

EL AIP. MANTENIENDO PROFUNDO POR MAS TIEMPO A LOS SUBMARINOS CONVENCIONALES

Renato Navarro Genta *

Introducción.

El lograr submarinos “Anaeróbicos” ha ido asociado al concepto mismo de submarino desde que éstos fueron creados, pero ante las dificultades tecnológicas que ello presentó no se pudo hacer realidad excepto en algunos submarinos experimentales; por ejemplo el sistema “Walter” (desarrollado por los alemanes en 1940, plena II G.M.) a base de turbinas y agua oxigenada, pero que por lo inseguro no se materializó en serie.

Este objetivo ha sido retomado intensamente durante estas últimas décadas y está empezando a dar sus frutos en la actualidad a pesar de existir limitaciones importantes para su pleno desarrollo debido principalmente a la complejidad del problema; sin embargo, la obtención de submarinos independientes de la atmósfera por medios “Químicos” (AIP) es ya una realidad y en el presente trabajo analizaremos su uso para una Armada como la nuestra.

El presente ensayo tendrá el siguiente desarrollo:

1. Características y limitaciones de los submarinos convencionales (diesel-eléctricos).
2. Los sistemas AIP más efectivos y viables.
3. Descripción de los submarinos AIP que son más viables y su efecto en la arquitectura del submarino.
4. Factores limitativos de los Sistemas AIP embarcados.
5. Qué esperar a mediano / largo plazo de las tecnologías AIP.
6. Síntesis de las principales soluciones AIP y su comparación con el sistema convencional.
7. Conclusiones.

DESARROLLO

1. Características y limitaciones de los submarinos convencionales (diesel-eléctricos).

Al estar sumergido, la energía disponible por un submarino convencional está definida por la capacidad de sus baterías, la única fuente energética de que dispone para navegar en esta condición. Estas baterías, en la inmensa mayoría de los submarinos construidos, son del tipo de plomo/ácido. Hay algunos casos (los menos) de submarinos con baterías de Ni/Cd de prestaciones muy similares

Como consecuencia de la baja capacidad energética específica de las baterías clásicas, los submarinos convencionales construidos en estas últimas dos décadas presentan las siguientes características:

- Autonomía en profundidad a unos 18-20 nudos: 1 a 1,5 horas.
- Autonomía en profundidad a 3 -5 nudos: 50 - 100 horas, (100 kW de consumo).
- Autonomía, de diesel-eléctrico, (con períodos de snorkel),: unas 8000-12000 millas náuticas (Mn.).

Estas prestaciones medias son el resultado de equilibrar los siguientes factores:

- Desplazamiento.
- Características del motor propulsor / batería.
- Peso y características de las baterías / potencia grupos diesel-generadores.
- Peso del combustible DMFO embarcado.
- Requerimientos de las Misiones a desarrollar.

No se debe confundir la autonomía a profundidad, que es la que corresponde, como máximo, a una descarga completa de las baterías con la autonomía total que corresponde a la distancia total navegada, con períodos alternados de snórkel y que está principalmente determinada por el DMFO embarcado.

La necesidad de recarga periódica de las baterías embarcadas exige el montaje de grupos “Diesel - generadores(AC)- rectificadores” de una cierta potencia, y que requieren que el submarino deba ascender hasta la profundidad de snórkel para usarlo.

Según la razón “Potencia diesel / Potencia absorbida” en snórkel, los períodos de recarga pueden oscilar entre el 8 y el 25% del tiempo total de navegación. Estos porcentajes se denominan “Coeficientes de indiscreción” (C.I.) porque equivalen al tiempo relativo en que el submarino está en una condición ruidosa y cercana a la superficie (máquinas diesel en servicio, compresores de aire de alta, planta de Osmosis inversa), respecto al tiempo total de navegación. En estos períodos de recarga

de las baterías el submarino se está evidenciando y debido a la existencia de sistemas de detección de superficie y aéreos (Aeronaves de exploración marítimas, AWACS, satélites), cada vez más perfeccionados, se exponen a ser detectados en condición snórkel tanto por el ruido generado como por la firma térmica y magnética de los gases de escape o incluso visualmente.

Teniendo en cuenta que la misión típica de un submarino medio, de unas 1400 tns. de desplazamiento, es de unos 50 días, de los cuales 20 días son de tránsito (7-8 nudos) con un coeficiente de indiscreción del 20 % y otros 20-25 días de patrulla (a 4-5 nudos) con un C.I. del 6-8%, el tiempo total que un submarino es indiscreto se puede establecer en unas 135 horas (96 horas durante el tránsito y 39 horas durante la patrulla).

Es evidente que estas indiscreciones son una importante debilidad de los submarinos convencionales; por lo tanto, si se requiere disminuir la probabilidad de éstos a ser detectados, no habría más remedio que recurrir a las tecnologías nucleares o AIP (químicas) las cuales permiten al submarino navegar sumergido profundamente durante extensos períodos de tiempo. Como el construir submarinos nucleares tiene trabas de toda índole, parece que el curso de acción restante sería el "AIP".

2. Los sistemas AIP más efectivos y viables.

El requerimiento de que el submarino, sumergido, deba generar o disponer de una significativa reserva energética que le permita navegar durante extensos períodos de tiempo sin tener que recurrir al aire atmosférico, exige la adopción de sistemas, en muchos casos, escasamente desarrollados; es necesario tener en cuenta que en su inmensa mayoría, los sistemas de generación de energía en nuestro planeta exceptuando la tecnología nuclear, eólica o solar, están basados en combustiones de tipo aire + hidrocarburos.

En este ensayo se ha descartado el análisis de aquellos principios generadores de energía basados en aplicaciones con problemas de rendimiento seguridad, costo, inadaptación al entorno en que se mueven los submarinos tal como Reacción F6S + Li; Calor generado por las sales fundidas, y Acumuladores de grafito entre otras. Por consiguiente sólo han sido aceptados como viables unos pocos sistemas y que han resultado ser derivaciones de sistemas ya utilizados por la industria en el campo terrestre, (excepto los motores Stirling que son de un uso muy limitado). Esto tiene unas ventajas obvias: las inversiones aplicadas al desarrollo de estos sistemas terrestres se aprovechan en el desarrollo de los sistemas submarinos siempre que se pueda compatibilizar la naturaleza de las máquinas en cuestión con las características del medio submarino (entorno presurizado, necesidad de silencio, volúmenes limitados, etc). Evidentemente, los elementos generadores pensados para la industria terrestre requieren ser modificados, a veces en gran amplitud y con importantes servidumbres, cuando se pretende utilizarlos para ese fin.

Si embargo, la adopción de tecnologías AIP en submarinos, presenta ciertas dificultades de carácter práctico, como se verá a continuación.

2.1. Un sistema AIP se compone de dos subsistemas de naturaleza muy distinta:

2.1.1. "El Convertidor": Encargado de transformar la energía primaria (térmica o química, etc.) de una substancia o elemento en energía aprovechable directamente (torque o electricidad).

2.1.2. "El de Reactantes": Acumuladores de energía o fuentes energéticas, que consiste en substancias que aportan o producen energía (térmica principalmente), y de las cuales se nutren los convertidores.

2.2. De la gran cantidad de variantes que es posible formar de conjuntos convertidor- reactantes, las siguientes son las que disponen de características aceptables para su uso en submarinos:

2.2.1. Celdas de combustible SPE (electrolito de polímero sólido) alimentadas alternativamente por LOX-hidruros o LOX- metanol; (LOX es oxígeno, almacenado en forma criogénica).

2.2.2. Máquinas Diesel alimentados por LOX-DMFO.

2.2.3. Motores Stirling alimentados por LOX-DMFO

2.2.4. Turbinas de vapor alimentadas por LOX-Etanol.

Otros muchos sistemas convertidores y de reactantes o acumuladores no han sido considerados debido a su bajo rendimiento, falta de seguridad, problemas operativos o logísticos, etc. Sólo las baterías avanzadas (LAIS, Na/S) merecen tenerse en consideración de forma adicional, aunque no sean sistemas AIP.

2.3. En la selección de cual de los anteriores es más efectivo, intervienen numerosos factores del tipo cuantitativo o cualitativo, como son:

2.3.1. En relación a la energía instalada, se puede decir que las Celdas SPE + LOX + Metanol son un 45% más efectivas que los sistemas Diesel o Stirling y un 70% más efectivas que las turbinas de vapor.

2.3.2. Considerando el ruido generado las Celdas son las menos indiscretas.

- 2.3.3. A efectos de disponibilidad de los componentes, los sistemas termodinámicos (Diesel Stirling y Turbinas) son los más desarrollados. Las celdas precisan un período de experimentación.
- 2.3.4. Si la consideración es la Seguridad general los sistemas más seguros son los Diesel y Stirling, por quemar DMFO, que es un combustible mucho menos peligroso en su uso y almacenamiento que el Hidrógeno o los alcoholes.
- 2.3.5. En lo que respecta a la confiabilidad y bajo riesgo técnico, las turbinas de vapor, seguidas de los motores Diesel serían los sistemas más apropiados.
- 2.3.6. En lo que respecta a costos, los sistemas termodinámicos son los más económicos, así como sus reactantes (DMFO), por estar ya plenamente desarrollados.
- 2.3.7. Finalmente a efectos logísticos, los motores Diesel y Stirling son los más favorables (LOX, DMFO).

En resumen, todos los sistemas anteriores pueden aplicarse, en función de los condicionamientos que se impongan así como el riesgo técnico y de seguridad que quiera asumirse.

2.4. Los convertidores AIP anteriormente citados no disponen de las potencias unitarias necesarias (ni es factible su construcción) para que, con un número reducido de éstos (3 ó 4 a lo sumo), se pueda alimentar directamente el Motor Eléctrico Principal (MEP) de un submarino, (que requiere de 3-4 MW). En los convertidores termodinámicos ello es debido a las limitaciones impuestas por las instalaciones de reciclado y gestión de gases.

En el caso de las celdas de combustible el problema, a largo plazo, sería abordable mediante el acopio de muchas unidades, hasta alcanzar los 3-4 MW de potencia máxima. Hoy por hoy la Operación de tan alta potencia de celdas a bordo, es un problema insalvable, teniendo en cuenta que se debe estibar no sólo el bloque de celdas, sino los reactantes asociados.

Esta limitación tiene como consecuencia lo siguiente:

- No es posible acceder a las grandes velocidades (18-20 nudos) mediante el uso exclusivo de convertidores AIP aumentando el MEP directamente)
- Es preciso el mantenimiento de las baterías o de otro medio de acumulación de energía eléctrica que pueda alimentar el MEP, a gran régimen. Como consecuencia es preciso además, disponer de un sistema de recarga de dichas baterías (que puede ser convencional o AIP).

2.5. Reactantes

Los reactantes se componen, en todos los casos, de un oxidante y un combustible que producen la energía primaria que es transformada por los convertidores. Los reactantes que han resultado más efectivos por su alto poder calorífico o por su idoneidad respecto a los convertidores seleccionados son los siguientes:

2.5.1. Oxidantes:

El oxígeno, almacenado en forma criogénica (LOX,) es el oxidante común y exclusivo que interviene en todas las reacciones de “oxidación – combustión” que constituyen la fuente energética de todas las máquinas mencionadas. El oxígeno es el oxidante universal y no existen alternativas disponibles a corto plazo. De ello se deriva que el requisito AIP (*no uso del aire atmosférico*) exige, inevitablemente, el almacenamiento a bordo del oxígeno necesario para poder alimentar los generadores AIP.

En las celdas en cambio, la unión del oxígeno con el hidrógeno se hace de forma catalítica, por consiguiente el rendimiento es mayor que en las máquinas termodinámicas.

2.5.2. Combustibles

Dentro de los combustibles más eficaces se encuentra el hidrógeno (combustible limpio y universal), el DMFO y los alcoholes (metanol-etanol).

2.5.2.1. El hidrógeno produce una combustión de alto poder calorífico (120 Mj/Kg de H₂) dando como resultado agua. Su principal inconveniente es su alta inflamabilidad, gran volumen específico incluso en estado líquido (-250° C) y su difícil estiba a bordo. Los hidruros reversibles han mejorado la manipulación a bordo de este gas aunque introducen penalizaciones en el peso muy importantes. El hidrógeno pareciera ser el combustible ideal aunque aún está apenas impuesto en la industria, por las limitaciones descritas.

2.5.2.2. El DMFO pareciera ser, sin embargo, el combustible, a nivel mundial, más eficaz (alto poder calorífico, gran seguridad de manejo, bajo costo) aunque su combustión produzca alta cantidad de residuos (CO₂, SO₃, cenizas, entre otros).

2.5.2.3. Los alcoholes son los sustitutos del DMFO en aquellas aplicaciones en que una combustión más limpia es esencial.

Para las celdas, el combustible requerido (H₂) se puede obtener de dos fuentes: los hidruros reversibles, de muy bajo rendimiento másico (del orden de 1.8% del hidruro embarcado, en peso) y del metanol, que es necesario "reformar" con vapor de agua para obtener hidrógeno gaseoso (contaminado con CO₂).

En los motores Diesel y Stirling, el combustible más adecuado es el DMFO común (para motores Stirling preferentemente DMFO desulfurizado), bien conocido y de características muy seguras.

Para las turbinas de vapor, que disponen de un quemador, el etanol es el combustible más adecuado por su limpieza de combustión (permite mayor longevidad de las piezas térmicas), aunque probablemente puedan admitir, a corto plazo, el DMFO desulfurizado, más seguro y económico.

2.5.3. Productos residuales

El uso de las Celdas de "Oxígeno + hidruros" sólo genera agua dulce, que puede servir para efectuar la compensación de pesos (o ser potabilizada). En las Celdas de "Oxígeno + metanol" es preciso deshacerse del CO₂ producido por el reformado del alcohol, como ocurre con las combustiones.

El uso de los combustibles clásicos (DMFO) exige la eliminación a bordo de los desechos de la combustión o su expulsión al mar (CO₂ principalmente, ya que el vapor de agua puede ser fácilmente condensado y gestionado). La expulsión al mar, lo más recomendado, exige una instalación auxiliar compleja, compuesta por absorbedores-mezcladores y una serie de bombas de circulación-expulsión de los gases disueltos, (WMS), excepto en el caso de turbinas de alta presión de combustión, (60-70 bar), en las que la expulsión se hace de forma directa al mar. Si la potencia del convertidor es alta, el volumen de gases a expulsar es, consecuentemente, alto y el ruido eventualmente producido podría negar uno de los requerimientos AIP máspreciado: el silencio.

3. Descripción de los submarinos AIP que son más viables y su efecto en la arquitectura del submarino.

3.1. En cualquiera de los sistemas AIP descritos y dadas las altas autonomías totales exigidas a los submarinos (más de 8000 Mn. de autonomía por misión), el almacenamiento de los reactantes AIP (LOX + hidruros/DMFO/alcoholes) exige unos respetables volúmenes adicionales (del orden del 80-100% del volumen del submarino portador) lo que impide o dificulta gravemente (por razones económicas, de efectividad y seguridad principalmente) la materialización de submarinos totalmente anaeróbicos (denominados MONO-AIP o 100% AIP), es decir, submarinos capaces de navegar a profundidad durante una misión completa, que suele constar de unos 50 días a velocidades que oscilan entre los 4 y 8 nudos, (la velocidad máxima, 18-20 nudos, que sólo se desarrolla de forma puntual no es accesible en modo AIP).

Suponiendo que no se considera el almacenamiento del combustible (utilizando DMFO se ocupa relativamente poco espacio), siempre quedará el problema de estiba de los contenedores criogénicos de LOX.

La energía de una misión de un submarino medio, (1400 tns. de desplazamiento) equivale a unos 350-500 MWh., lo que exige, en el mejor de los casos, el almacenamiento de 200-300 toneladas netas de LOX; a ello habría que añadir la parte proporcional de casco, lastres de flotabilidad, lastres fijos de estabilidad, estanques y cañerías de compensación, etc.

Finalmente, y en base a lo antes expuesto, el buque MONO-AIP que pueda cumplir una misión convencional total, tal como hoy se considera, es inviable. Ello sin citar la imposibilidad de dar la potencia máxima requerida por el MEP, por carecerse de convertidores AIP de la adecuada capacidad.

3.2. Siendo no viable en la actualidad la construcción de un submarino MONO-AIP de prestaciones similares a uno convencional y de dimensiones más o menos equiparables, una alternativa es "agregar", sobre un submarino convencional, una sección conteniendo elementos AIP. Es lo que se denomina una "Hibridación" AIP-convencional (Hibridación: Inclusión de un pequeño paquete energético o sección AIP a bordo de un submarino convencional). El volumen o tamaño de esta sección AIP debería suponer sólo un 15-20% del desplazamiento sumergido del submarino portador, con el fin de no deformar en forma exagerada su arquitectura; evidentemente, la energía adicional provista por esta sección AIP, sería una fracción pequeña (15%) de la energía total, de misión. El resto debería seguir estando a cargo del DMFO asignado a la planta energética convencional (combustión con aire atmosférico).

Puesto que la energía producida por la planta AIP se agotaría en poco tiempo (10-15 días a baja velocidad), es necesario mantener la planta original convencional, en toda amplitud y potencia, (en

realidad habría que aumentarla ligeramente ya que el buque híbrido desplaza más que el convencional base). Se podría, no obstante, eliminar una cierta cantidad de combustible convencional.

La ventaja más evidente que una hibridación AIP presenta es la de poder disponer de un paquete de energía, independiente de la atmósfera y del resto de la maquinaria convencional, que se podría utilizar para la propulsión cuando más conviniese, o que podría cargar (o recargar) las baterías del buque convencional, de forma muy discreta (pero sólo durante un limitado período de tiempo).

Los inconvenientes que se prevén en la hibridación. serían los siguientes, entre los más importantes:

- Mayor complejidad en la arquitectura general del submarino.
- Disminución general de la seguridad a bordo por motivo de la naturaleza de los nuevos combustibles y oxidantes, y los necesarios sistemas comunicados con el mar.
- Complejidad operativa (doble planta energética).
- Costo adicional (en la adquisición y operación).
- Instalaciones adecuadas de apoyo en base (AIP)

Por lo tanto se puede concluir que la hibridación es un método provisional de acceder a la tecnología AIP pura que puede aportar unas autonomías “adicionales” respetables respecto a las que pueden entregar las baterías (unos 13 días, en profundidad frente a los 4 días proporcionados por las baterías convencionales); a pesar de que la hibridación es un método económico para reconvertir sin excesivo coste los submarinos convencionales ya construidos, estimo no es la solución ideal teniendo en cuenta la eficacia general/costo y sólo imperativos muy fuertes podrían impulsar a la adopción de sistemas híbridos.

3.3. Como alternativas que se pueden contemplar, si la hibridación se descarta como método de aplicación AIP a bordo de los submarinos, están las siguientes:

3.3.1. Submarino MONO-AIP-ML

Esta alternativa, denominada MONO-AIP-ML, (submarino 100% AIP de movilidad limitada), consiste en la adopción de un submarino AIP en el cual se ha suprimido la casi totalidad de los elementos convencionales típicos: máquinas diesel generadores, batería y parte (o todo) del DMFO, y en sustitución de estos elementos se han instalado convertidores y reactantes AIP de un volumen equivalente, con lo cual el desplazamiento no se ha modificado.

La autonomía total resultante (utilizando máquinas Diesel, por ejemplo) es del orden de un 35-40% de la normal en un submarino clásico de 1400 tns., (se vería ligeramente mejorada con el uso de celdas de metanol, ascendiendo al 50% aproximadamente), aunque no se puede alcanzar la velocidad máxima de 18-20 nudos, sino una moderada (app. 8 nudos), debido a lo pequeño de la potencia de los convertidores. La construcción de un submarino, 100% AIP exigiría, por consiguiente, la reconsideración de las misiones, la autonomía y todas las prestaciones de un submarino.

Pese a que para un país como Chile la autonomía de un submarino 100% AIP no permitiría satisfacer nuestro RAN (requerimientos de Alto Nivel), a favor de los submarinos de reducida autonomía y por consiguiente de construcción viable en tecnología AIP, existen los siguientes argumentos:

- En países de desarrollo militar medio, con zonas marítimas no superiores a unas 1000 millas náuticas y sin grandes intereses en ultramar, como ser los países escandinavos, el despliegue normal de su fuerza submarina no precisa disponer de grandes autonomías. Solamente conflictos intercontinentales le exigirían en dotar de grandes autonomías de tránsito a sus buques y submarinos
- Debido a que la “Baja detectabilidad” de los submarinos se hace cada vez más vital, los submarinos 100% AIP son ideales, ya que toda la navegación (tránsito y patrulla) puede efectuarse en inmersión profunda, y con una discreción muy alta (C.I. cercano a “0”).

Para países, mediana o pobremente industrializados, y que operan submarinos, un submarino AIP presentaría excesivos riesgos logísticos y operativos, por lo que se inclinarían por mantener en su inventario, los submarinos convencionales puros.

En resumen, si se mira el uso de los submarinos en una Armada como la nuestra, y sólo en el concepto de defensa o patrulla costera o semioceánica (hasta 1000 Mn. de la costa), es probable que los submarinos MONO-AIP desempeñarían una labor eficiente en sustitución de los convencionales, pero para ir más lejos no sería así.

En este supuesto la tecnología AIP podría conducir a la realización de submarinos de pequeño tonelaje (300-500 tns.) tripulados por una dotación-reducida (5-8 hombres) y con armamento limitado, pero con capacidad para efectuar misiones específicas, en condiciones ideales de discreción.

Por ejemplo, un submarino MONO-AIP de unas 300 tns., podría albergar unos 20 MWh de energía, lo que permitiría una autonomía aproximada de unas 500 hrs. (20 días), a unos 4-6 nudos de velocidad, (2000 Mn.), en profundidad y de forma ininterrumpida.

3.3.2. Submarino Super-Bat.

Esta alternativa consiste en la adopción de un submarino convencional en el cual se han sustituido las baterías clásicas por baterías avanzadas, del tipo LAIS o Na/S. Estas baterías son de mucha mayor capacidad que las convencionales, aunque deben estar provistas de aisladores térmicos debido a que su temperatura de funcionamiento comprende entre los 350° y 500° C. La instalación de estas baterías puede efectuarse bien dentro del mismo "Pozo de las baterías clásicas" las que se eliminan o pueden disponerse en volúmenes adicionales.

Las ventajas de esta solución son las siguientes:

- Las baterías pueden ser recargadas en la mar.
- El buque mantiene su autonomía total (combustible).
- La capacidad energética en inmersión se mejora sensiblemente. En el caso de sustitución batería convencional por la batería avanzada, guardando el mismo desplazamiento, los resultados serían: la autonomía a baja velocidad se multiplica por 1,55 (mínimo), y a alta velocidad (18-20 nudos) se multiplica por 2,5.

Si se agrega un paquete adicional o se integra a bordo una cantidad de baterías avanzadas que represente un aumento del desplazamiento de 300 tns. (en un submarino de 1400 tns., que pasaría a ser de 1700 tns.), además de sustituir las propias baterías convencionales por las avanzadas, resultaría que la autonomía a baja velocidad se multiplicaría por 3,25 y la autonomía a alta velocidad, por 5 (aproximadamente).

A efectos comparativos, en un submarino híbrido AIP-DCC con sección agregada AIP de 300 tns. se obtiene una autonomía en AIP de 384 hrs. (con consumo teórico de 120 kW), a lo cual si le sumamos la autonomía proporcionada por las baterías convencionales del submarino original que es del orden de 94 hrs., en total serían unas 478 horas.

En cambio, utilizando las baterías avanzadas en las mismas condiciones (con sección agregada de 300 tns.) y sustituyendo las baterías convencionales del buque portador, asimismo, por baterías avanzadas (180 tns.), la autonomía resultante es de unas 315 horas, es decir del orden del 65% de la autonomía AIP-DCC anterior.

El mismo cálculo, pero con AIP híbrido a base de celdas de metanol proporcionaría una autonomía de unas 536 horas, más las 94 horas de batería convencional (630 horas en total). La razón de autonomía con baterías avanzadas respecto a AIP-Pilas + baterías es entonces del orden del 50% aproximadamente.

Aunque el sistema a base de baterías avanzadas no es tan bueno en prestaciones de autonomía a baja velocidad como los sistemas AIP típicos, tiene no obstante la enorme ventaja de ser recargable en la mar y permitir asimismo una gran potencia instantánea, muy útil para dar altas velocidades con el MEP. Por consiguiente esta alternativa debería tenerse muy en cuenta si se desean submarinos AIP.

4. Factores limitativos de los sistemas AIP embarcados.

4.1. De forma general y sin entrar en detalles de la arquitectura, la seguridad, los ruidos generados, etc., pueden presentarse las siguientes cifras orientadoras sobre las energías que pueden proporcionar los sistemas AIP más viables y efectivos:

La energía disponible en un submarino convencional de unas 1400 tns. de desplazamiento es de unos 350 MWh como mínimo, pudiendo considerarse unos 300 MWh. de energía útil si se incluye el rendimiento de carga/descarga de las baterías (85% app.).

El peso total de la instalación de generación/almacenamiento de energía que incluye máquinas diesel, generadores, baterías, combustible y sus auxiliares, es del orden de unas 600 tns. (incluyendo casco, tanques varios, soportes, etc.).

Por consiguiente, la razón "Energía útil almacenada/desplazamiento bruto de la instalación" es del orden del 0,5 MWh/tns.

En este cálculo el peso relativo del combustible es muy bajo, por lo que se podría variar substancialmente la energía almacenada (MWh) y la autonomía resultante, con una variación muy pequeña del peso total de la instalación. Es decir, esa razón es muy sensible al parámetro "peso de combustible". El aire de combustión, atmosférico, al ser de libre disposición y no requerir almacenamiento a bordo mejora mucho la Razón de energía específica global de un submarino convencional.

Por el contrario, los sistemas AIP, los cuales deben almacenar forzosamente el oxidante (LOX) más el combustible, que puede ser clásico (DMFO) o puede ser avanzado (hidrógeno), en condiciones

de estiba muy poco eficaces (a efectos de pesos/volúmenes), el coeficiente de energía específico global resultante es sensiblemente inferior llegando a tomar valores entre 0,17 MWh/tns. (máquinas térmicas) y 0,25 MWh/tns. (celdas de combustible).

Por consiguiente, la Capacidad específica global de los sistemas AIP es aún muy baja (30-50 %) en comparación con los sistemas convencionales, en los que el peso/volumen del aire consumido, evidentemente, no interviene. Ello asegura, al parecer, la vigencia de los submarinos convencionales.

4.2. A las bajas características energéticas inherentes de los sistemas AIP se debe sumar las consideraciones derivadas de los siguientes factores:

4.2.1. Seguridad:

4.2.1.1. En todos los sistemas AIP el oxidante (LOX) debe ser estibado a bordo en forma criogénica una temperatura de -183°C (90°K) en contenedores adecuados, que deben estar dimensionados e instalados de forma que resistan un cierto grado de choque y que una rotura accidental de los mismos no afecte gravemente la seguridad total del submarino.

4.2.1.2. El uso del hidrógeno (Combustible utilizado en las celdas de combustible) se expone asimismo a graves consecuencias respecto a la seguridad, por lo que su almacenamiento y manipulación deben ser estudiados con sumo detenimiento. Los recipientes de hidruros o LH2 deberán ir forzosamente por el exterior para limitar los daños, si éstos se producen.

4.2.1.3. Los alcoholes, por ser muy volátiles e inflamables, aunque mucho menos peligrosos que el hidrógeno, deberán contar con instalaciones muy específicas y poco comunes en los submarinos. Se debe extremar los cuidados para evitar las consecuencias producidas por derrames a causa de averías, roturas, etc.

En resumen, todos estos reactantes, no utilizados hasta ahora en los submarinos, exigen el desarrollo de nuevas tecnologías de seguridad en las instalaciones y servicios, etc. con el fin de asegurar que un accidente no suponga una inutilización o pérdida de la capacidad operativa de los mismos o ponga al submarino en riesgo.

4.2.2. Confiabilidad:

En los sistemas termodinámicos, la parte clásica, es decir, el convertidor básico, está bastante desarrollada, pero al ser máquinas que deben funcionar en circuito cerrado precisan un sistema auxiliar muy complejo que por consiguiente entrega una limitada confiabilidad operativa.

En las celdas de combustible este problema se agudiza debido a su mayor aún complejidad interna y vulnerabilidad a las duras condiciones que se exigen en los submarinos, (choque, grandes inclinaciones, ambiente salino, etc).

Se puede deducir de lo anterior que el riesgo técnico es moderado en los sistemas AIP que utilizan máquinas térmicas y relativamente alto en los que utilizan celdas o pilas de combustible, las cuales además necesitan combustibles basados en el hidrógeno, de difícil manipulación y almacenamiento.

4.2.3. Costo de adquisición:

No hay elementos suficientes para estimar con precisión el coste de los sistemas AIP aunque se puede asumir que para las máquinas AIP termodinámicas (motores Diesel, motores Stirling y turbinas), los costes, una vez recuperadas las inversiones de su desarrollo, serían sólo moderadamente superiores a los costes normales de este tipo de máquinas, por utilizar tecnologías ya comunes en la industria.

En las celdas de combustible, los costes específicos serían muy superiores a los anteriores ya que son elementos muy caros; a ello habría que agregar los relativamente altos costes de los recipientes criogénicos de LOX, los sistemas de expulsión de CO₂ al mar, etc.

En conclusión, el coste de adquisición de submarino AIP 100% podría fácilmente ser un 30-50% superior al de un submarino convencional del mismo desplazamiento, pero a prestaciones iguales, el desplazamiento requerido es del orden de un 80% superior al del submarino convencional, en resumen el coste efectivo sería del orden 2 a 3 veces superior al de éste.

Ello daría lugar al conocido dilema de "Cantidad versus Calidad" que, dicho en otras palabras, equivale a si un submarino AIP (casi 0% de indiscreción) es, o no, más necesario que dos o tres submarinos convencionales (10-20% de indiscreción) de características operativas equivalentes.

4.2.4. Costos operativos:

Los costos operativos de los submarinos AIP superan notablemente al de los convencionales.

Ignorando los costos de personal, varadas, etc. que serían similares en ambos casos, los debidos a los consumos de los elementos energéticos serían muy diferentes.

Por ejemplo, en un submarino convencional el consumo típico por misión es de unas 80 tns. de DMFO, (app. 0,4 dólares/kg.). Un submarino MONO-AIP a base de máquinas diesel con la misma autonomía (si ello fuese viable) consumiría una cantidad equivalente de DMFO más unas 280 tns. de LOX (a 0,5 dólares/kg), lo que significa un coste adicional de US\$ 133.000 por misión, o bien US\$ 800.000 al año. Siendo la vida de un submarino de unos 30 años, el incremento de costo a causa exclusivamente del consumo de LOX, sería de US\$ 24.000.000, equivalente al 10% del coste de un submarino convencional medio (1.400 tns.).

De estos simples datos puede deducirse que el coste (de adquisición y/u Operación) de un submarino AIP, es un factor limitativo importante.

5. Qué esperar a mediano o largo plazo de las tecnologías AIP.

A mediano o largo plazo los elementos AIP que pueden ser desarrollados o perfeccionados para su uso en submarinos son los siguientes:

5.1. Convertidores:

5.1.1. Los sistemas termodinámicos (motores Diesel, Motores Stirling y Turbinas) que ya han alcanzado su total madurez evolutiva y por consiguiente no se esperan obtener mejoras sensibles en su rendimiento y diseño; sólo resta obtener mejoras en la confiabilidad de los sistemas auxiliares de gestión de gases residuales, reciclado, etc.

5.1.2. Los sistemas a base de Celdas de combustible de polímero sólido (SPEFC) podrían, en un futuro, mejorar sensiblemente sus prestaciones generales y sobre todo su fiabilidad operativo al comenzar a ser elementos de uso común en la industria lo que permitirá asignar substanciales recursos en su perfeccionamiento (mayor vida media, mayor robustez mecánica, mejora de su control, etc.). Asociadas a ellas, los reformadores de metanol, podrían asimismo desarrollarse adecuadamente.

5.1.3. A largo plazo, las celdas de electrolito a base de carbonatos fundidos (MCFC) y las de óxidos metálicos (MOFC) podrían aplicarse con efectividad a los submarinos admitiendo como combustible directamente los hidrocarburos, simplificándose el almacenamiento del combustible y aumentando su seguridad, con respecto al metanol e hidruros, aunque todavía sería preciso dotarlos de otros sistemas; no obstante las celdas a base de “oxígeno-hidrógeno” puro son las ideales para los submarinos: son silenciosas, de alto rendimiento y no producen gases residuales que haya que expulsar fuera del casco de presión, por lo que son las de más conveniente desarrollo.

Se estima que es difícil que puedan aparecer en un plazo medio nuevos convertidores a excepción de aquellos derivados de las Celdas de combustible o híbridos Celdas-baterías (celdas de aluminio-LOX), los cuales se están desarrollando muy rápidamente con vistas a la propulsión de los automóviles eléctricos y otros usos industriales. Sin embargo, los sistemas que puedan desarrollarse con vistas a los automóviles no siempre son de fácil aplicabilidad a los submarinos pues deben ser adaptadas a las duras condiciones de entorno que éstos imponen.

En resumen, el futuro de la tecnología AIP parece estar en manos de las celdas de combustible, a pesar de los altos costes e inconvenientes actuales.

5.2. Reactantes:

Un punto crítico de la tecnología AIP es el gran volumen y peso ocupado por los reactantes que se usan en la actualidad. La adopción plena de los sistemas AIP exige una mejora substancial del almacenamiento de los reactantes utilizados.

5.2.1. El oxidante común, el oxígeno, no parece que pueda sustituirse a mediano plazo, además su almacenamiento criogénico es el más efectivo, en la actualidad.

Su potencial sustituto, el agua oxigenada (HTP), sólo será efectiva cuando se obtengan estabilizantes adecuados.

5.2.2. Los combustibles típicos (metanol, etanol, parafina, DMFO) van a seguir siendo similares, evidentemente, y sólo se pueden considerar mejoras en el modo de almacenamiento del hidrógeno, o en la obtención del hidrógeno por reformado. El hidrógeno, a pesar de su peligrosidad y los grandes inconvenientes de su estiba (gran volumen específico en el LH2 y gran peso específico en los hidruros conocidos) se considera como el combustible del futuro por ser potente, limpio, ecológico y abundante en la naturaleza.

5.2.3. Las baterías avanzadas, principalmente las baterías Na/S podrán desempeñar un papel importante en la industria y en los submarinos. Su potencial de desarrollo es muy grande ya que las energías específicas teóricamente alcanzables son mucho más altas que las obtenidas en la actualidad.

6. Síntesis de las principales soluciones AIP y su comparación con el sistema convencional.

Los submarinos convencionales actuales sumergidos a profundidad disponen de una autonomía relativamente modesta (unas 100 horas a 4 nudos con descarga total de la batería). Durante los tránsitos deben ascender periódicamente a profundidad de snórkel para recargar baterías, mediante los grupos Diesel-generadores. La periodicidad es del orden de 1 hora cada 4 a 12 h. de navegación, según la velocidad. Estas limitaciones, por consiguiente, exponen a los submarinos a la detección lo que ha impulsado el desarrollo de sistemas energéticos de propulsión de gran capacidad e independientes de la atmósfera, que permitan así al submarino navegar en sumergida profunda durante prolongados períodos de tiempo y en condiciones silenciosas, siendo éste el objetivo último de los sistemas anaeróbicos.

Las plantas AIP que se consideran más efectivas y aplicables a los submarinos, en la actualidad o a corto plazo, son las siguientes:

CONVERTIDOR	REACTANTES
Celdas tipo SPE	LOX + H ₂ (Hidruros)
Celdas tipo SPE	LOX + H ₂ (Metanol)
Máquinas Diesel.	LOX + DMFO
Máquinas Stirling.	LOX + DMFO
Turbina de Vapor	LOX + Etanol

Los sistemas de mayor disponibilidad, menor costo y mayor sencillez operativa son los formados por las Máquinas Diesel, Máquinas Stirling o turbinas de vapor y sus reactantes asociados.

El sistema de mayor eficacia en términos de energía específica es el formado por Celdas de combustible alimentadas por metanol, aunque es un sistema que precisa más experimentación.

El logro de autonomías en sumergida profunda comparables a las que disponen los submarinos convencionales en tránsito mixto, exige la inclusión de una cantidad desmesurada de reactantes a bordo lo que implica un aumento sensible del desplazamiento (y con ello el costo) y pérdida de seguridad debido a la naturaleza misma de los reactantes utilizados.

A pesar de que el costo y la seguridad pueden ser factores limitativos importantes, el punto crítico aún esta en la relativamente baja energía AIP que es posible almacenar en un submarino de unas dimensiones medias en comparación con una de propulsión convencional de tamaño equivalente ya que en éste el aire de combustión es de libre disposición y el combustible utilizado, DMFO, es de muy fácil estiba y de alto poder energético.

En resumen, a dimensiones iguales el submarino AIP dispondría, a lo sumo, de una energía igual al 50% de la existente en un submarino convencional típico, es decir, su movilidad se reduciría a la mitad.

Por consiguiente se podría concluir que al agregar una pequeña planta AIP a un submarino convencional permitiría mejorar sus prestaciones. Es lo que se denomina una hibridación; esta acción permitiría una autonomía suplementaria de unos 13 a 18 días a baja velocidad (4 nudos) con un aumento del desplazamiento de sólo 15 a 20%.

Se podría deducir también que las soluciones híbridas no serían aconsejables ya que, si bien mejoran las prestaciones, incrementan notablemente la complejidad del submarino y su costo.

6.1. Como soluciones alternativas a corto plazo se tendrían:

6.1.1. La realización de submarinos AIP de movilidad limitada, más sencillos y muy eficaces para algunas misiones. Su radio de acción sería de alrededor de 800 Mn, con una capacidad energética del 50% de la convencional, pero con una gran ventaja: toda la misión sería en navegación profunda (dificulta la detección por el adversario). La baja movilidad que proporcionan actualmente las tecnologías AIP sugiere construir submarinos específicos para la protección costera o para misiones especiales, en las que su baja susceptibilidad a ser detectados sea un factor primordial. Ello conduciría a la creación de submarinos AIP muy pequeños, (300 a 500 tns.) de desplazamientos con un armamento y una autonomía limitadas, pero muy efectivos en distancias cortas o en zonas de aguas restringidas (estrechos, entradas a puertos, etc.) o "Shock Points".

6.1.2. La adopción de nuevos tipos de baterías (LAIS, Na/S) que podrían mejorar sensiblemente la autonomía en inmersión de los submarinos convencionales, sin necesidad de cambiar de concepto, y por consiguiente, con bajo riesgo técnico.

7. Conclusiones.

7.1. Las indiscreciones debido a la necesidad de cargar baterías son una importante debilidad de los submarinos convencionales; por lo tanto, si se quiere disminuir substancialmente la probabilidad de éstos a ser detectados, no habría más remedio que recurrir a las tecnologías nucleares o AIP (químicas) las cuales permiten al submarino navegar sumergido profundamente durante extensos períodos de tiempo. Como el construir submarinos nucleares tiene grandes trabas, políticas y tecnológicas, para una Armada como la nuestra la alternativa entre ambos sistemas es el AIP.

7.2. Es inviable que el buque MONO-AIP pueda cumplir una misión convencional completa, y a ello se le debe sumar la imposibilidad de dar la potencia máxima requerida por el MEP, por carecerse de convertidores AIP de la adecuada capacidad.

7.3. La ventaja más evidente que una *hibridación* AIP presenta es la de poder disponer de un paquete de energía, independiente de la atmósfera y del resto de la maquinaria convencional, que se podría utilizar para la propulsión cuando más conviniese, o que podría cargar (o recargar) las baterías del buque convencional, de forma muy discreta, siendo un método para potenciar los submarinos convencionales ya construidos aunque involucre a mi entender muchos inconvenientes.

7.4 Otra posibilidad de AIP está en las Celdas de Combustible, pese a su alto costo e inconvenientes tecnológicos actuales; por ejemplo, las celdas a base de “oxígeno-hidrógeno” puro son las ideales para los submarinos: silenciosas, de alto rendimiento y no producen gases residuales que haya que expulsar fuera del casco de presión., por lo que estimo se privilegiará su desarrollo.

7.5. Como conclusión final, y considerando que un submarino AIP en la actualidad presentaría excesivos riesgos logísticos y operativos, estimo se debe privilegiar, al menos por ahora, a los submarinos convencionales puros y hacer un esfuerzo, a futuro, cuando haya un mayor desarrollo, por las celdas de combustible de Oxígeno-Hidrógeno.