



Artículo

Análisis de la tecnología AIP y su posible aplicación en los submarinos de la Armada Nacional de Colombia

Analysis of AIP technologies and it possible applications in the submarines of Colombian Navy

Jossie Esteban Zúñiga Alfaro ^{1*}, Gerardo Adolfo Romero Sierra ²

¹ Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", Cartagena, 130001, Colombia; jossie.zuñiga@armada.mil.co

² Submarino ARC "Tayrona", Armada Nacional de la República de Colombia, Bogotá, 111321, Colombia; geradoromerosierra@gmail.com

* Correspondencia: jossie.zuñiga@armada.mil.co

Resumen: Durante décadas los procesos de acumulación y transporte de energía, para aplicaciones móviles han sido motivo de gran parte de la investigación en esta área de la ingeniería. Sin duda alguna hasta el momento los combustibles fósiles son los más utilizados para aplicaciones de todo tipo, desde mínimas plantas de generación eléctrica, pasando por pequeños vehículos como motocicletas hasta grandes aplicaciones como buques mercantes y plataformas militares. El objetivo del presente artículo es analizar los usos de la tecnología de Fuel Cell (célula de combustible) aplicada por otras marinas del mundo en submarinos militares los cuales han implementado procesos AIP (Air Independent Propulsion) con el fin de señalar las ventajas estratégicas y posibles aplicaciones de dicha tecnología en las unidades submarinas de la Armada de Colombia.

Palabras clave: AIP o PIA; Electrolisis; Presión crítica; Profundidad de Snorkel; Temperatura crítica.

Abstract: During the decades the processes of accumulation and transport of energy, for mobile applications have been the reason for much of the research in this area of engineering, without a doubt until now fossil fuels are the most used for applications of all kinds, from minimum power generation plants, through small vehicles such as motorcycles to large applications such as merchant containers and military platforms. The objective of this article is the analysis of the uses of the fuel cell technology (full cell) applied other navies of the world in military submarines which have implemented AIP (Air Independent Propulsion) processes in order to indicate the advantages and possible applications of this technology in the submarine units of the A Colombian Navy.

Keywords: AIP; Critical pressure; Critical temperature; Electrolysis; Snorkel deep.



Citación: Zúñiga Alfaro, J.; Romero Sierra, G. . Análisis de la tecnología AIP y su posible aplicación en los submarinos de la Armada Nacional de Colombia. *DERROTERO* 2023, 17, 1–9. 10.70554/Derrotero2023.v17n01.08

Recibido: 04/09/2022

Aceptado: 06/12/2022

Publicado: 09/03/2023



Derechos de autor: © 2023 por autores. Licenciado por Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla", COL. Este artículo es de libre acceso distribuido en las términos y condiciones de *Creative Commons Attribution* (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

Los submarinos son unidades de gran capacidad ofensiva, su armamento cuando es ocasiones puede ser limitado, es sin duda furtivo y el empleo del mismo puede decidir el curso de la guerra (Romney and Duffey 2017). Posee la ventaja de operar sin ser detectado por largos periodos de tiempo (supeditado al tipo de propulsión); estas características lo hacen útil para desarrollar múltiples operaciones. En Colombia son considerados como el arma estratégica de la nación y su empleo permite garantizar la libertad de las acciones de nuestra fuerza de superficie neutralizando o destruyendo las amenazas bien sea de superficie o submarinas que pretendan impedirnos el acceso a los escenarios marítimos

de competencia nacional (Sub 2022). Dentro de las operaciones tendientes a fortalecer la soberanía, la independencia y el orden constitucional, los submarinos pueden desarrollar operaciones de reconocimiento y recolección de información, misiones de inteligencia, misiones de sabotaje a plataformas petroleras y/o portuarias, disuasión estratégica, patrullaje, y el pleno ejercicio de la soberanía.

Para Colombia como país ribereño y de gran extensión marítima es imperativo tener dentro de la marina este tipo de unidades navales, con el fin de garantizar el ejercicio de la soberanía en todo el territorio marítimo nacional. En la actualidad contamos con cuatro submarinos oceánicos, dos del tipo 209 y dos del tipo 206 A, cuya propulsión es Diésel-Eléctrico (Guo 2017). Este tipo de propulsión, dependiendo de la clase de operación que se esté desarrollando, puede significar una vulnerabilidad, ya que periódicamente deben exponerse en una condición especial de navegación llamada Snorkel para cargar baterías mediante el uso de generadores impulsados por motores diésel que “respiran” aire del exterior para efectuar su combustión interna.

Por el argumento anteriormente expuesto es preciso analizar la posibilidad de implementar un sistema alternativo de generación eléctrica a partir de sistemas de propulsión independiente de aire (AIP) en los submarinos de Colombia que garanticen una suficiente carga para las baterías con el fin de brindar propulsión extendida y suplir la energía eléctrica requerida en los sistemas auxiliares del submarino, mientras se encuentre en inmersión (Owen and Cote 2019).

2. Reflexión

La filosofía que aplican los submarinos de toda clase en el mundo es la discreción; operar en sigilo brinda a la flota ese factor determinante para decidir el curso de la guerra, así la incertidumbre permite llevar la ventaja en el escenario de combate, toda vez que el factor sorpresa jugaría a favor del submarino. La inventiva humana ha podido crear a grandes rasgos dos tipos de submarinos y estos son clasificados de acuerdo a su tipo de propulsión: los submarinos convencionales llamados diésel-eléctricos que requieren de un banco de baterías especiales que les permita almacenar energía eléctrica para la propulsión y los sistemas de apoyo a la navegación, y los submarinos nucleares quienes utilizan un reactor lo cual le proporciona energía nuclear tanto para la propulsión como para poner en servicio los equipos de la maquinaria auxiliar.

Apoyando este concepto, nace la necesidad de crear sistemas que le permitan al submarino permanecer un tiempo prolongado en inmersión sin necesidad de exponerse a la profundidad de Snorkel (Es una condición de navegación en la cual el submarino se encuentra a cierta profundidad que le permita izar el mástil del Snorkel con el fin de iniciar el proceso de carga de baterías) siendo esta la más vulnerable en cuanto a exposición se trata.

Quien pudiese garantizar la operación ilimitada en inmersión de un submarino (obtención de energía eléctrica mediante un reactor nuclear lo que le permite mantenerse en inmersión de forma ilimitada) son los sistemas basados en energía nuclear, pero es impensable contemplar esa posibilidad en el futuro mediano en un país como Colombia, el cual está en vía de desarrollo, ya que dicha tecnología implica altos costos de manutención y un alto nivel técnico para el manejo de las plantas nucleares, sin mencionar los residuos que puedan generar, puesto que el impacto ambiental puede ser caótico de no tener un tratamiento especializado de los mismos. No obstante, los sistemas de propulsión independiente de aire AIP permiten prolongar el tiempo de inmersión de un submarino y, comparativamente hablando, requieren menos esfuerzo económico y tecnológico. El estado del arte en materia de AIP nos indica que existen multiplicidad en el avance científico de esta tecnología; se describen a continuación las de mayor relevancia con el fin de analizar la viabilidad de la aplicación de una de ellas teniendo en cuenta factores críticos como los son el costo-beneficio y la transferencia tecnológica.

3. Motor Stirling

El funcionamiento del motor Stirling se basa en el aprovechamiento de los cambios volumétricos del fluido de trabajo como resultado de los cambios de temperatura que éste sufre. Estos cambios volumétricos se deben al desplazamiento del fluido de trabajo entre la zona caliente y la zona fría en un cilindro cerrado. A continuación, se explicará el funcionamiento del motor con la ayuda de una serie de diagramas: Si se tiene aire encerrado en un cilindro y luego se calienta, se observa que la presión dentro del cilindro se incrementa. Se asume que una de las tapas del cilindro es un émbolo y que éste es hermético; entonces habrá una expansión del gas y aumentará el volumen interior del cilindro hasta cierta posición final del émbolo (Figura 1) (Zamora 2006).

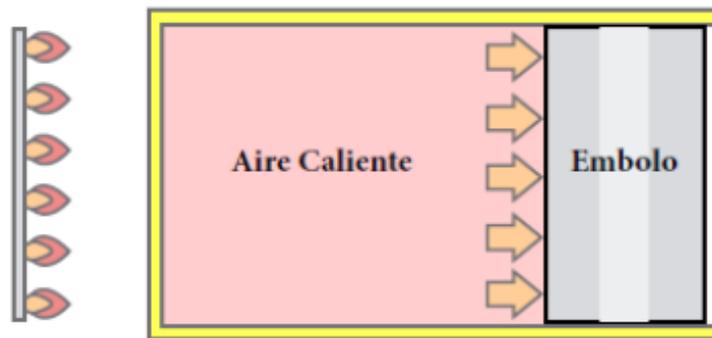


Figura 1. Calentamiento de aire dentro de un cilindro.

Si al mismo cilindro, en su estado de expansión, se enfría rápidamente, la presión disminuye; entonces, el volumen se contrae y la posición del émbolo vuelve al estado inicial (Figura 2).

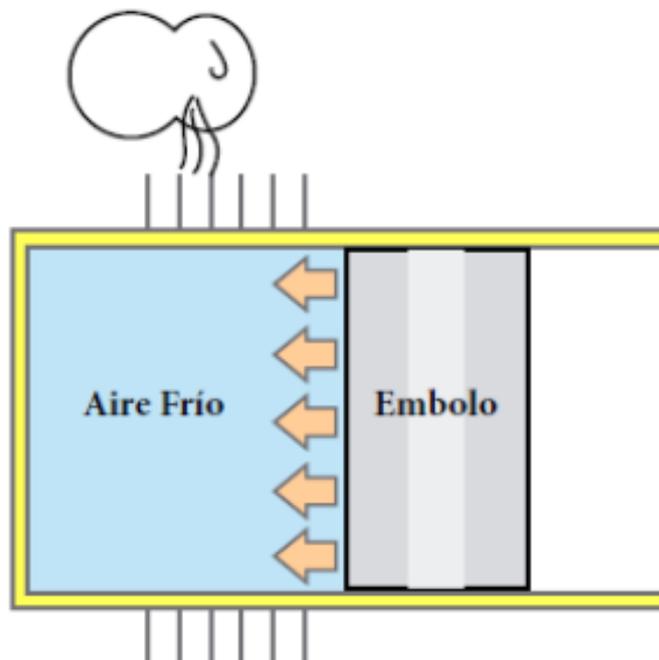


Figura 2. Enfriamiento del aire dentro de un cilindro.

Si el proceso del estado uno se repite, pero ahora uniendo el émbolo a una volante. El incremento de la presión forzaría al émbolo a moverse ocasionando el giro de la volante, con lo cual se consigue que el "cambio volumétrico" se transforme en movimiento (Figura 3).

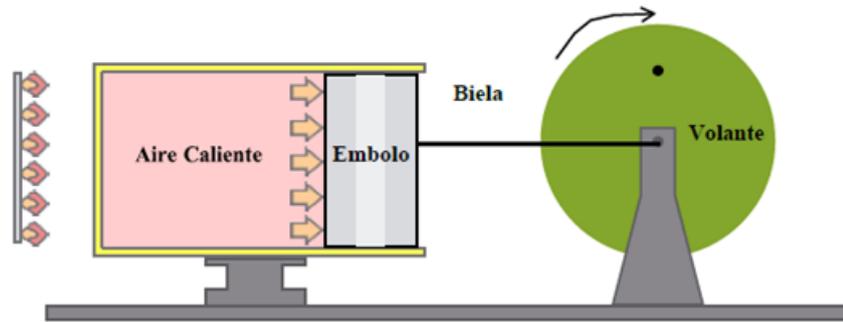


Figura 3. Conversión de la expansión de un gas en movimiento, a través de un mecanismo.

Si se repite el proceso del estado dos, enfriando rápidamente, el pistón retorna por efecto del movimiento de la volanta y se produce la disminución de la presión y el volumen (Figura 4).

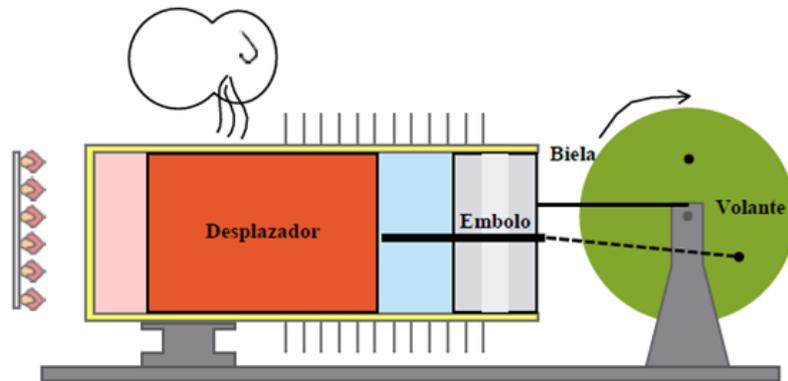


Figura 4. Conversión de la expansión de un gas en movimiento, a través de un mecanismo.

Con este simple ejemplo se ha explicado el principio de funcionamiento del motor Stirling.

4. Aplicación en los submarinos

Al final de los años 80, se instaló en un submarino Nacken, de la marina sueca, un motor Stirling. El nombre del sistema instalado fue "The Kockums Stirling AIP System". Este motor ocupaba unos ocho metros de longitud dentro del submarino. Tras varios años de prueba de este submarino, en el mar, se obtuvieron resultados muy satisfactorios, por lo que se decidió colocar este sistema en la nueva flota de submarinos de la clase Gotland (Figura 5).

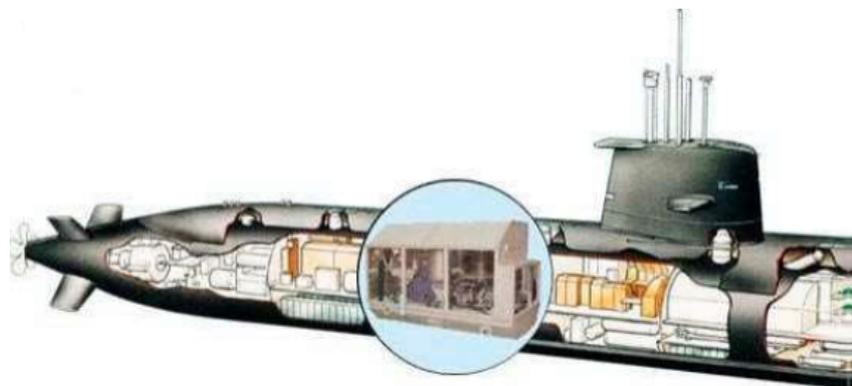


Figura 5. Esquema motor Stirling en un Submarino.

El sistema Stirling AIP aumenta considerablemente el tiempo de inmersión del submarino en el mar. En vez de algunos días de inmersión, un submarino con este sistema puede estar sumergido semanas y superar así a cualquier otro submarino convencional con respecto a esta característica (Kadir and Yasemin 2022).

La característica principal del sistema Stirling AIP es el uso del oxígeno puro y combustible Diésel en una cámara de combustión presurizada. La presión de la combustión es más alta que la presión circundante del agua de mar, esto permite que los productos de la combustión sean expulsados hacia el agua de mar, para ser disueltos en ella, sin la necesidad de usar un compresor (Wang 2008) (Figura 6). El oxígeno se almacena en forma líquida en tanques criogénicos. El tiempo de inmersión es determinado sobre todo por la cantidad de oxígeno líquido almacenado. En comparación con otros sistemas AIP de bajo desarrollo, el sistema Stirling AIP muestra ventajas importantes:

- El sistema Stirling AIP está fácilmente disponible y es de tecnología madura, probada en servicio operacional.
- El sistema Stirling AIP es un sistema adicional. Cuando se agota la fuente de oxígeno líquido, el submarino sigue siendo un submarino convencional de gran alcance, lo que permite la operatividad como convencionalmente se desarrolla en Colombia (Du 2016).
- El sistema Stirling AIP tiene un costo de adquisición bajo y también, un bajo costo durante su ciclo de vida. La infraestructura necesaria para su producción ya existe.
- El sistema Stirling AIP está igualmente disponible para la modernización de submarinos existentes y para su integración en nuevos diseños de submarinos.
- El sistema Stirling AIP está prácticamente libre de vibración, es silencioso y menos contaminante.

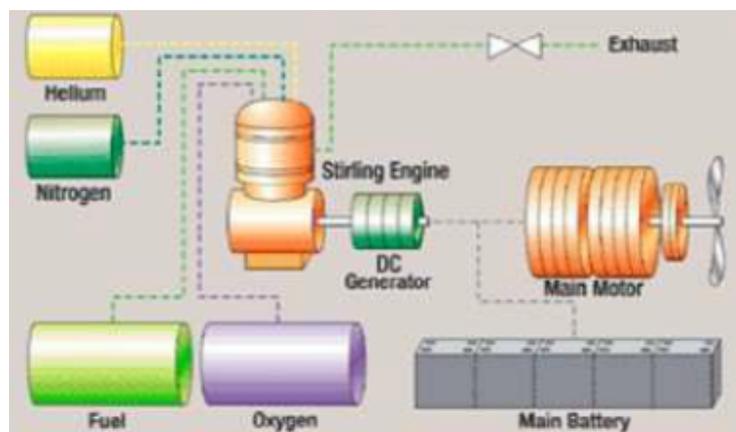


Figura 6. Esquema motor Stirling en un Submarino.

En la actualidad la siguiente lista de países emplean tecnología de motores Stirling en sus unidades submarinas (Tabla 1):

Tabla 1. Países tecnología Stirling aplicada a los Submarinos.

País	Clase Submarino	Desplazamiento
Japón	Asashio	2750 Toneladas
	Soryu	4200 Toneladas
Suecia	Gotland	1450 Toneladas
	Sodermanland	1500 Toneladas
China	Yuan	3600 Toneladas
España	S-80	2600 Toneladas

5. Módulo de energía submarina autónoma (MESMA)

El AIP llamado MESMA consiste en un módulo de una turbina de vapor convencional, donde la energía térmica es convertida en energía eléctrica utilizando un ciclo convencional de Rankine, que comprende un generador de vapor, turbo-alternadores y un condensador. El vapor es calentado por un circuito primario en una cámara de combustión, quemando una mezcla gaseosa de etanol y de oxígeno. El oxígeno se almacena bajo presión de forma criogénica, a -185°C , de aquí se bombea a un vaporizador para convertirlo a gas. A continuación, se envía a una cámara de combustión donde, combinado con el etanol, se produce una salida térmica de 700°C a una presión de 60 bar. Un recirculador recicla la parte del gas de escape refrescado para regular la temperatura dentro del circuito primario.

Estos gases pasan a través de un intercambiador de calor. Los gases de combustión se expulsan al mar directamente sin necesidad de emplear un sistema de gestión de agua para la disolución previa e independientemente de la cota de operación gracias a la elevada presión de trabajo de la cámara de combustión (Nicolas Aguirre Fontanela 2008).

El circuito secundario de vapor es el que se encarga de mover la turbina con la que, gracias a un alternador conectado de manera mecánica, se produce la energía eléctrica para recarga de baterías. Este vapor, tras la turbina, pasa por un condensador calentando un circuito de agua salada, el cual se encarga a su vez de aumentar la temperatura de un circuito intermedio que es el que vaporiza el oxígeno líquido, aprovechando así la energía al máximo.

El oxígeno líquido y el etanol deben almacenarse por separado a suficiente distancia para satisfacer las rigurosas normas de seguridad y requisitos de almacenaje peligrosos. Este sistema puede funcionar igualmente con diésel, pudiendo utilizar los mismos tanques diésel de los motores de la planta de generación de energía (Figura 7) (Nicolas Aguirre Fontanela 2008).

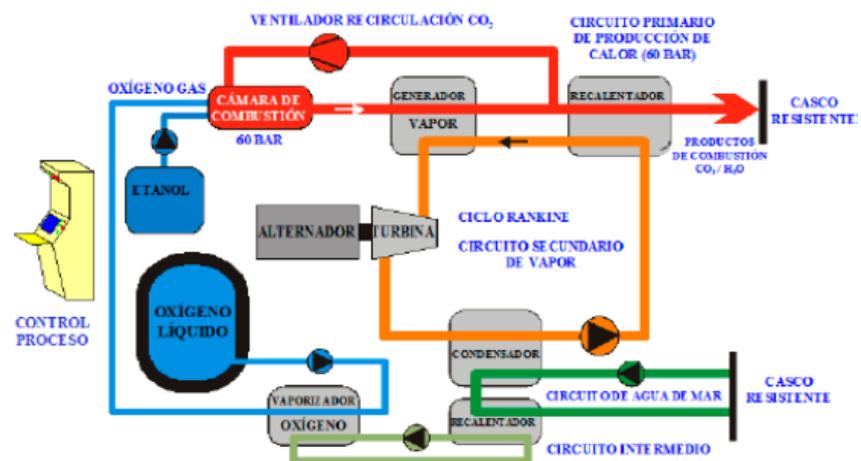


Figura 7. Esquema simplificado MESMA.

6. Célula de combustible o pila de combustible (Fuel Cell)

Las células de combustible son dispositivos electroquímicos que permiten la conversión directa de energía química de un combustible en energía eléctrica y calor mediante un proceso de electrólisis inversa. Una célula de combustible está compuesta por un conjunto de celdas electroquímicas conformadas a su vez por dos electrodos separados por un electrolito contenido en su correspondiente matriz. Para este proceso, el combustible es hidrógeno y el oxidante es oxígeno, obteniendo como únicos productos de la reacción agua, energía eléctrica y calor.

Actualmente, existen varios tipos o clases de células de combustible clasificadas por su electrolito, entre las cuales encontramos:

- Alcalinas (PCA/AFC)
- Pilas de Ácido Fosfórico (PCAF/PAFC)

- Pilas de Óxidos Sólidos (PCOS/SOFC)
- Pilas de polímeros o de membrana (PCPS/PEMFC)
- Pilas de carbonatos fundidos (PCCF/MCFC)

Teniendo en cuenta factores como tamaño y peso reducidos, potencia ajustable a demanda, tiempo de vida (aprox. 20.000 horas), reducida temperatura de funcionamiento (60°-80°C – firma térmica insignificante), rápida puesta en marcha, bajas pérdidas termodinámicas, y una firma acústica despreciable, el tipo de célula que presenta mayores ventajas para su empleo en unidades submarinas es el PEM (Polymer Electrolyte Membrane o Proton Exchange Membrane), cuyo electrolito es un polímero orgánico sólido en forma de membrana.

Una vez entendido el principio de funcionamiento, los tipos de células por su composición física y la opción más favorable para un submarino, se debe solucionar el problema del almacenamiento y transporte de los componentes necesarios para dicho proceso, es decir, hidrógeno y oxígeno.

El suministro de oxígeno es obtenido de tanques de almacenamiento de oxígeno líquido (-185°C) en aplicaciones de tipo submarino. Se almacena en tanques como por ejemplo tipo “Dewars” (de doble pared) de unos siete metros de longitud y cuatro de diámetro, con una capacidad de unos 60m³. Está formado por dos recipientes, uno interior y otro exterior, existiendo vacío entre ambos para evitar pérdidas innecesarias de temperatura. El recipiente interior está soportado con el exterior por unos pocos puntos de apoyo, muy livianos, para evitar esa posible vaporización líquida. El oxígeno es un gas comburente, no arde él mismo, pero es peligroso porque hace que materiales no combustibles pasen a serlo, y los que ya eran combustibles, ardan de forma violenta.

Los usos del oxígeno a bordo de las unidades submarinas a modo de resumen son los siguientes: suministro de oxígeno para la célula de combustible, suministro para la regeneración de la atmósfera y, en algunos casos, suministro para funciones auxiliares en los sistemas de suministro de hidrógeno. El suministro de hidrógeno supone un mayor reto de ingeniería y tecnología, teniendo en cuenta que para su almacenamiento líquido se requieren medios genéricos aprox. -250°C (23°K) y en concentraciones superiores a 2% es explosivo, de modo que cualquier tipo de fuga supone un gran riesgo de seguridad para las instalaciones donde se encuentre. Debido a su baja temperatura de licuefacción y a que reacciona violentamente al entrar en contacto con el oxígeno, siempre con una reacción exotérmica incontrolable, es por esto que se han desarrollado diferentes tipos de tecnología para el suministro de hidrógeno al sistema de alimentación de las células de combustible, entre las cuales encontramos los depósitos criogénicos de hidrógeno, la obtención de hidrógeno desde hidruros metálicos y la obtención del hidrógeno mediante reformado del bioetanol.

El mejor procedimiento implantado a día de hoy en submarinos es el de hidruros metálicos, ya que es el más seguro y fiable, pero también es el más caro. La base de este método consiste en que ciertos metales y aleaciones metálicas tienen la propiedad de formar enlaces covalentes reversibles cuando reaccionan con el hidrógeno, formando lo que se conoce como hidruros metálicos, que se descomponen cuando se calientan liberando hidrógeno.

El hidruro se forma sometiendo un determinado metal a una presión elevada de hidrógeno, lo que ocasiona que el metal atrape átomos de hidrógeno en su estructura cristalina como si fuera una esponja. Basta luego con disminuir la presión exterior para que el metal libere el hidrógeno. Los hidruros tienen la importante propiedad de que pueden utilizarse para almacenar hidrógeno durante muchos ciclos de asociación-disociación sin que con ello disminuya su capacidad de almacenamiento (UPM, U. P. sf).

Los tanques de metal-hidruro, por tanto, tienen en su interior una aleación capaz de absorber hidrógeno el cual se recupera más tarde aportando calor. Los hidruros metálicos llevan una proporción del 1 al 7% en peso de hidrógeno. En metales como el titanio, la concentración de energía por unidad de volumen es más alta que en el hidrógeno líquido. Se han estudiado más de 200 aleaciones diferentes, siendo las más adecuadas las del grupo

V de los metales de transición, tanto por su capacidad de almacenamiento como por su precio, su no decrepitación y la baja temperatura que se necesita para disociar el hidruro. Los tanques de metal-hidruro tienen dos inconvenientes, el primero es que se necesita el aporte de energía para recuperar el hidrógeno, y el segundo es que no todo el hidrógeno que se introduce en los metales es recuperable, su rendimiento no es del 100%.

En términos generales, el empleo de células de combustible LOX-H₂, hidrógeno y oxígeno líquido, para la conversión directa de la energía química en energía eléctrica y calor va evolucionando y tomando fuerza debido a las grandes ventajas tácticas que ofrece para un submarino de guerra. El desarrollo de la tecnología, la reducción de costos de fabricación y la producción a gran escala hacen que este tipo de tecnologías sean cada vez más accesibles a naciones emergentes.

Ejemplo de esto es Rusia que pretende aumentar su mercado de exportación vendiendo una variante del prototipo (Proyecto 950 AMUR), más barato que el proyecto alemán-italiano (212) y el franco-español (Scorpene).

7. Conclusión

Después de una decena de años de desarrollo, estamos frente a un nuevo avance tecnológico en cuanto a sistemas de propulsión anaeróbicos para submarinos el cual representa ventajas operacionales toda vez que le permite a las unidades estratégicas de la nación reducir considerablemente su exposición en largos periodos de Snorkel lo que haría más eficaz el uso del arma submarina. A mediano plazo se debe considerar el empleo de dicha tecnología, no sin antes haber hecho un exhaustivo proceso de selección y análisis tendiente a verificar cual es la opción más viable para Colombia teniendo en cuenta el costo, la transferencia tecnológica, la seguridad que representa el almacenaje de sustancia de manejo especial y demás factores de seguridad para las tripulaciones.

Referencias

(2022). *Submarine Warfare*.

Du, S. (2016). Conventional submarine equipped with artificial air internal combustion engine and fuel power generation device and boosted by water jet of water pump.

Guo, C. (2017). Hydrogen camouflage nuclear submarine model special for teenager defense-related science and technology research.

Kadir, G. and Yasemin, A. (2022). Assessment of stirling engine based air independent propulsion systems in submarines. *Gemi ve Deniz Teknolojisi*.

Nicolas Aguirre Fontanela, P. A. (2008). Funcionamiento aip. misma. España.

Owen, R. and Cote, R. (2019). Invisible nuclear-armed submarines, or transparent oceans? are ballistic missile submarines still the best deterrent for the united states? *Bulletin of The Atomic Scientists*.

Romney, B. and Duffey, B. (2017). Submarine warfare and intelligence in the atlantic and pacific in the second world war: comparisons and lessons learned for two opponents. *Journal of Maritime Research*.

UPM, U. P. (s.f.). Almacenamiento y transporte de hidrógeno. http://www.energiasostenible.net/almacenamiento_y_transporte_de_hidrog.htm. Consultado el 13 de agosto de 2024.

Wang, X.-w. (2008). Analysis of technology condition and development trend for air independent propulsion (aip) technology for conventional submarine.

Zamora, V. R. (2006). Principio de funcionamiento. In *Diseño y construcción de un motor Stirling para la generación de energía eléctrica*, pages 18–35. Lima - Perú.

Biografía de los Autores



Jossie Esteban Zúñiga Alfaro Ingeniero Electrónico; Armada de la República de Colombia



Gerardo Adolfo Romero Sierra Ingeniero Naval; Jefe Departamento de Ingeniería Submarino ARC "Tayrona"; Armada de la República de Colombia

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente responsabilidad de los autores y colaboradores individuales y no reflejan necesariamente las opiniones de DERROTERO y/o de los editores. DERROTERO y/o los editores se deslindan de cualquier responsabilidad por daños o perjuicios a personas o bienes que puedan surgir como resultado de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados en el contenido. Se recomienda a los lectores verificar de manera independiente la información antes de basarse en ella.