

EFFECTOS DE LOS SISTEMAS DE PROPULSION EN EL ROL DE LOS SUBMARINOS

*Guillermo Baltra Aedo
Capitán de Corbeta*

INTRODUCCION

Desde que Leonardo da Vinci concibió una unidad capaz de ocultar su presencia al permanecer sumergida bajo el agua, pasando por los submarinos propulsados por poder humano de fines del siglo pasado, llegando finalmente a los submarinos de la Segunda Guerra Mundial, precursores de los actuales submarinos convencionales y nucleares, el interés principal de los diseñadores, constructores y de las armadas que los emplean ha sido mejorar sus características operativas, en gran medida mediante transformaciones sucesivas de sus sistemas propulsivos, intentando maximizar la velocidad, la distancia franqueable y el tiempo sumergido, con independencia del aire exterior.

Estos esfuerzos, en gran medida se han cristalizado en dos grandes grupos de tecnologías: las denominadas convencionales y la nuclear. Los principios físicos y sus resultados al aplicarlos en el campo de la propulsión son tan disímiles que justifican plenamente la división planteada, ya que las llamadas técnicas convencionales ofrecen unos rangos de velocidad comprendidos entre 5 y 25 nudos, con una y mil horas de permanencia sumergido, respectivamente, considerando que ante el empleo de mayor velocidad se obtiene menor tiempo bajo la superficie. En cambio, la tecnología nuclear no sólo cubre totalmente dicha región de operación, sino que la sobrepasa ampliamente, pudiendo instalarse potencias propulsivas muy superiores y obtener tiempos de permanencia sumergido prácticamente limitados sólo por el factor humano.

A su vez, los sistemas propulsivos convencionales están divididos en categorías comprendidas entre los 5 y 25 nudos, con tiempos sumergido entre una y 100 horas para el sistema tradicional diesel eléctrico y baterías plomo-ácido. El complemento, hasta llegar a las 1.000 horas sumergido, estaba cubierto por los nuevos métodos anaeróbicos (independientes de aire exterior), que se están desarrollando en la actualidad.

La marcada discrepancia entre la característica velocidad contra tiempo sumergido ha significado una distinta asignación de roles para los submarinos propulsados por sistemas convencional y nuclear.

Básicamente, los submarinos convencionales se han empleado como disuasión en tiempo de paz, y en la guerra han tenido un rol primario de ataque a la fuerza de tarea adversaria, o un rol secundario de ataque a las líneas de comunicaciones marítimas del adversario, utilizándose también en tareas de guerra antisubmarina o en operaciones sobre la costa enemiga. En cambio, dependiendo de su tonelaje, al submarino nuclear se le han asignado dos funciones muy características:

- Submarinos nucleares de alto tonelaje, portadores de misiles con cabeza nuclear. Tienen una misión exclusivamente estratégica, desde el punto de vista de la disuasión nuclear en la paz o de acción nuclear en la guerra.

- Submarinos nucleares de bajo tonelaje y con armamento convencional, denominados de ataque. Tienen asignados roles muy similares a los de submarinos convencionales, pero considerando que en su accionar quedan liberados de la limitación de

ser un arma de posición y tienen la libertad de buscar y perseguir a sus adversarios, a las tareas mencionadas previamente para los submarinos convencionales se pueden agregar otras, tales como base de sonar adelantada y cortina de protección A/S a la fuerza de tarea organizada.

En sus distintas categorías, y comparados a las fuerzas a que se enfrentan, los submarinos se caracterizan por ser una inversión de menor costo de adquisición, menor costo de operación y con dotaciones reducidas. Estas características, por sí solas, hacen de los submarinos un arma sumamente interesante de analizar, especialmente si se considera los elevados costos de adquisición y operación que están alcanzando otros tipos de unidades navales

La introducción de las tecnologías anaeróbicas en los submarinos convencionales producirán algunas variaciones que podrían afectar las áreas estratégicas, tácticas y logísticas en una guerra convencional, obteniéndose en algunos casos beneficios que acrecientan el interés de estudiar el submarino.

En virtud de lo ya mencionado, el objeto de este trabajo es el de presentar las diferentes alternativas tecnológicas existentes en sistemas de propulsión para submarinos, haciéndose para cada caso un breve análisis de las características y limitaciones que se presentan en los aspectos tácticos, logísticos y estratégicos, permitiendo obtener una visión de conjunto de cuáles pueden ser las posibles fuentes de propulsión de los submarinos del futuro.

Para los efectos de análisis se considerarán dos categorías de sistemas propulsivos:

— Sistemas convencionales:

Clásicos:

- Diesel-eléctrico con baterías de plomo-ácido.
- Diesel eléctrico con baterías secundarias de litio.

Anaeróbicos:

- Híbrido con sistema de combustión interna anaeróbica.
- Híbrido con celdas de combustible.
- Eléctrico con baterías primarias de litio.

— Sistemas no convencionales:

Nucleares

PROPULSION SUBMARINO CONVENCIONAL

A. Sistemas de propulsión clásicos

Todos los submarinos convencionales actuales emplean propulsión eléctrica, en la cual los grupos generadores se han derivado de otras aplicaciones por el problema de costos asociados al diseño y producción de aplicaciones especiales. El sistema se basa en una batería que entrega la potencia necesaria a un motor eléctrico, acoplado directamente al eje. Esta, a su vez, es recargada por grupos generadores Diesel-eléctrico, durante las condiciones de navegación en superficie o en *snorkel*.

Este sistema, pese a resultar de mayor volumen (factor indeseable en un submarino convencional), ha hecho al submarino más silencioso y eficiente. Por otra parte, las baterías, que tienen una reducida capacidad de almacenamiento de energía, son un factor que limita el tiempo de operación sumergido de un submarino convencional, siendo necesario contar

con grupos generadores como fuente de energía. Así, factores tales como tasa de indiscreción (porcentaje diario de exposición de mastiles), generación de ruido, calor, gases y la capacidad de las baterías, entre otros, determinan el sistema propulsivo más apto para integrar a un submarino. En la actualidad, el tipo de batería usada es la de plomo-ácido, pero investigaciones recientes han demostrado cualidades muy promisorias para otras clases de baterías secundarias, entre ellas las de litio, analizándose a continuación estas dos alternativas.

1. Sistema con baterías de plomo-ácido

• Motores diesel

Los requerimientos de espacio y tamaño de los submarinos convencionales han conducido a la instalación de motores diesel en "V", de alta velocidad, con gran potencia específica y tamaño reducido. Estos motores de alta potencia y los sistemas automáticos de carga han permitido reducir los tiempos de carga de baterías e influir positivamente sobre la tasa de indiscreción, sin embargo, esto requiere volúmenes de aire mayores, y por supuesto, se deben aceptar cantidades de gases de descarga más altas. El aumento de potencia ha llevado a mejorar los sistemas de aspiración y descarga, así como los sistemas de control de profundidad, para evitar excesiva contrapresión en la descarga; de esta forma se han logrado tubos *snorkel* más pequeños y eficientes, y válvulas de descarga que han reducido los depósitos de carbón dejados en la superficie y la emisión de radiación infrarroja. La introducción de motores sobrecargados mecánicamente ha conseguido aliviar estas limitantes, junto a mejores eficiencias a plena carga. En la tabla N° 1 se muestran los motores actualmente usados y sus parámetros más importantes.

Tabla N° 1
CARACTERISTICAS DE LOS MOTORES DIESEL PARA SUBMARINOS

Constructor	MTU	HEDEMORA	PIELSTICK	PAXMAN
Tipo	12V652MB	V12A/15 Ub	12VPA4V185	16RPA200SZ
Sobrealimentación	Mecánica	Turbo	Mecánica	Mecánica
Potencia (Kw)	950	810	776	1.513
R.P.M.	1.400	1.500	1.300	1.350
Peso (Kg)	6.600	7.200	6.850	9.000
Pot/Vol. (Kw/l)	12	12	11,5	14.5

Otra característica importante es la generación de ruido, el cual se transmite en dos formas. La primera es al ambiente; el ruido se reduce con el diseño de espacios cerrados y recubiertos de aislantes. La segunda es a la estructura (más difícil de solucionar), el ruido se logra reducir con la instalación de montajes flexibles dobles o triples, los cuales consisten en conjuntos de amortiguadores separados por una gran masa.

• Baterías

El corazón del submarino diesel-eléctrico es su batería. Esta debe almacenar el máximo de energía, entregarla a diferentes razones de descarga, sin variación de su eficiencia, y ser recargada en el más corto tiempo posible. La batería de plomo-ácido es aún el medio más apropiado para alcanzar tales requerimientos. Actualmente estas suministran entre 100 y 200 Kw de potencia continuamente, por un período máximo de 4 o 5 días, y hasta 7,5 Mw por cortos tiempos, donde las densidades de potencia y altas razones de descarga permiten al submarino efectuar los ataques y evasiones desarrollando altas velocidades. La tabla N° 2

compara las densidades de energía de distintos tipos de baterías. De ella es posible concluir que los requerimientos del factor de forma, al aumentar la altura de los pozos, ha llevado a mejores diseños.

Tabla Nº 2
DENSIDADES DE ENERGIA EN BATERIAS

País	Energía/Volumen %			
	Tiempo (horas)			
	1 h	5 h	20 h	100 h
G.B.	100	100	100	100
URSS	87,1	84,3	87,1	94,9
R.F.A.1	125,7	133,2	135,5	144,4
R.F.A.2	157,2	139,8	137,2	143,5
R.F.A.3	139,0	137,6	137,2	143,5
R.F.A.4	164,0	140,2	138,4	145,5

Base 100% para baterías de G,B.

•Motor propulsor

El motor eléctrico de doble armadura y baja velocidad, junto a diseños especiales de hélices y acoplado directamente al eje ha conseguido plantas silenciosas, con la ventaja que su construcción y mantención es simple. Además, los motores de doble armadura con circuitos independientes logran mejores eficiencias, operando con cargas parciales, y menor consumo de combustible. Este aspecto se ve reforzado por el manejo que se hace de las baterías, las cuales en bajos poderes se conectan en paralelo para controlar la corriente de campo; en altos poderes, estas se conectan en serie, para satisfacer los requerimientos de velocidad. A su vez, mejoras en los tableros de control e interruptores han llevado al uso de sistemas de control automáticos, lo que disminuye los requerimientos de mantención a bordo. Las potencias suministradas por estos motores varían de acuerdo a cada diseño de submarino, encontrándose motores de hasta 7,5 Mw.

•Desarrollo futuro

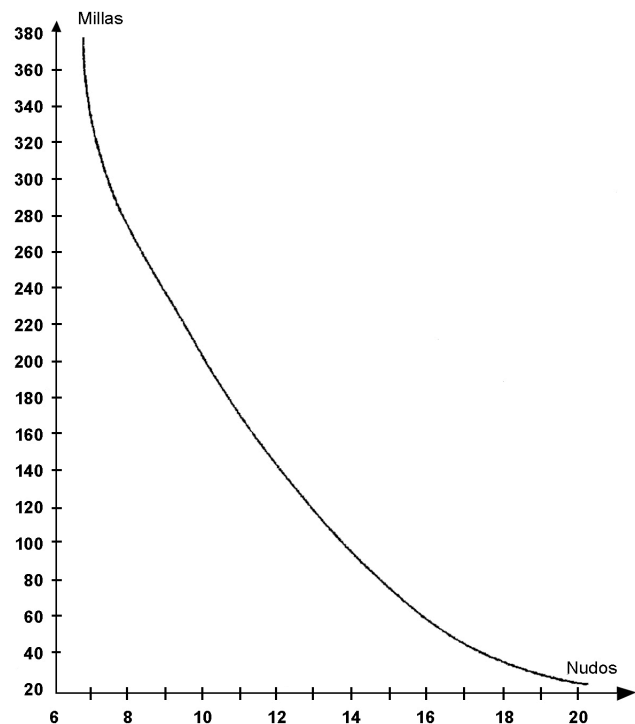
Los submarinos modernos producto de los avances tecnológicos han logrado optimizar sus requerimientos operacionales, que pueden ser resumidos en:

- Velocidad máxima sumergida, alrededor de una hora de duración.
- Navegación sumergida, hasta unas 400 millas a rendimiento máximo.
- Tasa de indiscreción, entre 4 y 5% a rendimiento máximo.

El actual desarrollo logrado impone a los futuros avances inversiones cada vez mayores en investigación. Tal es el caso, por ejemplo, de las baterías de plomo-ácido, en las cuales se han logrado considerables adelantos, siendo difícil esperar mejoras significativas de ellas. La figura Nº 1 muestra la capacidad de los diseños actuales.

Las últimas investigaciones están orientadas a aumentar la potencia de los motores diesel, dentro de las restricciones de volumen que tienen los submarinos convencionales. El uso de turbocargadores mejorará aún más las capacidades de ellos. De hecho, varios fabricantes ya ofrecen motores de aplicación submarina turbocargados, alcanzando reducciones de un 50% en el volumen, para similares potencias de los aspirados naturalmente. Por otra parte, mejoras en las cámaras de combustión permitirán ganancias de potencia, por ejemplo, una precámara de geometría variable ha reducido el consumo específico de combustible y permitido mayores presiones, en comparación al sistema de inyección directa.

Figura N° 1
DISTANCIA DE NAVEGACION SUMERGIDA CONTRA VELOCIDAD



Dado que la longitud alcanzada por los motores eléctricos es un factor limitante para el aumento de su potencia, el uso de motores-disco permitirá reducciones de espacio importantes, sin pérdidas de eficiencia. Otra área que se está desarrollando es el uso de imanes permanentes, que sustituyen los circuitos de excitación, reduciendo las pérdidas por calor, junto a un menor consumo de energía. Ello permitirá reducciones de espacio y peso, menor generación de ruido y baja perturbación magnética.

2. Sistema con baterías secundarias de litio

Las baterías de un submarino como elementos almacenadores de energía, entre otras capacidades deben mostrar una elevada densidad de energía y alta densidad de potencial. Por ser acumuladores recargables, también resulta muy conveniente que tengan un tiempo de carga breve, asociado a una potencia instalada compatible.

Entre las distintas alternativas para las baterías clásicas (plomo-ácido), se están desarrollando nuevas combinaciones de electrodos y electrolitos, tales como litio-aluminio/sulfuro de hierro, cadmio/níquel, fierro/níquel, zinc/cloro. Tal como se aprecia en la tabla N° 3, desde el punto de vista de la mayor densidad de energía (Wh/l), las baterías de litio-aluminio/ sulfuro de hierro son las más promisorias, aunque estas últimas, al igual que todas las mencionadas, necesitan de bastante desarrollo tecnológico para ser empleadas en submarinos.

Sin embargo, por sus mejores características teóricas se ha seleccionado el acumulador litio-aluminio/sulfuro de hierro como la opción más adecuada para su empleo en submarinos, que será analizado a continuación.

Tabla N° 3
PARAMETROS DE BATERIAS SECUNDARIAS,
PARA DISTINTAS OPCIONES DE ELECTRODOS

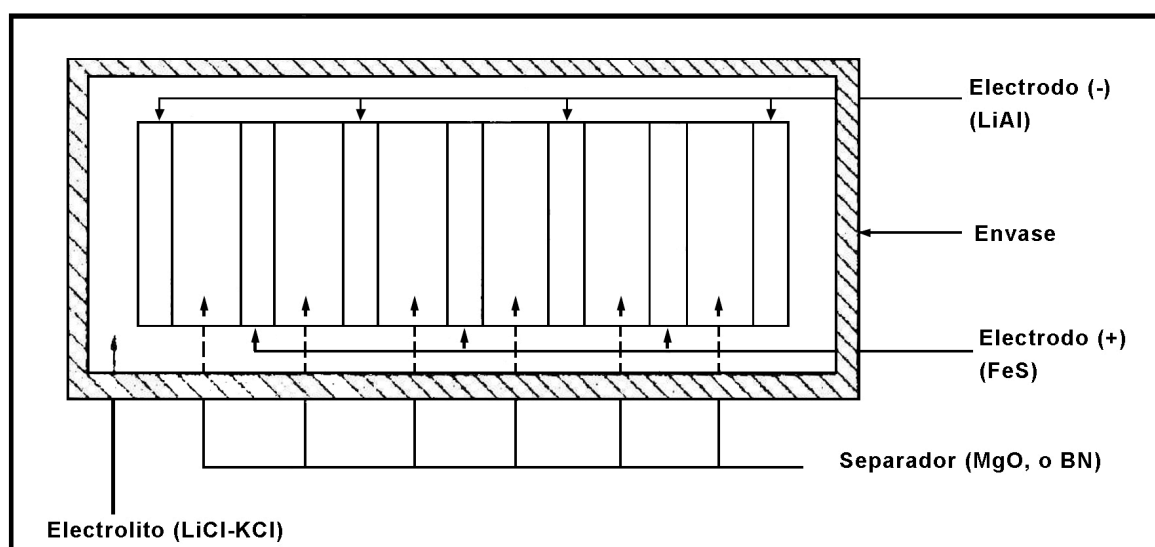
Opción	Densidad de Energía (Wh/l)	Temper. Operación (°C)	Nombre
Pb/PbO ₂	144	20	Plomo-ácido
LiAl/FeS	220	460	Litio-Aluminio/ sulfuro de hierro
Cd.NiO(OH)	140	N/D	Níquel/cadmio
Fe/NiO(OH)	N/D	N/D	Fierro/níquel
Zn/NiO(OH)	70	50	Níquel/zinc
Na/S	130	350	Sodio/azufre
Ag/Zn	110	25	Plata/zinc
Zn/Cl ₂	180	90	Zinc/cloro

• Aspectos técnicos.

La idea fundamental de esta, alternativa sería reemplazar, en un submarino clásico diesel-eléctrico, las baterías de plomo-ácido por acumuladores recargables, cuyos electrodos positivos estén formados por sulfuro de hierro y sus electrodos negativos por una aleación de litio y aluminio. Ambos electrodos se encuentran separados por una placa de óxido de magnesio o bien de nitruro de boro; todo el conjunto se encuentra inmerso en un electrólito formado por una mezcla de cloruro de litio y cloruro de potasio.

El conjunto de varios pares electródicos formar la unidad fundamental (celda) (ver figura N° 2), y la interconexión de varias celdas daría origen a un dispositivo intermedio denominado módulo. Finalmente, el agrupamiento de varios módulos constituiría una batería, siendo cada una de estas últimas de un tamaño similar a las actuales de plomo-ácido.

Figura N° 2
ESQUEMA DE UNA CELDA BASICA SECUNDARIA DE LITIO



Para su operación, estas baterías requieren de algunos sistemas auxiliares destinados al control de la temperatura del electrólito (460° C) y a la fijación del voltaje entre bornes de cada celda, ya que una reducción bajo 1 voltio de la tensión durante la descarga, o bien una elevación de la misma sobre 1,5 voltios durante la carga, produciría efectos irreversibles que destruirían la celda.

Las características electroquímicas superiores de este tipo de baterías ofrecen algunas capacidades especiales, tales como:

— Mayor densidad de energía; esto implica que para un mismo volumen de baterías un submarino aumenta su distancia franqueable sumergido, lo que se aprecia en la figura N° 3, donde un submarino de referencia a bajas velocidades (5 nudos) puede alcanzar aproximadamente 580 millas náuticas sumergido, sin recargar baterías, o bien en altas velocidades (20 nudos) podría alcanzar unas 75 millas náuticas bajo la superficie del mar.

— La reacción química de carga se efectúa en forma más rápida que en las baterías actuales; por tanto, los tiempos de recarga son menores, reduciéndose así la tasa de indiscreción de un submarino.

— Tanto en la operación de carga como en la descarga no se producen gases explosivos, eliminándose un factor importante de inseguridad.

— La característica de operación de la batería es bastante constante, pudiéndose llegar a descargas profundas sin reducir su rendimiento

Por otra parte, la introducción de esta tecnología conlleva algunas limitaciones, como las siguientes:

— La operación del electrólito en alta temperatura exige el uso de un sistema de refrigeración que elimine el excedente de energía (calor) hacia el medio ambiente, generándose una estela térmica detectable por sensores infrarrojos.

— En el caso de ruptura de algún contenedor de la batería, se derramaría en el compartimiento el electrólito a 460° C, el que posteriormente se solidificaría, siendo posible que se produzcan daños.

— Finalmente, la mayor limitación de todas es que este tipo de baterías no está disponible aún, por ser un sistema en desarrollo que presenta dificultades tecnológicas en vías de solución.

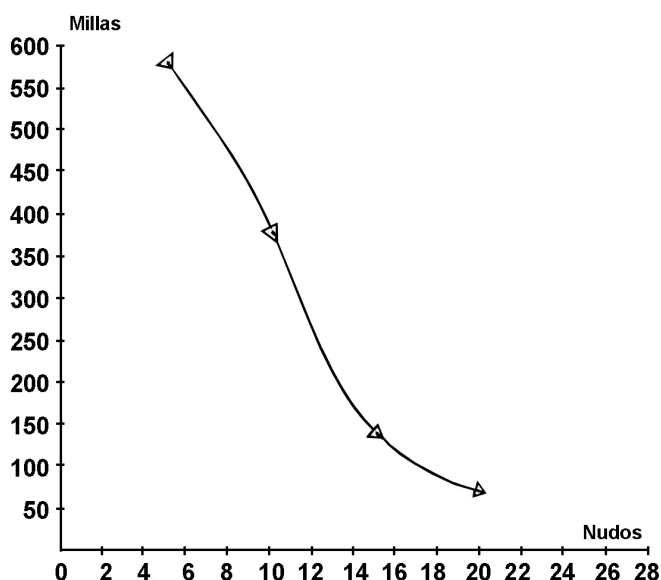
• Aspectos estralégicos.

Las capacidades técnicas que muestra la batería de litio se manifiestan, como un aumento de la distancia franqueable sumergida a distintas velocidades y una disminución del tiempo de recarga, induciendo por tanto una reducción en la tasa de indiscreción.

Lo anterior permitiría efectuar los despliegues a mayor velocidad pero sin traspasar aún el umbral que lo retiene como un arma de posición.

El aumento de velocidad en los despliegues favorece la sorpresa mediante la realización de una operación imprevista constituyéndose en un factor más en la obtención de una sorpresa estratégica.

Figura N° 3
DISTANCIA FRANQUEABLE SUMERGIDO
PARA UN SUBMARINO DE REFERENCIA CON BATERIAS DE LITIO



La reducción de la tasa de indiscreción dificulta la detección de los submarinos en sus operaciones, mejorando la seguridad, tanto por facilitar la sorpresa propia como por dificultar la sorpresa del adversario, mediante una operación de recolección de inteligencia más efectiva.

Por último, la mayor velocidad de desplazamiento ayuda a una concentración más eficaz de los medios.

- **Aspectos tácticos.**

El hecho de poder desplazar el submarino sumergido mayores distancias, a las distintas velocidades, le otorgaría una serie de capacidades tácticas adicionales, tales como:

- Mayor flexibilidad y rapidez, lo que favorecería la movilidad táctica, significando esto una ventaja especialmente en las fases de aproximación (aumentando los sectores de aproximación al blanco), ataque y retirada.

- Este aumento de capacidades da herramientas al comandante del submarino para introducir variaciones en los procedimientos que faciliten la sorpresa táctica.

- Como contrapartida, la estela térmica actúa negativamente sobre el submarino, facilitando su detección por sistemas infrarrojos.

- **Aspectos logísticos**

Desde el punto de vista de la logística naval operativa, la introducción de este tipo de baterías significa una variación en los elementos funcionales de abastecimiento, mantenimiento, personal e instalaciones, los que deberán adaptarse a las características de la nueva tecnología.

Sin embargo, el elemento funcional transporte, específicamente en el caso de hacer llegar combustible a las naves en operación, no sufriría cambios, por tratarse en esencia de un submarino diesel-eléctrico clásico.

- **Proyección futura**

El estado actual de la tecnología llega hasta la producción de baterías para la propulsión de vehículos terrestres, pero sin alcanzar aún el punto que las vuelva económicamente rentables.

Aplicaciones para potencias mayores requieren de un desarrollo tecnológico avanzado, y sólo unos pocos países han mostrado interés por realizarlo.

De esta forma, la verdadera proyección para el uso de las baterías de litio en submarinos está condicionada hasta el momento por el éxito que presenten las investigaciones que se realizan.

B. Sistemas de propulsión anaeróbicos

1. Sistema de propulsión a combustión interna

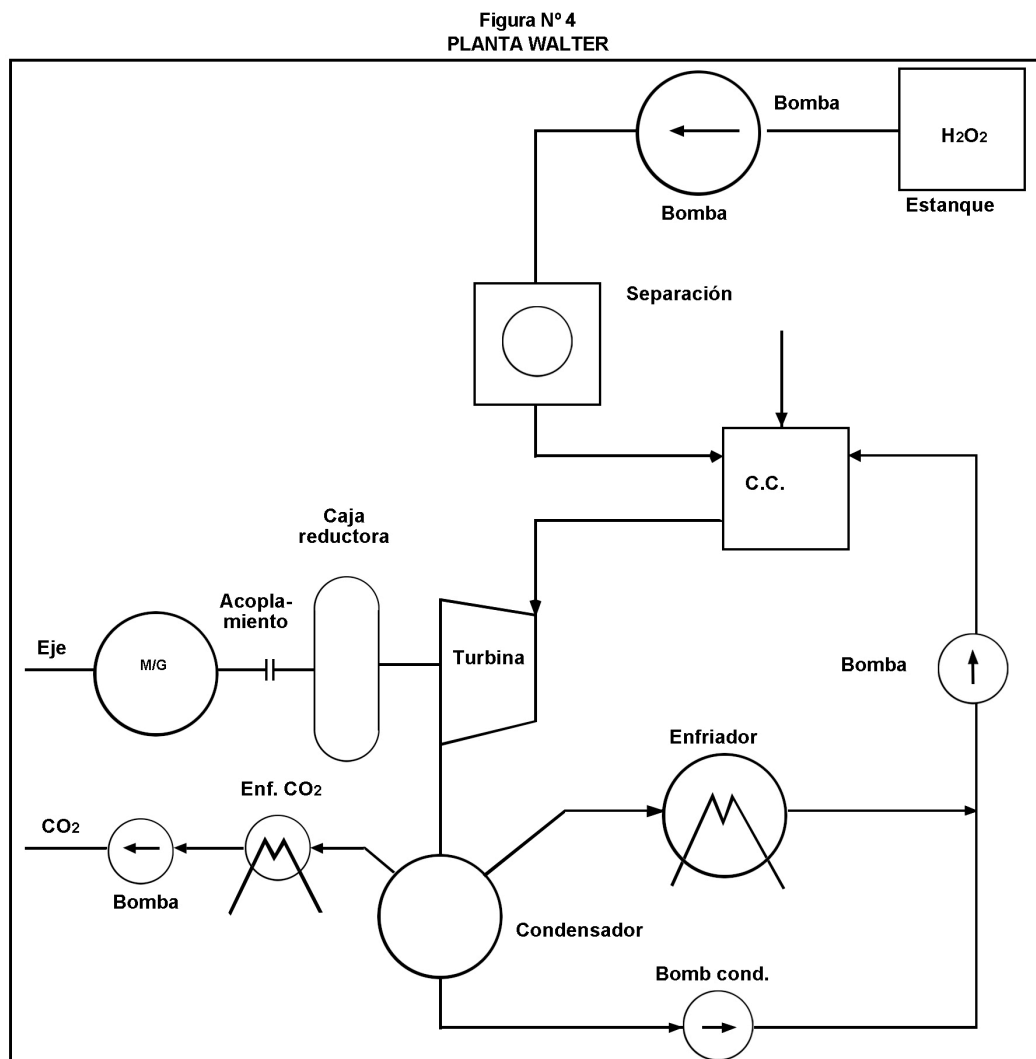
El sistema clásico de propulsión posee la gran desventaja de exponer al submarino a la detección de superficie, durante la condición de navegación en *snorkel*. El reconocimiento de estas limitaciones, por una parte, y los recientes avances logrados, producto de años de investigación y desarrollo en nuevos sistemas propulsivos, hacen prever la incorporación de estos a los submarinos en un futuro cercano. La instalación de un sistema de alta densidad de energía e independiente del aire conducirá a notables mejoras en la autonomía

sumergido de los submarinos. Entre estos métodos a combustión interna, con cierto grado de desarrollo, cabría destacar los siguientes:

- Turbina Walter
- Ciclo Brayton de circuito cerrado.
- Ciclo diesel de circuito cerrado/abierto.
- Ciclo Stirling.

•Turbina Walter

La figura N° 4 presenta un esquema del sistema propuesto, el cual mediante la descomposición catalítica del peróxido de hidrógeno (H_2O_2) proporciona vapor y oxígeno para quemar el combustible en una cámara. El acoplamiento existente entre la caja reductora y el motor eléctrico permite desconectar la turbina, y proseguir mediante baterías en navegación silenciosa.



La configuración anterior, por su tamaño y peso es para altas potencias; sin embargo, su funcionamiento a cargas parciales se ve afectado por su baja eficiencia; la adición de un sistema de propulsión apropiado para bajas demandas representa el complemento ideal. Por otra parte, al reemplazar la reducción mecánica por una eléctrica se tendrán mejoras en los siguientes aspectos: eficiencia, generación de ruido, confiabilidad y requerimiento de equipos auxiliares.

- **Ciclo Brayton de circuito cerrado**

Dicho sistema se basa en el ciclo termodinámico de las turbinas a gas, donde el fluido de trabajo opera en un circuito cerrado, empleándose una reducción eléctrica en la propulsión. La energía es aportada por la combustión del petróleo con el oxígeno almacenado a bordo en forma líquida, o con el aire ambiental para aquellas ocasiones de navegación en superficie. Para descargar los gases en altas profundidades de operación se debe proveer un compresor, o emplear una cámara de combustión presurizada.

Al igual que la turbina Walter, este ciclo, por su diseño compacto, es ideal para elevadas potencias. El funcionamiento a cargas parciales lo afecta negativamente al igual que la instalación de un compresor para descargar los gases de combustión. Otro aspecto que lo afecta negativamente es la emisión de calor al medio, que aumenta la probabilidad de ser detectado.

- **Ciclo diesel de circuito cerrado/abierto**

En esta planta, el motor propulsor principal pasa a ser un diesel independiente del aire, donde el oxígeno para la combustión se obtiene del almacenamiento a bordo, ya sea en forma gaseosa o líquida. Este motor, por medio de una caja reductora, mueve una hélice a bajas revoluciones, y un acoplamiento permite desconectarlo y proseguir con el motor eléctrico de baja potencia. Este puede ser alimentado desde un banco de baterías o desde otro generador diesel auxiliar independiente del aire. Así se lograrían importantes ahorros de espacio y peso; sin embargo, la capacidad limitada de almacenamiento de oxígeno reduce las ganancias del espacio y autonomía del submarino. Otro problema que se presenta es la generación de ruido del motor diesel, el cual debe funcionar en toda ocasión, excepto en condiciones de baja velocidad con baterías.

Es importante destacar que el sistema en base a reducción mecánica no es la única alternativa posible de concebir. La utilización de una reducción eléctrica similar a la empleada en los submarinos convencionales actuales, posee importantes ventajas que deben ser consideradas.

- **Ciclo Stirling**

Este motor basa su funcionamiento en el ciclo termodinámico de Stirling, cuya innovación más notable es la fuente de calor externa a la máquina, lo que permite quemar mejor el combustible mejorando la eficiencia del ciclo. Otra ventaja es su baja generación de ruido, por la combustión continua que ocurre en su cámara y la ausencia de válvulas.

La Armada Real de Suecia, en conjunto con sus astilleros, desde los años 70 han estudiado un sistema de propulsión independiente del aire, basado en esta máquina. En vista de la experiencia alcanzada por firmas de ese país en la producción de motores Stirling, en el manejo y producción de oxígeno líquido, y en el desarrollo de cámaras de combustión presurizadas para aplicación submarina, Suecia ha enfocado los esfuerzos hacia un sistema híbrido, bajo las siguientes premisas.

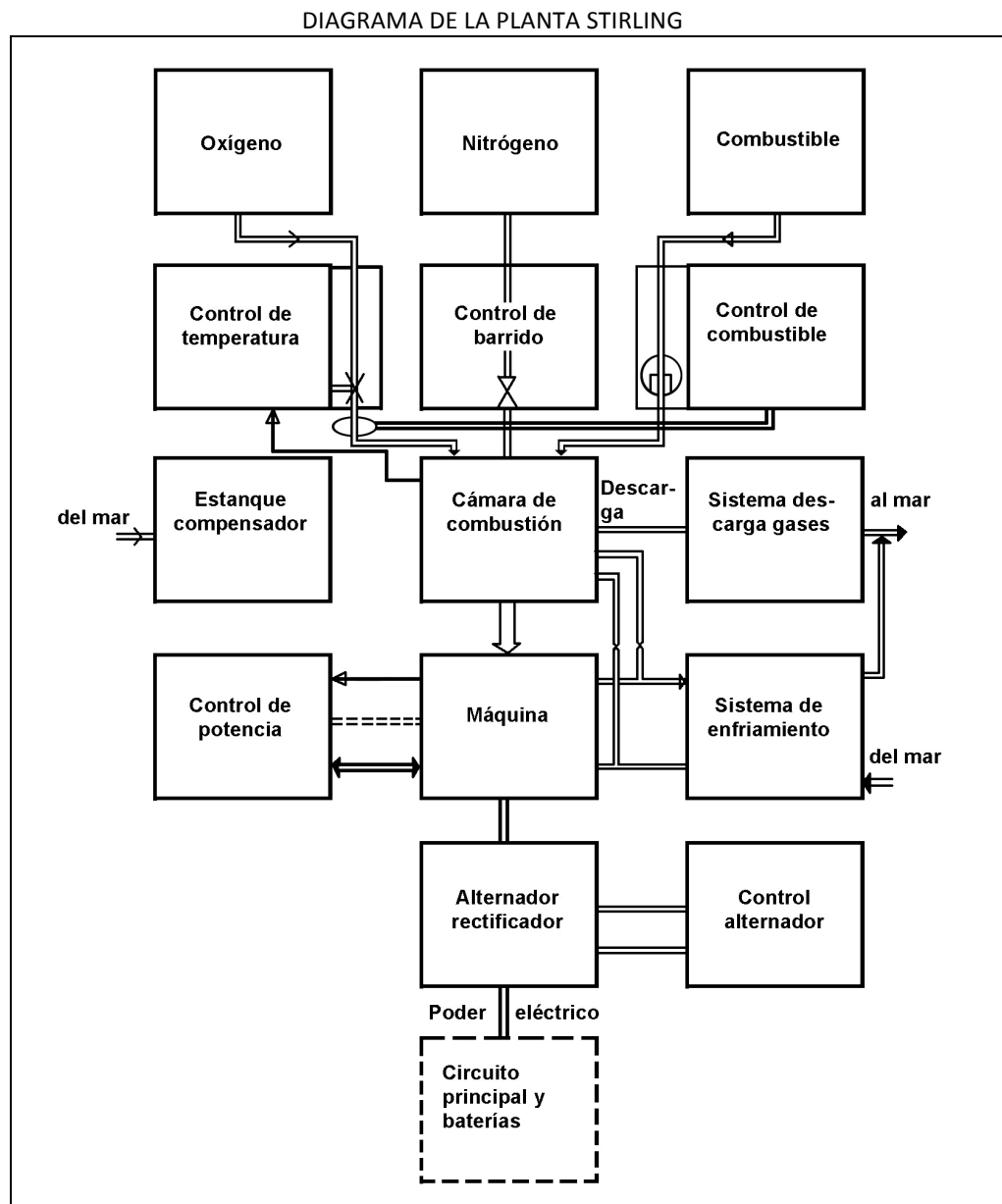
- Un sistema independiente del aire, de baja potencia y alta autonomía, basado en máquinas Stirling para navegación de patrulla

- Un sistema convencional de baterías para altas velocidades y condiciones muy silenciosas.

— Una planta diesel para cargar baterías y navegaciones rápidas cuando sea tácticamente aceptable.

La figura N° 5 muestra un diagrama esquemático de una maquina Stirling. El sistema completo constará de dos máquinas Stirling capaces de producir 75 Kwe cada una, para el servicio del submarino, y propulsión hasta 5 nudos, junto a 110 Kw de agua caliente a 50 °C.

Figura 5



De acuerdo al estado de desarrollo de las opciones de combustión interna mencionados, el ciclo Stirling se aprecia como el más promisorio, ya que inclusive se encuentra en construcción un prototipo. En virtud de lo mencionado se hará a continuación una descripción de los aspectos estratégicos, tácticos y logísticos del mismo, incluyendo las características que representan una variación de las que poseen los submarinos clásicos actuales.

• Aspectos estratégicos del motor Stirling

Debido a la gran capacidad del motor Stirling para permanecer independiente del aire exterior, su tasa de indiscreción se reduce notablemente. Un balance ponderado de esta capacidad, contra una mayor generación de ruidos y emisión de calor, permitiría afirmar que el factor sorpresa se ve mejorado al poder efectuarse despliegues y cambios de área con una menor probabilidad de ser detectado. Además, esto último implica una mayor seguridad, por la negación de información que tendrá el adversario y por la facilidad para cumplir las tareas propias de recolección de Inteligencia.

La dependencia que tiene la planta del oxígeno líquido dificulta la movilidad estratégica de la unidad, ya que deberá contarse con la capacidad logística que asegure el suministro de éste; de otra forma, el submarino se constituye en uno clásico de menor capacidad una vez que se ha agotado su primera carga de oxígeno.

Todo lo expresado manifiesta que si bien con la planta Stirling se podrán obtener ventajas en cuanto a la acción sorpresiva de la unidad, el submarino continuaría siendo fundamentalmente un arma de posición.

• Aspectos tácticos del motor Stirling

La utilización dada a la planta Stirling durante la patrulla permite reservar las baterías para aquellas ocasiones en que sean requeridas altas potencias (como en un ataque). Ahora bien, dado que la movilidad táctica de un submarino es función, entre otros de su disponibilidad de energía, ésta finalmente se ve mejorada. La concepción de la planta Stirling, por su independencia del aire, permite aumentar en 200% su capacidad de permanecer sumergido.

Otros factores tales como tiempo de carga de baterías, profundidad de operación, radio de acción, velocidad máxima sumergido, no se ven alterados respecto del sistema clásico.

• Aspectos logísticos del motor Stirling

La introducción de la planta Stirling plantea un aumento de los requerimientos logísticos de la unidad, debido a la incorporación del sistema de almacenamiento, suministro y manejo del oxígeno líquido. Por ello, el personal deberá dominar fundamentalmente la técnica del sistema de suministro de oxígeno; las características de su almacenamiento criogénico (muy bajas temperaturas) y las precauciones de seguridad. Asimismo, se crea la necesidad de proveer de oxígeno al submarino, lo que implica contar con un sistema seguro de producción industrial y transporte a los lugares de reaprovisionamiento.

2- Sistema en base a celdas de combustible.

También conocidas como *fuel cells*, son dispositivos que convierten la energía química de los reactantes directamente en energía eléctrica, lo cual se puede explicar—para el caso particular de las celdas de H_2O_2 — como la acción inversa de la electrólisis del agua, esto es, hidrógeno y oxígeno se recombinan en presencia de un catalizador, para producir agua a través de un electrólito que permite el transporte de iones de un gas al otro. La reacción, además de electricidad, genera calor y agua pura como residuo, los cuales deben ser evacuados en forma continua. El silencio absoluto en el cual se genera la energía eléctrica, la ausencia de gases de descarga en cierto tipo de celdas, el aprovechamiento óptimo de la energía química almacenada en los reactivos, y el número mínimo de partes móviles en el

sistema completo son características muy ventajosas para su aplicación como fuente de poder en unidades autónomas, particularmente submarinos.

En la práctica, se pueden distinguir tres tipos fundamentales de celdas: las de electrólito fundido de muy alta temperatura (750°C), las de electrólito ácido, que operan a media temperatura (250°C) y las de electrólito alcalino de baja temperatura (80-90°C), siendo éstas últimas más eficientes que las primeras (aproximadamente, 60% contra 50%, respectivamente). A excepción de algunos proyectos de generación eléctrica de potencia, las celdas alcalinas han sido las más usadas y se ha determinado que son las más adecuadas para su uso en unidades autónomas como vehículos terrestres o submarinos. Por esta razón, en el presente trabajo se analizará este tipo de celdas.

Su principal área de aplicación ha sido la de generación eléctrica para los proyectos espaciales de la NASA; también se han probado en forma exitosa como fuentes de poder propulsivo para sumergibles de investigación de altas profundidades.

Para el caso de unidades autónomas, se ha determinado que por su mayor energía almacenada por unidad de volumen, las formas más adecuadas de suministro de combustible y oxidante son hidrógeno y oxígeno puros, respectivamente.

La figura N° 6 muestra un diagrama esquemático de una unidad de este tipo, que por motivos de simplicidad se ha ilustrado con una celda de combustible, la cual está compuesta por:

- Sistemas de almacenamiento y suministro de combustible (alguna forma de hidrógeno) y de oxidante (alguna forma de oxígeno).
- Sistema de suministro de electrólito.
- Banco de celdas de combustible.
- Sistema de control y monitoreo del equipo.

La instalación de un sistema de suministro de energía eléctrica para propulsión de un submarino, en base a celdas de combustible, impone la modificación del diseño del mismo, ya que se debe intentar por todos los medios el almacenamiento de estos reactivos fuera del casco de presión. En todo caso el manejo de hidrógeno y oxígeno requiere de severas medidas de seguridad para los estanques, cañerías y equipo auxiliar.

Las formas de almacenamiento de estos reactivos son de vital importancia, ya que modifican las características constructivas de la unidad. En el caso del oxígeno, se ha encontrado que la forma más adecuada de almacenamiento es en forma líquida, a temperaturas criogénicas y alta presión. Una de las formas más adecuadas que se ha desarrollado para el almacenamiento de hidrógeno es como hidruros polimetálicos, consistentes en estructuras metálicas, que son capaces de alojar en los espacios de las redes cristalinas, átomos de hidrógeno (en cierto sentido estos hidruros se empapan en hidrógeno). Los hidruros que han sido probados en forma relativamente satisfactoria poseen un peso elevado, pero presentan grandes ventajas de seguridad. Las principales capacidades y limitaciones de las celdas combustibles se indican en la tabla N° 4

Figura N° 6
ESQUEMA DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE H_2O_2

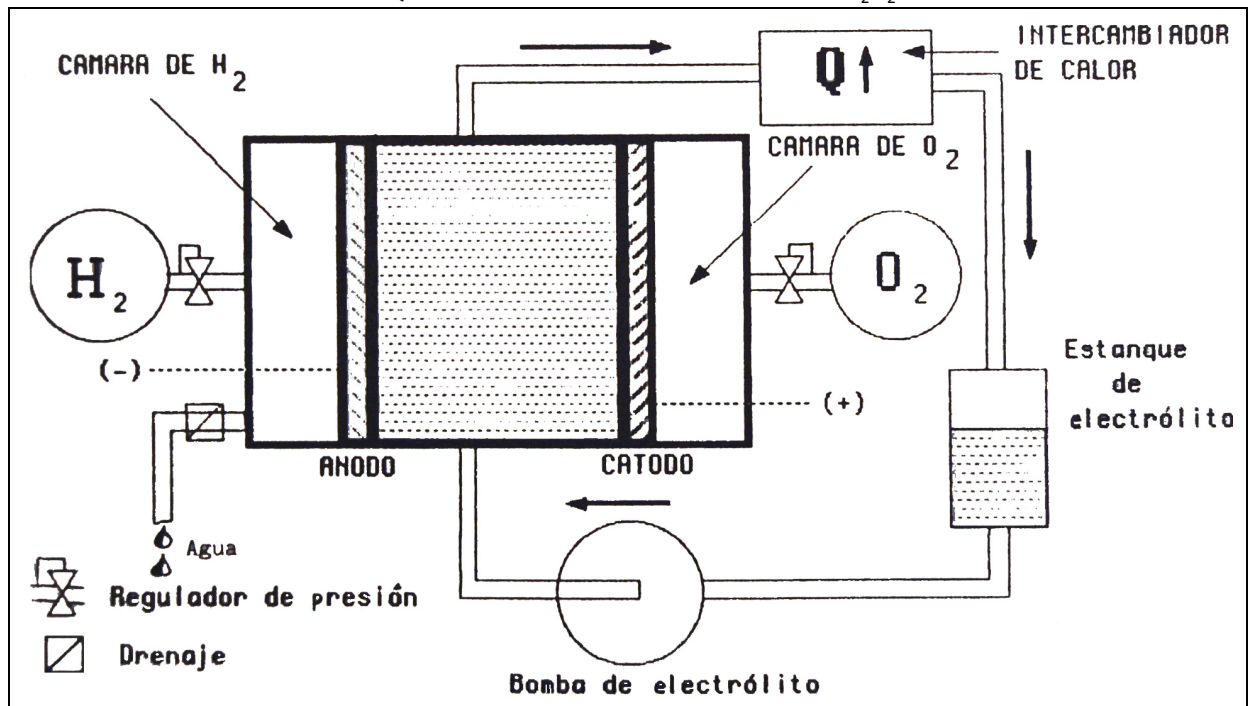


Tabla N° 4
CELDA DE COMBUSTIBLE

Capacidades	Limitaciones
Operación continua mientras se suministran reactivos H-O	Problemas de almacenamiento de los reactivos H-O.
Independiente del tamaño, son altamente eficientes (60%), ya que no están limitadas por la eficiencia del ciclo de Carnot.	Vida útil incierta (en especial los electrodos).
Modulares.	Peligros asociados al trabajo con hidrógeno y oxígeno (explosiones).
Silenciosas	Grado de desarrollo limitado (escala 1:1 a nivel experimental).
Estela térmica reducida	
Confiables.	
Limpias.	Alto costo de los electrodos (catalizadores de metales nobles)
Altas densidades de energía por unidad de volumen.	Electrolito altamente corrosivo.

De esta tabla se desprende que no basta con desarrollar celdas de combustible adecuadas para su uso en submarinos; también es necesario realizar una gran cantidad de investigación y desarrollo en los sistemas auxiliares. La tabla N° 5 caracteriza unidades de celdas de combustible que han sido probadas en forma satisfactoria como fuente de energía para unidades autónomas.

Además de lo anterior, se debe tener en cuenta que estas celdas de combustible son eficientes a bajas potencias, limitando la velocidad máxima de la unidad; por este motivo es necesario combinar estas ventajas para bajas velocidades, con sistemas más eficientes en altas velocidades, como son las baterías secundarias recargadas por motores diesel, permitiendo una gran flexibilidad de operación de la planta propulsora, llegándose así a un sistema híbrido de propulsión compuesto de motores diesel, baterías y celdas de combustible.

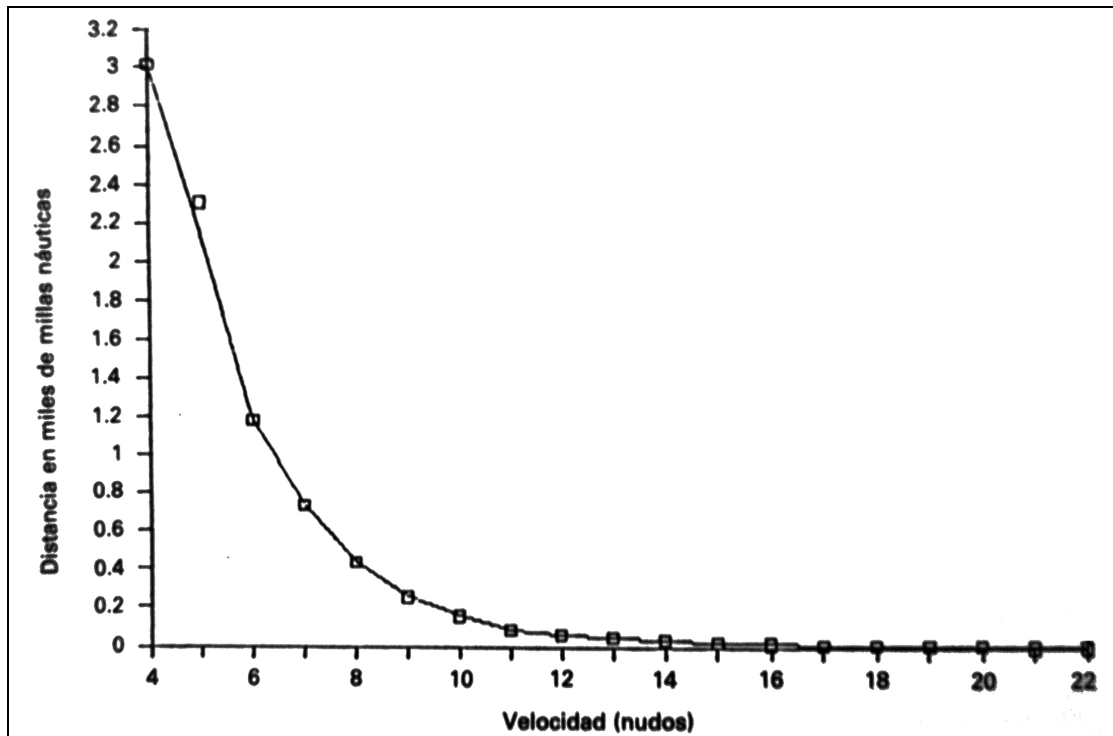
Tabla N° 5
CELIDAS DE COMBUSTIBLE COMERCIALES

Firma	United Technologies	Union Carbide	Siemens	Siemens
Potencia Continua	67.5 Kw	25Kw	3,5 Kw	5,6 Kw
Potencia Intermitente	104 Kw	45 Kw	3.7 Kw	7 kw
Potencial (voltios)	95-140	16.9-169 Serie-Paralelo	26,7	53,8
Peso Total	268 Kg	204 Kg celda	49 Kg	85 Kg
Presión	12,3 atm	<2 atm	2 atm	2 atm
Temperatura	110° C	90° C	80° C	80° C
Electrólito	KOH	KOH 14N	KOH 6N	KOH 6N
Catalizador	Pt/Pa	Pt	Ag-Hg/Ti	Ag-Hg/Ti
Eficiencia %	63 (8 Kw) 56 (30 Kw)	58 (25Kw)	58 (1,07 Kw) 45 (3,7Kw)	53 (1,4Kw) 54 (7Kw)
Consumo Reactivos	0,37 (Kg/Kw) (30 Kw)	0,34 Kg/Kwh (25 Kw)	0,33 Kg/Kwh (3,5 Kw)	0.31 Kg/Kwh (7Kw)
Pot/Peso	252 W/Kg	122 W/Kg	71 W/Kg	82 W/Kg
Pot/Volumen	301 W/l	12,5 W/l	63,9 W/l	64,2 W/l
Estado de Desarrollo	En uso, sumergido alta profundidad	Experim. 4 Kw, probada	Fabricada	Fabricada

A nivel internacional se ha mencionado a Suecia y Alemania Federal como los únicos países que podrían estar interesados en contar con unidades equipadas con celdas de combustible, existiendo antecedentes de que el país más avanzado en esta área sería Alemania Federal (ver Bibliografía), el cual en el mediano plazo podría contar con una unidad experimental de propulsión híbrida.

La figura N° 7 ilustra la distancia franqueable sumergido que sería posible obtener mediante un sistema de propulsión híbrido instalado en un submarino convencional de referencia. Para velocidades mayores de 11 nudos, la distancia franqueable sumergido es menor que mediante baterías convencionales, por lo cual es poco práctico su uso en este rango.

Figura N° 7
DISTANCIA FRANQUEABLE SUMERGIDO A DISTINTAS VELOCIDADES
CON LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE DEL SISTEMA HIBRIDO



- Aspectos estratégicos

Desde un punto de vista operativo, para un submarino operando en una zona de patrulla en la que se deberá disminuir al máximo la tasa de indiscreción, un sistema de propulsión híbrido como el ya indicado estaría en condiciones de cumplir su misión en forma más adecuada que una planta clásica.

La aproximación a la zona de patrulla puede ser llevada a cabo mediante la planta clásica de propulsión del submarino, dejando la carga de reactivos H-O para ser usada cuando requiera permanecer largos períodos sumergido. El tiempo que el submarino puede permanecer sumergido navegando a baja velocidad, mediante la energía eléctrica suministrada por las celdas de combustible, está limitado solamente por la capacidad de renovación del aire para la tripulación y por la disponibilidad de reactivos H-O almacenados. De este modo una unidad podrá permanecer sumergida en un área de patrulla por períodos muy prolongados, con una tasa de indiscreción cero y sin emisiones de gases ni estela térmica considerable; lo que favorece la sorpresa al efectuar acciones antes de ser detectado por el enemigo.

Al disminuir la probabilidad de detección aumenta la seguridad propia, ya que se dificulta al enemigo la obtención de la posición de la unidad, y permite una más fácil infiltración en aguas controladas por el adversario, facilitando la recolección de Inteligencia.

Por sus requerimientos adicionales de reactivos H-O, y la dificultad que significa su suministro seguro hacia la zona de operaciones, se reduce la movilidad estratégica de las unidades equipadas con el sistema híbrido de propulsión

Finalmente, las mejoras que introducirían las celdas de combustible otorgarían al submarino una operación más discreta, pero no permiten sostener altas velocidades sumergido, por lo que la unidad continuaría siendo esencialmente un arma de posición.

- **Aspectos tácticos**

Durante un enfrentamiento táctico, debido a la reducida velocidad que es posible obtener con la unidad sumergida, operando solamente con celdas de combustible, se hace necesario el uso de baterías, las cuales, durante el tiempo que el submarino ha permanecido a la espera en el área de patrulla, se mantienen continuamente con su carga máxima y en condiciones de entrar en combate. Posteriormente, al alejarse de la zona del ataque a máxima velocidad sumergido, propulsado por las baterías, el submarino puede continuar la navegación bajo la superficie usando celdas de combustible para propulsión a baja velocidad, manteniendo en forma simultánea una recarga lenta de las baterías, lo que reduce su vulnerabilidad después de un ataque.

Por tanto la movilidad táctica de una unidad equipada con este tipo de sistema de propulsión, aumenta, ya que está en condiciones de navegar sumergida por períodos más prolongados, manteniendo permanentemente las baterías a plena carga, disponiendo así del máximo de energía almacenada para el momento del ataque y alejamiento posterior.

La principal ventaja de estas unidades es su elevado tiempo de permanencia y distancia franqueable sumergido, justificando así la incorporación de celdas de combustible a las unidades convencionales.

Una vez agotados los reactivos de la celda de combustible, el submarino puede continuar prestando servicios con la planta clásica, pero disminuyendo sus capacidades operativas.

- **Aspectos logísticos**

La incorporación de submarinos con un sistema de propulsión híbrido traerá como consecuencia requerimientos adicionales de entrenamiento y capacitación de personal, ya que las celdas de combustible, sus sistemas de control, de operación y los requerimientos especiales de seguridad que se deben tener con el manejo de hidrógeno y oxígeno, dan lugar a nuevos requerimientos dentro de la armada que decida incorporarlas.

El país que introduzca estas celdas en sus submarinos deberá tener en consideración su capacidad de suministro de repuestos para una correcta operación, mantención y reparación. Esto podría significar una mayor limitación y que en algunos casos se requeriría la adquisición de equipos especiales en otros países, con la consiguiente dependencia política que ello implicaría.

Además de lo anterior, sería necesario agregar a la infraestructura nacional la capacidad de producir en forma industrial los reactivos H-O, como también su transporte desde las plantas de producción a los lugares de almacenamiento y suministro en las zonas de operaciones, en las cantidades y en las condiciones adecuadas para su empleo en forma óptima

3. Sistema en base a baterías primarias de litio

Las baterías primarias son aquellos dispositivos electroquímicos que no pueden ser reutilizados por simple recarga de energía, sino que deben restituirse sus propiedades

fisicoquímicas. Existe una diversidad de estas hoy en día; sin embargo, son particularmente interesantes las que utilizan electrodos que contengan litio, por su alta energía específica.

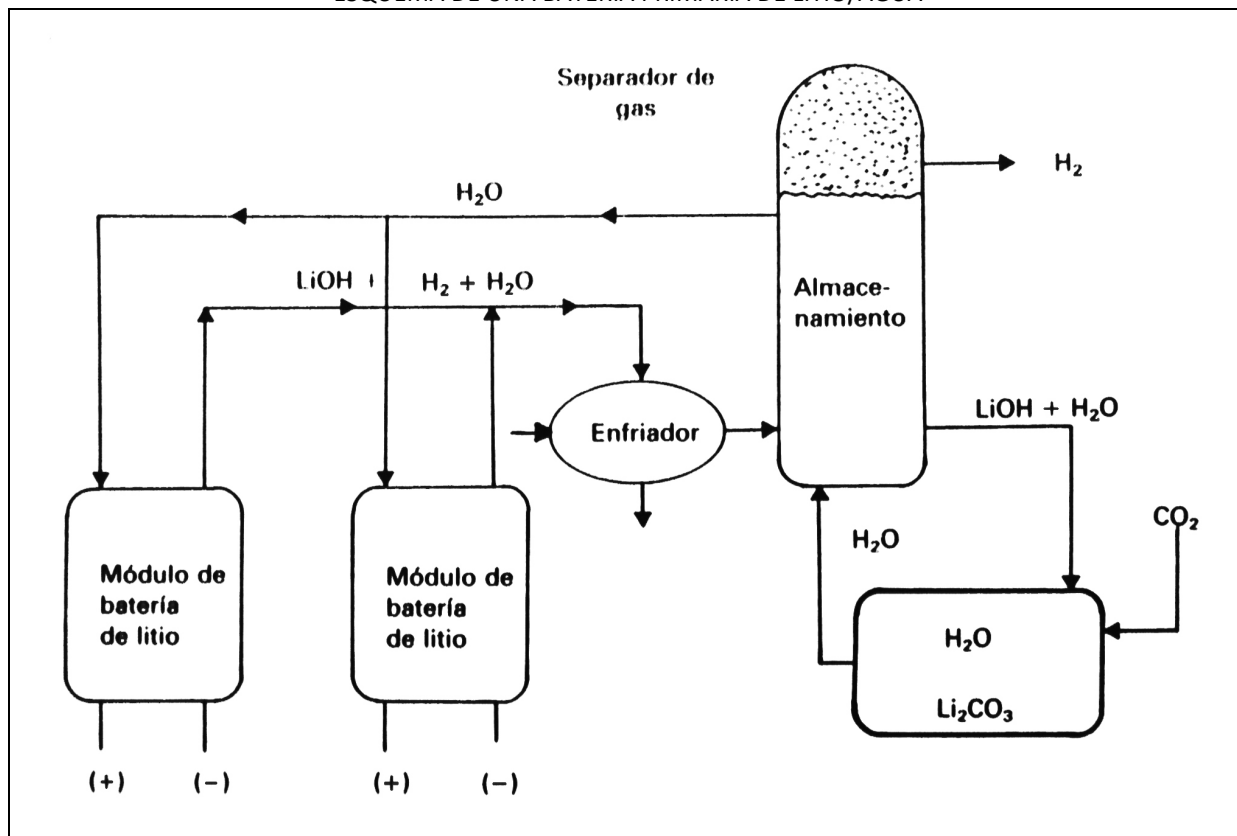
De las indicadas destacan las de $\text{Li}/\text{H}_2\text{O}$, $\text{Li}/\text{H}_2\text{O}_2$ y la Li/SOCl_2 , que además tienen la posibilidad de ser dimensionadas para altas capacidades, con una buena seguridad de operación y con una tecnología relativamente accesible. Sin embargo, algunas pruebas con baterías de Li/SOCl_2 , durante el almacenamiento mostraron inestabilidades incompatibles con la seguridad que de ellas se requiere, ya que presentaban un alto riesgo de explosión. Por otro lado, las baterías de $\text{Li}/\text{H}_2\text{O}_2$ aún se encuentran a nivel de diseño conceptual y presentan un riesgo inherente, debido al manejo del peróxido en el submarino.

De lo mencionado se desprende que el sistema de más interés sería la batería de litio/agua, que será analizada con mayor detenimiento.

La batería de litio/agua se basa en la reactividad del litio ante el contacto con el agua, que constituye el oxidante. Esta reacción genera: hidróxido de litio (LiOH), hidrógeno gaseoso, energía eléctrica y calor. Fueron diseñadas algunas unidades experimentales con las que se han obtenido ciertos parámetros eléctricos de interés, tales como densidades de energía para la celda del orden de 2,03 Kwh/Kg, y densidades de potencia de 84 W/Kg.

Un esquema tentativo de este sistema se muestra en la figura N° 8, donde se pueden observar los componentes principales de este tipo de instalación, incluido el control químico del electrolito.

Figura N° 8
ESQUEMA DE UNA BATERIA PRIMARIA DE LITIO/AGUA



• Aspectos técnicos

a) Capacidades

— Como trabajan con electrodos de litio, la capacidad energética de la batería dependerá de la cantidad de litio que se pueda incorporar a ella y su potencia dependerá de la superficie de los electrodos. Dado que el electrodo de litio es el único elemento consumible de la celda, se suele hablar de baterías de litio reusables, ya que por un recambio mecánico de electrodos en puerto la celda se podría aprovechar íntegramente.

— Una característica importante es que mantiene su respuesta de voltaje en descargas profundas; inclusive, su eficiencia es mayor para razones de descarga máximas, debido a la ausencia de reacciones parásitas perjudiciales.

— La gran densidad de energía que es posible obtener permitiría una navegación sumergida prolongada libre de ruidos y con tasas de indiscreción prácticamente nulas.

— Se requiere CO_2 para precipitar el hidróxido como carbonato de litio, lo que representa una ventaja para los submarinos, que necesitan mantener bajos los niveles de CO_2 en su atmósfera.

— La reacción genera calor, que puede ser utilizado para mejorar el bienestar dentro del submarino (calefacción).

— Debido al almacenamiento del litio como carbonato, se facilita el reciclado industrial de este metal, que es relativamente caro.

— La reacción genera hidrógeno, que puede ser desechado, almacenado o eventualmente utilizado en combinación con una celda de combustible para una generación eléctrica alternativa.

— La celda no se activa hasta que no se le introduzca el electrólito.

— Como la batería puede funcionar usando agua salada como electrólito, se facilitaría su manejo y daría una concepción más simple a la instalación.

b) Limitaciones

— Una vez que se ha consumido todo el litio en las celdas no existe la posibilidad de generar más energía.

— Su baja eficiencia para descargas parciales obliga a la utilización de controles adecuados que descarguen grupos de celdas a su razón máxima, en función de la potencia requerida.

— Mientras no se active la celda, el Interior debe ser mantenido en una atmósfera inerte, a fin de evitar la corrosión del litio.

— Aún requiere de un desarrollo tecnológico para aumentar la capacidad y eficiencia de los actuales diseños.

— Se debe resolver el problema de la generación de hidrógeno, ya que si se evacuara directamente al mar emitiría burbujas que delatarían la presencia del submarino.

— El litio metálico, en contacto con el agua reacciona violentamente y sólo puede ser manejado en una atmósfera controlada.

Antes de evaluar la capacidad operativa de un submarino equipado con baterías primarias, debe definirse si se usará como medio único de propulsión o como medio

alternativo; sin embargo, por estimarse que la primera opción es la que más altera las capacidades operativas de un submarino convencional, se discutirá con un poco más de detalle.

El utilizar baterías primarias como medio único de propulsión obliga al cambio de los electrodos de litio para restituir sus capacidades eléctricas. Esta operación sería relativamente compleja y lenta, estimándose que la alternativa de propulsión única con baterías primarias de litio sólo es factible en pequeños submarinos, con tonelajes que fluctúan entre las 100 y 500 toneladas, y es en este contexto que se hará el análisis siguiente.

• Aspectos estratégicos

a) Capacidades

Dentro de las limitaciones de su radio de acción se pueden concebir algunos aspectos de interés:

- Su bajísima tasa de indiscreción y ausencia de ruido contribuye a la sorpresa.
- Este diseño permitiría operar en altas velocidades por períodos prolongados, por lo que podría usarse como un arma de posición, o bien en funciones de búsqueda-interceptación y ataque del adversario.
- El contar con varias unidades pequeñas de bajo costo relativo, operadas con poco personal, facilitaría una mejor distribución y dosificación de las fuerzas, asimismo otorgaría mayor flexibilidad para las operaciones de exploración y patrulla.

b) Limitaciones

- Es un arma que depende fuertemente de una buena posición, que le permita un adecuado apoyo logístico para sus operaciones.
- Por la imposibilidad de recarga de su sistema de baterías, es una unidad que tiene baja persistencia.

• Aspectos tácticos

a) Capacidades

- Se adapta especialmente a los requerimientos de pequeños submarinos que pueden operar en aguas someras o interiores y con dotaciones poco numerosas, o vehículos submarinos desechables transportados por otros medios, para efectuar operaciones con fuerzas especiales sobre la costa enemiga.
- Con el objeto de evaluar la capacidad operativa de estas baterías, se puede afirmar que si un submarino de referencia ocupa volumen actual destinado a las baterías de plomo-ácido con baterías primarias de litio, podría operar alrededor de 24 horas a plena potencia. Si este mismo volumen de baterías se instala en un submarino pequeño, con menores requerimientos de potencia, podría operar varias semanas.
- La tasa de indiscreción dependerá sólo de los requerimientos de aire exterior y de las comunicaciones.
- Por operar sólo con baterías y motores eléctricos, su nivel de ruido sería muy reducido.

— Con buenos diseños en los intercambiadores de calor, la estela térmica podría reducirse a niveles de difícil detección.

— Por su bajo nivel de ruido y alta movilidad, se prestan para operaciones contra submarinos, y en particular contra submarinos nucleares, que son más ruidosos.

— Los submarinos pequeños tienen un radio menor en su casco de presión, lo que facilita el diseño en cuanto a mejorar la profundidad y velocidad máxima de operación (del orden de los 25 nudos); inclusive, el eco ante una detección por sonar activo se vería disminuido.

— El contar con un submarino de bajo tonelaje y de alta velocidad sostenida permitiría disponer de un arma extremadamente eficiente en el campo táctico ya que su alta movilidad y gran poder ofensivo lo transformaría en un "caza" sumergido, pudiendo ser dirigido hacia su blanco de una forma similar a la de los aviones.

— Su alta velocidad sumergido podría entorpecer en gran medida el panorama A/S de una fuerza en movimiento.

— Dependiendo del volumen de baterías primarias con que esté equipado el submarino, el radio de acción puede ser de 500 a 1,000 millas, o superior.

b) Limitaciones

— Por ser el único medio propulsivo, debe operar dentro del radio de acción fijado por la capacidad de sus baterías, ya que el reemplazo de los módulos para los diseños proyectados debe realizarse con apoyo terrestre.

• Aspectos logísticos

Al efectuar un análisis de cómo se podrían ver afectados los diferentes elementos funcionales, por contar con pequeños submarinos con baterías primarias, se puede concluir lo siguiente.

— El mantenimiento a bordo del sistema propulsivo se reduciría a niveles mínimos, pero se requeriría de un gran apoyo terrestre para efectuar la mantención o los reemplazos de los módulos de baterías.

— El elemento funcional personal se facilitaría, ya que cada unidad tendría una dotación reducida, pero que requeriría de un entrenamiento más avanzado.

— El transporte se dificulta, ya que aunque se trata de módulos sólidos, compactos y de bajo peso relativo, por el gran volumen que habría que transportar a la base de operaciones y por la mantención de las mismas antes de iniciar las hostilidades, se requeriría de un esfuerzo logístico importante.

— El elemento funcional instalaciones es el que tendría mayor relevancia, ya que se necesita de un apoyo e infraestructura extremadamente dinámicos, tecnificados y novedosos, con el objeto de disminuir al máximo los tiempos muertos por el reemplazo de módulos.

La única ventaja en la concepción de un submarino con baterías primarias como medio alternativo es poder contar con un sistema suministrador masivo de energía cuando se requiera, ya sea en el ataque o en maniobras evasivas.

Basicamente, el diseño consiste en un submarino clásico de referencia, donde se ha efectuado el cambio de algunas baterías de plomo ácido por unos módulos de baterías primarias.

Para este caso, las únicas ventajas esperadas serían en el campo táctico, ya que se tendría una gran disponibilidad de energía de reserva.

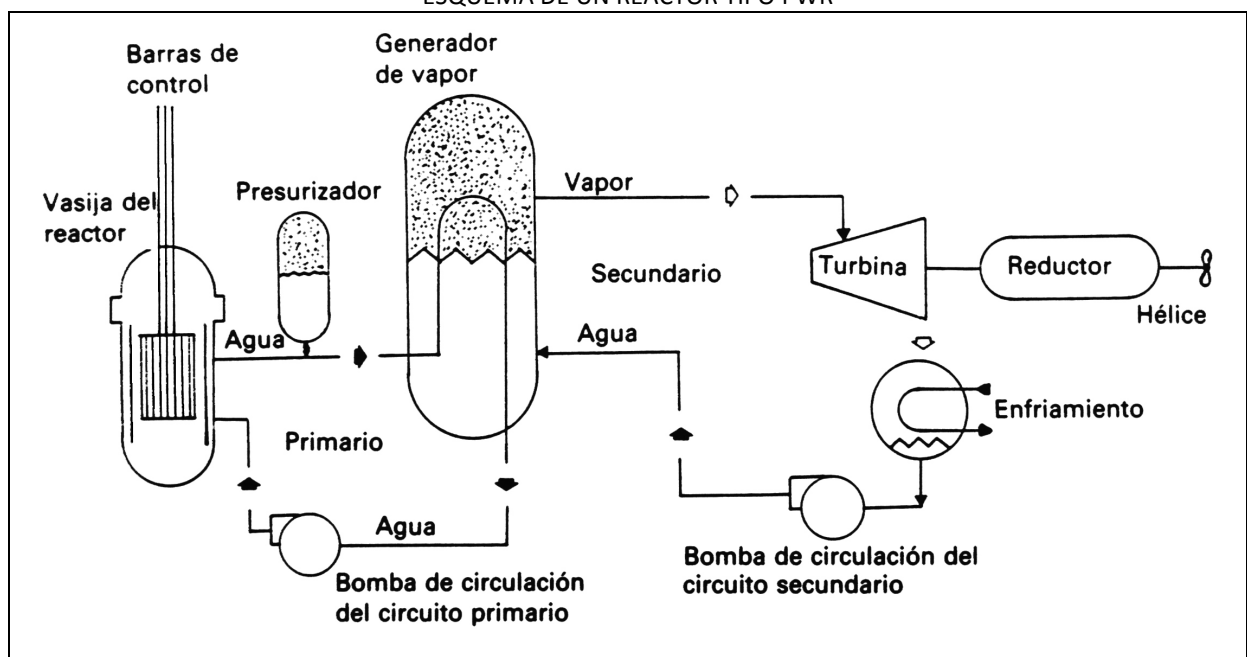
PROPULSION SUBMARINA NO CONVENCIONAL

Reactores nucleares de propulsión

Un sistema de propulsión nuclear funciona básicamente con el ciclo Rankine de vapor tradicional, en que la fuente de calor por reacción química del combustible se ha cambiado por una reacción nuclear del combustible. En ambos casos el calor generado se extrae mediante un refrigerante que, en forma directa o indirecta, produce el vapor que impulsa el conjunto turbo-propulsor.

Existe una gran variedad de reactores; sin embargo, se enfocará la atención en aquel reactor que ha tenido un uso más extensivo en la propulsión naval, el PWR o reactor de agua presurizada, que se ilustra en la figura N° 9.

Figura N° 9
ESQUEMA DE UN REACTOR TIPO PWR



Básicamente, el sistema contiene dos circuitos. El primario o de agua presurizada y el secundario, que es esencialmente el ciclo tradicional de una planta térmica de vapor.

Los componentes del circuito primario que se muestran son los usuales en todo reactor nuclear del tipo indicado: el reactor en cuyo núcleo se produce la reacción nuclear que genera el calor; el refrigerante, que se mantiene a alta presión para evitar un cambio de fase del agua en estado líquido; el presurizador, que absorbe las variaciones de volumen del refrigerante por cambios en su temperatura; el generador de vapor, que es el intercambiador de calor donde se transfiere la energía térmica del refrigerante primario al circuito secundario, y finalmente la bomba del circuito primario, cuya función principal es mantener el fluido primario en circulación.

El circuito secundario está formado por los siguientes componentes:

- Generador de vapor, que debido a la diferencia de presiones que existe entre el circuito primario y el secundario permite la vaporización del fluido en este último cuando se le transfiere energía.
- Turbina, que puede ser una o varias y cuya única función es transformar la energía térmica en energía mecánica para ser utilizada en el propulsor, mediante una caja de reducción.
- Condensador, que evacua al medio ambiente el calor residual del fluido de trabajo y a la vez mantiene el vacío en la descarga de la turbina.
- Bomba de alimentación del generador de vapor.

• Aspectos técnicos

a) Capacidades

- En el reactor nuclear se produce una reacción nuclear de fisión que es extremadamente energética; además, la energía acumulada por unidad de masa es también muy alta, lo que permite operar la planta por varios años sin tener que renovar el combustible nuclear; esto es una ventaja obvia para un submarino que necesita operar por largo tiempo sin reabastecimiento.
- Por la gran energía almacenada en el combustible nuclear no existen inconvenientes para producir el agua y el oxígeno necesarios para la supervivencia de la dotación. El agua se puede generar mediante evaporadores u otro sistema y el oxígeno por electrólisis del agua. Esto da bienestar e independiza al submarino del aire exterior.
- La alta densidad de energía del combustible nuclear permite navegar períodos prolongados a velocidades elevadas, estendo limitado solamente por sus condiciones de diseño.

b) Limitaciones

- Debido a que se mueven caudales de agua refrigerante relativamente importantes dentro del submarino; y por la presencia de engranajes de reducción en el eje propulsor, la planta nuclear es bastante ruidosa.
- Como subproducto de la reacción nuclear de fisión se generan radiaciones muy penetrantes, contra las cuales se debe proteger adecuadamente tanto al personal como al entorno del submarino; esto agrega peso adicional y dificultades de diseño estructural.
- Las plantas térmicas nucleares tienen una eficiencia termodinámica que fluctúa entre el 30 y el 40%; esto significa que el 60 ó 70% de la energía que se genera en el reactor es eliminada del submarino, lo que se traduce en una estela térmica muy importante.
- El diseño, construcción, operación y mantención de un reactor nuclear involucran tecnologías extremadamente complejas y caras, por lo que la infraestructura terrestre y humana de apoyo es de un tamaño muy superior a la de un submarino convencional.
- Por problemas conceptuales de diseño, las plantas nucleares no generan vapor sobrecalentado de alto grado, lo que obliga a usar turbinas o sistemas poco eficientes termodinámicamente.
- Por lo complejo, voluminoso y caro de la planta nuclear, sólo se justifica su utilización en submarinos de tonelaje superior a 2.500 toneladas de desplazamiento.

- **Aspectos estratégicos**

El submarino nuclear (SSN) es el arma estratégica por excelencia; experiencias recientes así lo confirman. Su sola presencia puede tener un efecto disuasivo gravitante en las operaciones de un adversario que se sienta amenazado. La movilidad estratégica de un SSN es bien conocida, y que su persistencia en el área de operaciones, comparada con aquella de los convencionales, es muy superior. Sus capacidades contribuyen al logro de la sorpresa estratégica y a la obtención de Inteligencia desde las líneas de comunicaciones marítimas adversarias, negándole con esto la sorpresa estratégica al enemigo. La introducción de la energía nuclear como medio propulsivo ha liberado al submarino de la amarra que significa ser un arma de posición, para convertirse en un arma que busca, persigue y ataca sus blancos.

- **Aspectos tácticos**

La alta densidad de energía contenida en el combustible nuclear y la gran densidad de potencia que le otorga el reactor, tienen una influencia gravitante en los parámetros tácticos usuales; así, se puede afirmar que son capaces de desarrollar velocidades superiores a 30 nudos por largos períodos; su radio de acción es prácticamente ilimitado estando más bien restringido por la resistencia del personal que por problemas técnicos. Por otro lado, las posibilidades que ofrece justifican mayores inversiones en los materiales o componentes del casco de presión, que le otorguen capacidades para operar a mayor profundidad, favoreciendo las maniobras evasivas ante un ataque antisubmarino.

- **Aspectos logísticos**

Quizás el aspecto más importante para la operación de un SSN es el aspecto logístico, ya que supone una capacidad tecnológica avanzada que permite la elaboración de la mayoría de los repuestos y del combustible nuclear, de modo de lograr la independencia ante agentes externos que podrían condicionar su abastecimiento y poner en peligro la disponibilidad de un arma tan importante como un SSN, cuando se requiera

Dado el punto de vista de los elementos funcionales de la logística naval operativa, la introducción de la tecnología nuclear significa ajustes bastante importantes y onerosos en los elementos de abastecimiento personal, instalaciones y sanidad, los cuales deben prepararse con mucha antelación para conseguir un efectivo soporte a esta poderosa arma

RESUMEN:

Se han expuesto hasta el momento las siguientes opciones

— Sistemas convencionales

Clásicos

- Diesel-eléctrico con batería de plomo-ácido.
- Diesel-eléctrico con baterías secundarias de litio.

Anaeróbicos

- Motor Stirling.
- Celdas de combustible.
- Baterías primarias de litio

— Sistemas no convencionales

Nucleares.

Todas estas alternativas, en términos generales ofrecen un mejoramiento de las capacidades técnicas estratégicas y tácticas, mediante distintos grados de aumento en la distancia franqueable sumergido, tal como se aprecia en la tabla N°6

Tabla N° 6
RESUMEN DE CARACTERISTICAS RELEVANTES EN LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS PROPULSIVAS

CARACTERISTICAS	SISTEMA CONVENCIONAL				SISTEMA NO CONVENCIONAL
	Batería secund. de litio	Motor Stirling	Celda de Combustible	Batería primaria de litio	Nuclear
Dist. franqueable sumergido	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta	Aumenta mucho
Veloc. sumergido	Igual	Igual	Igual	Puede aumentar	Aumenta
Tasa de indiscreción	Disminuye	Nula	Nula	Nula	Nula
Dist. franqueable total	Igual	Igual	Igual	Disminuye	Aumenta mucho
Estado del arte	En desarrollo	Prototipo	Prototipo	En desarrollo	Tecnología probada
Profund. máxima	Igual	Igual	Igual	Igual	Aumenta
Estela térmica	Regular	Regular	Nula	Regular	Grande
Ruido	Sin ruido	Ruidoso	Sin ruido	Sin ruido	Muy ruidoso
Costo	Elevado	Elevado	Elevado	Elevado	Muy elevado
Rol fundamental	Arma de posición	Arma de posición	Arma de posición	Arma de posición y de ataque	Arma de ataque

Desde un punto de vista logístico, las tecnologías mencionadas plantean una variedad de requerimientos y crean diversos grados de dificultad. Desde los sistemas más limitados (celdas de combustible y baterías primarias), pasando por restricciones intermedias como el caso del motor Stirling; hasta los sistemas con problemas logísticos tradicionales donde se incluyen las baterías secundarias de litio. En una situación muy superior se aprecia al SSN, que prácticamente no presenta limitaciones logísticas en el aspecto propulsivo, durante su operación

Respecto del estado del arte, las tecnologías clásicas (baterías de plomo-ácido) y nucleares están probadas. El resto de las opciones presentan distintos niveles de avance; por ejemplo, la tecnología de las celdas de combustible y del motor Stirling se encuentran en la fase de prototipo terrestre, funcionando, y actualmente se piensa instalarlas en un submarino para pruebas en la mar. En una situación más distante, las baterías secundarias de litio han sido probadas en vehículos terrestres y se encuentran en una etapa de investigación y desarrollo, para su aplicación en instalaciones de potencias mayores

Realmente, refiriéndose a las baterías primarias, algunos prototipos experimentales han sido construidos para sumergibles de investigación de altas profundidades, pero se han apreciado ciertas limitaciones técnicas que deberán ser corregidas en el futuro.

De lo expuesto se estima que la evolución más probable, en el mediano plazo, se orientará hacia el submarino híbrido, que podría contar con una planta convencional mejorada, complementada con alguna fuente no convencional de poder independiente del

aire, la que dependerá de los resultados que se obtengan en sus pruebas operacionales. Por otra parte, la introducción de la tecnología del litio se aprecia fuertemente condicionada por los avances que se obtengan en las actuales etapas de investigación y desarrollo.

Por sus características netamente superiores, el SSN se proyecta como una opción a la cual muchos países pretenderán acceder, estando limitados por condiciones políticas más que tecnológicas o económicas. En cuanto a mejoras futuras, éstas se orientan a superar los problemas de detección que los SSN presentan.

Es importante señalar que en parte de la bibliografía consultada se menciona ciertas ventajas de tipo costo-efectividad de los submarinos convencionales anaeróbicos (sistema híbrido), respecto de los nucleares, para tareas específicas (operaciones sobre la costa enemiga y en operaciones especiales), en virtud de lo cual aquellos países que han optado por la alternativa nuclear no deberían descuidar estas otras líneas tecnológicas de futuro promisorio.

BIBLIOGRAFIA .

- "Submarine propulsion: Conventional and outside-air independent". *Naval Forces* N° IV. 1932.
- "Beyond the Contemporary Conventional Submarine", *Maritime Defence*, Julio, 1934.
- "Advanced Concepts in Chemical Propulsion Systems for a 500 ton Submersible", *Naval Engineer-ing Journal*, febrero, 1931.
- Luis Kipreos A., Teniente 2° Tesis de Grado para optar al Título de ingeniero Naval Electricista, Academia Politécnica Naval, 1934.
- "A Fuel Cell Power Plant for a Deep Diving Submarine", *Journal of Engineering for Industry*, mayo, 1963.
- "A Small Fuel-Cell Powered Submarine", *Maritime Defence*, diciembre. 1979,
- "La Propulsión de Submarinos Convencionales", *Tecnología Militar* N° 3/1986,
- "Potential of Fuel-Cell Power Plants for Undersea Vehicle Propulsion", The 18th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Orlando, Florida, agosto, 1983.
- "Development of a 7 Kw H₂O₂, Fuel-Cell Assembly with Circulating Electrolyte in a Compact Modular Design", *Journal Electrochemical Society*, octubre, 1930.
- "Fuel-Cell Power Plants in a Compact Design", *Siemens*, junio, 1933.
- "Desarrollo en el Diseño de Submarinos Convencionales", *Tecnología Militar*, octubre, 1983.
- RINA 1933. Tema de discusión: "La Construcción de Submarinos", *Revista Internacional de Defensa*, agosto, 1983.
- "Propulsion", *Navy International*, diciembre, 1984.
- "Modern Diesel-Electric Submarine Technology, Part 2: Propulsion and Tactical Systems"; *Maritime Defence*, abril, 1977. *Janes Fighting Ships*. 1935.
- "Diesel-Electric Submarine and their Equipment: Propulsion", *International Defence Review*, Supplement.V-1986.
- "Propulsion Power Systems", *Naval Forces*, Supplement III-1983.
- H. SHIMOTAKE, A.A. CHILENSKAS, R.F. MALECHA y N.P. YAO: "Thermal Management of a Lithium/ Iron-Sulfide Battery", Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois,
- A.A. CHILENSKAS; H. SHIMOTAKE Y N.P. YAO: "Li-Al/Fes Van Battery Configuration Study", *Summary Report*, octubre 1982-septiembre 1983, noviembre 15, 1983, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois.
- Patente Alemana DE-29.49.011-A1 de Varta Batterie Aktiengesellschaft
- E.L. LITTAUER y J.J. REDLIEN: "The Lithium/Water Electrochemical Cell as a Marine Power Source", Intercos Energy Conversion Eng. Conf. Proc, 9th, 1974.
- Ingenieurkontor Lübeck. Prof. Gabler Nachf. "Lithium. Its Occurrence and Application"
- H.B. URSACH, M.C. CERVI y D.E. ICENHOWER: "Electrochemical Lithium Power Systems for Hydrospace". NSRDC, Dept. of the Navy, 1974.
- "The Nuclear Submarine-AD2000 and beyond". *Maritime Defence*, volumen N° 6, febrero, 1981.
- "Nuevos Tipos de Submarinos", *Tecnología Militar*, N° 1/1981.