

RESURGIMIENTO DE LA PROPULSION NAVAL ELECTRICA*

Eugenio Varela Münchmeyer
Capitán de Corbeta

INTRODUCCION

En varios países industrializados del mundo y como producto de las nuevas tecnologías, equipos y materiales se están llevando a cabo proyectos y estudios con respecto a la propulsión naval eléctrica. Este tema es bastante antiguo en la ingeniería naval y como ejemplo se puede recordar la edición de 1928 del *Manual de Ingeniería Naval*, en el cual la compañía General Electric anuncia el primer buque con propulsión eléctrica para la armada inglesa, el HMS *Adventure*. Este buque contaba con dos motores de 2.100 HP y tenía las siguientes ventajas, descritas en el aviso: "Simplicidad de operación de la planta, no requiriéndose prácticamente ningún conocimiento técnico para operarla. Las órdenes del puente son ejecutadas en períodos muy cortos, asegurando una gran maniobrabilidad del buque, siendo lo más relevante que toma alrededor de un minuto establecer todo poder adelante o atrás".

Al igual que en 1928, en el mundo naval actual se tiene puesta la atención en el proyecto de la nueva fragata antisubmarina (AS) inglesa clase *Duke* (tipo 23), cuya propulsión para bajas velocidades es eléctrica, como asimismo el proyecto canadiense de una fragata AS de 4.354 toneladas, propulsada íntegramente con un sistema eléctrico.

El *Adventure* no cumplió con las economías de combustible esperadas, por lo que le

fue cambiada su planta propulsora. Esto permite recordar que en general las plantas de propulsión eléctrica son más voluminosas, pesadas y caras que un sistema de propulsión mecánica que efectúe la misma labor. Por eso, para seleccionar el uso de la electricidad como sistemas de propulsión debe pesar mucho alguno de los siguientes requerimientos, los que son ventajas propias de los sistemas de propulsión eléctrica:

—*Flexibilidad*: Del uso de la planta y de la instalación de la maquinaria en el buque. Fácil y diversas posibilidades de interconexión de los motores. Simplicidad y rapidez para invertir la marcha hasta pleno poder.

Este concepto ha pesado grandemente en la selección de plantas de propulsión eléctricas para diferentes buques, por la posibilidad de separar la línea de ejes de la fuente de energía. Tal es el caso del Ro-Ro *Seaway Princess*, que cuenta con una turbina de gas de 10 mw que arrastra un generador de corriente alterna que alimenta dos motores de corriente continua de 4 mw y 200 rpm cada uno. El uso de propulsión eléctrica permitió instalar la turbina muy alto en la superestructura, dejando libre el mejor espacio para la carga de vehículos, que de otra manera hubiese estado ocupado por la admisión y descarga de la turbina. Esta ventaja se hace mayor para aplicaciones en cascos no convencionales como los Swath, embarcaciones de doble casco planteadas como la embarcación

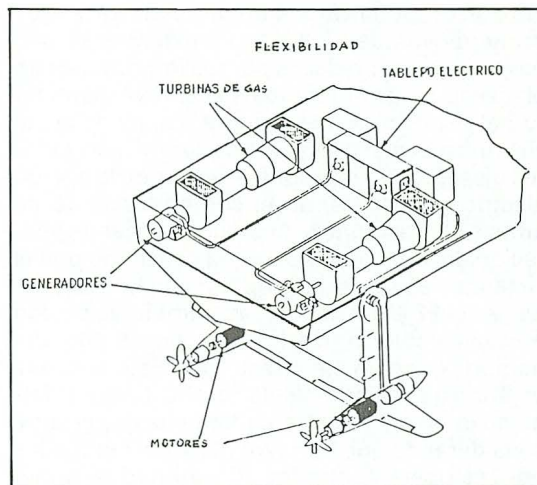
* Ponencia efectuada por el autor en el Seminario Avances en Propulsión Naval, patrocinado por la Dirección de Ingeniería de la Armada, efectuado entre el 25-26 de octubre de 1990 en la Escuela de Ingeniería Naval.

AS del futuro, y los aliscafos, en los que los grupos turbogeneradores se ubican en la cubierta principal y los motores en los ejes.

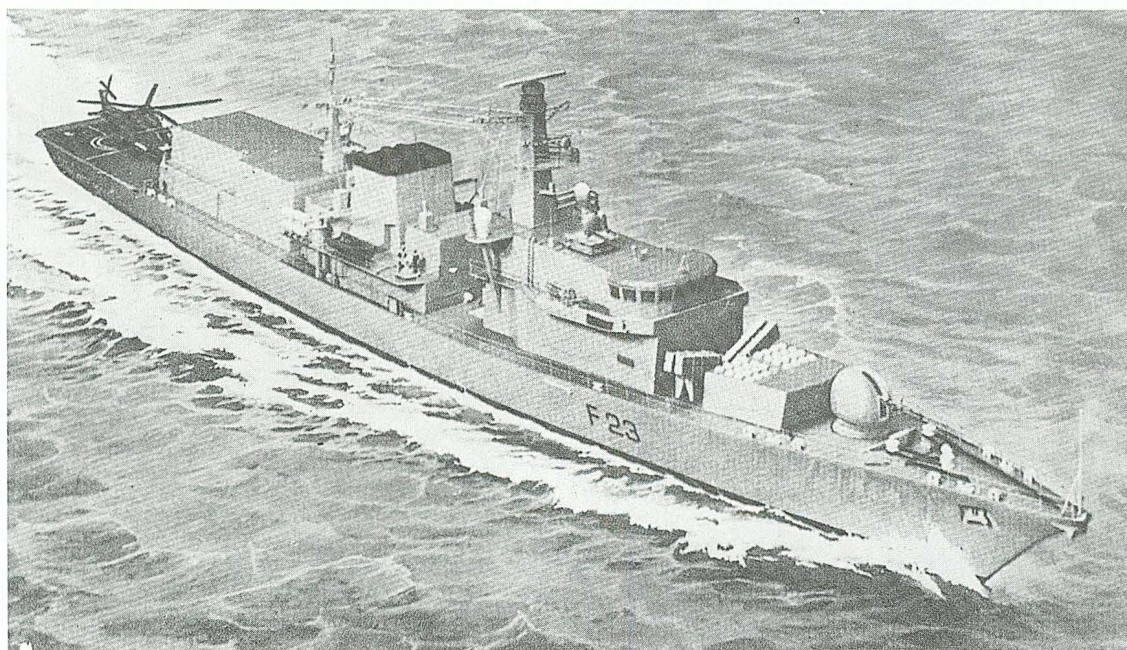
Otros problemas solucionados por la separación de los ejes con las fuentes de energía son: Hacer los ejes mucho más cortos llevando los motores más a popa; se eliminan las cajas de reducción en casi todas las aplicaciones; se elimina el tradicional problema de alineamiento entre los ejes y los motores diesel o cajas de engranajes, permitiendo la instalación de los diesel o turbinas en la posición más conveniente y económica (p. ej.: Las turbinas de gas con admisiones de un largo mínimo optimizan su funcionamiento).

Otro aspecto de la flexibilidad es la referente a la operación de la planta propulsora, substancialmente en lo que se refiere a la eficiente utilización de las fuentes de energía, gracias a la posibilidad de interconectar los motores a diferentes generadores, de modo de poder seguir más de cerca la curva del mínimo consumo específico de las máquinas; en el caso de las turbinas de gas, poder operar siempre en el rango óptimo de velocidad (p. ej.: 2.400 a 3.600 rpm para la LM2500).

Sherlock y Borman efectuaron una comparación entre sistemas de propulsión eléctrica y mecánicos similares de dos ejes. El sistema eléctrico puede usar ambos ejes con una sola



fuente de energía (grupo generador), a diferencia del mecánico que debe usar como mínimo dos fuentes de energía (turbinas) para ello. Por supuesto, podría arrastrarse un eje pero con el inconveniente del ruido por cavitación. (En este punto es importante aclarar que todas las comparaciones entre sistemas mecánicos y eléctricos se hacen sobre la base de fuentes de energía como los motores diesel o turbinas de gas, descartando el uso de turbinas de vapor ya que



INTERPRETACION ARTISTICA DE LA FRAGATA TIPO 23

la relación potencia-volumen es mayor en los primeros, lo que ha llevado a extender su uso naval, ya que uno de los puntos importantes en el diseño naval moderno es el aprovechamiento del espacio). En el área de los servicios, el sistema mecánico requiere de cuatro generadores diesel contra dos convertidores en la opción eléctrica. Comparando el comportamiento de ambas plantas contra un perfil estándar de operación del tipo de buque se ha concluido que el sistema eléctrico puede operar con una turbina de gas el 83% del tiempo; en cambio, la opción mecánica sólo lo puede hacer por el 46% del tiempo (y con un eje arrastrado). Esto conlleva un ahorro considerable de combustible a lo largo de un año y es extremadamente importante considerando que la mayor parte del tiempo los buques operan entre los 10 y 20 nudos, o menos, por lo que se subutilizaría una instalación de tipo mecánico.

Bajo la misma premisa anterior, pero agregando la facilidad de elegir la combinación más eficiente del número y tipo de grupos generadores a utilizar, lo que se puede hacer sin grandes variaciones de costos paralelos sólo si se piensa en propulsión eléctrica, Canadá ha encontrado que la alternativa de usar propulsión eléctrica (COEDAG) contra CODOG es entre un 30% a 40% más eficiente durante su vida útil, en términos de consumo de combustible, y cerca de un 50% para velocidades bajas (andar silencioso).

Detalles	COEDAG (t)	CODOG (t)
Desplazamiento	4.354	4.247
Consumo combust. (20 años)	111.000	150.000
Cada 100 horas:		
Normal	113	153
Defensa	123	163
Silencioso	177	300

El sistema eléctrico integral de la fragata tipo 23 está diseñado para una operación continua paralela con partidas, conexión y distribución de carga automática de los diesel generadores según demanda, de modo de flexibilizar y minimizar las horas de operación de los generadores.

En el caso de las plantas propulsoras diesel eléctricas instaladas en los cruceros de placer (transatlánticos) el factor que más pesó en esta decisión fue el hecho de que fuesen más económicas, en términos de consumo de combusti-

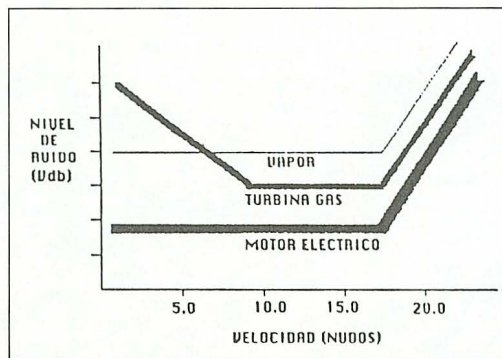
ble, que las opciones mecánicas, hasta velocidades alrededor de los 17 nudos.

Los cálculos estiman un 2% de ahorro de combustible en un año de operación.

—*Bajo nivel de ruido.* De importancia para los buques de guerra, en relación con los submarinos y la guerra antisubmarina.

Es bien sabido que los niveles de ruido de una planta de propulsión eléctrica están muy por debajo de cualquier otra alternativa, sobre todo a velocidades bajo los niveles de cavitación de las hélices, donde se hace predominante el ruido de la máquina.

Teniendo en cuenta que los sistemas de detección de ruido submarino han mejorado notablemente, fundamentalmente en lo que se refiere a sonares remolcados (bajas velocidades), Inglaterra tomó en consideración esta premisa para la selección de la propulsión de su fragata tipo 23, al igual que Canadá, de modo de reducir al máximo el ruido durante la detección pasiva y ser muy poco detectable por un submarino. Junto con minimizar el ruido propio de la planta, la maniobrabilidad del sistema eléctrico permitió que se pudieran utilizar hélices de paso fijo, más silenciosas, eficientes, baratas y resistentes que las de paso variable. El proyecto canadiense considera además la salvedad que durante la navegación silenciosa se operen las turbinas de gas y no los diesel que generan mayor ruido.



CARACTERÍSTICAS DE RUIDO DE LOS SISTEMAS DE PROPULSION

Este mismo concepto ha sido esgrimido para la construcción de buques de apoyo como petroleros de flota, negando al submarino la necesaria referencia de ruido para su detección e interceptación, como también para la construcción del nuevo barreminas inglés, que será propulsado con un sistema Voith Schneider

movido por motores eléctricos, que ha probado ser la combinación más silenciosa para un buque que requiere maniobrar extensamente a bajas velocidades, amén de ser la única alternativa de posicionar los motores diesel en la superestructura para minimizar la huella acústica del buque.

—*Alta carga auxiliar.* En el caso de la planta eléctrica existe la facilidad de generar energía para la propulsión y los servicios auxiliares usando la misma fuente, optimizando así el uso de ella y obviando la instalación supernumeraria de generadores para el servicio, junto con evitar los problemas asociados al funcionamiento a bajas cargas de los motores diesel con turbocargadores. Esto es recomendable cuando la carga de servicio auxiliar es grande, comparable a la necesaria para la propulsión, y su ocurrencia coincide cuando las necesidades de propulsión son bajas y viceversa; por ejemplo, los buques-factoría o maestranza.

Este concepto ha sido tomado en cuenta en la construcción de modernos cruceros de placer con propulsión eléctrica, como los de la línea Carnival Crusie, con 4 generadores de 9.500 kVA, 2 de 6.300 kVA y dos motores eléctricos de 14 mw, y el *Queen Elisabeth 2*, con 9 generadores de 10.620 kW y motores de 22 mw, que tienen un alto requerimiento de poder eléctrico debido a las plantas de aire acondicionado, el servicio hotel y los propulsores transversales.

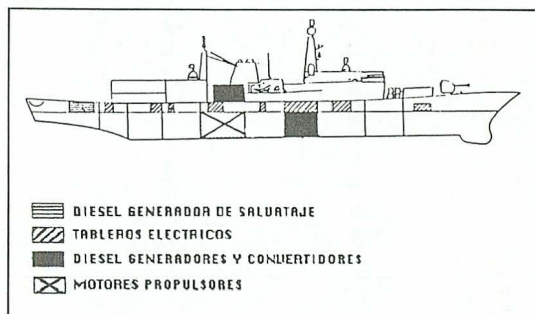
- *Necesidad.* A la fecha no hay alternativa para submarinos convencionales.
- *Funcionamiento blando.* Las plantas eléctricas pueden ser trabadas sin daños muy serios, lo que las hace recomendables para rompehielos y remolcadores.
- *Minimiza el consumo de combustible.* Referido al uso óptimo de los grupos diesel o turbogeneradores, con respecto a una carga deseada.

—*Control y disponibilidad.* Se ha encontrado que un buque con propulsión eléctrica es de mejores características de maniobrabilidad que uno con propulsión mecánica. En el proyecto canadiense se establece que la fragata es capaz de acelerar a 25 nudos en 40 segundos y detenerla en 60 segundos dentro de una distancia de 400 metros (3 largos de buque).

Por otro lado, los grupos turbogeneradores pueden ser distribuidos por el buque para minimizar los daños productos de averías o incendios. Este factor pesó en el diseño de la fragata AS inglesa tipo 23 y el proyecto canadiense, donde la capacidad de supervivencia de la propulsión se incrementó notablemente sólo por este factor.

Lo anterior también se encontró válido para la selección de combinaciones diesel eléctricas en las plantas de los cruceros de placer, de modo de que una falla tenga la mínima injerencia en la velocidad del buque y el confort de los pasajeros.

Por otro lado, el control de la planta misma se puede automatizar en base a microprocesadores, a tal nivel que opere siempre en máxima eficiencia con un mínimo de personal de supervisión, como es el caso de la fragata tipo 23, donde la guardia de máquinas se cubre con tres hombres.

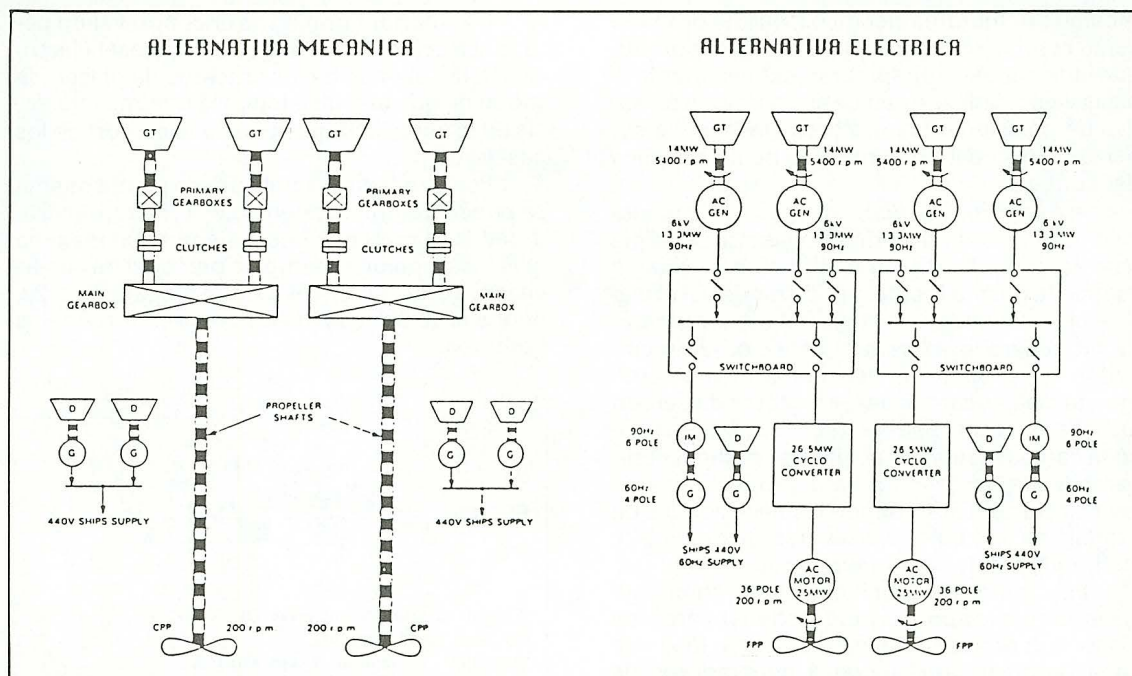


DISTRIBUCION DE CARGAS CONECTADAS
A LO LARGO DEL BUQUE

DESARROLLO ACTUAL Y FUTURO

Se han esbozado ciertas aplicaciones actuales y las razones por las que se seleccionó la propulsión eléctrica. Estos desarrollos se han basado en tecnología probada y obtenible en el mercado, manteniéndose a la fecha las desventajas de mayor volumen, peso y costo inicial, las que están siendo superadas con estudios y experiencias orientadas fundamentalmente a motores enfriados por líquido, mejoramiento de los sistemas alternos, máquinas superconductoras y motores homopolares. La GE Naval and Drive Turbine Systems ha planteado ya un paquete de propulsión eléctrica con turbogeneradores, el cual es dos veces más liviano que un sistema de propulsión eléctrica convencional.

Hasta la fecha, el mayor uso de la propulsión eléctrica ha sido en los submarinos y se ha basado en motores de tensión continua debido a las baterías que los impulsan, llegando a instalarse motores de hasta 4 mw de potencia, limitado por el volumen de éstos. Pero el interés actual y por ende el tema de esta conferencia está orientado a la propulsión de buques de superficie, los que requieren potencias substancialmente mayores.



ALTERNATIVAS

Los posibles tipos de propulsión eléctrica moderna están basados fundamentalmente en tensión alterna, básicamente por ser máquinas de tensión continua substancialmente más grandes que las de tensión alterna y puntualmente se prefieren los motores sincrónicos a los de inducción, por ser estos últimos muy sensibles a un entrehierro mínimo y concéntrico, que puede ser alterado por impactos o deflexiones del eje.

Combinación generador y motor con velocidad variable

La combinación de fuente de poder y motor variable ha sido usada satisfactoriamente en una serie de buques alrededor del mundo; mas, la necesidad de una frecuencia común entre el generador y el motor acarrearán dificultades en el diseño de ambas máquinas para satisfacer las bajas revoluciones de las hélices. Este sistema hace impracticable el uso de una alimentación eléctrica integrada con todas sus ventajas. Es por ello que el interés se ha orientado a sistemas con fuentes de poder de velocidad fija.

Combinación generador-motor con velocidad fija y hélice de paso variable

El motor de velocidad fija con caja de en-

granaje de paso variable fue usado en el RFA *Diligence*. Es una de las opciones más baratas ya que usa un motor de inducción de alta velocidad, lo que lo hace relativamente pequeño. Este es un buen sistema para largos períodos de navegación a alta velocidad, pero tiene el inconveniente de ser muy ruidoso.

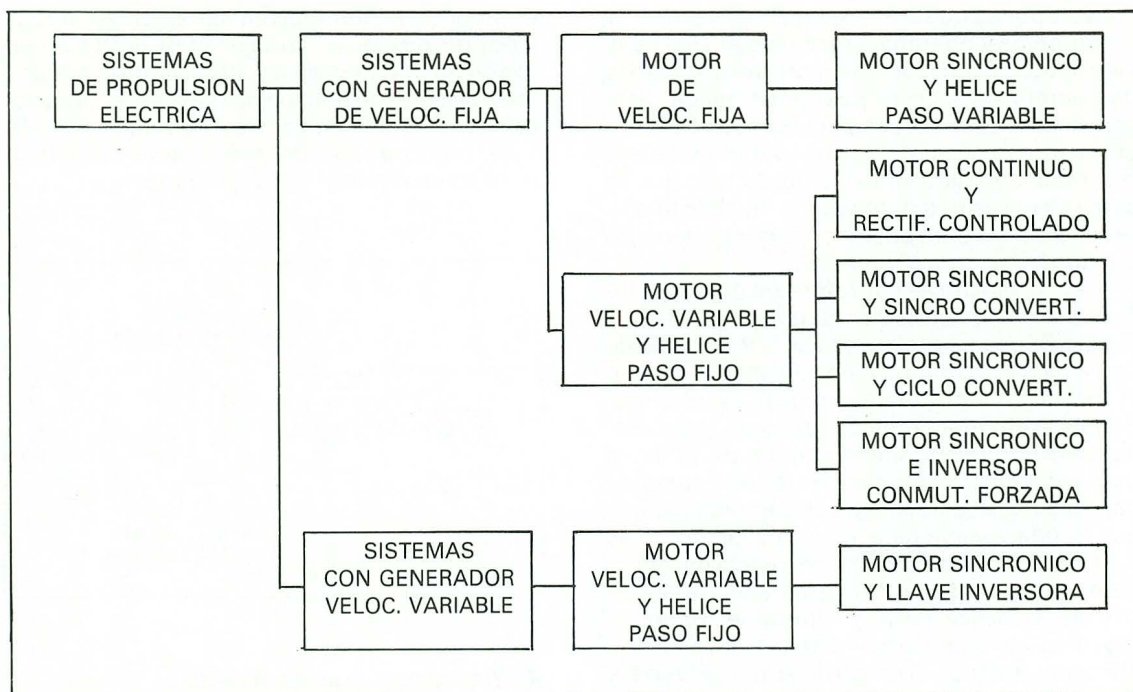
Configuración generador de velocidad fija-motor velocidad variable

Para poder obtener sistemas de propulsión menos ruidosos se debe recurrir a las alternativas de la configuración fuente de velocidad fija-motor de velocidad variable.

Motores de corriente continua

En el caso de la fragata tipo 23 se usó motores de tensión constante de 15 MW alimentados desde rectificadores controlados que reciben 600 vac y 61 Hz (61 Hz para absorber el resbalamiento en los dos conjuntos motor-generador de 440 V de poder y 60 Hz a servicios auxiliares) desde el sistema eléctrico principal, el que cuenta con cuatro diesel generadores de 1,3 MW cada uno. Se eligió motores de tensión continua por ser más silenciosos y fáciles de controlar que los alternos.

La propulsión eléctrica de esta fragata está orientada a las bajas velocidades y movimientos de máquinas, donde opera con un sistema



diesel eléctrico, siendo desconectado para velocidades mayores, en que las turbinas de gas mueven los ejes a través de engranajes de reducción.

El límite del tamaño del motor de tensión continua depende de los problemas inherentes a la conmutación. La conmutación límite se puede determinar por la siguiente relación práctica: $PN < 15 \cdot 10^5$ (kW.rpm). A 200 rpm se puede obtener 7,5 mw por armadura, lo que equivale a 15 mw para un motor de doble armadura, por lo que si se necesita un motor de 20 mw (30 mil HP, app.) a 150 rpm deberá recurrirse a la tecnología de tensión alterna.

Motores de tensión alterna

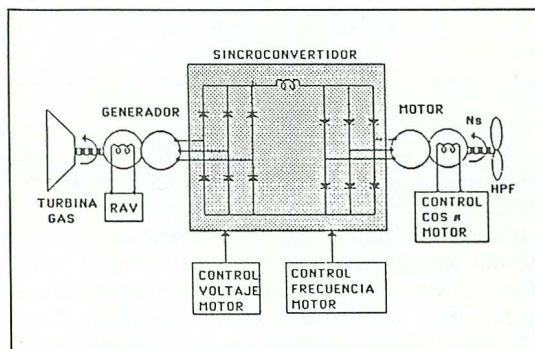
En los buques de superficie actuales con propulsión total se ha preferido el uso de sistemas de tensión alterna y a altos voltajes para mantener bajas las corrientes, con el objeto de usar equipos de menor volumen, minimizar los problemas de conmutación y poder manejar las fallas (3,3 kV en el *Challenger* y 6 kV en el *Dilligence*).

Convertidores

Los avances en la tecnología de control de estado sólido de corrientes, fundamentalmente

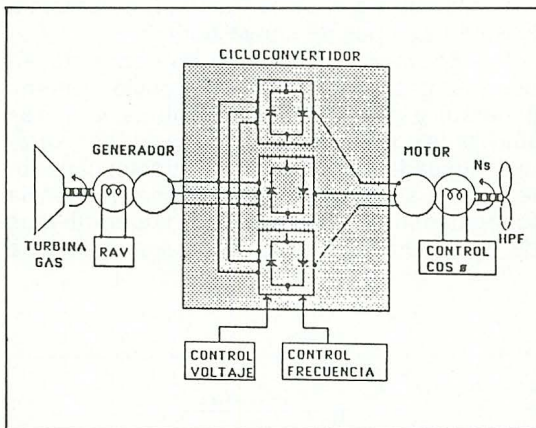
en los convertidores de estado sólido, han permitido controlar las frecuencias de la alimentación de los motores sincrónicos sin tener que variar la velocidad de la fuente. Básicamente, existen tres tipos de convertidores.

—El *sincroconvertidor*, que consiste en dos puentes: Uno rectifica la tensión alterna generada y la transforma en continua, la cual es suavizada por la inductancia antes de ser cortada (chopeada) por el segundo puente, para obtener una señal cuadrada con una frecuencia fundamental de acuerdo a los requerimientos de velocidad del motor. El problema de este



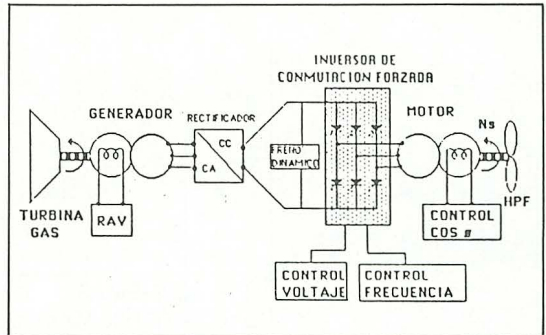
convertidor es que entrega un alto nivel de 5ª y 7ª armónica y no trabaja bien bajo el 15% de la velocidad máxima, donde aparecen problemas de conmutación en el puente de salida. Este convertidor es adecuado para producir frecuencias sobre la de alimentación, por lo que no es recomendado para su uso a bordo, a lo que se suma su necesidad de instalarle muchos tiristores en paralelo para operar con altos poderes, lo que lo hace muy voluminoso.

—El *cicloconvertidor* sintetiza una onda trifásica con una fundamental deseada desde la señal trifásica de la alimentación. Por medio de una adecuada conmutación se puede disminuir substancialmente las armónicas resultantes. Requiere un mínimo de 36 tiristores, pero este número no crece notablemente para poderes más elevados. Su mejor rango de trabajo es bajo el 50% de la frecuencia de alimentación, lo que es una ventaja para su uso naval ya que es siempre deseable elevar la frecuencia del generador, de modo de reducir su tamaño y la velocidad de la hélice para minimizar el ruido. El proyecto canadiense considera la propulsión eléctrica para todo el rango de velocidades de la fragata AS, usando para ello 3 turbogeneradores de 6 mw cada uno y 3 diesel generadores de 4 mw cada uno, 4.160 V/60 Hz y 2 motores sincrónicos de 12,5 mw/4.160 V controlados por un cicloconvertidor.



—El *convertidor de conmutación forzada* está basado en una nueva generación de tiristores, los GTO (Gate Turn off Thiristors), los que pueden ser abiertos con un pulso de corriente al igual que los comunes, pero pueden ser cerrados por un pulso de polaridad inversa mientras la corriente aún fluye, lo que no se puede hacer con sus similares comunes. Esta característica

permite una conmutación simétrica en ambos lados del pico de la forma de onda de la alimentación, lo que implica un alto factor de poder y muy bajo coeficiente de armónicas. Desgraciadamente, este tiristor aún está limitado a 1 mw y 1 kV, por lo que se deberá esperar un tiempo para su pleno desarrollo y utilización.

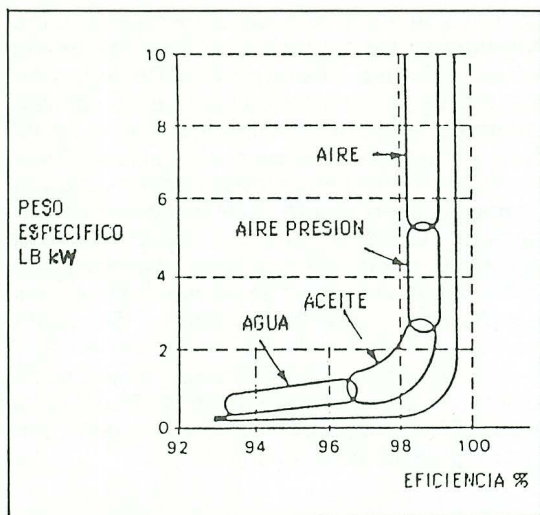


Refrigeración líquida directa

Siguiendo con la idea de reducir el peso y volumen de un motor eléctrico, esto se puede efectuar por el camino de maximizar el factor de utilización del cobre y hierro, el que es proporcional a la corriente y la densidad de flujo magnético, respectivamente. Si alguna de estas cantidades aumenta, el tamaño del motor disminuirá.

En general, la elección ha sido aumentar la corriente ya que el posible mejoramiento de aceros especiales no aportaría una gran ventaja. Este aumento se produce mediante la transferencia directa de calor desde los conductores eléctricos al líquido refrigerante, pero tiene un límite práctico y es que si disminuimos el cobre de la máquina aumentamos su resistencia eléctrica, lo que junto con incrementar la corriente hace que aumenten las pérdidas, disminuyendo la eficiencia del motor. El proyecto de la fragata canadiense determinó que el enfriamiento directo con agua desionizada de los motores y el cicloconvertidor implicaría una reducción de volumen en un 50% y 33%, respectivamente.

Una de las soluciones estudiadas para aumentar la relación potencia-peso es bajar la temperatura lo más cercana a 0°K, donde los metales se comportan casi como superconductores ($R=0$) y aumentar así las corrientes involucradas, pero la experiencia ha demostrado que el equipo necesario para manejar esta facilidad hace que la relación potencia-peso se



EFICIENCIA DE VARIOS METODOS DE ENFRIAMIENTO

mantenga comparativamente similar a que si no fuera usada.

A esta altura de la exposición se puede inferir que la parte del sistema de propulsión eléctrica que permitirá mayores innovaciones es el motor; de aquí que se están desarrollando esfuerzos serios en desarrollar nuevas alternativas, como las siguientes:

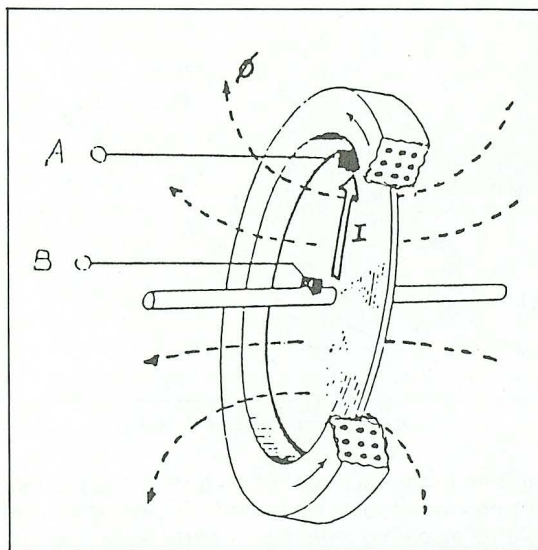
Motor de flujo transversal

Este motor, diseñado y construido en Alemania puede manejar potencias de 20 mw a 200 rpm con una reducción de un 30% de peso y un 39% de volumen con respecto a los motores sincrónicos de la misma potencia.

Motor homopolar con campo superconductor

Este motor, largamente estudiado, se basa en el disco generador de Faraday y es similar al que se usa en los medidores de electricidad domiciliarios. Es esencialmente un motor de altísima corriente y bajo voltaje.

Para hacer manejables las corrientes se divide el disco en estados, cada uno asociado a una escobilla colectora. Esta máquina es muy delgada, simple de construir y de bajo costo. Inglaterra ha probado un prototipo de hasta 3.250 HP a 200 rpm con buenos resultados, mas la complicación se basa en que el diseño de un motor de mayores potencias, suficientes para la propulsión de un buque, considera cientos de escobillas, cada una manejando varios cientos de amperios. Estados Unidos está estudiando



MOTOR HOMOPOLAR CON CAMPO SUPERCONDUCTOR

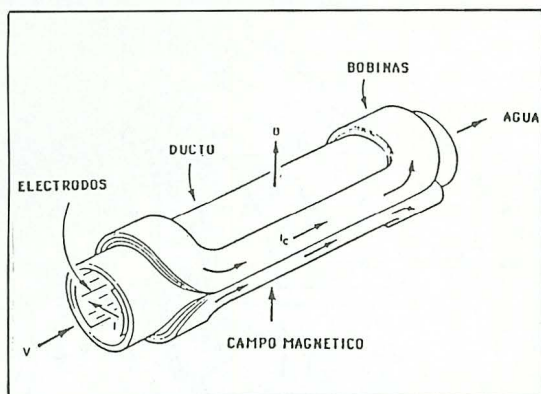
una nueva forma de colector, por lo que habría que esperar que se solucione este problema para considerarlo una alternativa viable.

Motor con campos superconductores

Dentro del campo de los superconductores se han hecho grandes avances en el logro de materiales superconductores a temperaturas manejables con la técnica criogénica disponible. Es así como en Estados Unidos y en Inglaterra se ha logrado producir conductores basados en óxidos de cobre (Y, Ba, Cu, O y Bi, Sr, Ca, Cu, O) los que son críticos a temperaturas de 240 y 100 °K, posibles de producir con nitrógeno líquido. Con ellos han sido construidas pequeñas bobinas, las que instaladas en máquinas experimentales han entregado promisorios resultados, fundamentalmente en el aumento de la relación potencia-peso de la maquinaria. El problema fundamental de estos materiales es su inestabilidad y fragilidad mecánica, por lo que se estima que deberán pasar algunos años antes de poder considerarlos una alternativa para la propulsión eléctrica.

Motor magnetohidrodinámico

Por muchos años Japón ha estudiado esta alternativa de propulsión, basada fundamentalmente en proveer un alto campo magnético usando un imán superconductor y luego pasar corriente continua a través del agua que se encuentra entre los electrodos en un ángulo recto



MOTOR MAGNETOHIDRODINAMICO

al flujo magnético, de modo que el agua experimente una fuerza de Lorentz. El principal problema está en que la mayor parte de la energía se va en calentar el agua debido a su baja conductividad, siendo su eficiencia no mayor de un 10%. En todo caso, es una alternativa ultrasilenciosa.

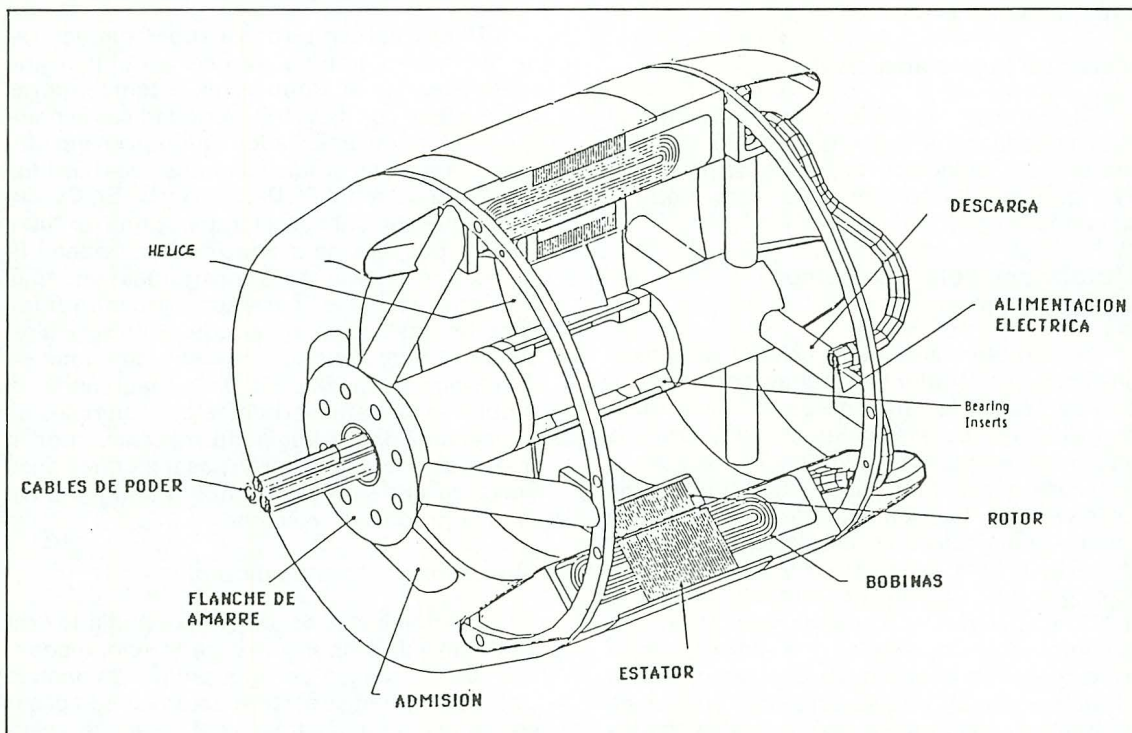
Motor propulsor eléctrico sumergido

En la vía de disminuir el tamaño de los

motores de modo que pueda mejorarse su instalación dentro del buque, en Estados Unidos (Westinghouse Research and Development Center) se ha tomado un camino de solución diferente, el de instalar los motores fuera del buque con las hélices integradas al rotor. Es un motor de inducción de velocidad variable y su ventaja está en su alta eficiencia como propulsor y que el enfriamiento se hace directamente por el agua de mar. Tiene otros atractivos, tales como el no uso de cajas de engranajes, ejes, acoplamientos y sellos rotatorios. Se estima que su eficiencia debe ser del orden del 88% para máquinas de 30 mil HP a 120 rpm, donde el diámetro del motor sería de unas 150 pulgadas y unas 36 toneladas de peso. Por supuesto, este prototipo está aún en estudio.

CONCLUSION

Se ha visto que en general la selección de una planta de propulsión eléctrica en la actualidad obedece fundamentalmente a su flexibilidad en el diseño y la operación, insuperable capacidad de maniobra, bajo nivel de ruido, mayor seguridad en la disponibilidad pese a las averías y la capacidad de minimizar el consumo



MOTOR PROPULSOR ELECTRICO SUMERGIDO

de combustible a lo largo del tiempo. En cambio, a la fecha la alternativa eléctrica sigue siendo más pesada, voluminosa e inicialmente más costosa que las alternativas mecánicas existentes; mas, estas desventajas han sido minimizadas con el uso y advenimiento de modernas técnicas de diseño, equipos y materiales, a tal grado que están siendo atractivas como alternativas de propulsión naval comercial y sobre todo militar.

Actualmente, la tecnología disponible ha hecho posible que se revierta el concepto nacido del caso del *Adventure*, al cual le fue cambiada la planta eléctrica por no ser tan económica como una mecánica... ¿Quién podría negar que en algunos años más el personal naval deba lidiar con nitrógeno líquido o superconducción a bordo de las unidades, o que para bajar a la máquina haya que abrigarse en vez de desabrigarse, como es la costumbre en la actualidad?

