

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA PROPULSIÓN ANAEROBIA EN SUBMARINOS

Ángel ARRAZOLA MARTÍNEZ



Introducción



Se de general conocimiento que la propulsión convencional de un submarino está basada en el empleo de motores eléctricos y almacenamiento de energía en baterías recargables. Dependiendo del consumo energético del buque y de la energía almacenada en las baterías, cada determinado tiempo se debe proceder a la recarga de las mismas, para lo cual se emplea una planta de generación de energía, que consiste en motores diesel acoplados a generadores.

Para llevar a cabo esta maniobra, denominada «snorkel», el buque debe situarse a cota periscópica e izar el mástil de inducción para alimentar la admisión de los motores diesel con aire atmosférico. La maniobra de «snorkel» supone cometer una indiscreción, ocasionada fundamentalmente por el incremento de:

- Ruido propio por la puesta en funcionamiento de los motores diesel.
- Firma térmica por los motores y su exhaustación.
- Firma visual por la estela del mástil sobre la superficie del agua.
- Firma radar por el mástil de inducción.

Por tanto, la propulsión convencional presenta los inconvenientes de limitación de autonomía (máxima de 70 a 100 horas) y de la indiscreción que se comete durante los periodos de «snorkel».

Para soslayarlos se comenzó a investigar, después de la Segunda Guerra Mundial, en la obtención de sistemas de propulsión independientes del aire atmosférico que aportaran autonomía suficiente para desempeñar misiones que exigieran periodos largos de inmersión.

Inicialmente se recurrió a la energía nuclear que permitió y permite el diseño de submarinos de gran tamaño, aportando una autonomía tal que el tiempo

de inmersión del buque no está limitado por parámetros energéticos, sino por motivos de diferente índole, como puede ser la fatiga de la dotación.

Este tipo de propulsión supone disponer de una tecnología muy específica y compleja, que además de costosa desde el punto de vista económico, puede resultarlo también en el entorno sociopolítico. Por ello, son sólo cinco los países que disponen de submarinos nucleares en servicio: China, Estados Unidos, Francia, Reino Unido y Rusia.

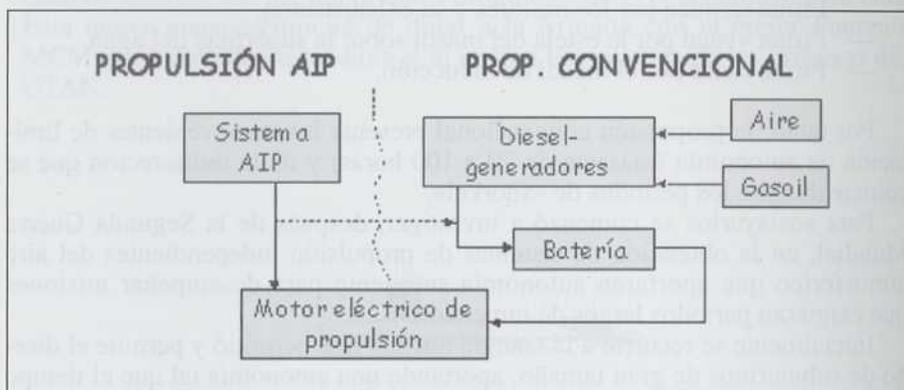
En paralelo al desarrollo de la propulsión nuclear, otros países, principalmente Alemania, Suecia y Francia, comenzaron a investigar sistemas de propulsión no nucleares que permitieran la navegación en inmersión sin necesidad de contacto con la atmósfera. Estos sistemas se denominan sistemas de propulsión anaerobia o AIP (Air Independent Propulsion).

Definición de sistemas AIP y de sistemas de propulsión híbridos

Un sistema de propulsión anaerobia se define como un conjunto de elementos que transforman la energía química que el propio sistema almacena en energía mecánica o eléctrica, con independencia de la atmósfera.

Las potencias obtenidas hasta ahora con los diferentes sistemas AIP son reducidas, pero suficientes para desplazar un submarino en inmersión a una velocidad sostenida de cuatro o cinco nudos. En estas condiciones de navegación, el consumo total, que incluye la propulsión y los auxiliares, es también reducido, estando comprendido entre 150 y 200 kW.

Para la obtención de las potencias necesarias en condiciones de elevado consumo energético, del orden de MW, como pueden ser velocidades elevadas, tránsito o recarga de baterías, se necesitarían un gran número de unidades de transformación de energía, lo que incrementaría el peso, volumen y coste del sistema AIP, llegando así a la conclusión de que se tiene que continuar empleando la propulsión convencional.



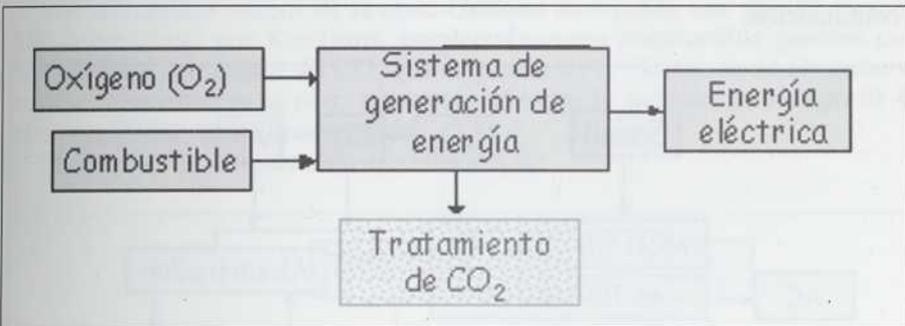
Por tanto, dado el estado actual de la técnica, un sistema AIP es un complemento al sistema convencional diesel-eléctrico de propulsión, que está optimizado para capacitar a un submarino a permanecer sumergido durante un gran periodo de tiempo a baja velocidad. Así, surge el concepto de submarinos híbridos, que emplean su sistema AIP para situaciones de reducida demanda energética, como pueden ser las misiones de patrulla, vigilancia y adquisición de información a baja velocidad, y las baterías para maniobras que implican mayores consumos, por ejemplo, caza evasión a alta velocidad o tránsitos.

El esquema funcional de este tipo de plantas de propulsión híbridas es el que se muestra a continuación.

Hay que señalar que el sistema AIP puede aportar la energía que genera a las baterías o directamente al motor eléctrico de propulsión, dependiendo de la solución de diseño que se adopte.

Elementos principales de un sistema AIP

Cualquier sistema AIP consta de los elementos principales que se detallan en el esquema adjunto.



El elemento diferencial es el sistema de generación de energía, que además impone el tipo de combustible a emplear y la necesidad o no de tratamiento de productos residuales, en su mayoría dióxido de carbono (CO_2), fruto de una combustión o de una reacción química.

Sistemas AIP actuales

En la actualidad existen las siguientes posibilidades para estos sistemas, cada una con un grado de desarrollo e implantación en buques en servicio diferentes.

Sistemas basados en motor diesel de ciclo cerrado

El elemento generador de energía es un alternador acoplado a un motor diesel estándar, destacando como aspecto específico del sistema la recirculación parcial hacia la admisión de los gases de escape, previa eliminación del CO_2 que contienen.

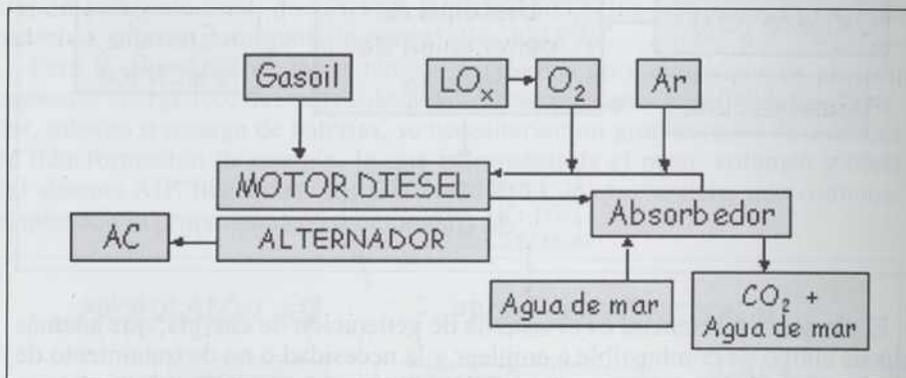
Los gases de escape, constituidos fundamentalmente por nitrógeno (N_2) y CO_2 , se introducen en el absorbedor, cuya misión es disolver el dióxido de carbono en agua de mar. De este dispositivo, además de agua de mar con CO_2 disuelto, sale una mezcla de gases, N_2 en su mayoría, a la que se añade oxígeno (O_2) y un gas inerte, argón (Ar).

Así se tiene que en los cilindros del motor se introduce un flujo de gases, equivalente desde el punto de vista termodinámico a la atmósfera a cielo abierto, compuesto principalmente por oxígeno, nitrógeno y argón, que es el responsable de mantener las características termodinámicas de dicho flujo.

El oxígeno se almacena en tanques criogénicos en estado líquido (LO_2). Esta solución es la que se adopta para cualquier tipo de sistema AIP.

El combustible que demanda el motor es el mismo que se utiliza para los motores de la planta de generación de energía principal.

El esquema básico de funcionamiento de este sistema es el que se muestra a continuación.



Las ventajas que presenta este sistema son, además del empleo del mismo combustible que la planta principal, la fiabilidad y facilidad de mantenimiento por incorporar en su mayoría elementos de tecnología probada y conocida. Como inconvenientes hay que destacar la producción de ruido y vibraciones y la generación de CO_2 , que deberá de ser expulsado al exterior, aunque ello no resulta ser un aspecto crítico, puesto que existen soluciones técnicas al respecto.

En referencia a su estado de desarrollo, actualmente no se encuentra en servicio ningún buque que incorpore este sistema, ni está previsto instalarlo a corto plazo, aunque se han realizado pruebas con él en un submarino alemán. Thyssen continúa investigando y optimizando esta tecnología.

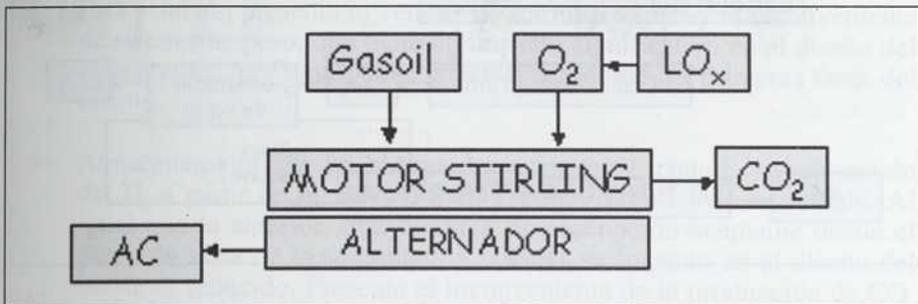
Sistemas basados en motor Stirling

El motor Stirling es un motor alternativo de combustión externa, en el cual el calor producido en una cámara de combustión se transfiere a un circuito cerrado de gas. El gas calentado a alta temperatura se expande en uno o varios cilindros provocando un movimiento alternativo de pistones que se transmite a un cigüeñal por medio de bielas, transformándose en movimiento rotatorio que arrastra a un alternador.

En lo referente a la expansión y compresión el funcionamiento es similar a un motor alternativo, pero presenta dos diferencias fundamentales: los pistones que sufren las carreras de trabajo operan en un circuito cerrado de gas, que suele ser helio (He), y la energía calorífica procedente de la cámara de combustión se transfiere de modo continuo al ciclo mediante un intercambiador de calor.

Los submarinos suecos de la clase *Götland* incorporan este tipo de sistema AIP, desarrollado por Kockums, empleando como combustible gasóleo con bajo contenido en azufre. El CO_2 que se genera en la cámara de combustión se expulsa directamente al mar, aprovechando que la presión de trabajo de la misma es 20 bar, aproximadamente.

El esquema de alto nivel de este sistema es:



La principal garantía que presenta esta solución es que se encuentra en servicio desde 1995, aportando resultados satisfactorios en lo referente a prestaciones y mantenimiento. Su mayor inconveniente es la producción de CO_2 , y la solución adoptada para su eliminación, ya que limita la cota operativa de funcionamiento.

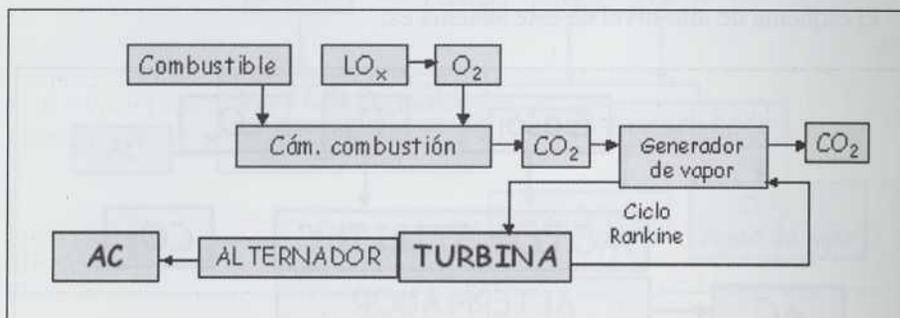
Sistema MESMA

La empresa de construcciones navales francesa DCN, aplicando los conocimientos adquiridos en la obtención de sistemas de propulsión nuclear, inició a principios de los años 80 un proyecto para desarrollar un sistema de propulsión anaerobia para submarinos convencionales, empleando una turbina de vapor operando según el ciclo de Rankine. De esta manera nació el sistema MESMA, que responde al acrónimo de Module d'Energie Sous Marine Autonome. Se trata básicamente de un sistema convencional de turbina de vapor con una cámara de combustión alimentada por O_2 y un combustible (diesel o etanol).

El sistema está constituido principalmente por:

- Circuito primario de generación de energía calorífica por combustión, que incluye la cámara de combustión y parte del generador de vapor. La presión de operación de este circuito es de 60 bar. Aprovechando esta elevada presión la expulsión de los gases de escape (CO_2 principalmente) se puede efectuar directamente al mar.
- Circuito secundario de generación de energía eléctrica, basado en un ciclo Rankine convencional, que consta de parte del generador de vapor, a través del cual se produce un intercambio de energía con el circuito primario, de la turbina de vapor y del alternador acoplado a la misma.

El esquema básico del MESMA es el que se muestra en la figura.

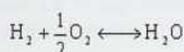


La principal ventaja de este sistema es que el CO_2 se puede expulsar directamente al mar hasta una profundidad próxima a los 600 m, lo que no implica ninguna restricción desde el punto de vista operativo. Como inconvenientes se destacan su gran volumen y reducido rendimiento, ya que hay tres etapas que conllevan pérdidas energéticas (combustión, expansión en turbina y condensación del vapor).

Aunque se han realizado numerosas pruebas en tierra, no se encuentra en servicio.

Sistemas basados en células de combustible

Las células de combustible son dispositivos electroquímicos de conversión directa de la energía química de un compuesto en energía eléctrica y calor, en un proceso inverso a la electrolisis del agua. El combustible es hidrógeno (H_2) y el oxidante (O_2), obteniéndose como únicos productos de la reacción agua (H_2O), corriente continua (DC) y calor:



Para el almacenamiento de hidrógeno se plantean dos opciones:

- Almacenamiento en hidruros metálicos, que se basan en la propiedad de determinadas aleaciones metálicas para absorber átomos de H_2 . Para liberar el H_2 retenido basta con aportar energía calorífica (Q) al hidruro. La reacción que rige el proceso es:



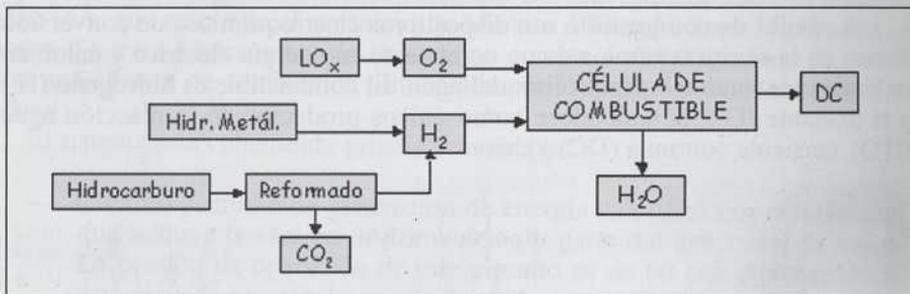
Esta solución presenta la ventaja de ser muy segura y el inconveniente de su enorme peso, que tiene un impacto significativo en el diseño del buque y que, por tanto, debe considerarse desde las primeras fases del mismo.

- Almacenamiento de un hidrocarburo (metanol, etanol...) y obtención del H_2 a partir de él mediante un proceso químico de reformado. Al igual que la anterior, ésta también es una opción aceptable desde el punto de vista de la seguridad, y además su impacto en el diseño del buque es reducido. Presenta el inconveniente de la producción de CO_2 en el reformado.

En la figura siguiente se presenta un esquema básico de un sistema AIP basado en células de combustible, reflejando las opciones de almacenamiento de hidrógeno.

Las ventajas más destacables son la reducida firma acústica, debido a la ausencia de partes móviles, y la gran proyección de futuro que presenta, ya

que esta tecnología se encuentra en continua evolución, apoyada en gran medida por el sector del automóvil que promueve cuantiosas inversiones. El mayor inconveniente es su elevado precio, por los altos costes de desarrollo; la tendencia es a reducirse, pero no se vislumbran rebajas significativas a corto plazo.



El primer submarino *U-212* de la Armada alemana, actualmente en fase de pruebas en la mar, incorpora un sistema AIP basado en células de combustible e hidruros metálicos. Un sistema similar está previsto incorporar en los *U-212* para la Armada italiana y en los *U-214* para la Armada de Grecia. El submarino *S-80* de la Armada española incorporará un sistema AIP basado en células de combustible y reformador de bioetanol.

Conclusiones

La incorporación de sistemas AIP a los submarinos convencionales mejora la discreción de los mismos, ya que permite prolongar los periodos de inmersión.

El diesel de ciclo cerrado es una máquina robusta y de no muy elevado coste, fácilmente adaptable a cualquier diseño, por lo común de la tecnología empleada.

El Stirling también es sencillo conceptualmente, pero su potencial de desarrollo es reducido, ya que la adaptación a diferentes potencias puede resultar complicada.

El MESMA es un sistema complejo, lo que influye en su elevado precio y posterior mantenimiento, y voluminoso en comparación con el resto de opciones.

Los sistemas basados en células de combustible presentan el futuro más prometedor por su elevado rendimiento, reducidas firmas, escaso impacto ambiental y potencial de desarrollo.

BIBLIOGRAFÍA

- LÓPEZ PALANCAR, Luis: *Pasado, presente y futuro en los sistemas de propulsión anaerobios en submarinos*. Revista de ingeniería naval, n.º 783, 2001.
- SCOTT, Richard: *Air-independent propulsion system options are maturing*. Jane's International Defense Review. Noviembre, 1999.
- The AIP Alternative*. Sea Power Review. Diciembre, 1999.
- KLEIN, Manfred, y REGENDORF, Uwe: *Closed Cycle Diesel. Principle and application*. Nordse-erwerke GMBH. 1993.
- Stirling Engine Ideal Isothermal Analysis*. www.ent.ohiou.edu. 2003.
- Two piston type Stirling engine*. American Stirling Co. www.stirlingcycle.com. 1997.
- Kockums AIP system for submarines*. Kockums. 1997.
- PRIETO, Jesús: *Dimensionamiento del motor Stirling y revisión de sus aplicaciones marinas*. Universidad de Oviedo. Revista de ingeniería naval, n.º 802, 2003.
- PAIN, E.: *MESMA AIP system test report*. DCN Ingenieere. Warship'99. Naval Submarines.
- DAMS, R., y Hayter, P.: *Progress in proton exchange membrane fuel cell systems*. Warship'99. Naval Submarines.
- SATTLER, Gunter, y POMMER, Hans: *Storage of reactants for PEM FC systems aboard submarines*. Warship'99. Naval Submarines.

