

# LA TURBINA A GAS

## EN LA PROPULSION NAVAL

Por

Oscar PAREDES Vignolo  
Capitán de Fragata (I.)  
Armada de Chile

**E**l problema que tienen que enfrentar los Altos Mandos de las Armadas de los países de escasos recursos ha llegado a ser cada vez más agudo a medida que los Armamentos y los Equipos han ido aumentando en complejidad y en costos.

En la mayoría de los casos estos países entre los cuales estamos nosotros, han operado buques provenientes de la Armada de los EE.UU. y de Inglaterra, siendo el término medio de vida de ellos de alrededor de 25 años o más, lo que los hace estar totalmente obsoletos para una guerra moderna.

El hecho de que a estos países les sea económicamente imposible adquirir buques modernos de gran poderío, al igual que lo hacen las potencias navales de mayor categoría, ha inducido a algunos Astilleros a estudiar el diseño de un buque de guerra pequeño de gran poder ofensivo y que esté dentro de las posibilidades económicas de esos países a los cuales no les interesa la adquisición de buques mayores, ya sea porque no tienen necesidad de adquirirlos o porque no pueden hacerlo.

Estos nuevos diseños se basan principalmente en la adopción de la Turbina a Gas como propulsión básica, lo que permite aprovechar el espacio disponible en llevar una mayor cantidad de armamen-

to, de preferencia proyectiles dirigidos, como asimismo una mayor cantidad de combustible.

Condiciones esencialmente económicas permiten llegar a la conclusión que la Turbina a Gas ha incursionado en los buques de guerra para permanecer en ellos y no en forma experimental. Es la más compacta, la más altamente desarrollada y la que mejor se adapta a la automatización de las plantas propulsoras disponibles. Su moderado costo inicial y la simplicidad de su instalación reducen los costos de construcción. El poco peso, volumen y lo compacto de la instalación ofrecen al Arquitecto Naval una gran libertad para su localización, resultando con esto un uso más eficiente del espacio a bordo.

En base a estas consideraciones, fundamentalmente económicas es que se abordará en su primera etapa el desarrollo de este tema para después ampliarlo sobre las Turbinas a Gas esencialmente navales en uso.

### **I.—Análisis de la importancia de la Planta Propulsora en el diseño de un buque de guerra pequeño.**

#### **A.—Componentes principales del diseño de un buque de guerra.**

El diseño de un buque de guerra debe efectuarse teniendo siempre presente que

LA TAREA.

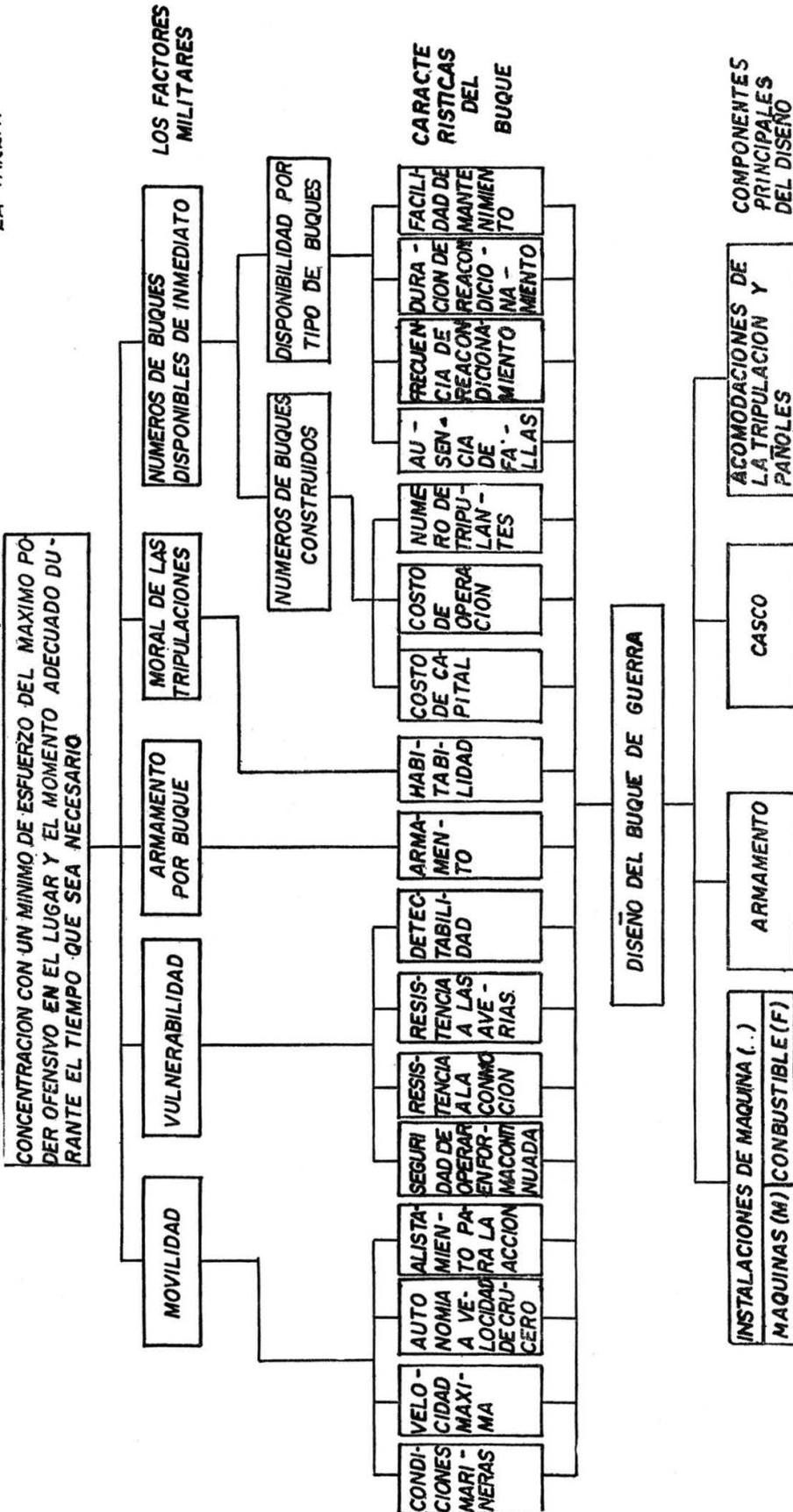


Fig. 1. Influencia del Diseño Sobre los Factores Militares.

pueda cumplir con la tarea que el Alto Mando le haya asignado.

El conjunto de estas Tareas deberá permitirle a la Armada poder cumplir con su Misión, vale decir, ejercer el Poder Naval.

La figura N° 1 ilustra la definición de esta Tarea que no es más que una definición del ejercicio del Poder Naval, sobre cinco factores claves.

Muestra además en qué forma estos factores claves son a su vez dependientes de las características del buque.

Cuatro de estos factores son materiales, a saber: movilidad, vulnerabilidad, armamento por buque y número de buques; mientras que el quinto es psicológico. Los factores materiales dependen todos directamente de las características del buque y aún el quinto, la moral, depende hasta cierto punto de las características, como se demuestra en la figura.

Estas características derivan hacia una o más de las cinco componentes principales en las cuales, para conveniencia de este trabajo, se ha decidido subdividir el diseño de un buque de guerra. Las componentes elegidas, sus definiciones y el porcentaje aproximado, del peso de cada componente con relación al desplazamiento total del buque para diseños de entre 1.000 a 3.500 toneladas de desplazamiento, son las siguientes:

- 1.—Casco— el peso estructural del casco y todos los accesorios subordinados a los equipos, armamento, maquinaria distribuidos en todo el buque 40 a 50% del T.
- 2.—Maquinaria— la maquinaria principal de propulsión, los generadores eléctricos y la auxiliar 15 a 20% del T.
- 3.—Estanques para combustible— capacidad total de almacenaje de combustible 10 a 20% del T.
- 4.—Armamento— todo el armamento que se lleva, incluyendo cañones, lanzadores de misiles, armamento antiaéreo y antisubmarino, munición, equipo de reconocimiento de contramedida y observación 7 a 15% del T.
- 5.—Tripulación— acomodaciones para la tripulación y pañoles de consumos con un 5 a 15% del T.

De estas cinco componentes, el casco existe únicamente para transportar a las otras cuatro y se ve, por cierto, afectado por ellas.

También hace la mayor contribución al desplazamiento, de manera que podría ser considerado un objetivo valedero para la economía. En verdad, mediante la utilización de aceros especiales, mejor diseño estructural y fórmulas más sofisticadas de diseño, se están logrando permanentemente pequeñas economías. Debe comprenderse, no obstante, que el peso en acero y aluminio del casco a menudo sólo constituye una mitad del peso total agrupado bajo el término "casco", de modo que, excepto por la introducción de superestructuras de aluminio y de mamparos internos de aluminio en puntos en que no sea necesaria una mayor resistencia, el campo para proporcionar economías importantes de peso en el diseño del casco ha llegado virtualmente al punto en que esto sólo puede lograrse a expensas de su resistencia, lo que claramente es inconveniente. Salvo por una técnica revolucionaria, tal como el empleo masivo de fibra de vidrio o de titanio como material estructural para cascos de buques, es muy poco lo que se puede lograr en el presente en lo que respecta a economías de peso en el gran porcentaje que representa el casco del buque.

La directa dependencia de la capacidad para almacenaje de combustible en los requerimientos de autonomía exigidos por el cumplimiento de la Tarea asignada al buque y el consumo específico de combustible de la Planta Propulsora seleccionada, hacen lógico combinar el peso de la instalación de maquinaria y el peso del combustible como una sola variable "M + F" con una gama del 30 a 45 por ciento del total del tonelaje de desplazamiento. Inmediatamente se hace evidente la influencia dominante de un buen diseño de instalación de la maquinaria, ya que sólo pueden esperarse aumentos en el peso del armamento montado si se logran reducciones de peso en "M + F" y, es obvio que economías menores en esta gran área puedan dar por resultado grandes aumentos porcentuales en el armamento llevado.

Desgraciadamente el problema no es en modo alguno tan simple como esto, debido a la necesidad de mantener una buena estabilidad del buque. En general, el armamento con excepción de la Santa Bárbara, está ubicado en los niveles altos del buque y exige espacio en la cubierta superior, dando por resultado un mayor peso en la superestructura. Economías en "M + F", proviniendo, como es lógico, desde las partes más bajas del buque, pueden tener un efecto adverso sobre su estabilidad. En esta forma se hace evidente la importancia del centro de gravedad de la maquinaria más el combustible, en el diseño del buque y este parámetro forma una parte importante del análisis detallado de toda instalación de la maquinaria.

Hasta aquí sólo se han discutido los aspectos de peso de las cinco componentes principales del diseño del buque; pero los aspectos de espacio son igualmente importantes y si la componente del casco, que comprende la envoltura y los mamparos de subdivisión, etc. del buque, no se consideran, la gama de la contribución de las cuatro componentes restantes para el volumen encerrado por el casco y la cubierta es:

1.—Maquinaria	30-50 %
2.—Estanques de combustible	5-10 %
3.—Armamento	7-16 %
4.—Acomodaciones para la tripulación y pañoles	25-35 %

Estos porcentajes al igual que los relacionados con el peso, señalan la importancia primordial del espacio ocupado por la maquinaria más el combustible, que, en conjunto, en algunos buques puede representar más el 50% del volumen. Además la maquinaria invariablemente ocupa una porción central del buque por razones de adrizamiento y de tamaño y para permitir las líneas finas hacia popa. Esta es una excelente ubicación desde el aspecto de espacio para la tripulación y equipo.

## B.—Características de la Instalación de la Maquinaria

El arte del diseño de un buque reside en la selección de una sensata solución de compromiso entre las diversas carac-

terísticas de una instalación de maquinaria naval para satisfacer los requerimientos del Alto Mando en cualquier tipo determinado de buque de guerra. El profundo conocimiento de estas características, algunas de las cuales son independientes y otras están relacionadas, y de la forma en que éstas influyen en los factores militares de los cuales depende el cumplimiento de la Tarea es vital para lograr el éxito del diseño.

La figura N° 2 muestra en forma diagramática esta relación y resalta claramente la gran influencia que tiene el diseño de instalación de la maquinaria naval sobre la efectividad que se puede lograr en los cinco factores militares.

Las diecinueve características, conjuntamente con sus derivaciones asociadas, pueden ser subdivididas en primarias y secundarias como se indica a continuación:

### 1.—Primarias

Potencia instalada, velocidad máxima, autonomía.  
 Capacidad generadora eléctrica instalada.  
 Detectabilidad nivel de ruidos.  
 Resistencia a la conmoción.  
 Resistencia de averías del casco.  
 Facilidad de mantenimiento a bordo.  
 Facilidad de operación.  
 Frecuencia de los reacondicionamientos.  
 Seguridad, ausencia de fallas.

### 2.—Secundarias

Peso de la maquinaria y centro de gravedad.  
 Volumen de la maquinaria.  
 Peso del combustible y centro de gravedad.  
 Espacio de almacenaje para el combustible.  
 Resistencia, capacidad para seguir operando.  
 Costo de capital inicial.  
 Dotación de la sala de máquinas.  
 Duración de los reabastecimientos en bases.  
 Velocidad de reacción.

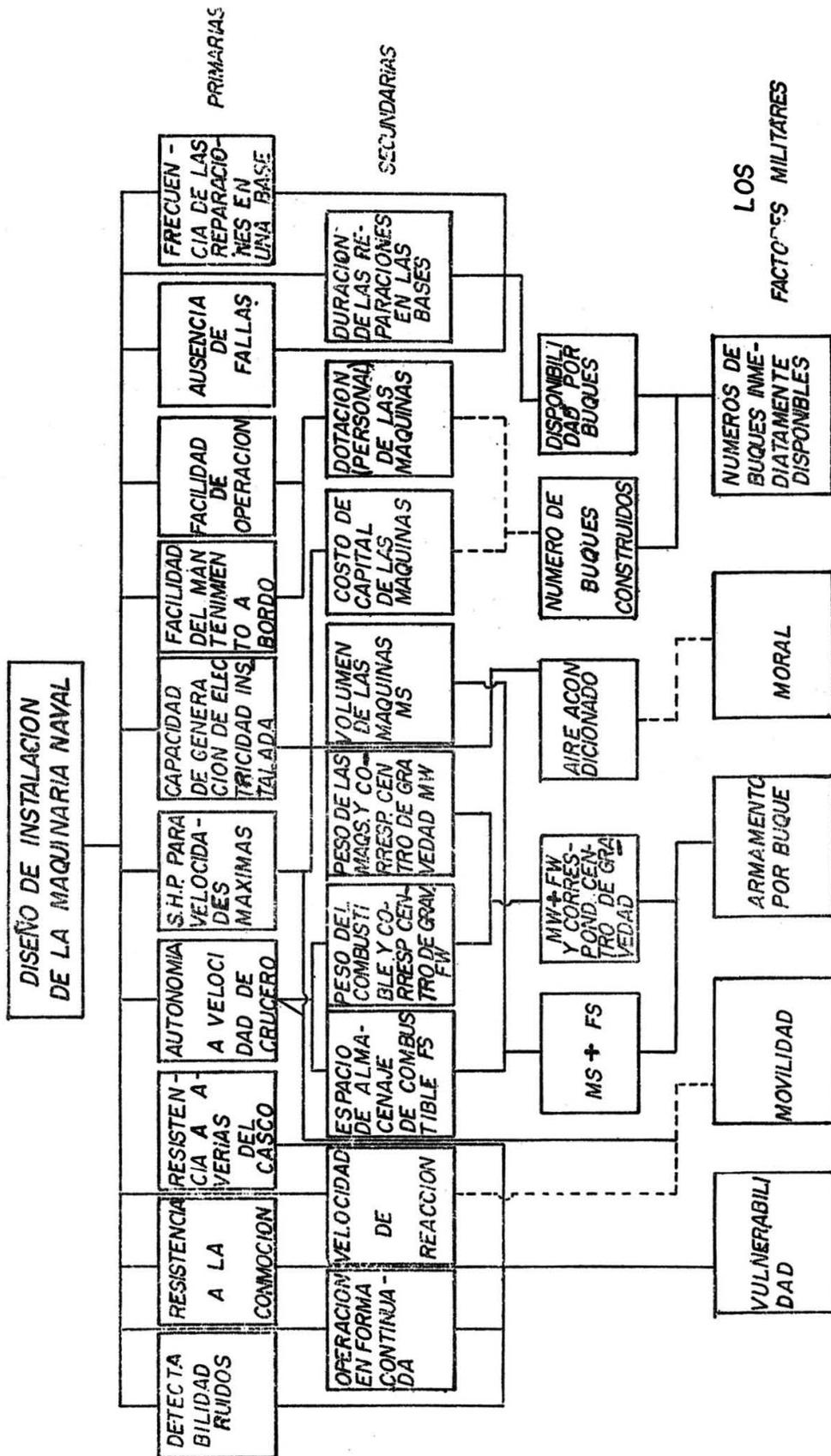


FIG.2

Fig. 2. Característica de Instalación de la Maquinaria.

En general un diseño procura, como primer paso, satisfacer las características primarias y, al así hacerlo, desarrolla los parámetros secundarios, de los cuales los cuatro primeros afectan decisivamente al diseño integral del buque de guerra en su etapa evolutiva inicial. Existe, por cierto, la espiral usual de diseño y solución de compromiso entre requerimientos conflictivos antes de la selección final de la maquinaria.

### C.—La Fórmula "M + F" (Maquinaria + Combustible) en el diseño

La forma analítica usual de abordar aquellas instalaciones de maquinaria capaces de satisfacer las características primarias ha sido empezar con una evaluación del peso de la maquinaria más el combustible, que ya se ha designado con la expresión "M + F". En esta expresión se supone que el peso de la maquinaria y del combustible son intercambiables y el objeto del estudio es obtener un porcentaje tan bajo del desplazamiento total del buque como lo permitan las características primarias. El efecto que las necesidades de velocidad máxima y autonomía exigidas por un Estado Mayor tienen sobre este porcentaje, son evidentes, y este porcentaje variará considerablemente con estas exigencias y con el tipo y tamaño del buque que se necesita. Otra influencia importante es el consumo de la Planta Auxiliar y en especial el requerimiento de capacidad generadora eléctrica.

Para cualquier buque específico la gama de variación en "M + F", si ha de lograrse un buen diseño, es relativamente reducida, y si esta cifra se designa por K, existen entonces en líneas generales dos formas extremas de abordar la producción de un diseño adecuado que pueden ser representadas matemáticamente por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} M + f &= K \\ m + F &= K \end{aligned}$$

donde el peso de la maquinaria está representado por M (pesada) y m (liviana) y el peso del combustible por F (grande) y f (pequeño). Implícitamente en estas dos ecuaciones está la suposición de que la maquinaria más pesada y compleja tiene un mejor consumo específico de

combustible y, por tanto, requiere menos almacenaje de combustible que la maquinaria liviana sencilla.

Naturalmente ésta es una generalización muy amplia y, por supuesto, se pueden encontrar excepciones, pero cuando se trata de instalaciones de maquinaria naval esta aproximación no está demasiado descartada. Un ejemplo clásico es la propulsión nuclear en que la componente de combustible se ve virtualmente eliminada.

Normalmente se busca la fórmula M + f de abordar el problema ya que ésta mantiene bajo los requerimientos globales de combustible para una Fuerza de Tarea, reduciendo así los requerimientos logísticos en un teatro de operaciones, tanto en lo que concierne al almacenaje en tierra como al número de buques tanques. También se reducen los períodos de reabastecimiento en la mar, que siempre constituyen una posición en exceso vulnerable. Además hay que considerar los efectos de estabilidad que resultan del vaciado de los estanques de combustible. Un factor adicional, pero de poca importancia para los buques de guerra a diferencia de los mercantes, es el costo relativamente bajo de operación en lo concerniente a combustible en tiempo de paz.

En ausencia de grandes desventajas la fórmula M + f es indudablemente la mejor forma de abordar en forma inicial un diseño.

Sin embargo en los últimos años ha habido una creciente tendencia en el sentido de que los diseñadores analicen críticamente las ventajas de obtener una mejor eficiencia termodinámica contra las desventajas resultantes de la complejidad de diseño al incorporar intercambiadores adicionales de calor, etc.

La figura N° 3 nos muestra diversos valores de  $(M + F) / \Delta$  para diferentes tipos de plantas propulsoras, excluyendo la maquinaria de propulsión nuclear, de un buque de guerra pequeño planteado frente a los requerimientos de autonomía. Cuando la autonomía es cero, no se requiere de combustible y la ordenada sobre el eje "Y" representa el peso de las máquinas. La inclinación de las diversas curvas de tipo de planta de má-

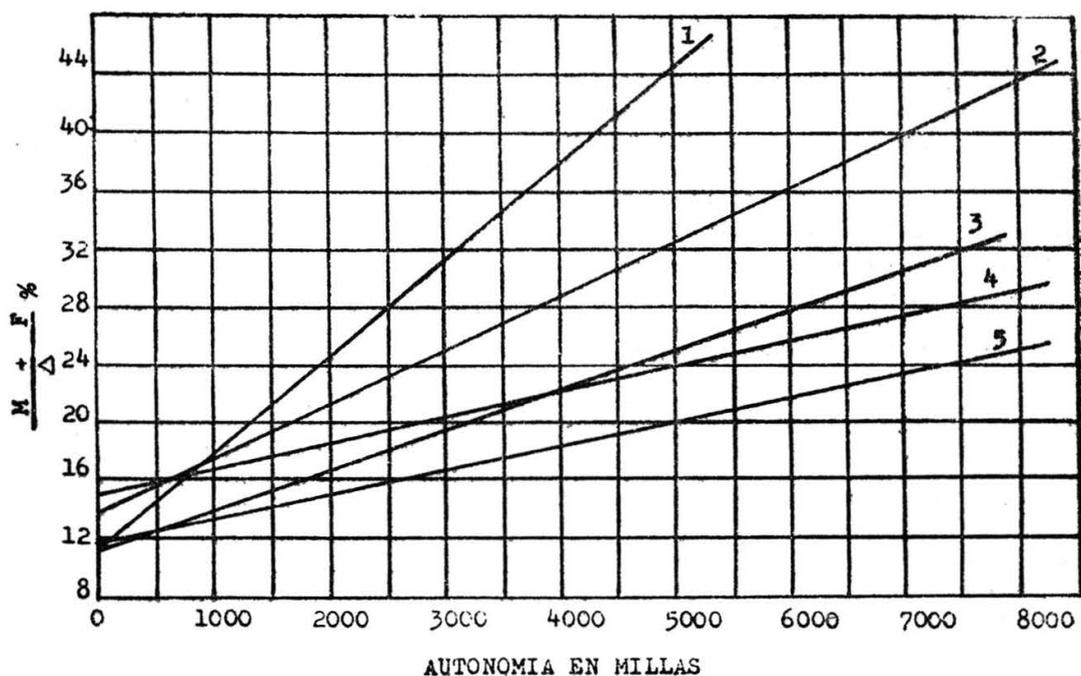


Figura N°3  $\frac{M + F}{\Delta}$  / autonomía para buques pequeños



#### TIPO DE PROPULSION DOS HELICES

- |                       |                |
|-----------------------|----------------|
| 1.—Turbina a gas pura | 4.—Diesel puro |
| 2.—Vapor solo         | 5.—CODOG.      |
| 3.—COGOG              |                |

quinas es directamente proporcional al consumo de combustible de cada una de las plantas. Como podría esperarse, la instalación de turbina a gas es la más liviana, pero tiene el más alto consumo específico de combustible. Los puntos de encrucijada representan, por tanto, aquellos valores de autonomía a los cuales una planta de turbina exclusivamente a gas deja de tener una ventaja global de peso  $M + F$ . De las plantas ilustradas, sobre la base de un análisis puramente de  $M + F/\Delta$ , el tipo de planta CODAG/CODOG, es el más atractivo cuando el radio de acción debe ser una de las características primarias más importantes.

**D.—La simplicidad en el diseño**

El diseño de instalación de las máquinas, al igual que todos los demás debe perseguir el objetivo primario de seguridad si se desea obtener un éxito final, y el mejor camino a seguir para lograrlo

es la simplicidad. Esto, esencialmente, significa reducir un diseño al menor número de componentes básicos. Lógicamente estas componentes deben a su vez ser simples, de lo contrario las ganancias obtenidas mediante la reducción del número se verán frustradas.

Por cierto, desde el punto de vista naval esta filosofía podría ofrecer desventajas, a saber:

Elevado consumo específico de combustible, ya que la simplicidad a menudo significa la ausencia de ciclos complicados y de intercambiadores de calor.

Capacidad de reserva; en muchos casos se puede simplificar el diseño de un sistema reduciendo el número de elementos de reserva, pero sólo al riesgo potencial de reducir la disponibilidad operativa y la seguridad. Estas consideraciones dependen hasta cierto punto, del tipo

de planta seleccionada. No obstante, la simplicidad puede contribuir significativamente a reducir los requerimientos de mantenimiento, potencial humano, de costo inicial y control. Además con un menor número de componentes se puede dedicar un mayor esfuerzo al desarrollo de mayor eficiencia en las restantes.

Es por estas razones que las plantas propulsoras compactas, como el motor diesel y la turbina a gas, están recibiendo la acogida de los diseñadores navales.

### E.—Rendimiento del Capital Invertido

La necesidad de que una Armada obtenga el "rendimiento adecuado del dinero invertido" es tan esencial como lo es para cualquier directorio en una empresa comercial. En tiempo de paz, los presupuestos de defensa son severamente limitados y la efectividad del costo debe ser aplicada a todo diseño, vale decir si cumplirá con la Tarea encomendada y por cuánto.

La conciencia de la descomposición del costo de las principales componentes de un buque es tan importante como en los aspectos de peso y espacio. Para buques pequeños, los principales grupos de ítem pueden distribuirse como sigue:

- |   |           |
|---|-----------|
| 1.—Casco, incluyendo pañoles de consumos y acomodaciones para la tripulación. | 25 - 35 % |
| 2.—Máquinas   | 22 - 30 % |
| 3.—Equipo eléctrico   | 7 - 8 %   |
| 4.—Armamento  | 40 - 50 % |

Como una cifra aproximada, los costos actuales de un buque de guerra son del orden de £ 4.000 por tonelada, de manera que hay un marcado incentivo económico en favor del diseño del buque más pequeño que pueda satisfacer los requerimientos de una Armada y, una vez más, un buen diseño de instalación de la maquinaria juega un importante papel en esta tarea.

Los costos operativos así como los costos iniciales influyen sobre la efectividad integral de costo de cualquier diseño naval y vale la pena observar que una descomposición aproximada de costo para un buque de guerra pequeño en tiempo de paz es más o menos lo siguiente:

- |   |      |
|---|------|
| 1.—Costos de mantenimiento y reparaciones | 60 % |
| 2.—Costos producidos por la tripulación   | 31 % |
| 3.—Costos de combustible                  | 9 %  |

Las áreas susceptibles de mejorar son claramente los costos de mantenimiento y reparaciones y las producidas por la tripulación. Por lo tanto, si ciclos termodinámicos "ineficientes" indican atracciones en otras áreas, o sea, mantenimiento de bajo costo, potencial humano más reducido y mayor disponibilidad, éstas no pueden ser descartadas en seguida, ya que los gastos por combustible no constituyen una parte significativa de los costos operativos globales.

## II.—SELECCION DE LA PLANTA DE PODER

### A.—Instalación de Turbina de Gas Pura

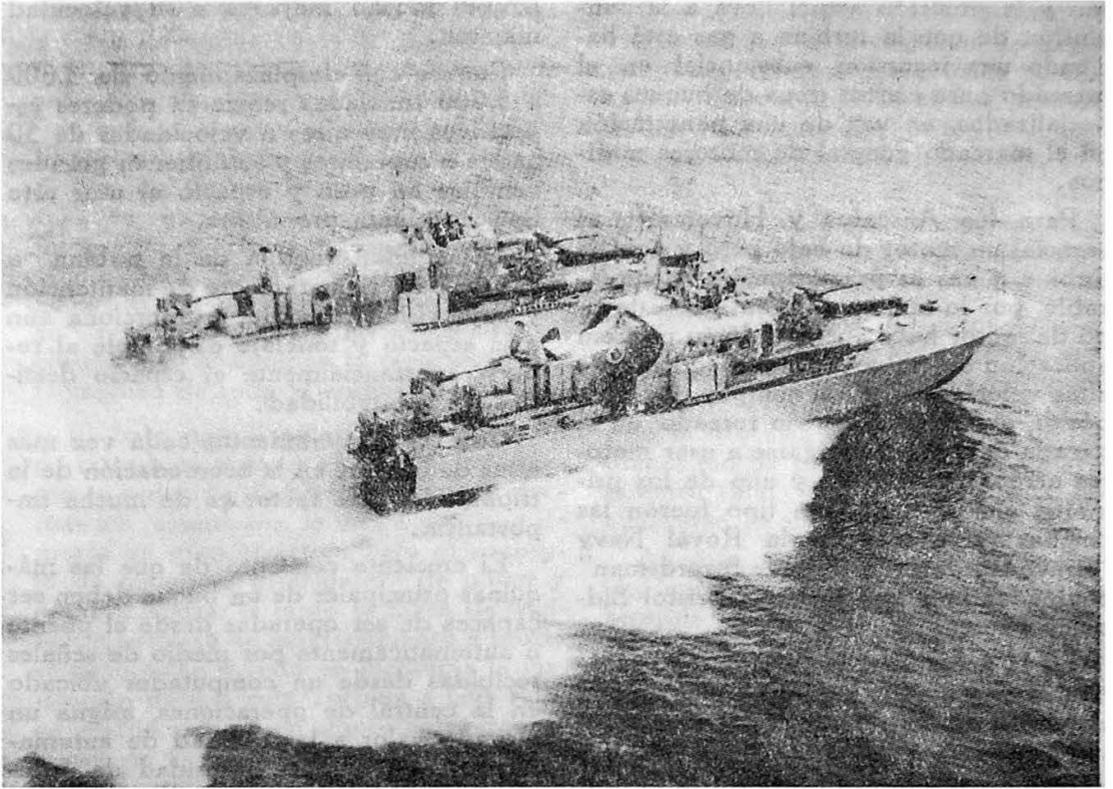
Desde hace muchos años se han tratado de usar las Turbinas a Gas para la propulsión naval. Muy poco progreso se logró al efectuar la competencia con voluminosas turbinas a gas, especialmente diseñadas.

Estos fracasos se debieron en parte a las mejoras introducidas a la Turbina a Vapor, al rápido y excelente desarrollo del motor Diesel Marino de operación lenta y que no se aprovecharon las cualidades especiales de la Turbina a Gas que son su alto poder y poco peso. En los últimos años la situación ha cambiado debido a las crecientes necesidades navales para instalaciones de motores de alto poder específico y al hecho de que el motor de los actuales aviones a chorro proporciona un excelente punto de partida para perfeccionar el tipo de Turbina a Gas necesario para las Plantas a Flote.

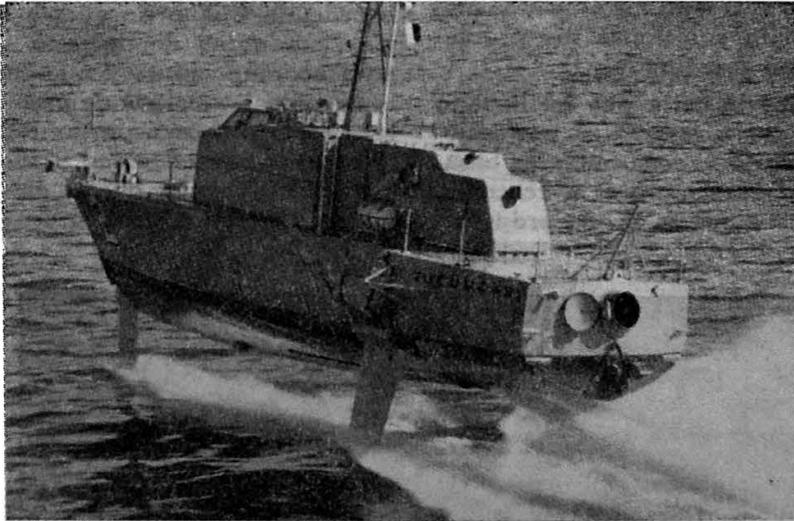
La popularidad de la Turbina a Gas actualmente descansa en dos aspectos:

Su capacidad sobresaliente para producir altos poderes en poco espacio y con un pequeño peso, su bajo requerimiento para mantención y supervisión a bordo.

A diferencia de los numerosos argumentos que se esgrimen para hacer valer los méritos de las turbinas a vapor o de



Lanchas Torpederas H.M.S. "Brave Borderer" y "Brave Swordsman".



Aliscafo "Tucumcari" de la U.S.N. equipado con una turbina a gas Proteus.

los motores diesel para los cuales la decisión de adoptarlos depende de la evaluación de un gran número de ventajas y desventajas, en el caso de la turbina a gas su aceptabilidad depende de su superioridad abrumadora en cuanto a ta-

maño y peso, balanceada contra sus actuales deficiencias en otros aspectos, especialmente su alto consumo de combustible y su necesidad de petróleo de alto grado. Sin duda las deficiencias de la turbina a gas con el tiempo se minimiza-

rán y la situación actual lleva a la conclusión de que la turbina a gas está haciendo una incursión substancial en el mercado para ciertos tipos de buques especializados, en vez de una penetración en el mercado general de motores marinos.

Para los Aliscafos y Hovercrafts es esencial un motor de bajo peso y aquí la turbina a gas es prácticamente irremplazable, por lo tanto es natural que este tipo de motor haya encontrado su primera aplicación en embarcaciones pequeñas de altas velocidades. Para cumplir este propósito, el diseñador se vio forzado en la década del 50 a arriesgarse a usar motores aéreos convertidos y uno de los primeros ejemplos de este tipo fueron las lanchas torpederas de la Royal Navy "Brave Borderer" y "Brave Swordsman" equipadas con tres turbinas Bristol Siddeley Proteus.

En la actualidad la turbina a gas marina se está usando en forma más amplia en varias de las Armadas del mundo.

La operación de los motores en estos buques ha tenido sus inconvenientes, pero ello ha servido para tener una mejor comprensión de sus condiciones ambientales y ha sido necesario introducirles modificaciones para solucionar los problemas que se han presentado.

Esta experiencia es la que ha llevado a los fabricantes a apoyar el perfeccionamiento de motores más potentes basados en los actuales motores a reacción, usados en los aviones, a fin de propulsar

buques mucho mayores a su velocidad máxima.

Buques con desplazamiento de 3.000 a 5.000 toneladas requieren poderes específicos muy altos a velocidades de 30 nudos o superiores y se obtienen grandes ventajas en peso y espacio al usar este tipo de planta propulsora.

La segunda ventaja de la turbina a gas, su bajo requerimiento de mantención y supervisión a bordo, proporciona aún más espacio y tonelaje disponible al reducir substancialmente el espacio destinado a habitabilidad.

Con los requerimientos cada vez más altos de confort en la acomodación de la tripulación, este factor es de mucha importancia.

El creciente concepto de que las máquinas principales de un buque deben ser capaces de ser operadas desde el puente o automáticamente por medio de señales recibidas desde un computador ubicado en la central de operaciones, asigna un elevado valor a la facilidad de automatización. La urgente necesidad de reducir el potencial humano en los buques de la Armada puede ser apreciada fácilmente a través del hecho de que cada hombre de un buque de guerra necesita 30 pies cuadrados del espacio de cubierta para acomodaciones y que cada hombre representa 1 tonelada de peso. El proveer este espacio y transportar este peso por el océano a la velocidad y autonomía requeridas involucra que el casco, las máquinas y el combustible necesario tendrán



Hovercraft Tipo BH7 de 40 tons, propulsado por una turbina a gas Proteus.

un efecto combinado sobre el desplazamiento de varias veces la carga real de 1 tonelada por hombre que se lleva. Además las necesidades de vigilancia para una turbina a gas son más reducidas que para otras plantas motrices. La campaña en pro de un diseño que elimine tareas de mantenimiento a bordo de los buques de guerra se ha orientado claramente desde hace ya cierto tiempo, en el concepto de "reparaciones por reemplazo" y esta tendencia, llevada a su conclusión lógica, significa la reparación por reemplazo de toda la unidad propulsora.

El bajo peso específico, lo compacto de la turbina a gas y el número relativamente reducido de conexiones para efectuar los reemplazos, le dan a este tipo de motor un gran atractivo bajo el concepto de máquinas principales "de poner y sacar". Ahora, si tanto la tarea de vigilancia como la de mantenimiento a bordo se simplifican y reducen mediante la instalación de una sola Turbina a Gas Pura se podría pensar en importantes reducciones en el potencial humano con todas las economías consiguientes en el diseño del buque en general.

No obstante, pese a estas ventajas, subsiste cierta renuencia de parte de las Marinas para construir un buque de guerra con "turbina a gas pura". Los dos factores claves que siguen ejerciendo gran influencia en contra de la adopción de una instalación de esta naturaleza son:

- 1.—Temores concernientes a la seguridad a largo plazo de las turbinas a gas de operación continuada como la única planta de energía de un buque de guerra mayor. Hasta que no se obtenga mayor experiencia en la mar, estos temores no pueden ser confirmados ni desechados.
- 2.—Un consumo específico de combustible excesivamente alto a velocidades de crucero, lo que significa una operación más onerosa y un mayor apoyo logístico.

Para bajas velocidades y a velocidades de cruceros los requerimientos de poder específico del buque se reducen mucho siendo en la generalidad de los casos hasta un valor alrededor de  $1/4$  ó  $1/5$  de la potencia máxima.

Las características de la turbina a gas son tales que la navegación de Crucero no puede efectuarse en forma económica desacelerando la turbina a gas, debido al gran aumento en el consumo de combustible que ocurre bajo estas condiciones.

La figura N° 4 muestra las variaciones de consumo de combustible de acuerdo con el porcentaje de potencia empleado por una turbina a gas.

No debe estimarse sin embargo que el alto consumo específico de combustible de la turbina a gas a velocidades de crucero la descarta completamente como la planta motriz primaria, ya que es el parámetro total " $M + F$ ", el que debe analizarse en el diseño de buques.

Además, algunas turbinas a gas ya están logrando cifras de consumo de combustible bastante razonables cuando se las compara con plantas a vapor y existe también la posibilidad de utilizar el calor de descarga de la turbina a gas para mejorar aún más la eficiencia térmica integral del ciclo.

En ciertos casos, en que no se requiere una prolongada autonomía a potencia de crucero, una instalación de "turbina a gas pura" podría ofrecer indudables atractivos. No obstante, para nuestros fines que es producir un diseño para buque de guerra pequeño inmediatamente que incorpore turbinas a gas, un diseño de buque con turbina a gas pura sería un prototipo y pocos países están dispuestos a desempeñar el papel de "conejiillo de Indias".

## B.—PLANTAS DE PODER COMBINADAS

### 1.—Consideraciones Generales

Descartada la solución más sencilla, al diseñador le queda el concepto de la planta combinada si es que se desea aprovechar las ventajas de la turbina a gas. Estas Plantas de Poder combinadas no son una novedad y se han usado siempre en los buques, cuando una nueva fuente de poder estaba en desarrollo que ofreciera ventajas sobre la planta de poder existente, pero que no fuera tan decididamente superior como para que la

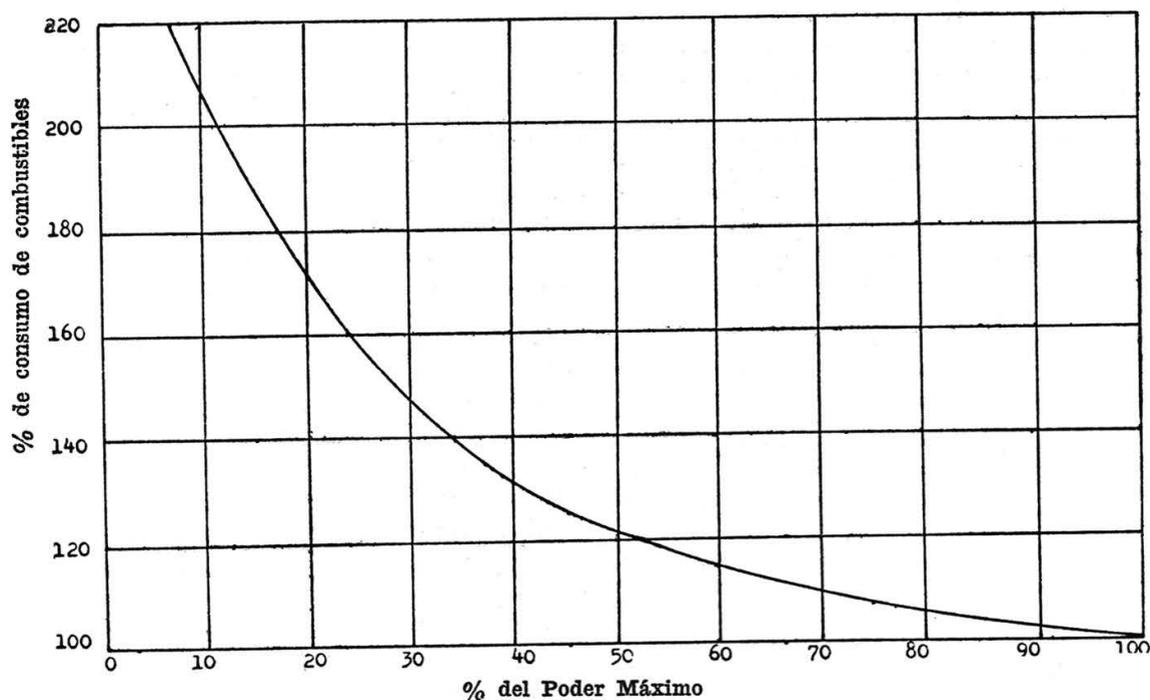


Fig. 4: Variación del consumo específico de combustible en una turbina a gas.

planta de tipo más antiguo pudiera ser abandonada de inmediato.

Como ejemplo se podría citar que los primeros buques a vapor no abandonaron del todo el velamen de sus mástiles.

Una planta de poder combinada se definirá como una instalación de máquinas que tenga dos tipos de poder propulsor principal conectados al eje de la hélice.

Hasta este momento los buques que han incorporado estas plantas combinadas han usado turbina a vapor y motores diesel en conjunto con turbinas a gas, como maquinaria para ser empleada a velocidades de crucero. En las instalaciones de los destructores de la Clase County y las fragatas de la Clase Tribal de la Royal Navy que están en servicio desde 1961, se tienen turbinas a gas y a vapor de poder similar y de hecho los buques son operados realmente como buques a vapor, usando las turbinas a gas sólo cuando se desea un rápido aumento de velocidad o para zarpar en forma inmediata sin la demora normalmente requerida para elevar presión.

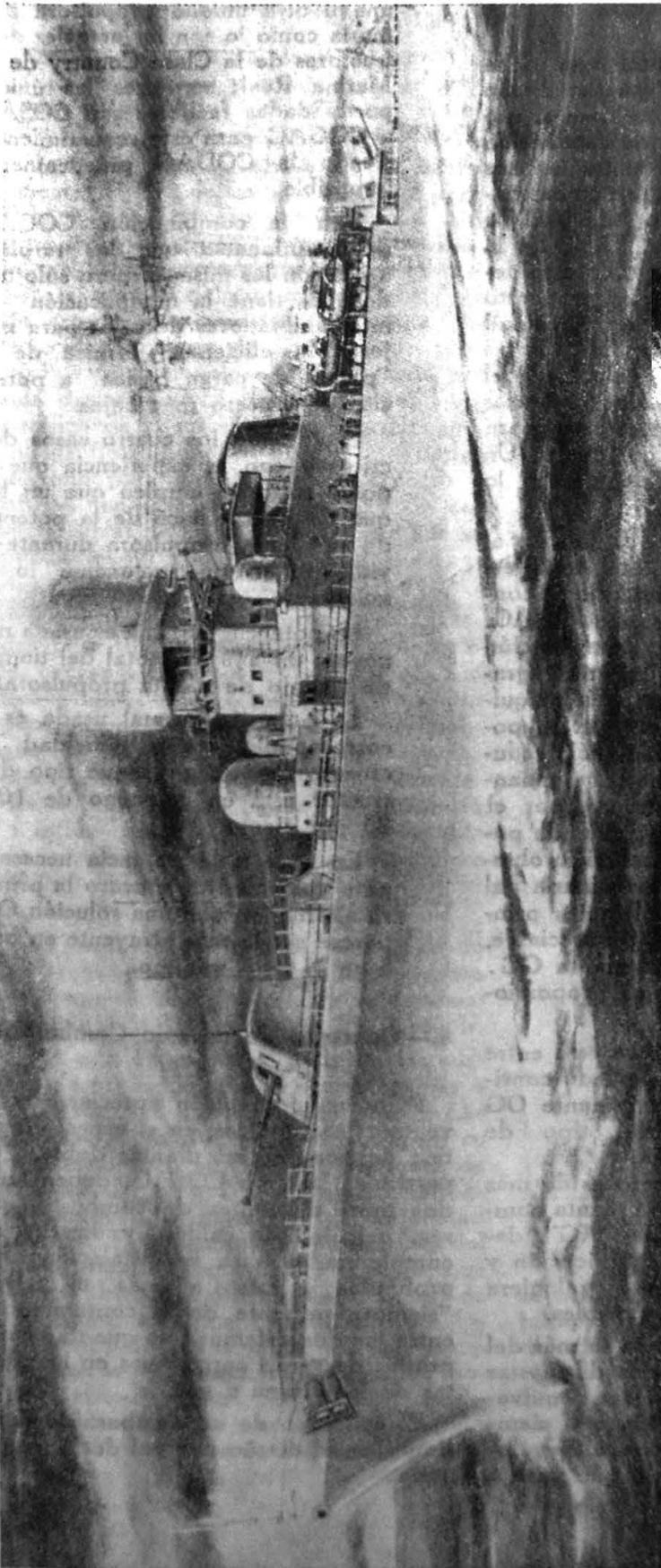
Aún se están considerando y construyendo nuevos buques con esta disposición en su propulsión como los destructores tipo 82 para la Royal Navy.

A medida que crezca la confianza en la turbina a gas, esta disposición de maquinaria será una excepción en vez de una regla.

## 2.—Tipos de Plantas Combinadas

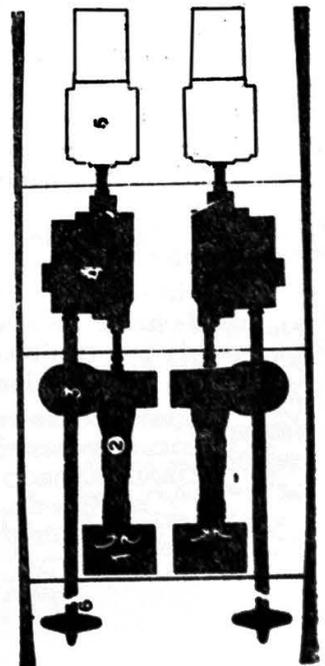
Algunos de los posibles tipos de plantas de poder combinadas que puedan utilizar turbinas a gas son:

- a.—COSAG Combinación vapor y gas
- b.—CODAG Combinación diesel y gas
- c.—CODOG Combinación diesel o gas
- d.—COGAG Combinación gas y gas
- e.—COGOG Combinación gas o gas
- f.—CONAG Combinación nuclear y gas



DISPOSICION DE LA MAQUINARIA

- 1.—Conducto de Admisión
- 2.—Turbinas a gas Olympus
- 3.—Descarga
- 4.—Caja de Engranajes
- 5.—Turbinas a Vapor
- 6.—Hélices



### 3.—Subdivisión de la Potencia

Una decisión fundamental que debe tomarse en la primera etapa del diseño de un buque cuando se considera el uso de plantas combinadas, es la subdivisión de la potencia a emplear entre las dos máquinas y si han de utilizarse ambas para lograr plena potencia, o sea, "AG" o sólo la más grande, o sea, "OG". En la etapa de factibilidad del estudio esto depende del tamaño del buque propuesto y de los requerimientos de velocidad máxima y de crucero. El primer paso es estimar la curva de poder/velocidad del buque, en el cual se leen las potencias máximas y de crucero necesarias para satisfacer estos requisitos operativos. Un rápido análisis podría adelantarnos lo siguiente:

- a.—Si el poder de crucero es inferior al 20% de la potencia total, debe estudiarse con mucho cuidado la conveniencia de una combinación AG, ya que ello implica la complicación de combinar en una caja de engranajes simultáneamente dos máquinas diferentes para obtener la potencia total, consiguiendo sólo reducidas ventajas a saber; la ganancia en velocidad derivada por el incremento de un 20% más de potencia es ínfima y el beneficio obtenido en peso de la maquinaria al reducir la potencia del motor principal en un 20% es despreciable, por estas razones una planta OG, es preferible para estas proporciones de potencia.
- b.—Si la potencia de crucero está entre 20 y 30 por ciento se puede considerar entonces indistintamente OG o AG, dependiendo del tipo de planta de carga básica.
- c.—Si la potencia de crucero es de más del 30%, entonces una planta combinada completa, o sea "AG", decididamente vale la complicación y podría ser factiblemente cualquiera de las combinaciones posibles.
- d.—Si la potencia de crucero es más del 40% o, por necesidades dispuestas por el Alto Mando debe ser equivalente al 50%, de modo que siempre haya disponible una alta velocidad del buque pase lo que pase a

una u otra unidad propulsora primaria como lo son los actuales destructores de la Clase Country de la Marina Real; entonces las únicas posibilidades factibles son COSAG o COGAG para este requerimiento, siendo la CODAG prácticamente imposible.

Para la combinación COGAG debe suponerse que las turbinas a gas son las mismas, pero sólo una de ellas tiene la complicación de intercambiadores de calor para mejorar la eficiencia térmica de la "planta de carga básica" a potencias de crucero más bajas.

Estudiando los cuatro casos descritos y con la experiencia que se posee sobre el empleo que un buque de guerra hace de la potencia de su planta propulsora durante su vida útil se puede concluir lo siguiente:

La potencia máxima es usada menos de un 5% del total del tiempo de trabajo de planta propulsora.

La potencia normal usada es la correspondiente a la velocidad de crucero que en un buque tipo destructor está en el rango de 16 a 25 por ciento.

En base a la potencia necesaria para velocidad de crucero la primera alternativa con una solución OG, parece ser la más atrayente en base a un  $M + F$  mínimo.

### 4.—Concepto de un solo Combustible

Aún cuando pueden apreciarse como ventajas económicas, en el aspecto logístico de por qué las plantas dobles, en particular las tipo COSAG, deben tener dos tipos diferentes de combustible, o sea, petróleo de caldera y diesel, las complejidades para su instalación son profundas y existe además el peligro "siempre presente de la contaminación entre los dos sistemas", lo que de ocurrir produciría serias corrosiones en las paletas de la turbina a gas.

El concepto de un combustible único simplifica el diseño integral de la maquinaria.

## 5.—Consideraciones Finales

De lo expuesto se desprende que la pregunta actual es si en el futuro se preferirá el buque con turbinas a gas exclusivo COGOG o la disposición CODOG.

Indudablemente ahora en el futuro cercano el uso de un motor diesel para velocidad de crucero proporcionará un gran radio de acción. La ventaja del diesel en este aspecto es muy substancial pero el tamaño del motor diesel que puede acomodarse generalmente limita la velocidad máxima de crucero para propósitos operacionales, lo que puede ser una desventaja. El pequeño tamaño específico de la turbina a gas permite una mayor flexibilidad al elegir el poder máximo para una turbina de crucero y ofrece una elección más amplia de características de operación, siempre que se puedan cumplir los requerimientos de radio de acción.

Es difícil producir curvas generalizadas para demostrar estos aspectos y tales curvas pueden ser muy engañosas. Un factor vital es el combustible necesario para proporcionar los servicios auxiliares que en un buque moderno afecta notablemente el radio de acción a velocidades de crucero. La figura N° 5 muestra la influencia en la distancia franqueable de un buque arbitrario que requiere 48.000 SHP. para una velocidad de 30 nudos.

El combustible total disponible es de 850 tons. y las curvas se muestran para dos requerimientos auxiliares de combustible de 1.500 Lbs/hora y 750 Lbs/Hr.

En este diagrama se incluyen las curvas de capacidad para cuatro turbinas a gas y también para un motor diesel. Las turbinas a gas son todas idénticas en su eficiencia, pero son respectivamente de 100, 50, 25 y 16.2/3 por ciento del poder requerido para dar la velocidad máxima. El consumo de combustible del motor diesel es equivalente al mejor que puede obtenerse con un motor diesel de velocidad mediana, mientras que los consumos de la turbina a gas son aquellos que se logran actualmente en los motores existentes y se basan en un consumo específico de combustible de 0,5 Lbs/SHP/Hr. a carga máxima.

Las curvas muestran claramente que siempre que se pueda instalar una turbina de crucero de un poder no superior al 25% de la turbina principal, el alcance a 21 nudos es adecuado aún cuando es inferior al obtenido con un motor diesel en base a una igual capacidad total de combustible.

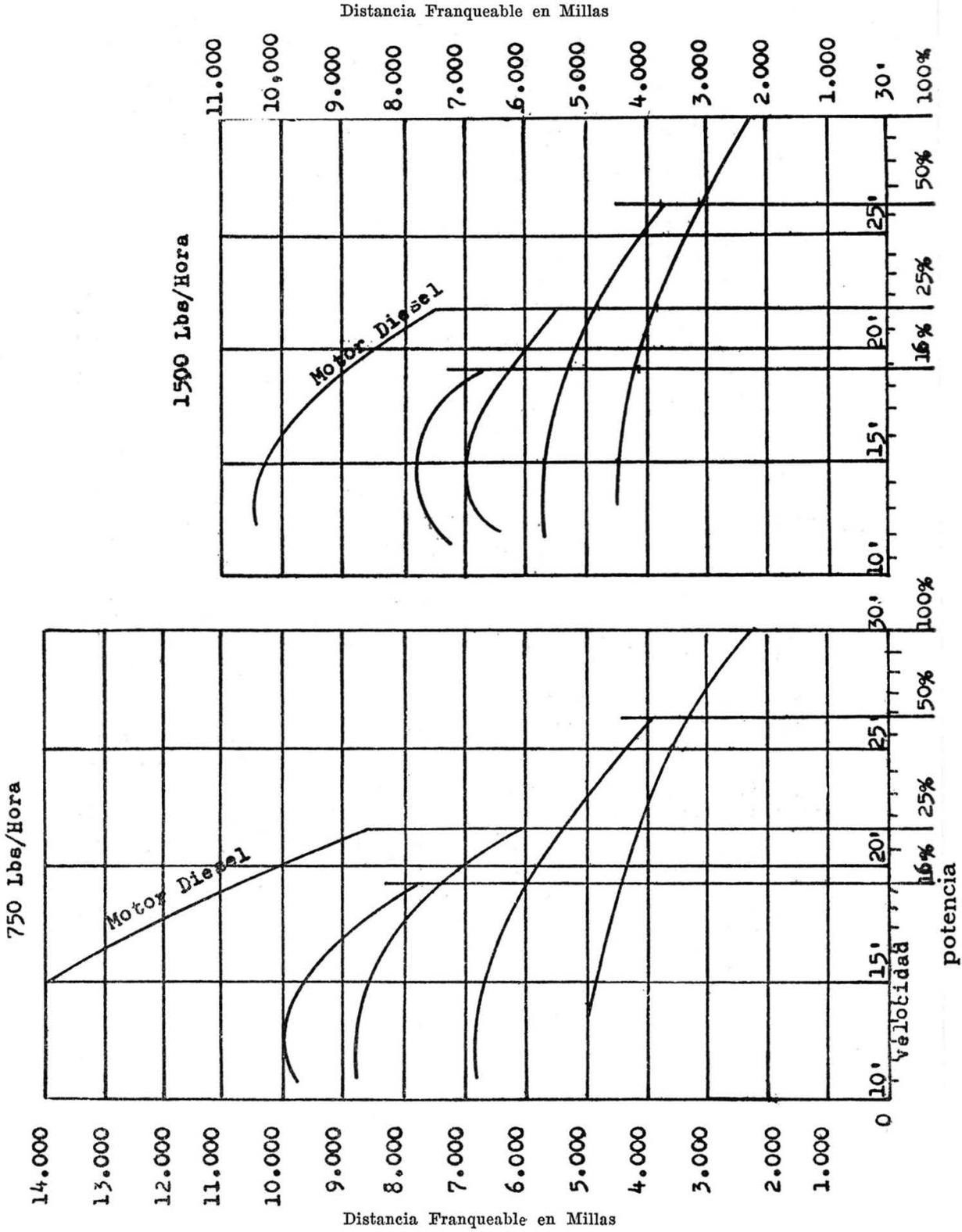
Además la diferencia apreciable en tamaño y peso de una turbina a gas de 6.000 SHP. comparada con un motor diesel de velocidad mediana de igual poder proporciona la oportunidad de aumentar la capacidad de combustible en el buque a turbina a gas. Esto no sólo aumenta el alcance posible a 21 nudos sino que también da mayor flexibilidad al buque permitiendo la alternativa de una mayor duración a velocidad máxima.

También es posible que un motor diesel de 6.000 SHP. sea demasiado grande para ser instalado y si este poder tiene que reducirse a 4.000 SHP. la velocidad máxima de crucero disponible se reducirá a 18 nudos aproximadamente.

Por lo tanto, existen buenas razones para que un buque tenga toda su maquinaria compuesta de turbinas a gas. La eliminación del diesel de crucero da además importantes ventajas operacionales como ser:

- a.—Una reducción en los requerimientos de habitabilidad de la tripulación.
- b.—Disminución de los períodos de mantención debido a reparaciones por medio de cambio de piezas.
- c.—Reducción del nivel de vibraciones obteniéndose un buque más silencioso.
- d.—Ventaja de tener un solo tipo de maquinaria en el sistema de propulsión del buque.

La situación anteriormente planteada se basa en las Turbinas a Gas existentes basadas en motores a reacción usados en aviación y se debe tener en cuenta que ellos sólo están en su primera generación. Por lo que es posible obtener mejoras considerables en la eficiencia de trabajo de estos motores.





Por lo tanto, se presenta en la actualidad una situación muy favorable para el buque COGOG siempre que el radio de acción no sea un requerimiento mandatorio. Esta desventaja actual será eliminada en el futuro con las mejoras que se están obteniendo en el consumo específico de combustible.

Un ejemplo del uso de este tipo de combinación lo tenemos en los destructores de la Royal Navy Tipo 42, cuya orden de construcción fue colocada en noviembre de 1968.

Estos buques de 3.500 toneladas, diseñados para llevar el proyectil superficie-aire Seadart, llevarán dos turbinas a gas Tyne para su navegación de crucero con una potencia de 4.100 HP. cada una y dos turbinas a gas Olympus de 27.200 HP cada una.

## LA TURBINA A GAS

### III.—A.—Generalidades

Antes de poder apreciar plenamente las cualidades de la turbina a gas como planta de poder para buques de guerra pequeños es necesario estudiar brevemente aquellas de las plantas propulsoras existentes que hasta ahora han sido empleadas para esta tarea. Son éstas la planta a vapor y el motor diesel. Pese a una marcada ventaja en el consumo específico de combustible y su simplicidad general, este último ha estado siempre en desventaja frente a la Planta de vapor en el diseño de buques de guerra pequeños por las siguientes razones:

- a.—La razón o proporción integral de peso específico de la instalación de las máquinas ha sido marcadamente inferior, o sea, aproximadamente 25 Lbs/HP. al eje para la planta de vapor contra 75 Lbs/HP. para los diesel.
- b.—Gama limitada de potencia disponible de un motor, ya que 10.000 HP es aún ahora el límite superior más grande proyectado para un motor de velocidad media. Esta reducida potencia obliga al diseñador a un concepto de motores múltiples con todas las complicaciones consiguientes.

- c.—Una elevada carga de mantenimiento con períodos "fijos" de recorrida cuyo intervalo disminuye de acuerdo al aumento de RPM.
- d.—Debido a las dos primeras razones sólo se obtiene una baja velocidad máxima para el peso de la maquinaria instalada.

Aún la planta a vapor posee la ventaja única, en la actualidad, de ser capaz de alcanzar por diseño potencias significativamente superiores a cualquiera de sus rivales, el grado de complicación y multiplicidad de los sistemas subsidiarios y elementos auxiliares es mucho mayor comparado con una planta de turbina a gas. La congestión en los espacios para las máquinas que provocan estos sistemas adicionales y auxiliares tiene un efecto adverso en la facilidad de mantenimiento, pues no sólo están las áreas de sentinas llenas de los sistemas de circulación y drenaje del agua de alimentación y de mar, sino que encima de los espacios de las máquinas se extiende una selva de sistemas de tuberías de vapor. A objeto de ofrecer una indicación de la magnitud de estos diversos sistemas es suficiente con observar que en una fragata moderna con propulsión enteramente de vapor, ellos contribuyen al 15 % del peso total de la maquinaria y hay casi media milla tan sólo de tuberías de vapor de diversos diámetros, desde 1/2 hasta 8 pulgadas que irradian gran cantidad de calor hacia los departamentos, el cual es necesario extraer.

Otras características en que la planta a vapor está en abierta desventaja frente al diesel y a la turbina a gas son:

- a.—Velocidad de reacción. Aún con una caldera pequeña, moderna, de baja capacidad térmica, es poco probable que se levante una columna completa de vapor en menos de 30 minutos y esto con la ayuda de arbitrios tales como serpentines de ebullición lenta, lo que significa que la planta no está nunca verdaderamente fría.
- b.—Facilidad de operación. Una rápida ojeada a la multiplicidad de sistemas y elementos auxiliares asociados requeridos por la planta de vapor, revelará la magnitud del problema de control en comparación

con una máquina que utiliza un gas que no se condensa como fluido operativo en un ciclo abierto.

1. Las cualidades específicas de la turbina a gas son tan conocidas que casi no es necesario volverlas a mencionar, pero para que este trabajo quede completo se las enumera muy brevemente a continuación.

### Ventajas

- a.—Baja proporción de peso específico de la máquina que va desde 1,0 Lb/HP. al eje en turbinas a gas de aeronaves a 5,5 Lb/HP. al eje para turbinas a gas "marinas".
- b.—Alta potencia disponible por máquina, que llega por el momento hasta 27.000 bhp.
- c.—Velocidad de reacción 30 segundos para bajar a velocidad mínima; 2 minutos para alcanzar la máxima potencia.
- d.—Estructura compacta, las ventajas que se derivan de una unidad integral "compacta" en contraposición a una unidad dispersa como la instalación de una turbina a vapor.
- e.—Seguridad; además de su ventaja básica de ser una máquina rotatoria, en contraposición a una recíproca, está el requisito intrínseco esencial de seguridad (confiabilidad), obtenida de su versión aérea, aún cuando ésta sea por períodos relativamente cortos de operación para los standards marítimos.
- f.—Facilidad de operación, sencilla de por sí, sencillo control del acelerador o válvula reguladora del combustible y, por consiguiente, facilidad de automatización y bajos requerimientos de vigilancia.
- g.—Pocos sistemas auxiliares.
- h.—Bajos consumos de aceite lubricante en comparación con el diesel.

### Desventajas

- a.—El consumo específico de combustible a la potencia máxima es alto y aumenta rápidamente al disminuir la potencia.

b.—Elevada razón o proporción aire/combustible 62/1 en comparación con 40/1 del diesel y 17/1 de la turbina de vapor, esto da por resultado grandes tuberías de admisión y chimeneas.

c.—Alta calidad de combustible, incapacidad para quemar petróleo de caldera denso debido a los efectos de corrosión en el empaquetado, lo que obliga a la utilización de petróleo refinado de un costo mayor.

d.—Sensibilidad a las condiciones de admisión de aire, o escape o descarga de gases, lo que también se produce en el motor diesel.

e.—Duración relativamente corta de los períodos post recorrida (overhaul) en comparación con la mayoría de las componentes de una planta de vapor, aunque en esta planta la caldera presenta un punto bastante débil que limita la confiabilidad de la planta.

f.—Ruido. Elevado ruido, lo que hace necesario el empleo de silenciadores para "confort" de los compartimientos circundantes.

g.—Normalmente es una propulsora primaria unidireccional, y por tanto, requiere la utilización de sistemas de engranajes o de hélices de paso variable para obtener impulso de retroceso.

### B.—DISEÑO DE LA TURBINA A GAS MARINA

1.—La turbina a gas marina consta esencialmente de dos componentes principales. El generador de gas y la turbina de poder tal como se muestra en la Figura N° 6.

Como generador de gas se usa el motor aéreo de reacción adecuadamente modificado y una turbina de poder especialmente diseñada para convertir la energía del gas en energía mecánica.

En el diseño de la turbina de poder hay dos alternativas posibles: la turbina de poder puede ser construida esencialmente "dentro" del conjunto generador de gas, en cuyo caso el motor se transforma en una unidad que se repara por su cambio, o la turbina puede ser dise-

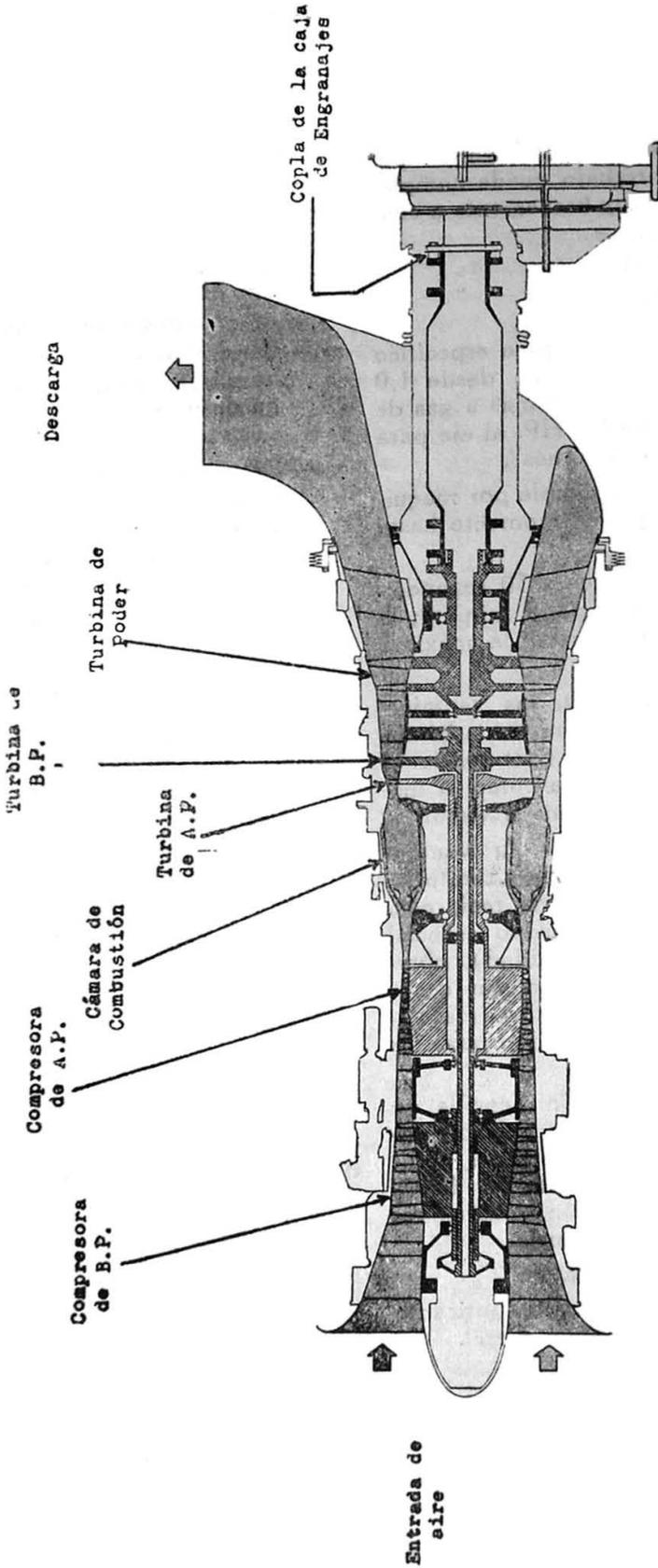


Fig. Nº 6. Turbina a gas marina.

ñada como un conjunto separado; en este caso sólo se cambia la parte que sea necesaria. Es normal que la primera alternativa se elija para los motores más pequeños y la segunda para los más grandes. En ambos casos el diseño aerodinámico de la turbina no presenta gran problema. El diseño mecánico será diferente en las dos alternativas, y en el segundo caso será dictado por las consideraciones de instalación y operación a bordo.

El motor Rolls Royce Marine Tyne es un ejemplo de la primera alternativa.

Aunque el generador de gas puede ser desmontado de la turbina de poder, esto no se hace generalmente a bordo y la unidad completa se saca cuando es necesario su overhaul.

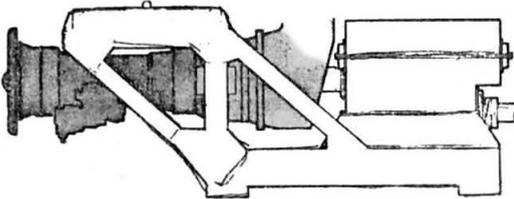


Fig. N° 7. Turbina a gas Tyne.

La figura N° 7 muestra en forma diagramática la disposición de todo el "motor" como está instalado en el buque.

Consiste en tres componentes: El bastidor principal, la caja de engranajes de reducción primaria y el motor mismo. Los primeros dos componentes son aquellos que están permanentemente en el buque y se hacen arreglos de manera que el motor Tyne pueda ser cambiado fácilmente sin involucrar problemas de alineamiento en su transmisión a la caja de engranajes.

Un ejemplo de la segunda alternativa es el motor Rolls Royce Marine Olympus, ilustrado en la figura N° 8.

Es importante tener en cuenta que una vez instalado en el buque, la carcasa de la turbina de poder no se vuelve a sacar y toda la mantención del conjunto es efectuada en esa posición. El generador de gas es fácilmente desmontable y se saca al exterior a través de su propio conducto de admisión de aire.

Algunos sistemas están integrados con el motor de modo que formen parte del diseño total. Estos son básicamente:

El sistema de control de combustible.

El sistema de lubricación.

Sistema auxiliar de control y lubricación.

El sistema de ventilación del motor.

A menos que se tenga cuidado en el diseño inicial para asegurar un adecuado acceso y un medio apropiado para ope-

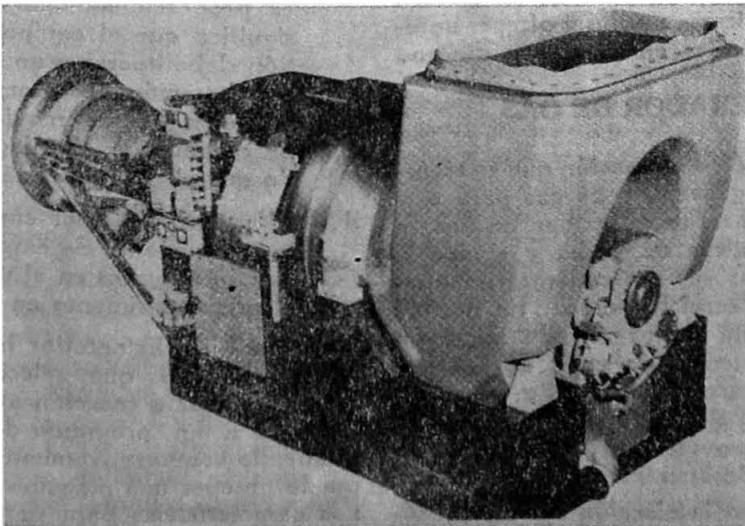


Fig. N° 8. Turbina a gas Olympus.

rar estos sistemas, surgirán problemas difíciles en la instalación del motor. Junto con estas consideraciones está también el problema del nivel de ruidos, debiendo considerarse en la etapa de diseño, la colocación de un sistema adecuado para la supresión de éstos si se desea lograr una instalación operacionalmente aceptable.

## 2.—PROBLEMA ACUSTICO Y VENTILACION

Hay dos alternativas en el problema de supresión de ruidos y ventilación del motor. La primera es encerrar toda la maquinaria de propulsión en un espacio grande a prueba de sonidos en cuyo caso muy poco o nada del problema debe ser llevado al diseño mismo del motor. La segunda es disponer que cada unidad tenga su propia caja acústica haciendo los arreglos adecuados para facilitar el acceso a todos los puntos que sea necesario y manteniendo una ventilación interna adecuada. Esta segunda posibilidad exige una consideración muy cuidadosa en la instalación básica del motor y no es fácil de lograrla en forma satisfactoria. Sin embargo, nos ofrece un motor standard que puede instalarse en cualquier buque y ha demostrado ser la mejor solución y la de más bajo costo.

Siempre que se puedan mantener las dimensiones totales del motor, con su aislamiento acústico, razonablemente reducidas, el problema total de instalación puede simplificarse mucho y ofrecer apreciables economías en tiempo y dinero.

## 3.—EL GENERADOR DE GAS

El motor aéreo a reacción que se transforma en el generador de gas para este tipo de turbinas, se selecciona en base a sus características de poder y eficiencia y también por sus antecedentes de operación en el servicio aéreo. Es normal que el tipo de motor elegido tenga un historial de cientos de miles de horas y en algunos casos millones de horas de operación en el aire y que los motores elegidos tengan un rango de 3.000 a 6.000 horas de operación entre overhaul.

Por lo tanto la elección del motor aéreo básico es de gran importancia. De-

termina la posición competitiva en relación al trabajo y eficiencia del motor marino resultante, y tiene un efecto vital sobre la confiabilidad del producto final, influyendo notablemente en el tiempo de servicio entre overhaul y sobre todo asegurando la factibilidad de las modificaciones del motor para su nuevo uso.

Por muy bien que se haga la elección, son esenciales algunas modificaciones, si deseamos que el motor sea tan confiable o más aún, en su trabajo naval como lo fue en su trabajo aéreo. Estas modificaciones esenciales surgen debido a las nuevas condiciones ambientales en las que el motor debe operar, las que pueden resumirse como sigue:

- a.—El motor marino opera siempre al nivel del mar donde la densidad del aire es mayor que en las condiciones operacionales normales del avión. Esto aumenta las cargas aerodinámicas y las fuerzas de excitación sobre sus componentes y la carga en sus descansos de empuje.
- b.—El aire en la atmósfera que lo rodea está siempre contaminado con sal y polvo en mucha mayor extensión que en la que se encuentra el motor aéreo.
- c.—El poder promedio desarrollado en estas condiciones por el motor naval es mayor que el del motor aéreo, debido a la mayor densidad del aire, y el consumo de combustible es proporcionalmente mayor. Esto significa que el equipo de combustión debe operar a un mayor rango de liberación de calor; por lo tanto generalmente requiere quemar un combustible destilado más pesado que el del motor aéreo.
- d.—El motor debe ser capaz de aceptar condiciones de carga de choque mucho mayores en el uso naval que el que experimenta en vuelo.

A pesar de lo anterior la experiencia ha demostrado que seleccionando un "buen" motor a reacción aéreo y someténdolo a un programa de rediseño y desarrollo comparativamente reducido, se puede obtener una máquina de muy buenas características para su nuevo trabajo.

Es importante tener en cuenta que los requerimientos para las turbinas a gas navales son casi idénticos con aquellos para las industriales. En efecto, aparte del problema de cargas bruscas por cambios de poder, toda nueva condición ambiental para el motor marino puede encontrarse en una instalación industrial. Por lo tanto el motor marino puede aprovechar toda la mayor experiencia acumulada en este tipo de motor usado extensamente para la generación de electricidad, gas y para el bombeo de petróleo.

Las compañías que fabrican turbinas a gas para usos industriales tienen a su haber cientos de miles de horas de experiencia en este campo, y generadores de gas, de funcionamiento continuo, han tenido períodos de más de 15.000 horas de operación entre overhaul.

Las modificaciones incorporadas en estos generadores de gas pueden estudiarse bajo las siguientes consideraciones:

- a.—Alteraciones a la parte "fría" del motor.
- b.—Alteraciones a los descansos.
- c.—Alteración al equipo de combustión.
- d.—Alteración a los componentes de la turbina.

#### 4.—ALTERACION A LA PARTE "FRÍA" DEL MOTOR

Las alteraciones necesarias en esta sección son las más lógicas y comparativamente fáciles de diseñar y ejecutar. Su extensión depende del diseño del motor aéreo original.

Es necesario eliminar todas las aleaciones de magnesio y los componentes afectados pueden ser fácilmente reemplazados por piezas similares fabricadas de una aleación de aluminio.

El empaletado de la compresora, tanto estatores y rotores, debe ser de acero inoxidable o titanio. A veces el empaletado de las compresoras de baja presión en los motores aéreos es de aleación de aluminio y aunque el empaletado de este tipo, diseñado correctamente y con márgenes adecuados de fatiga, debiera ser perfectamente satisfactorio en los motores marinos o industriales, se estima que para asegurar un mayor tiempo de ope-

ración, sin fallas por fatiga, es esencial la sustitución del empaletado por uno de acero inoxidable o titanio. Esto puede incluir una alteración mayor ya que el cambio del empaletado del rotor involucra los cambios correspondientes a los discos del rotor. Esto en sí aumenta el peso del rotor y el efecto de esto sobre las velocidades críticas del eje debe ser considerado cuidadosamente. El cambio impone pruebas extensivas, pero con las técnicas modernas de diseño basta con el cambio de material sin alterar las formas de las paletas para tener un resultado final satisfactorio.

El problema ocasionado por los altos requerimientos de carga de choques para el motor marino, hace necesario reforzar las cajas que llevan los descansos principales.

En este caso basta con un simple aumento en el espesor de la sección.

Queda el problema de desgaste que en realidad es de importancia en estos motores. Cualquier signo leve de desgaste en el motor aéreo se incrementará considerablemente en la versión naval. Normalmente es posible en esta parte del motor, reducir la posibilidad de movimiento relativo entre partes aparejadas, y en otros casos se han desarrollado tratamientos especiales para las superficies en contacto que impiden en forma efectiva un desgaste exagerado.

#### 5.—ALTERACION A LOS DESCANSOS

El generador de gas al igual que el motor aéreo del cual se desarrolló, usa descansos antifricción. Se usan descansos de roletes para las cargas de superficie y generalmente descansos de bolita doble para soportar las elevadas cargas de empuje. El nuevo uso del motor no involucra cambios en los descansos de roletes pero la carga promedio soportada por los descansos de empuje aumenta considerablemente.

Por lo tanto, es necesario reducir la carga aumentando la capacidad del descanso. A veces basta sólo con hacer una "Doble Corrida" en el descanso existente y así doblar su capacidad, pero a menudo se debe incorporar además un descanso más grande.

## 6.—ALTERACION AL EQUIPO DE COMBUSTION

El equipo de combustión del motor aéreo está diseñado para quemar un combustible de destilación liviana en el menor espacio posible bajo una amplia gama de densidad de aire. Debe ser capaz de volver a encender a cualquier altura desde el nivel del mar hasta los 50.000 pies y proporcionar una alta eficiencia de combustión bajo todas las condiciones. Además debe tener una larga vida cuando opera bajo condiciones de baja densidad a cargas parciales. Además es deseable aunque no necesario que la combustión sea sin humo.

En su trabajo como generador de gas marino los requerimientos se alteran en lo siguiente:

Debe quemar un combustible de destilación más pesado sin producir humo. Debe operar a nivel del mar y debe tener una larga vida operacional a densidades de aire correspondientes a las condiciones existentes a nivel del mar.

El primer requerimiento generalmente obliga a ejecutar una alteración en la zona de combustión primaria y esta alteración no ha sido muy difícil excepto en lo que se refiere a la eliminación del humo, en el rango total de poder cuando se quema petróleo diesel. Sin embargo en este aspecto se ha obtenido un éxito considerable y la combustión se puede hacer virtualmente libre de humo sobre el rango de 55 a 100% de poder. La emisión de humo aumenta del 50 al 25% de poder alcanzándose un valor aproximado a 5 en la escala Bacharach y disminuye desde allí al funcionar en vacío.

El tercer requerimiento involucra el perfeccionamiento del diseño mecánico de la cámara de combustión y un especial cuidado en los dispositivos para enfriamiento de las superficies. El desgaste de las superficies en contacto ha sido superado al platear las superficies con carburo de tungsteno.

La experiencia obtenida en generadores similares de gas, actualmente en operación, da confianza en que el equipo generador de gas para uso naval no será una causa que limite la vida útil del motor.

## 7.—ALTERACION A LA TURBINA

Es práctica normal limitar la potencia máxima de un generador de gas marino de modo que la temperatura máxima de admisión de la turbina sea apreciablemente inferior a la máxima permitida en el uso aéreo. Además, el motor marino operará a su máximo poder una parte muy pequeña de su vida.

Es lo más común en las Armadas que el poder máximo de la planta propulsora sea necesario usarlo durante sólo un 5% de la vida de los buques. Desde el punto de vista de limitaciones por temperaturas, la turbina aérea posee características más que suficientes para el trabajo naval.

Sin embargo la situación se altera por la presencia de sal en el aire y también en el petróleo. Esto puede tener como resultado serios daños si no se toman las precauciones necesarias para reducir el efecto de esta contaminación.

La resistencia a la oxidación y a la corrosión de las aleaciones de alta temperatura dependen de finas capas protectoras de óxido. Estas películas son generalmente espinelas formadas a base de cromo o aluminio por ser elementos trivalentes.

La adhesión y densidad de la película es principalmente una función de este contenido trivalente.

Cuando las sales marinas se introducen en cantidades apreciables (0,5 PPM de aire) en la admisión del motor, se produce una intensa corrosión en el empaletado debido a la formación de sulfatos. El ataque producido por los sulfuros existentes en el petróleo produce una acción semi catalítica acompañada de corrosiones. Sin embargo, la causa de corrosión principal parece consistir esencialmente en la fusión de la película protectora producida por la acción del sulfato.

Esto expone continuamente las superficies limpias a la oxidación y da como resultado rápidas desintegraciones.

La capa protectora producida por la aluminización actualmente en uso, opera en forma razonable contra ambas formas de corrosión. En el caso del ataque de sulfuro la protección está completa hasta que la película es penetrada por la erosión o por agrietaduras, pero general-

mente se logran períodos de operación bastante apreciables. Sin embargo con las sales marinas la vida útil depende de la cantidad de sal que se introduzca al sistema, ya que el óxido de aluminio también se funde aunque mucho más lentamente que el óxido de cromo.

Con el grado de protección proporcionado por la aluminización, la vida de la turbina depende en su mayor parte de mantener la proporción total de partes de sal que entran al sistema a un valor lo más bajo posible.

a.—En lo que se refiere a los buques de guerra mayores es posible, con equipos para separación de sal en la admisión, mantener la concentración de sal en el aire de admisión del motor bajo 0,005 PPM. y se ha podido comprobar que en la mayoría del tiempo en el mar la concentración ha sido bajo 0,001 PPM.

b.—Con los materiales actuales de las paletas y el tratamiento de superficie por la aluminización, la corrosión de las paletas no será un factor de limitación en la vida de los generadores de gas; sin embargo, esta situación es solo marginal y la resistencia a la corrosión producida por la sal debe seguirse aumentando especialmente a medida que se requieran temperaturas de operación mayores en el futuro.

## 8.—COMBUSTIBLES

En la actualidad la posibilidad de usar combustibles residuales para las turbinas a gas de alta temperatura parece remota debido a la presencia de metales alcalinos como el sodio y el vanadio. Aún cuando se pueden tolerar pequeñas cantidades de sodio el cuadro es mucho menos prometedor para el vanadio. La actividad fundente de las sales de vanadio es mucho mayor que las sales de sodio y su prevención es mucho más difícil. Sin embargo, se espera que en el futuro el arte de protección contra las sales marinas pueda variar esta imagen.

La situación actual es que si se deben usar temperaturas máximas sobre los 1.200° F, el vanadio debe mantenerse fuera del motor. Actualmente estos motores están operando a todo poder en el

rango de 1.650° F y se contemplan temperaturas aún mayores.

Por lo tanto, el petróleo destilado es una necesidad pero vale la pena examinar la posibilidad de hacer más fácil la especificación del destilado requerido para hacerlo lo más barato posible. El motor es el árbitro final de la especificación del petróleo y no vale la pena economizar en el petróleo si se va a perder dinero al reducirse la vida del motor.

Por lo tanto, es vital demostrar por medio de la operación real, que cualquier cambio en la especificación de petróleo representa un ahorro en el costo total de la operación del motor.

## 9.—NIVEL TOLERABLE DEL CLORURO DE SODIO EN EL PETRÓLEO

Como es una tarea muy difícil mantener el combustible totalmente libre de la acción de la sal en un medio ambiente marino, ésta debe ser eliminada antes de que llegue al punto de alimentación del motor por medio del uso de una centrífuga o un filtro.

La experiencia muestra que cualquiera de estos elementos es capaz de reducir las concentraciones de sal bajo las cifras de 1 PPM. y por lo tanto no existe la importancia de tener una especificación que controle rígidamente la concentración de sodio en el petróleo.

## 10.—EFECTOS DE LAS PROPIEDADES DEL PETRÓLEO EN EL HUMO

El humo producido por una mala combustión es un serio problema tanto en las instalaciones navales como en las turbinas instaladas en tierra, donde existen leyes que limitan estrictamente la descarga de humo a la atmósfera.

Los requerimientos en este sentido para las turbinas a gas de uso industrial son mucho más exigentes que para los motores de aviación y de uso naval.

Hay dos demostraciones de humo, a saber, humo que se produce al operar el motor en vacío, el cual está formado por vapores de fracciones del combustible de un color claro acompañado por pro-

ductos nocivos de la combustión tales como los aldehidos, y el humo negro que es principalmente carbón y que se genera en cualquier punto del rango de poder.

### 11.—HUMO VAPOROSO

Normalmente no constituye una dificultad al usar kerosene como combustible, pero se ha transformado en un problema serio con los combustibles más pesados especialmente con el petróleo diesel. El humo vaporoso aparece en las condiciones de vacío y su olor es muy desagradable y produce molestias a la tripulación u otro personal que se encuentre alrededor.

Las principales propiedades del petróleo que inciden en la producción de humo vaporoso son densidad, viscosidad y el grado de destilación.

Este problema se soluciona alterando el diseño del quemador, además si se recurre al calentamiento del petróleo, hay una buena posibilidad de quemar satisfactoriamente combustibles de alta densidad y viscosidad.

### 12.—HUMO NEGRO

El humo negro es principalmente carbón de partículas de un tamaño extremadamente pequeño (inferiores a 0,1 micrón) es completamente inocuo y puede ser transportado por el aire y representa menos del 0,25% del peso del combustible.

Las condiciones que produce el humo negro son una alta temperatura y una mezcla muy rica en la zona primaria.

En las cámaras de combustión de tipo aéreo generalmente las zonas primarias muy ricas se usan para lograr un encendido seguro a grandes alturas, lo que no es necesario en el motor marino.

En la operación a nivel del mar es innecesario tener zonas primarias muy ricas, y se puede mejorar el nivel de humo aumentando la cantidad de aire en esas zonas.

Un aumento de la cantidad de aire en las zonas primarias redujo el nivel de humo desde 7 Bacharach a 2 Bacharach usando como combustibles gas oil. Este nivel de humo es imperceptible.

Se considera que para las turbinas a gas marinas los problemas de humo negro y vaporoso pueden solucionarse por medio de una acción de diseño en el quemador y en las cámaras de combustión, además de un adecuado calentamiento del combustible. Esto es aplicable a los combustibles de alto punto de ebullición, alta densidad y alta viscosidad, siempre que sean producto de una buena destilación.

Tomando en consideración que la turbina a gas naval sólo se requiere que opere al nivel del mar, que la modificación de las zonas primarias en las cámaras de combustión y el diseño apropiado de quemadores han logrado una alta eficiencia en la eliminación del humo y seguridad de incendio, que a bordo se dispone de purificadores para obtener un combustible de un alto grado de limpieza y que además éste puede ser precalentado para obtener una mejor combustión es posible entonces seleccionar las especificaciones para elegir un combustible que resulte lo más barato posible.

El combustible propuesto debe ser un hidrocarburo producto de una destilación y que no esté contaminado por combustibles residuales o aditivos dañinos.

### 13.—INSTALACION

Con la idea de la unidad compacta de turbinas a gas, como se describió en el capítulo de Diseño, se eliminan una cantidad de problemas que se presentan en el momento de su instalación a bordo, la unidad incorpora las conexiones adecuadas para ventilar el motor, proporciona adecuado aislamiento acústico y provee los flanges de conexión para los conductos de admisión y descarga. Por lo tanto los problemas de instalación se reducen a:

- a.—Proporcionar un sistema adecuado de admisión de aire.
- b.—Proporcionar un sistema adecuado de conductos de descarga.
- c.—Montar la unidad motora en sus bases.
- d.—Proporcionar la conexión de transmisión del eje a la caja de engranajes del buque.

e.—Disponer un sistema de control adecuado para la maquinaria que constituya la propulsión del buque.

La turbina a gas no sólo necesita una alimentación considerablemente mayor de aire para un poder dado, con respecto a los demás tipos de motores, sino que también es muy sensible a las pérdidas ocurridas en los sistemas de admisión y descarga. Por lo tanto, es necesario montar un sistema de conductos bien diseñados y de grandes dimensiones. Esto es a menudo difícil de efectuar debido a otras consideraciones importantes en el diseño del buque, pero cualquier solución al problema de proporcionar conductos de tamaño adecuado y sin curvaturas pronunciadas debe ser aceptada a fin de evitar las pérdidas de eficiencia de la planta por estos conceptos.

El montaje del motor en el buque se dificulta sólo por las precauciones que hay que considerar para la absorción de las fuerzas de choque y la transmisión de ruidos al casco. El grado de absorción de estos esfuerzos, que el motor debe soportar sin fallar, se determina por el diseño del motor y debe ser mantenido lo más alto posible. Una cifra típica para estos motores es "50 g" y los arreglos de montaje y las bases deben ser capaces de atenuar cualquier carga transmitida a través del casco hasta esta cifra. El grado de desalineamiento entre el motor y la caja de engranajes también se limita y si el motor está montado separadamente de la caja de engranajes el desalineamiento máximo del flange de transmisión del motor no debe exceder la capacidad de las juntas del eje de acoplamiento para corregir el movimiento angular producido.

Además de la consideración que la base del motor debe absorber los esfuerzos de las cargas de choque, se requiere que estos montajes o bases del motor tengan ciertas cualidades para suprimir los ruidos transmitidos al casco por los motores.

Las instalaciones de turbinas a gas diseñadas para usos navales son casi siempre instalaciones múltiples.

Típicamente hay dos turbinas a gas o una turbina a gas y un motor diesel en cada eje de transmisión acopladas a una

caja común de engranajes de reducción por medio de embragues.

La caja de engranajes puede estar diseñada para invertir la rotación de la hélice o bien se puede usar una hélice de paso variable.

Cualquiera que sea la disposición elegida es necesario considerar toda la maquinaria de propulsión, desde la turbina a gas a la hélice, como formando un solo sistema. El control de este sistema debe estar integrado de manera que todas las maniobras del motor puedan efectuarse en forma fácil y segura desde el puente y que el control local y la supervisión del comportamiento de todos los componentes del sistema pueda lograrse con un mínimo de personal.

La importancia que sea aconsejable o necesario cambiar a control local, en el caso de averías o fallas de cualquier parte del sistema, es materia de discusión entre el diseñador y el operador y en la actualidad las opiniones difieren mucho sobre este punto. Sin embargo es regla general que la insistencia en la "operación manual" hace más difícil el problema de proporcionar un sistema de control integrado confiable. Las turbinas a gas mencionadas en este trabajo son especialmente adecuadas para el control automático y no hay duda de que en un buque en que sus motores propulsores son todos turbinas a gas, el ideal es tener un sistema de control totalmente integrado para la maquinaria de propulsión. Esta condición es mucho más fácil de lograr que con maquinaria mezclada.

#### 14.—FUTUROS PERFECCIONAMIENTOS DE LA TURBINA A GAS MARINA

Anteriormente se señaló que la turbina a gas marina basada en un motor a reacción aéreo se había transformado en un motor en línea de producción con características propias, que estaba entrando en el mercado de propulsión marina para aquellas naves que demandaban un mayor poder específico. La aceptación de este motor desde ese punto de vista trae aparejados grandes beneficios, especialmente para los buques de guerra, al permitirles disponer de un mayor espacio y peso y por la reducción en los niveles de vibración.

Actualmente en comparación con otros motores adolece de:

- 1.—Baja eficiencia
- 2.—Bajo poder por libra de aire admitido
- 3.—Relativo alto costo de mantención por hora de operación
- 4.—Relativo alto costo de combustible.

Este es un nuevo tipo de motor y existen grandes expectativas para mejorarlo en estos cuatro aspectos. La utilización de motores similares en el campo de bombeo de gas ya está mostrando que modificaciones relativamente menores al generador de gas, producen aumentos substanciales en el tiempo de operación entre overhaul bajo condiciones constantes de operación, lográndose períodos de hasta 15.000 horas.

Así se puede esperar que se reduzcan notablemente los costos de mantención del generador de gas en un futuro relativamente cercano.

El trabajo intensivo actual en las turbinas a gas ya ha resultado en motores de alta compresión que operan a temperaturas mucho mayores debido en gran parte al progreso significativo que se ha hecho en las técnicas de diseño y fabricación del empaquetado de turbinas. Se ha demostrado que es factible lograr temperaturas máximas de hasta 2250° F en los motores aéreos experimentales; sin embargo, debido a las severas condiciones ambientales de los motores navales, dichas temperaturas de operación están todavía distantes, estimándose sí totalmente posibles en un futuro cercano temperaturas de hasta 1850° F. Al aumentar, la temperatura máxima desde 1600° F a 1800° F, se produce un incremento del 32% en el poder específico y un 15% de mejora en el consumo de combustible.

Pueden lograrse mayores aumentos substanciales en la eficiencia por dos métodos diferentes:

- a) Usando un ciclo regenerativo con un intercambiador de calor entre los gases de descargas y el aire entregado por el compresor, y
- b) Extrayendo poder de la energía del gas de descarga.

Con las mejoras sobre este aspecto que se espera incrementar en un futuro cercano existe una clara posibilidad que el uso de las turbinas a gas marinas se extienda rápidamente desde el área particularmente especializada del campo de propulsión marina, donde lo más importante es el alto poder específico, a un mayor campo que en la actualidad es dominado por las turbinas a vapor y los motores diesel.

#### IV.—CONCLUSIONES

La Armada británica, que en la actualidad es la que posee la mayor experiencia en el uso y operación de turbinas a gas a bordo de unidades de combate, nos presenta la siguiente secuencia de realizaciones.

En 1954 se dispuso la construcción de dos lanchas torpederas, la HMS "Brave Borderer" que empezó sus pruebas en octubre de 1958, y la HMS "Brave Swordsman" en abril de 1960.

Ambas lanchas tienen como único sistema de propulsión tres turbinas a gas Proteus que le dan una velocidad máxima de 50' y una velocidad de crucero de 45' la que mantuvieron durante una demostración en el mar Báltico en una travesía de 2.000 millas.

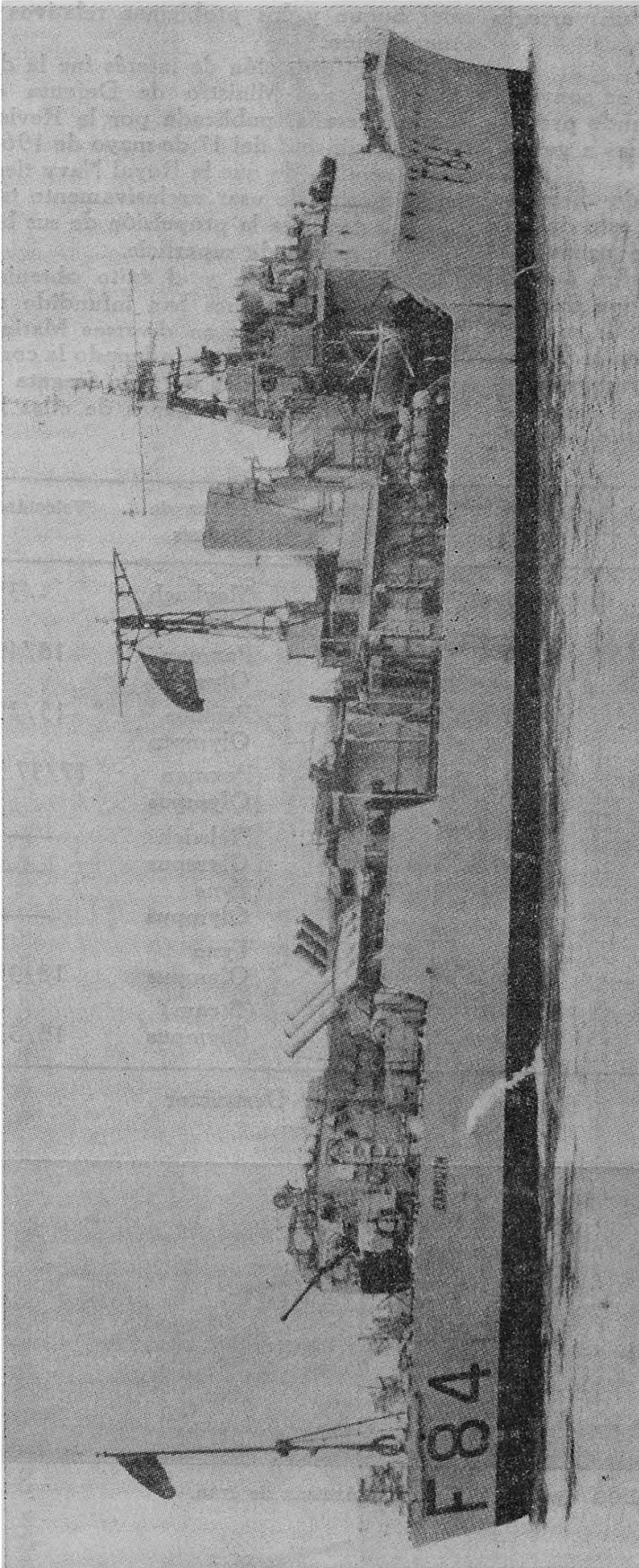
Al poco tiempo después una turbina a gas tipo Metrovick fue instalada en la primera de las fragatas de la clase Tribal en un arreglo tipo COSAG.

Posteriormente cuatro turbinas a gas de 7.500 SHP. cada una fueron montadas en el primero de los destructores de proyectiles teledirigidos del tipo County en otro arreglo COSAG.

La fragata "Exmouth" de 1.200 tns. de desplazamiento de la clase "Blackwood", que fuera construida en 1955-1958, fue designada el 10 de febrero de 1966 por el Almirantazgo británico para ser transformada en el primer buque de guerra propulsado completamente por turbinas a gas.

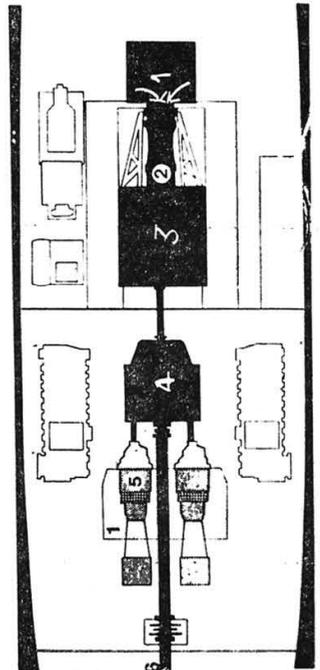
Para este efecto se le desmontó su turbina a vapor de 15.000 HP. y la maquinaria auxiliar correspondiente, montándole dos turbinas a gas Proteus para navegación de crucero y una Olympus a la cual se le redujo el poder a 15.000 SHP.

H.M.S. "Exmouth".



DISPOSICION DE LA MAQUINARIA

- |                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| 1.—Conductos de Admisión | 4.—Caja de Engranajes     |
| 2.—Turbina a gas Olympus | 5.—Turbina a gas Proteus. |
| 3.—Descarga              | 6.—Ejes Propulsores.      |



para máximo andar en un arreglo COGOG.

De este modo esta unidad se convirtió en el primer buque en el mundo propulsado íntegramente por turbinas a gas.

El hecho de no haber sido diseñado inicialmente para incorporar este tipo de motores como su medio de propulsión principal, seguramente impedirá que los beneficios que reporta este tipo de propulsión pueda apreciarse en toda su magnitud, pero sin lugar a dudas la Armada británica obtendrá valiosas informaciones sobre la performance de estas maquinarias, la flexibilidad de operación

del buque y los problemas relativos a mantención.

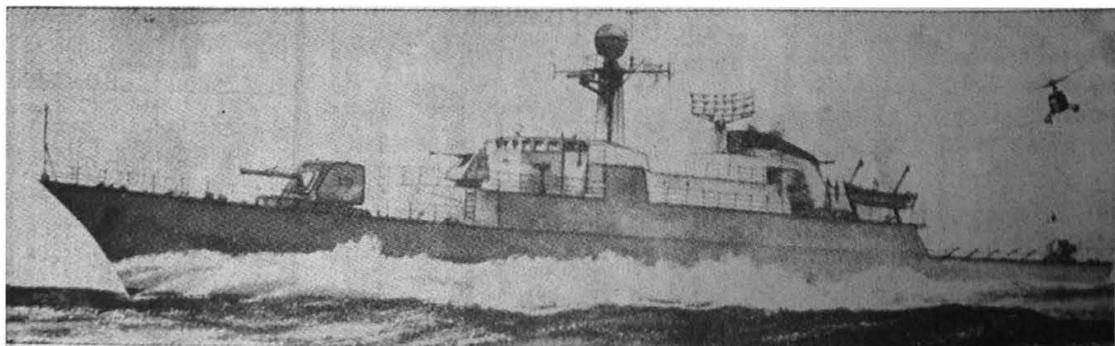
Otra información de interés fue la declaración del Ministro de Defensa de Gran Bretaña, publicada por la Revista "The Engineer" del 1º de mayo de 1968, en el sentido de que la Royal Navy tiene el propósito de usar exclusivamente turbinas a gas para la propulsión de sus buques de guerra de superficie.

Esta declaración y el éxito obtenido en estas instalaciones han infundido un clima de confianza en diversas Marinas de otros países que han ordenado la construcción de unidades del tipo fragata o destructores, siendo algunas de ellas las siguientes:

Tipo	País	Desplaz. (Tons.)	Tipo Planta	Marca de Motores	Velocidad
Corbeta	Finlandia	700	CODAG	Maybach Olympus	-/35
Mark 5*	Irán	1200	CODOG	Paxman Olympus	18/40
Type 14*	Inglaterra	1450	COGOG	Proteus Olympus	15/25
Mark 7*	Libia	1500	CODOG	Paxman Olympus	17/37.5
Yarrow*	Malasia	1600	CODOG	Pielstick Olympus	—
Type 21*	Inglaterra	2000	COGOG	Tyne Olympus	—
Type 42°	Inglaterra	3500	COGOG	Tyne Olympus	18/30
Type 82°	Inglaterra	6500	COSAG	(Steam) Olympus	18/32

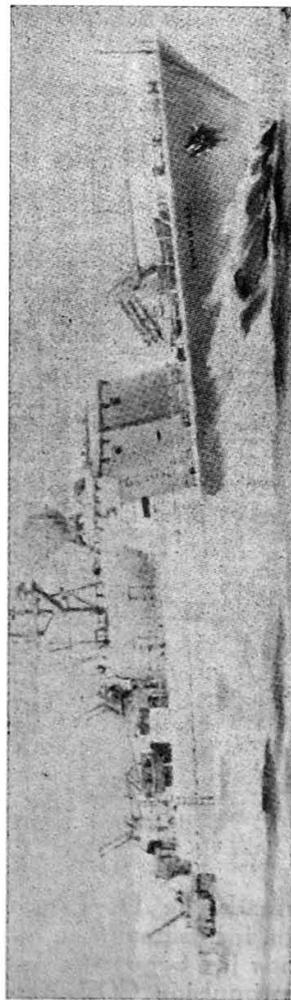
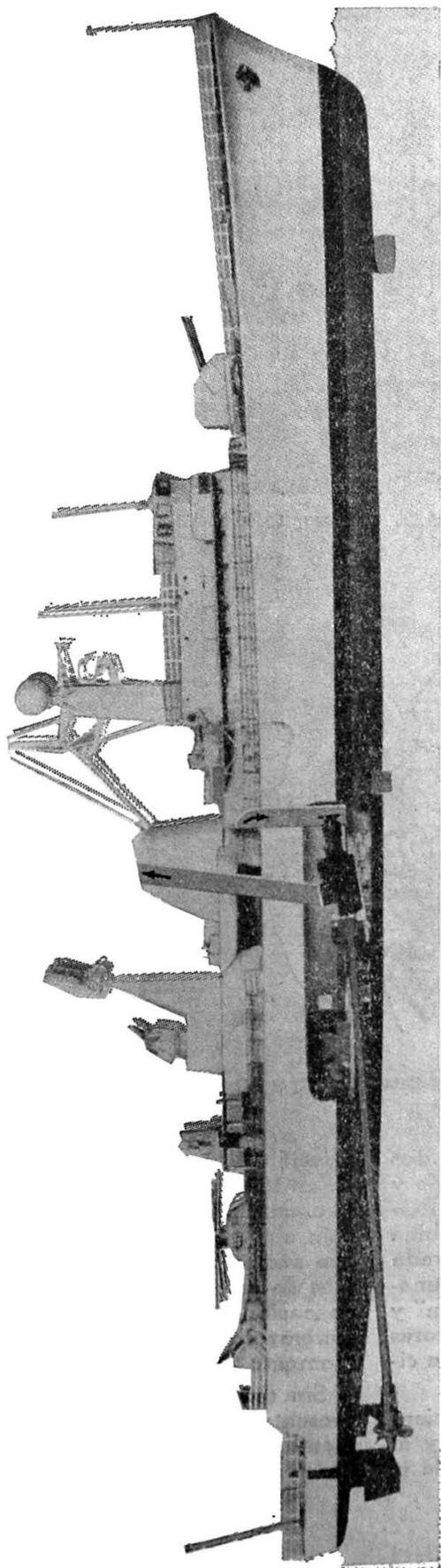
\* Fragata

° Destructor



Fragata CODOG tipo Mark 5 para la Armada de Irán.

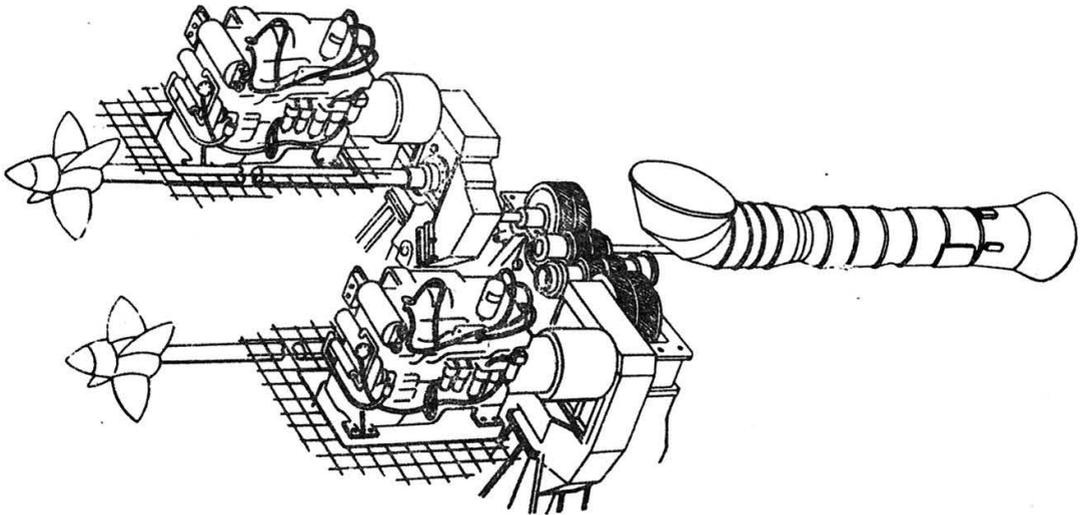
Fragata CODOG 'Yarrow' en construcción para la Armada de Malasia.



Corbeta para la Armada de Finlandia.



P.G. 84 de la U.S.N. con propulsión CODOG.



Esquema de la planta propulsora del tipo PG-84 de la U.S.N.

La Armada de los Estados Unidos también ha incursionado en este campo y así tenemos los buques de la Clase PG-84, con propulsión CODOG; la turbina a gas usada en esta unidad fue derivada del turbo reactor J-79-8, usada en numerosos aviones, entre ellos, el "Phantom" y las máquinas de crucero con dos motores Diesel, Modelo VT 12-875M de doce cilindros en V y cuatro ciclos.

La turbina a gas ya se está estableciendo firmemente en el servicio naval y al igual que lo sucedido en el campo de la

aviación, donde su iniciación fue exclusiva en los aviones de combate, antes de dominar la aviación comercial, así también el futuro de este motor, a medida que aumenten sus ventajas sobre los medios de propulsión existentes, hará que su aplicación en la navegación comercial se incremente en una proporción que por el momento no puede predecirse.

Sin temor a equivocarse, el futuro se presenta sumamente claro para un aumento de las posibilidades de las turbinas a gas navales.



### BIBLIOGRAFIA:

- 1.—“Gas Turbine Installation Design for Naval Ships” por E.B. Good.
  - 2.—“The Marine Gas Turbine” por W. H. Lindsey.
  - 3.—“Gas Turbines At Sea” por G.G. Connor.
  - 4.—“Jet Aircraft Engines for High-Speed Warships” por Stefan Geisenheyner.
- Destructor Tipo 42 para la Armada Británica.
- 5.—“Naval Ship Systems Command — Technical News”, March 1968.
  - 6.—Antecedentes proporcionados por “Rolls Royce Industrial and Marine Gas Turbine Division”.
  - 7.—“Gas Turbines in the Royal Navy” por N.K. Bowers.