con el consumo mínimo específico de gasoil para la energía que en este momento se precisa.

Una versión anterior del sistema fue probada con éxito en una instalación de pruebas en tierra, y a bordo del submarino alemán retirado del servicio U1 en los años 1990. A pesar de los resultados positivos, la Marina alemana decidió en ese tiempo a favor de otro sistema alternativo y el desarrollo fue suspendido. Últimamente se ha reasumido el trabajo

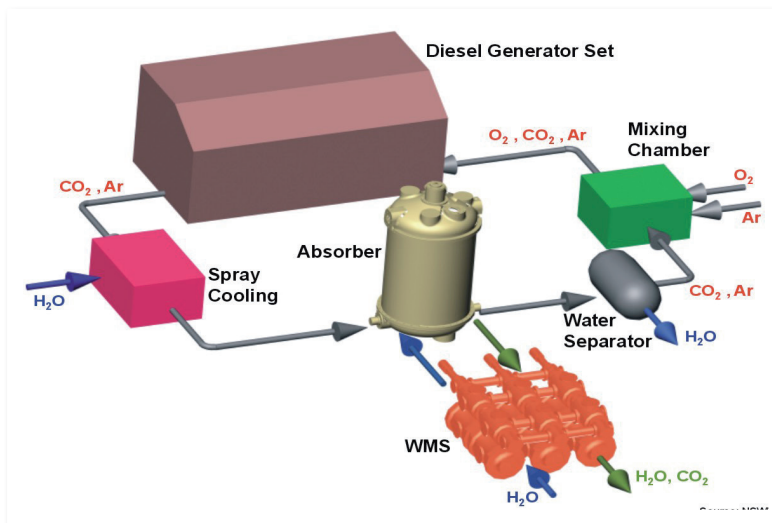


Figura 2: Sistema CCD.

de sistema. La empresa ThyssenKrupp Marine Systems dispone del sistema más avanzado para el uso a bordo de submarinos, en forma de una instalación de prueba en tierra.

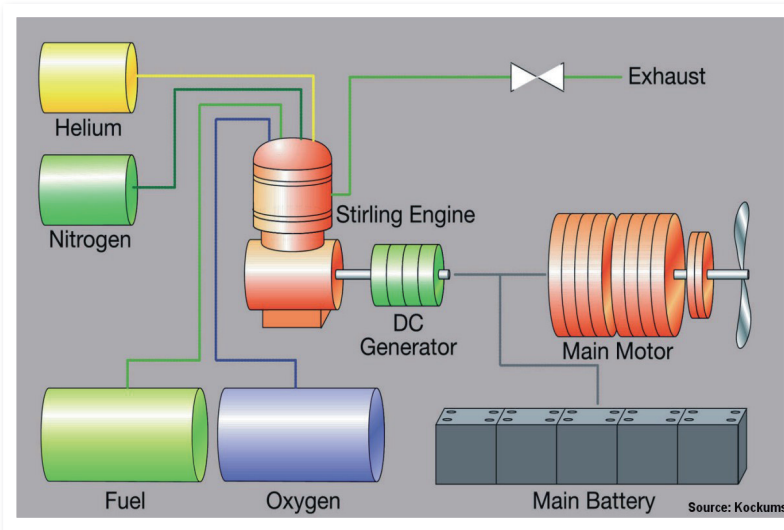
El sistema emplea un motor diesel comercial tipo MTU 2000 adaptado a las necesidades particulares de la operación en ciclo cerrado. Los gases del escape consisten principalmente en dióxido de carbono, argón, vapor de agua y un restante de oxígeno no consumido.

Tras enfriar a unos $80^\circ C$, el gas de escape pasa por un sistema absorbente en el cual el dióxido de carbono se disuelve en agua de mar, condensando el vapor de agua. La presión del ciclo cerrado de gas se mantiene lo más alto posible para conseguir un adecuado ritmo de absorción de CO_2 con dimensiones compactas del aparato de absorción. La mezcla de gases residuales se enriquece con oxígeno y vuelve al motor para su reutilización en otro ciclo de combustión. Para controlar la

resultando de ello la cuarta generación del sistema, que de momento no se ha vendido a ningún cliente.

Sistema de motor Stirling

El motor Stirling es un motor de calor que generalmente puede funcionar con más o menos de cada tipo de carburante; pero para el uso en submarinos normalmente se utiliza gasoil con oxígeno. El motor Stirling funciona a base de la combustión externa continua. En principio es bastante fácil elevar la presión en la cámara de combustión a un nivel más alta que la presión máxima de sumersión, permitiendo así despedir los gases de escape al agua del mar en una profundidad prudente sin necesidad de un compresor adicional y opcional. El sistema actualmente más avanzado del tipo Stirling para submarinos ofrece SAAB (Kockums Naval Solutions) y en su tercera generación ya está disponible en el mercado.



■ **Figura 3: Sistema de motor Stirling.**

En ese sistema, el motor conjuntamente con el generador y sistemas auxiliares compone un módulo completo de Stirling. El rendimiento mecánico del motor Stirling se convierte en energía eléctrica en un alternador síncrono. El rendimiento eléctrico de un módulo Stirling puede ajustarse y fijarse entre 25 y 70 kW mediante el ajuste del carburante. La cantidad de módulos a instalar a bordo de un submarino depende de sus necesidades de energía en sumersión. Los gases de escape del sistema Stirling se componen principalmente de dióxido de carbono y vapor de agua. Tras el proceso de combustión, los gases entran en un condensador de gases de escape para condensar el vapor de agua. Los gases residuales pasan a una cámara de mezcla en la cual el dióxido de carbono se disuelve en el agua de refrigeración para pasar al agua de mar. En las flotas de las Marinas de Suecia, Singapur y Japón se encuentran en servicio submarinos equipados con motores Stirling.

Sistema de células de combustible

En las células de combustible la conversión de la energía almacenada en los reactivos en energía eléctrica tiene lugar sin ruido y sin combustión, mediante la conversión directa electroquímica. Si los reactivos utilizados son hidrógeno y oxígeno, el resultado de la conversión consiste únicamente en electricidad y agua.

Para el uso a bordo de submarinos es lo más adecuado utilizar células de combustible con membrana de intercambio de protones (PEM, Proton Exchange Membrane); las células operan con temperaturas de unos 80°C. Las células de combustión tienen ciertas ventajas en comparación con motores de combustión: la conversión de energía tiene un alto grado de eficiencia, la

temperatura de operación es baja por lo que la señal infrarroja también lo es, el funcionamiento para conectar/desconectar y dinámico es favorable, no hay gases de escape por lo que no hay limitación de la profundidad de sumersión.

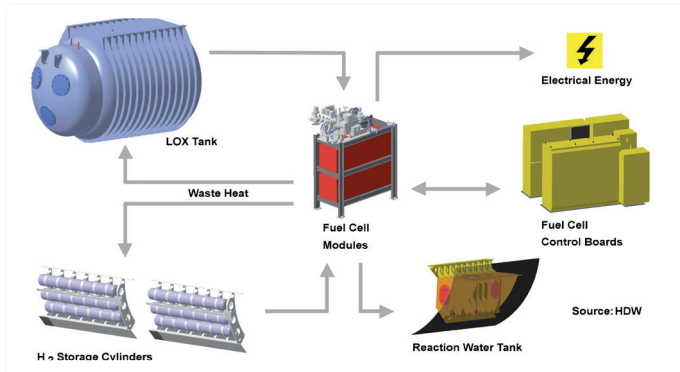
Siendo la conversión de energía química en eléctrica directa sin la intervención de aparatos mecánicos, no se necesita generador. Además, no se producen gases de escape, que deberían despedirse al agua del mar. El agua derivado como subproducto de la reacción queda a bordo para compensar peso.

El líder entre los sistemas de célula de combustible PEM para submarinos fue desarrollado y está ofrecido a la venta por ThyssenKrupp Marine Systems (antes Howaldtswerke-Deutsche Werft/HDW) conjuntamente con Siemens. Estas células de combustible PEM se caracterizan por el alto grado de integración de procesos, teniendo por resultado un volumen bajo con alta fiabilidad y alta densidad de energía.

Además de las células de combustible y placas de control, el sistema AIP con células de combustible comprende el almacenamiento de los reactivos (H₂ y O₂), almacenamiento del agua producida en la reacción y las interfaces con el sistema de control del submarino y varios sistemas auxiliares, indicados en la Figura 4. El hidrógeno está almacenado en forma de hidruro metálico en cilindros completamente libres de mantenimiento, por lo que pueden

estar colocados sin riesgo en el casco exterior del submarino.

Como próximo paso de avance, en varios países se está desarrollando un sistema reformador para la generación de hidrógeno desde hidrocarburos.



■ Figura 4: Sistema de células de combustible.

ThyssenKrupp Marine Systems presentó un sistema de prueba en el año 2000 y ya dispone de un diseño de submarino equipado con sistema de AIP con células de combustible y reformador, tratándose del submarino de HDW de la Clase 216.

Mientras varias naciones como Francia, España, Rusia y China están desarrollando sistemas AIP con células de combustible, hasta ahora Thyssen Krupp Marine Systems es el único astillero que ofrece sistemas de propulsión independiente del aire a base de células de combustible. Los submarinos en servicio de HDW de las Clases 212A, 214 y Dolphin AIP actualmente se encuentran utilizando este sistema, y que se ofrece, también, para el reacondicionamiento de submarinos de HDW de la Clase 209.

Comparación de los sistemas

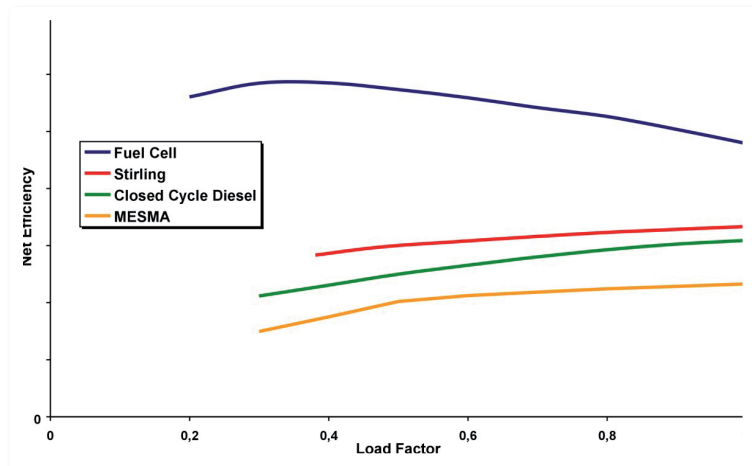
La comparación está basada en datos publicados o estimados.

Todos los sistemas aquí relacionados tienen muy distintos principios de operación. Por ello, los parámetros como eficiencia, ruido emitido, consumo de carburante, consumo de oxígeno, calor difundido, etc. se diferencian mucho.

Como se desprende de la Figura 5, la célula de combustible es superior a todos los demás sistemas en cuestiones de rendimiento neto, los sistemas Stirling y CCD demuestran eficiencia media, mientras MESMA es bastante menos eficiente. Es digno de mención que el sistema de células de combustible, contrariamente a los otros, alcanza su máxima eficiencia neta con carga parcial, cosa favorable para el uso a bordo de submarinos especialmente en

operación silenciosa.

En lo que es ruido, el sistema de célula de combustible es, a priori, mucho mejor que los otros. La ausencia casi completa de piezas móviles



■ Figura 5: Rendimiento neto de los sistemas AIP.

hace que el funcionamiento del sistema sea excepcionalmente silencioso y sin comparación.

La ventaja del alto rendimiento de la célula de combustible conlleva los beneficios adicionales de un bajo consumo específico de oxígeno, lo que a su vez influye directamente el tamaño total del sistema. Por ello, el relativamente bajo consumo

de oxígeno por las células de combustible, cuyo sistema precisa un depósito menos grande de oxígeno líquido, tiene por resultado que el sistema de células de combustible es el más pequeño de todos, los sistemas con diesel de ciclo cerrado y Stirling son aproximadamente iguales, mientras MESMA necesita mucho más espacio que los otros. Comparando las posibilidades de almacenamiento de carburantes, es más fácil almacenar diesel y etanol, los carburantes de Stirling, CCD y MESMA, que el hidrógeno utilizado por las células de combustible. La manera más eficiente y segura de almacenar el hidrógeno es de ligarlo físicamente en un hidruro metálico sólido. La energía que se precisa para liberar el hidrógeno del hidruro metálico consume casi completamente el calor residual producido por la operación de las células de combustible, por lo que muy poca energía calorífica pasa al agua de mar. De esta manera, también, se reduce la probabilidad de detección por sensores infrarrojos. El almacenamiento del hidrógeno en hidruro metálico sólido hace que el sistema de células de combustible sea el más pesado de estos cuatro sistemas. Este hecho tiene relevancia si el diseño básico del submarino no tiene lo suficiente en lastre de plomo que puede sustituirse por los pesados cilindros de hidruro metálico.

Conclusiones

- Actualmente hay cuatro diferentes sistemas en el mercado con distintas características y capacidades. No es posible clasificar un

ranking final porque el sistema a elegir depende mucho de las necesidades del cliente potencial. No obstante, es evidente que el sistema de MESMA no compite en la misma clase que los otros a raíz de su bajo rendimiento.

- El sistema de células de combustible, con su alto rendimiento, es el sistema AIP más avanzado y tomando en consideración el requisito más crítico de submarinos, de mantener un comportamiento sigiloso y furtivo, este sistema caracterizado por su tamaño pequeño, muy poco ruidoso, ausencia total de gases de escape y baja señal infrarroja tiene muchas ventajas. Los sistemas del motor Stirling y del diesel de ciclo cerrado no tienen el mismo grado de perfección técnica y señales mínimas, pero probablemente son más económicos y utilizando diesel como carburante, evitan las exigencias logísticas del hidrógeno.
- En los últimos años la mayoría de las Marinas (por ejemplo, Alemania, Italia, Grecia, Corea del Sur, Portugal, Israel, Turquía y España), decidieron a favor de un sistema de propulsión independiente del aire con células de combustible; tanto para sus nuevos submarinos como para programas de reacondicionamiento, mientras Suecia y Japón eligieron el sistema AIP del motor Stirling. El sistema MESMA se utiliza únicamente en la Marina de Paquistán, mientras el sistema con diesel de ciclo cerrado hasta ahora no ha sido contratado.
