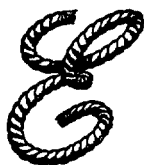


LA PROPULSIÓN SUBMARINA Y EL MOTOR DIESEL EN EL SIGLO XXI

Luis LÓPEZ PALANCAR
Doctor ingeniero naval



El desarrollo de los motores diesel de alta velocidad para aplicaciones navales a comienzos del presente siglo supuso un impacto decisivo en la construcción de submarinos. Las características específicas de los motores diesel de alta velocidad, tales como bajo peso y dimensiones apropiadas para una gran compacidad, demostraron tener una enorme importancia en este área específica de aplicación.

Los primeros motores diesel para submarinos fueron construidos por MAN en 1905/1906, y eran máquinas que desarrollaban una potencia de 625 kW a una velocidad de 450 rpm, considerablemente rápidos para la tecnología diesel existente en aquella época. La relación peso/potencia de aquellas máquinas era de 19 kg/kW, en comparación con los aproximadamente 110 kg/kW que era el valor normal para los motores de uso civil. A finales de la primera guerra mundial, los motores diesel para la propulsión de submarinos habían alcanzado potencias de 2.200 kW.

La obtención de una mayor autonomía en la condición de inmersión en los submarinos, a cota de periscopio, fue consecuencia del desarrollo del *snorkel*, que permite el funcionamiento de los motores de combustión interna (diesel) con el buque en inmersión. De esta forma, la energía eléctrica almacenada en las baterías puede ser utilizada única y exclusivamente para navegación en inmersión a cotas profundas.

Cuando se navega a cota *snorkel*, el aire de combustión para alimentación de los motores diesel se toma directamente de la atmósfera a través del *snorkel*. Sin embargo, las condiciones operativas difieren muchísimo de aquellas existentes cuando el buque navega en superficie.

Excluyendo aquellos sistemas de propulsión que son independientes de la alimentación de aire exterior (AIP), que serán examinados a continuación, la solución *snorkel* permite que el motor diesel siga manteniendo un lugar de importancia decisiva en los submarinos de pequeño y mediano tonelaje.

Las potencias navales han establecido, sin excepción alguna, como propulsión para los grandes submarinos de ataque la energía nuclear. Sin embargo, debido al gran espacio requerido por este tipo de sistemas propulsivos, no es apropiado para cualquier tipo de unidad subacuática y misión, y su alto coste impide que tal tipo de buque tenga una ilimitada aplicación en un futuro previsible.

En los límites de las potencias obtenibles, los motores diesel han llegado a ser la única fuente de energía motriz en la mayoría de unidades navales de este tipo, y las entidades que han tenido una influencia decisiva en este campo han sido alemanas, francesas y suecas, aparte de las compañías rusas que han suministrado los motores para las unidades ex soviéticas convencionales.

En la búsqueda de sistemas propulsores que pudiesen trabajar sin aportación exterior de aire, eliminando con ello la necesidad de unas grandes y pesadas baterías, se han estudiado a lo largo del tiempo varios sistemas, tales como la turbina Walter o el motor diesel trabajando en circuito cerrado (el primero de ellos un motor Mercedes tipo MB 501 modificado), al que se alimentaba de oxígeno en un circuito cerrado, en el que, de forma similar a la usada en las turbinas Walter, el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) se utilizaba como vehículo transporte del oxígeno. Sin embargo los navíos con tales sistemas de propulsión no alcanzaron la madurez operativa ni la construcción en serie debido a las vicisitudes bélicas y al final de la segunda guerra mundial. El motor MB 501 anteriormente citado fue probado en funcionamiento normal en dos grandes submarinos «transporte» durante cruceros efectuados por el océano Índico. Los últimos proyectos de submarinos realizados durante la segunda guerra mundial no llegaron a fructificar y, en su mayoría, estaban basados en la utilización de este tipo de motor.

Terminada la contienda, las principales potencias navales estudiaron los sistemas propulsores desarrollados o proyectados por los técnicos germanos durante la guerra, e incluso los aplicaron en varias series de submarinos, con resultados variables. En el caso concreto de Alemania, cuando la Armada alemana encargó los primeros proyectos de submarinos a finales de los años cincuenta, utilizó en los mismos la más moderna tecnología existente en aquel momento, eligiendo, consecuentemente con esta política, una de las máquinas más desarrolladas y modernas en aquel entonces: el motor Maybach 12V 493 de alta velocidad. Dadas las características de los buques a los que se iban a destinar los motores (bajo desplazamiento, autonomía limitada, y navegación en áreas restringidas), los motores se eligieron con aspiración natural del aire, parcialmente amagnéticos (del tipo usado en los cazaminas existentes en aquel momento), siendo instalados en numerosas unidades costeras para navegación a cota *snorkel*. Los submarinos de mayor tonelaje fueron equipados con motores con sobrealimentación mecánica y refrigeración del aire de sobrealimentación, del tipo 12 ó 16V 652, en aquellos buques de diseño germano.

Por su parte, Francia utilizó en sus buques motores Pielstick de forma casi única, siempre que los mismos fuesen convencionales. También en este caso nos encontramos ante máquinas de alta velocidad, de aspiración natural o sobrealimentadas mecánicamente. Un caso análogo sucede con Gran Bretaña, cuyos motores Paxman se encuentran instalados en todos los buques convencionales suministrados por este país a sus principales clientes.

Hedemora ha tenido su campo de aplicación, de forma casi exclusiva y única, en las unidades subacuáticas de la Armada sueca, usando los mismos principios generales que los anteriormente indicados, pero, en la actualidad, ha cedido el sitio a otras entidades.

Otros fabricantes de motores para submarinos son MAN, Sulzer, Brons-
werk y Admiralty, pero todos ellos presentan como característica esencial la disposición de modelos de motor menos avanzados desde el punto de vista técnico.

Disposición de la planta propulsora y funcionamiento

Los submarinos con *snorkel*, motores diesel de la última generación, y propulsión diesel-eléctrica, están, en la actualidad, cualificados para una operatividad submarina continua y no sólo a pequeñas profundidades. El motor diesel acciona un alternador, que alimenta de energía eléctrica a los motores eléctricos propulsores y a los cargadores de baterías.

El aire del exterior entra en el buque a través del *snorkel* y es aspirado por los motores diesel desde la cámara de máquinas (constante circulación de aire y disipación de calor). Si el *snorkel* por cualquier causa falla (principalmente por intenso oleaje), la entrada de aire al mismo se cierra automáticamente y el aire contenido en el casco actúa como amortiguador para compensar las fluctuaciones de presión. En casos de excesiva depresión de aspiración, el motor se debe parar automáticamente para evitar daños físicos a la dotación del buque.

Los gases de escape son expelidos a través de un silencioso refrigerado por agua y unos conductos de escape también refrigerados por agua, con salida, normalmente, bajo la flotación. El motor diesel, cuya parada en el caso anteriormente citado es automática, se arranca nuevamente con las válvulas de escape cerradas (las de salida de gases al exterior del buque). Durante el funcionamiento, el caudal y la presión de los gases de escape evitan la entrada de agua al motor.

Requisitos generales de un motor diesel para submarinos

Los requisitos específicos generales que debe cumplir un motor diesel para propulsión en submarinos son los siguientes:

- Alto tiempo operativo y largo TBO.
- Alta potencia y bajo peso.
- Arranque contra alta contrapresión.
- Diseño parcialmente amagnético o compensado magnéticamente.

- Características antichoque.
- Sustentación elástica altamente amortiguadora de ruido, para minimizar los niveles de ruido estructural. (Discreción acústica para evitar detección).
- Bajo nivel de ruido aéreo. (Discreción acústica para evitar detección).
- Potencia adecuada para trabajar correctamente con una gran depresión de aspiración y una gran contrapresión de escape.

De forma básica, los motores de cuatro tiempos, de simple efecto y alta velocidad, son los más apropiados para el funcionamiento a cota *snorkel*. El motor debe trabajar con la menor cantidad posible de exceso de aire, de forma que el tamaño de los conductos de aspiración y escape a bordo sean del menor tamaño posible. Un bajo consumo de combustible es otro factor determinante en la elección del motor, ya que ello permitirá reducir el tamaño de los tanques almacén de combustible a bordo, y aprovechar el espacio ahorrado, bien para instalar más sensores o armamento, bien para mayor confort de la dotación.

La depresión del aire de aspiración y la contrapresión de escape están sujetas a variaciones, en función del estado de la mar y del grado de inmersión del buque (el *snorkel* cierra automáticamente cuando se encuentra sumergido).

Motores con sobrealimentación mecánica

La sobrealimentación mecánica consiste en una soplante accionada por el cigüeñal del motor a través de un engranaje (multiplicador). Con este sistema se compensan bastante los efectos asociados con la alta depresión de aspiración y la contrapresión del escape, pero, a cambio, absorbe una alta potencia del motor. Los alternadores trifásicos con rectificadores, utilizados en los submarinos, necesitan una velocidad constante, lo que implica que la absorción de potencia por la soplante, que es función de la velocidad del compresor, debería permanecer constante para todas las posibles condiciones operativas del buque. Esta característica especial supone una gran desventaja, sobre todo cuando el motor trabaja en condiciones de carga parcial, dado que la soplante absorbe una gran cantidad de la potencia producida por el motor, y el consumo de combustible es relativamente alto. Para obviar en parte estas dificultades, han surgido en los años 90 motores para submarinos con sistema de sobrealimentación mixto (mecánico y por gases de escape). No obstante, todos ellos no han pasado del estado de prototipo, siendo dudosa su aplicación en submarinos, buques en que si algo es importante es la seguridad y fiabilidad de todos los equipos instalados.

Motores sobrealimentados por gases de escape

Las turbosoplantes de gases de escape, que no están mecánicamente unidas en forma alguna al motor, extraen la energía que proporcionan de los gases de escape del motor.

Las condiciones específicas de aspiración y escape típicas de los submarinos son factores que evitan que las turbosoplantes convencionales puedan trabajar correctamente a bordo de tales buques. Estas condiciones, agravadas por los frecuentes cambios en las condiciones de funcionamiento a cota *snorkel*, hacen necesaria la utilización de turbosoplantes especialmente desarrolladas, que no suelen ser productos de serie de los tradicionales fabricantes de turbosoplantes.

El incremento de potencia del motor diesel obtenido con estas turbosoplantes especiales (que deben ser de bajo peso y compactas) da como consecuencia unas mejoras significativas en los parámetros capitales para aplicación de un motor diesel en submarinos:

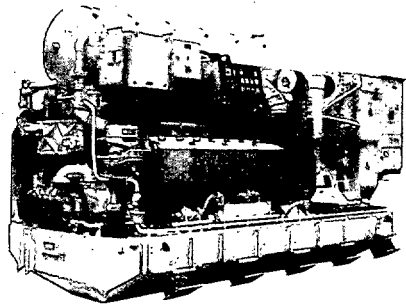
- Mejora considerable de la relación peso/volumen motor (kg/m^3).
- Relación peso/potencia más favorable (kg/kW).
- Reducción drástica del consumo específico de combustible, que es muy significativa, sobre todo en el funcionamiento a cargas parciales.

El estado actual del arte

Partiendo de la base de que MTU es una entidad líder en la fabricación y suministro de motores diesel para submarinos, es preciso estudiar, de forma más detenida, las características de los más modernos motores para esta aplicación diseñados y construidos por este fabricante.

MTU comenzó el desarrollo de motores diesel sobrealimentados por gases de escape para la propulsión de submarinos, partiendo de la serie de motores 396-03; a finales de los años 70, obteniendo con ello el éxito que buscaba la entidad.

En la actualidad, MTU ha desarrollado los motores de la serie 396 en una versión para aplicación en submarinos (bajo la denominación SE), con un margen de potencias que comprende desde los 600 hasta los 1.350 kW, todos ellos a 1.800 rpm, velocidad necesaria para la generación de energía eléctrica a bordo.

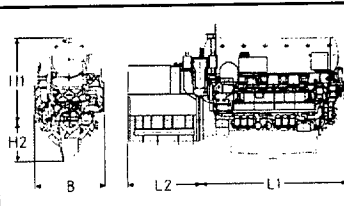


Las principales características de los motores MTU 396 SE-04 para submarinos se recogen a continuación:

N.º cilindros	16V396SE84	12V396SE84	8V396SE84
Potencia (kW) con 1.100 mbar de contrapresión de escape después del silencioso (superficie).	1.350	1.000	600
Consumo específico combustible (g/kWh) + 5 por 100 tolerancia (superficie).	215	215	225
Potencia (kW) con 1.600 mbar de contrapresión de gases de escape después del silencioso (cota <i>snorkel</i>).	1.200	900	550
Consumo específico combustible (g/kWh) + 5 por 100 tolerancia (cota <i>snorkel</i>).	235	235	240

Todos los datos anteriormente enunciados están referidos a una temperatura máxima del aire de aspiración de 45° C, una temperatura máxima del agua salada de 32° C, una depresión de aspiración de 960 mbar antes del silencioso (excepto para condiciones de superficie), y una contrapresión de 1.600 mbar de gases de escape después del silencioso (excepto para condiciones de superficie).

Puede parecer extraño a los profanos en la materia la relativamente poca potencia que desarrollan los motores específicamente diseñados para la propulsión de submarinos. Ello responde a criterios de seguridad, redundancia y fiabilidad en caso de fallo. Para explicar este importante asunto, permítanme hacer una digresión sobre este tema.

	Tipo de motor	L ₁	L ₂	B	H ₁	H ₂	Peso ¹
		mm	mm	mm	mm	mm	kg
	8V396SE84	2.340	1.250	1.600	1.730	700	5.400
	12V396SE84	2.800	1.450	1.600	1.880	800	7.400
	16V396SE84	3.260	1.620	1.600	1.930	900	8.800

Dimensiones generales de grupos generadores con motores tipo 396SE84.

La detección de submarinos

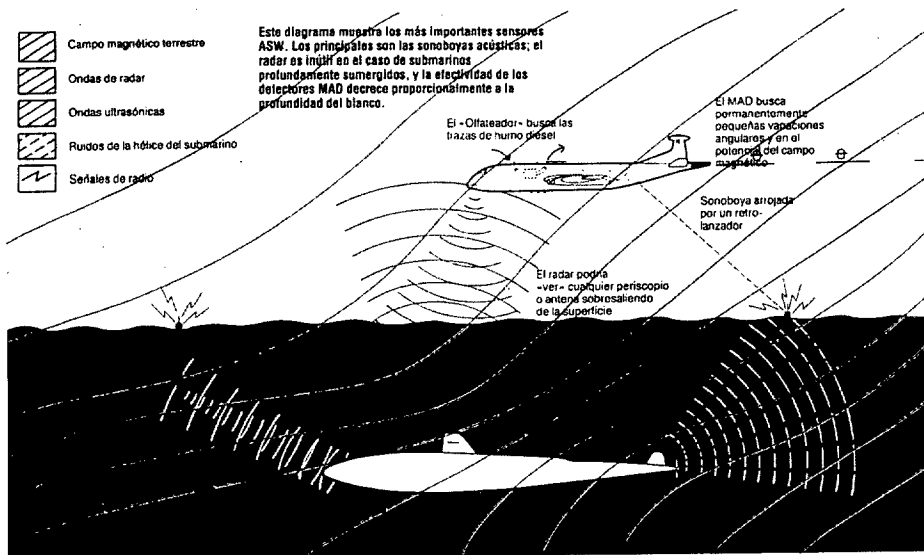
Todos los modernos aviones marítimos de gran capacidad y buques de combate están diseñados para operar con eficacia en un medio electrónico hostil, con interferencias enemigas y otras contramedidas. Aunque en muchos casos los blancos marítimos, tales como buques de superficie, son más fáciles de detectar que los blancos en zonas terrestres, son tantos los problemas derivados del movimiento continuo de la superficie del mar (oleaje producido por el viento) que los radares marítimos han de ser particularmente capaces y procesar datos muy completos para eliminar lo que de otro modo podrían parecer falsos blancos en movimiento.

Como consecuencia de todo ello, en los aviones y helicópteros de patrulla modernos los operadores de radar, navegantes tácticos o *plotters* (trazadores) no ven otra cosa en sus pantallas que blancos auténticos. Con un radar antiguo la imagen quedaría ocultada por las reflexiones de radar procedentes del mar, sobre todo las que tienen origen en las olas encaradas hacia el avión. Hoy en día es posible volar sobre la mar agitada y ver una pantalla totalmente en blanco, salvo un punto causado por la punta del *snorkel* o el periscopio de un submarino.

El radar es, naturalmente, una de las formas de detección y seguimiento de blancos en el mar. En el caso de un submarino sumergido, otros dos métodos importantísimos son los sistemas acústicos y el MAD. El MAD o detector de anomalías magnéticas es un método para medir la dirección y la intensidad (o relación de cambio o gradiente) del campo magnético terrestre local. En la mayor parte de las áreas oceánicas, mucho más que en las terrestres, el campo magnético es uniforme; los únicos accidentes naturales que pueden afectarlo, como las regiones magnéticas de la corteza terrestre, suelen estar a gran profundidad bajo el fondo del mar y, por tanto, su influencia es prácticamente despreciable. Pero un gran submarino de acero que se mueve a pocos metros bajo la superficie provoca una irregularidad importante o anomalía. Un aparato MAD es una forma muy sensible de galvanómetro o magnetómetro que mide continuamente en sus bobinas las más pequeñas corrientes engendradas por el campo de la Tierra. Cuando el MAD vuela sobre un submarino, las corrientes aumentan bruscamente y luego vuelven a su nivel anterior. Si el MAD cuenta con una computadora para interpretar las lecturas, puede conducir al avión o helicóptero directamente sobre el submarino. Lógicamente, las bobinas tienen que estar tan aisladas como sea posible de las perturbaciones provocadas por el metal de la propia aeronave, por lo que su sitio más habitual es la punta de un largo contenedor que se proyecta hacia atrás desde la cola.

La búsqueda acústica es la contrapartida submarina del radar. Éste opera en el aire, mientras que el sonido puede realizar la misma tarea en el agua.

Hay dos maneras de localizar un submarino. El sonar pasivo consta de micrófonos extremadamente sensibles que simplemente escuchan los sonidos emitidos por el submarino. Los submarinos modernos están diseñados para moverse muy silenciosamente, pero es inevitable que la hélice emita poderosas perturbaciones que no sólo se registran a grandes distancias, sino que pueden proporcionar claves de identificación del tipo de submarino y de la velocidad a que navega. El sonar activo consiste en la reflexión de ondas de sonidos de gran intensidad provenientes de la superficie externa del submarino. Las ondas sonoras son engendradas en general por un aparato electroacústico de gran intensidad que funciona según un principio conocido como magnetostricción. Las ondas de gran intensidad viajan a través del océano, a una velocidad variable según factores complejos, como las variaciones en la temperatura del agua y otros, pero, en todo caso, más rápidamente que las ondas sonoras en el aire. Si encuentran un gran objeto sumergido, algunas ondas son reflejadas y devueltas del mismo modo que las ondas (de radio) electromagnéticas son reflejadas en el radar. Un contenedor de sonar autónomo recibe el nombre de sonoboya, y una aeronave de patrulla puede lanzarla al océano y escuchar por radio las señales que emite (los helicópteros pueden «zambullir» la misma boya una y otra vez en diferentes sitios). Un tercer método de detección, útil con submarinos diesel, consiste en un «olfateador», es decir, un aparato muy sensible que detecta los humos de los escapes lanzados a la atmósfera.



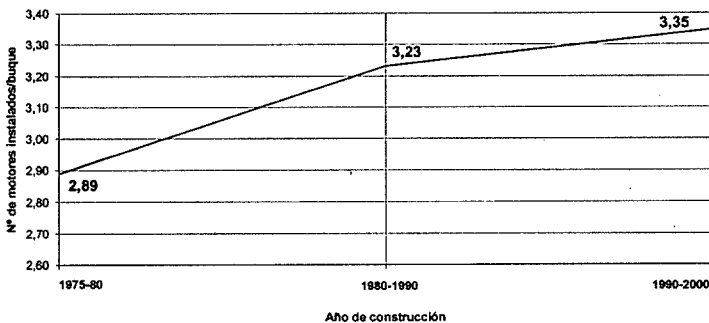
Principales sistemas de detección submarinos.

El problema del número de motores

Los submarinos suben a cota *snorkel* para efectuar la carga de baterías, proceso que debe ser lo más rápido posible para evitar la detección del *snorkel*, de los humos diesel o del sonido producido por la hélice o por los propios motores. Hasta la década de los 80, la tónica normal era equipar cada submarino con dos grupos diesel generadores de alta potencia. A partir de esta década surgen dos filosofías totalmente diferentes: la centroeuropea, liderada por los alemanes, que preconiza la subdivisión de la potencia total instalada en un mínimo de tres grupos diesel generadores, aun cuando el número ideal sea cuatro. Por otra parte, las filosofías francesa y sueca preconizan la utilización de sólo dos grupos generadores. Tanto una como otra teoría tienen sus ventajas y sus inconvenientes, pero permítanme decir que la teoría centroeuropea parece más sensata y asegura la operatividad del buque incluso en condiciones extremas.

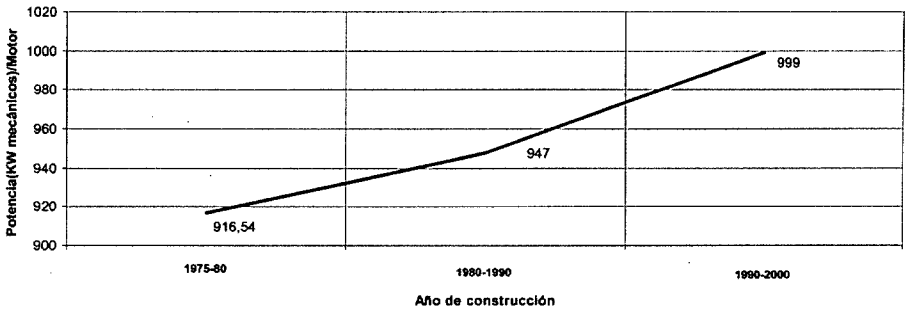
Imaginemos que disponemos de un submarino equipado con dos grupos diesel generadores, capaces de a plena potencia (P) cargar las baterías del buque en un tiempo (T). Si por cualquier causa uno de los grupos queda inoperativo, la máxima potencia disponible a bordo sería de $P/2$, y con esta potencia el tiempo necesario para cargar las baterías sería aproximadamente de $2T$, con lo que las probabilidades de detección aumentan al doble de las existentes en la condición normal de navegación. Si por el contrario suponemos un submarino en que la potencia total (P) se ha subdividido en cuatro grupos diesel generadores, la avería de un grupo supondría que el buque podría disponer de $3/4$ de P, con lo que el tiempo necesario para cargar las baterías sería de $4/3$ de T; es decir, el tiempo aumentaría en un 33 por 100, cifra muy inferior al 100 por 100 necesario en el caso de buques equipados con dos grupos diesel generadores. Resumiendo, con la subdivisión de la potencia total en tres o cuatro grupos se gana fiabilidad, discreción a la detección del buque y seguridad operativa. Con la teoría de instalar solamente dos grupos generadores lo único que se gana es un ahorro en el mantenimiento de los motores, que no compensa los riesgos inherentes a tal disposición.

Como demostración de lo que acabamos de leer, a continuación se dan las curvas indicadoras del número de motores instalados por buque y la potencia



de cada uno de los motores instalados en el curso de los años 1975-1980; 1980-1990; 1990-2000, que son bastante explícitas en cuanto a resultados.

En los años 1975-1980, distorsiona la cifra de motores instalados por buque, que deberían ser dos, los submarinos vendidos por el constructor HDW alemán, equipados con motores tipo 493, así como los submarinos italianos del tipo *Sauro*, equipados con tres grupos diesel generadores. Si se estudia la potencia de cada motor instalado a lo largo de este cuarto de siglo, se obtienen los siguientes resultados:



Los resultados de este gráfico son también bastante elocuentes: la potencia de cada uno de los motores instalados ha ido aumentando a lo largo del tiempo, pasándose de los poco más de 900 kW/motor a los 1.000 kW actuales. Estos gráficos se han obtenido tomando como base todos los submarinos no nucleares construidos en el periodo 1975-2001, con un total de 191 buques, con más de 215.000 kW mecánicos instalados. En este estudio, los únicos países que siguen la teoría de dos motores por buque son: Francia (con los buques serie *Agosta*), Japón (que tradicionalmente ha utilizado esta disposición) y Suecia (aunque en este último caso es necesario indicar que adicionalmente a los grupos diesel generadores los buques suecos llevan instalados desde 1980 motores tipo Stirling, como sistema AIP). Merece también destacarse que en los últimos años se están construyendo varios submarinos con células de combustible como AIP, aunque siempre dotados con grupos diesel generadores.

El resultado tangible de este estudio es que, salvo Francia y Japón, todos los demás países siguen la filosofía de subdividir la potencia total instalada en un mínimo de tres y un máximo de cuatro grupos diesel generadores por buque.

La elección de motor

Para la elección de los motores diesel apropiados para un submarino, deben tenerse en cuenta los siguientes puntos:

- El consumo específico de combustible es mucho menor en los motores sobrealimentados por gases de escape que en los motores con sobrealimentación mecánica o mixta (240 g/kWh frente a valores del orden de 275 g/kWh).
- Las condiciones ambientales de referencia usadas para la comparación deben ser las mismas. Para esto es preciso tener en cuenta que en los motores con silencioso de gases de escape incorporado al motor la contrapresión de escape, normalmente se mide a la salida del silencioso, que es 100 mbar superior a la contrapresión de escape a la salida de las turbosoplantes. Para hacer una comparación real, será preciso aumentar en los motores con sobrealimentación mecánica o mixta la contrapresión de escape a la salida del motor en 100 mbar (la pérdida correspondiente al silencioso), o bien, en los motores sobrealimentados por gases de escape disminuir la contrapresión de escape en esos mismos 100 mbar anteriormente indicados.
- Otro factor importante es la temperatura del agua salada. Normalmente en motores con sobrealimentación mecánica o mixta esta temperatura del agua salada es de 25° C, en tanto que para los motores con sobrealimentación por gases de escape, este valor es de 35° C. Una comparación real y seria debe tener en cuenta esta diferencia de temperatura en el agua salada.
- El peso es un factor esencial a la hora de seleccionar el motor. Normalmente, los motores con sobrealimentación mecánica o mixta son más pesados que los motores con sobrealimentación por gases de escape. Si a esta diferencia le añadimos el peso del silencioso de gases de escape, que está incluido en el peso del motor con sobrealimentación por gases de escape, la diferencia es aún mayor. A título de ejemplo, podemos citar que un motor de 1.200 kW, con sobrealimentación por gases de escape y silencioso incorporado a motor, tiene un peso de 8.900 kg. Una máquina, con sobrealimentación mixta, de una potencia equivalente tiene un peso de 10.500 kg, cantidad a la que hay que añadir los 1.800 kg de peso del silencioso de gases de escape que en el primer caso está incorporado al peso del motor.
Por añadidura, dado que la velocidad en estos motores es mayor que en los de sobrealimentación mecánica o mixta, el alternador será también más liviano, con lo que el peso del grupo completo será bastante menor.
- El sistema de escape, con su silencioso, y las contrapresiones admisibles por el motor a cota *snorkel* constituyen otro de los factores esenciales en la selección del motor. Una característica deseable de los motores a instalar la constituye el hecho de que lleven silencioso de gases de escape montados sobre el motor. Este silencioso, refrigerado por agua salada, de forma simultánea, cumple con las siguientes funciones:

- Silencioso de gases de escape.
 - Refrigeración de los gases de escape hasta los 450° C. (Con ello se disminuye la firma térmica del buque)
 - Proporciona un volumen adicional para el arranque del motor contra las válvulas de escape del buque cerradas.
 - Es una seguridad contra las pérdidas de agua salada en el propio sistema de escape del buque.
 - Como ya se ha citado anteriormente, en estas máquinas con sobrealimentación por gases de escape se garantiza una contrapresión de escape de 1.600 mbar después del silencioso, lo que significa que la contrapresión existente después de las turbosoplantes es de 1.700 mbar.
 - Durante las maniobras de arranque, el motor es capaz de arrancar con contrapresiones de escape de hasta los 2,5 bar, en contra de lo que ocurre con los motores sobrealimentados mecánicamente o de forma mixta, en que este valor de contrapresión de escape máxima admisible en el arranque alcanza a duras penas el valor de dos bar.
- El sistema de regulación del motor y el LOP (*Local Operating Panel*) son otros elementos fundamentales que tienen una influencia decisiva en el proceso de selección. Los motores con sobrealimentación por gases de escape tienen un sistema ECS-UNI de regulación, que está montado en el propio silencioso de escape. Este sistema es plenamente redundante, incluyendo el LOP; ello implica en la práctica que existen dos reguladores sobre el motor, el principal o ECS-UNI principal, y uno secundario o de *back-up*, que sólo entra automáticamente en funcionamiento cuando en el primero surge algún problema. Por otra parte, el LOP consta de dos monitores para el registro de señales analógicas y digitales, con pulsadores de selección para cualquiera de los parámetros medidos.
- Los motores de este tipo suelen llevar doble sistema de arranque; el tradicional de aire directamente inyectado en la cámara de combustión a través de una válvula principal de aire de arranque y de un distribuidor de aire, y un sistema secundario, consistente en un motor neumático cuyo piñón engrana con la rueda dentada del volante. De esta forma, el arranque está asegurado aun en el caso de fallo de uno de los dos sistemas instalados.
- Firma acústica y de vibración. Pocos factores tienen una influencia tan decisiva a la hora de elegir un motor diesel para submarinos. El hecho de disponer de unas firmas bajas, tanto acústica como de vibraciones, implica que el buque será más difícilmente detectable y, consecuentemente, su seguridad en condiciones operativas será mayor.

A este respecto, y como ejemplo, se dan a continuación las curvas de ruido aéreo típicas de un motor con sobrealimentación por gases de escape y de otro con sobrealimentación mixta. Las condiciones de referencia son las mismas, y una mera comparación de ambas arroja los siguientes resultados:

- El motor con sobrealimentación mixta presenta unos grandes márgenes de tolerancia en el ruido aéreo.
 - Aun tomando el valor mínimo del ruido aéreo del motor con sobrealimentación mixta, el motor con sobrealimentación por gases de escape presente niveles de ruido mucho menores.
- En general, los motores sobrealimentados por gases de escape presentan las siguientes ventajas:
- Los motores con este tipo de sobrealimentación no necesitan accionar mecánicamente un compresor. Ello da lugar a que el consumo de combustible sea muy inferior al de los motores con sobrealimentación mecánica o mixta y, consecuentemente, es mayor su autonomía y su radio de acción.
 - Estos motores tienen también menor consumo de aceite lubricante.
 - Estos motores permiten mayores inclinaciones en funcionamiento.
 - Tienen un TBO muy alto para la aplicación de que se trata (9.000 horas de funcionamiento).
- Otros factores dignos de tener en cuenta en este proceso de selección son los siguientes:
- Es fundamental que los tacos elásticos de apoyo del motor diesel y del generador sean suministrados por el fabricante del motor.
 - Es recomendable disponer de un motor de diseño lo más compacto posible. Por ejemplo, la bomba de prelubricación debe estar montada sobre el motor.
 - Con objeto de disponer de un solo responsable del sistema, es preferible que el mismo suministrador pueda entregar el grupo completo, incluyendo generador y bancada. La experiencia ha demostrado en variadas ocasiones que si no hay un solo responsable del sistema suelen aparecer problemas técnicos, de coordinación, etc.
 - Los motores con sobrealimentación por gases de escape no necesitan equipo de arranque en frío debido a su buena capacidad de arranque para estos motores, incluso a bajas temperaturas.
 - Las válvulas de cierre rápido montadas en el motor permiten una parada muy rápida de éste en caso de emergencia.

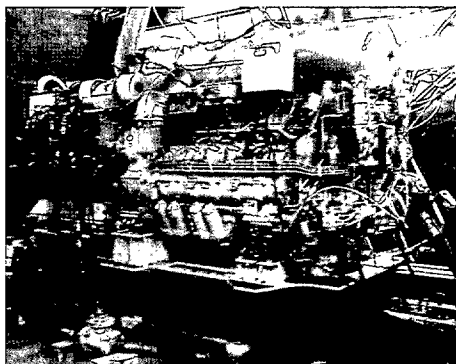
- Es importante que el suministrador tenga una larga lista de referencias con el mismo tipo de motor. Las experiencias de prototipos en buques de combate no son en sí mismas buenas, pero si el buque es un submarino suelen ser nefastas, como ha ocurrido en otras ocasiones.

Conclusiones

Después de cuanto se ha dicho, y haciendo el ejercicio de selección enunciado, se llega a la conclusión que las máquinas que mejor cumplen con los requisitos enunciados son los motores tipo 396 SE 04. Estas máquinas son las mismas que equiparán los nuevos submarinos tipo *Scorpene* que IZAR y DCN construyen para Chile, y para los que IZAR-Motores, merced a sus muy especiales relaciones con MTU, ha suministrado los grupos generadores.

Los numerosos ensayos a que han sido sometidos los grupos generadores han permitido, tanto al cliente final como a personal de IZAR-Cartagena y de la propia MGE, hacerse una idea precisa y adecuada de las bondades de diseño y funcionamiento de estos motores.

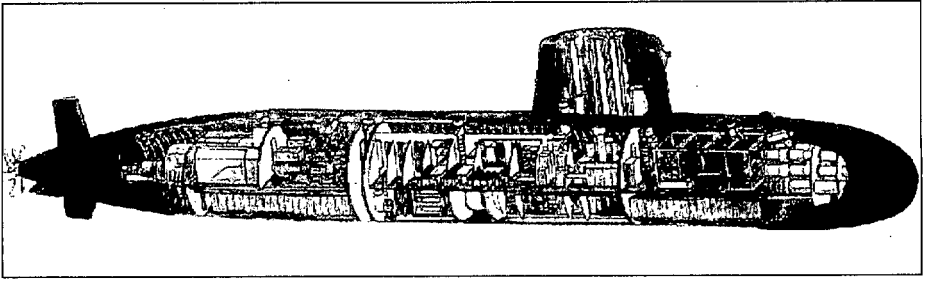
A mayor abundamiento, en el estudio realizado sobre los submarinos construidos entre 1975 y 2001, de los 544 motores instalados en los 191 buques construidos han sido motores MTU un total de 284 unidades, lo que implica que esta entidad ha tenido en este cuarto de siglo una cuota de todo el mercado de propulsión submarina del 52,20 por 100, llegando estas cifras en la última década a un total de 59 motores MTU instalados de un total de 79 motores



El banco de pruebas de IZAR-Motores con un grupo generador destinado a los submarinos chilenos *Scorpene*.

posibles en nuevos submarinos, lo que implica una cuota del 74,7 por 100. El aumento de tales porcentajes de motores MTU instalados en submarinos se ha incrementado como consecuencia de la óptima adecuación de estas máquinas a los submarinos de nueva generación, así como a los desarrollos técnicos habidos en los motores diesel.

Pese a que los sistemas AIP cada vez están más en uso en nuevas unidades de combate, y al hecho de que las grandes potencias navales están usando casi exclusivamente submarinos de propulsión nuclear, el motor diesel no ha cedido un ápice en su aplicabilidad a la propulsión submarina. Tanto los buques equipados con células de combustible como aquellos

Sección de un submarino *Scorpene*.

que llevan motores de ciclo Stirling confían la propulsión en régimen de crucero a grupos generadores equipados con motores diesel. En cuanto a los submarinos nucleares, todos ellos llevan grupos diesel generadores de emergencia, aun cuando existen dos teorías al respecto: la Marina norteamericana, Rusia y Francia usan grupos diesel generadores con mínima capacidad operativa en condiciones de *snorkel*; por el contrario, la Marina británica y China han optado por la alternativa de que los grupos diesel generadores sean exactamente iguales a los instalados en los submarinos convencionales, de forma que incluso en condiciones severas de *snorkel* puedan trabajar los motores diesel y proceder a la carga de baterías.

Es lógico pensar que en los próximos años los sistemas AIP experimentarán un gran auge y se perfeccionarán hasta los límites deseados por los usuarios; pese a ello, el motor diesel seguirá teniendo un papel destacado en la propulsión de submarinos, lo que hace prever nuevos desarrollos técnicos en este campo.



BIBLIOGRAFIA

- ALDECOA, M. de: *Combustión en circuito cerrado*. I. N., 1952.
- BERLING, G.: *Die Entwicklung der Unterseeboote und ihrer Hauptmaschinenanlagen*. STG, 1913.
- CHICO GÁRATE, J. J.: *Combustión en circuito cerrado*. I. N., 1955.
- CHICO GÁRATE, J. J.: *Motores de C. L. en circuito cerrado para propulsión submarina*. I. N., 1955.
- DCN: *Les sousmarins Agosta et les nouveaux sousmarines*. 1996.
General Dynamics Electric Boat Division.
- Germanischer Lloyd Magazin: *Mobilis in mobile*. Agosto, 1988.
- HDW: *Die Entwicklung der Unterseeboote und ihrer Hauptmaschinenanlagen*.
Jane's Fighting Ships 1974-2001.
- MAZARREDO Y BEUTEL, L.: *Evolución de la Propulsión Naval Mecánica*, 1992.
- MC KEE (traducido por J. Manjón): *La propulsión por peróxido de hidrógeno*. I. N., 1947.
- NILSSON, H.: *Application of the Stirling engine to the propulsion of autonomous ROVS*. Sumer-gibles y submarinos. Subsea Defence Conference. Londres, 1985.
- PRIETO GARCÍA, J.: *Funcionamiento del motor Stirling y aplicaciones navales*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo, 1990.
- SEBALD, O. H.: *Medios de combate enanos, submarinos de las potencias del eje en la segunda guerra mundial*. I. N., 1952.
- Swedish Navy: *The building of submarines in Sweden, 1912-1997*.
- TECHEL, H.: *El Ictineo de Narciso Monturiol*. I. N., 1952.
- WEYERS: *Taschenbuch der Kriegsflootten, 1974-2000*.