

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
PROPULSÃO NAVAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**UTILIZAÇÃO DA TURBINA A GÁS NA PROPULSÃO DOS NAVIOS DA MARINHA
DO BRASIL: possibilidades futuras e desafios**



1º TEN FELIPE RIBEIRO DOS SANTOS

**Rio de Janeiro
2023**

1º TEN FELIPE RIBEIRO DOS SANTOS

UTILIZAÇÃO DA TURBINA A GÁS NA PROPULSÃO DOS NAVIOS DA MARINHA
DO BRASIL: possibilidades futuras e desafios

Monografia apresentada ao Centro de Instrução
Almirante Alexandrino como requisito parcial à
conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em
Propulsão Naval

Orientadores:

CC (EN) Júlio César Silva Pontes - DEN

Prof. Dr. Ulisses Admar B. Vicente Monteiro - UFRJ

CIAA

Rio de Janeiro

2023

1º TEN FELIPE RIBEIRO DOS SANTOS

UTILIZAÇÃO DA TURBINA A GÁS NA PROPULSÃO DOS NAVIOS DA MARINHA
DO BRASIL: possibilidades futuras e desafios

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

CC (RM1) Carlos Alfredo Órfão Martins _____

CC (EN) Júlio César Silva Pontes _____

Prof. Dr. Ulisses Admar B. Vicente Monteiro _____

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico esse trabalho a minha mãe Valeria e
minha filha Sofia, cujo nascimento está fazendo
eu me tornar uma pessoa melhor a cada dia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem Ele nada seria possível. A esta instituição de ensino, seu corpo docente, direção e administração e colegas que me deram todo o apoio necessário durante o curso e conclusão deste trabalho. Aos meus orientadores, Prof. Ulisses e CC Júlio César, que tanta ajuda forneceram para que este trabalho fosse finalizado com o êxito esperado. Aos meus pais, José e Valeria, que sempre me apoiaram e são os meus maiores exemplos de vida. E a minha filha Sofia, que me fez enxergar o mundo de uma maneira diferente.

“Vencer sem correr riscos é triunfar
sem glória”

Ayrton Senna

UTILIZAÇÃO DA TURBINA A GÁS NA PROPULSÃO DOS NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL: possibilidades futuras e desafios

Resumo

O trabalho aborda o assunto referente à turbina a gás, o qual é um motor de combustão interna do tipo rotativo e é composta basicamente pelo compressor, câmara de combustão e a turbina propriamente dita, e que durante a sua operação realiza a transformação da energia química de um combustível em energia mecânica que é transformada em potência. Assim como em toda máquina, a turbina a gás apresenta suas vantagens e desvantagens, como por exemplo: a ausência de componentes atritantes e de movimentos recíprocos significa poucos problemas de balanceamento, baixo consumo de lubrificantes e alta confiança, entretanto, a eficiência dos componentes (razão de compressão do compressor) e a temperatura de trabalho são fatores que afetam a performance da turbina. O trabalho discorre sobre os navios da Marinha do Brasil que utilizam turbina a gás, e abordamos a propulsão dos futuros navios que serão incorporados à Armada brasileira.

Palavras- chave: Turbina a gás, Marinha do Brasil, Propulsão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema Básico de Ciclo Brayton	18
Figura 2 – Ciclo de Bryton	20
Figura 3 – Compressor de Fluxo Axial	21
Figura 4 – Palhetas Fixas e Rotativas	22
Figura 5 – Câmara de Combustão	23
Figura 6 – Fragata Rademaker.....	25
Figura 7 – Fragata Constituição	26
Figura 8 – Corveta Jaceguai	27
Figura 9 – Sistema CODOG das Fragatas Classe Niterói	28
Figura 10 – Turbina Tyne	32
Figura 11 – Componentes do Motor 16V956 TB91	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados Comparativos entre OLYMPUS (RALANTI) e Tyne	31
Tabela 2 – Comparativo entre os Navios que usam TG e a FCT	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Emissões de Nox específicas para motores	35
------------------------------------------------------------	----

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CCI	Corveta Classe Inhaúma
CCB	Corveta Classe Barroso
CODOG	Combined Diesel and Gas
CODOG	Combined Diesel or Gas
FCG	Fragatas Classe Greenhalgh
FCN	Fragatas Classe Niterói
FCT	Fragatas Classe Tamandaré
GTCU	Unidade de Troca de Turbina a Gás
IMO	Organização Marítima Internacional
MB	Marinha do Brasil
NPaOc	Navios Patrulha Oceânicos
RPM	Rotações por Minuto
TG	Turbina a Gás

LISTAS DE SÍMBOLOS

t	tempo
$^{\circ}\text{C}$	graus celsius
Kg	quilo grama
s	segundo
pint	unidade de volume
psi	unidade de pressão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Apresentação do Problema	14
1.2 Justificativa e Relevância	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Funcionamento da turbina a gás	18
2.2 Ciclo Brayton	19
2.3 Componentes da turbina a gás	20
2.3.1 Compressor	20
2.3.2 Condutos Convergentes e Divergentes	20
2.3.3 Compressor de Fluxo Axial	21
2.3.4 Palhetas de Admissão.....	22
2.3.5 Câmara de Combustão	23
2.4 Navios da MB que utilizam turbina a gás	24
2.5 Turbina Olympus TM3B	27
2.5.1 Vantagens e Desvantagens	28
2.5.2 Dados Operacionais	29
2.5.3 Rendimento.....	29
2.6 Turbina Tyne	30
2.7 Motor 16V956 TB91	33
2.7.1. Dados Operacionais	33
2.7.2. Componentes	34
2.8. Emissão de Poluentes Gerados pela Turbina a Gás	35
2.8.1 Legislação	37
2.9 Futuros Navios da Marinha do Brasil	37
3 METODOLOGIA	41
3.1 Classificação da Pesquisa	41

3.1.1 Classificação Quanto aos Fins	41
3.1.2 Classificação Quanto aos Meios	41
3.2 Limitações do Método	41
3.3 Universo e Amostragem	42
4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO CASO	43
5 CONCLUSÃO	44
5.1 Sugestões para futuros trabalhos	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Antes da adoção das turbinas a gás, os navios da Marinha do Brasil (MB), como em todo o mundo, eram impulsionados por turbinas a vapor, essas máquinas de vapor eram eficazes, mas tinham limitações em termos de eficiência e manutenção.

Ao longo da década de 1970, a MB começou a modernizar sua frota, incorporando turbinas a gás (TG) em uma variedade de navios, incluindo fragatas, contratorpedeiros e porta-aviões. Além do aumento do desempenho, as turbinas a gás também contribuíram para a eficiência operacional e a sustentabilidade ambiental da MB, pois elas são mais limpas em termos de emissões em comparação com as turbinas a vapor e podem ser mais facilmente adaptadas para uso de combustíveis alternativos, isso permitiu uma maior flexibilidade e velocidade nas operações navais.

A introdução das turbinas a gás também culminou no treinamento especializado para os marinheiros e equipes de manutenção, uma vez que essa tecnologia é diferente da das turbinas a vapor em muitos aspectos. A MB continua a modernizar sua frota, atualizando as TG e outras tecnologias para manter sua capacidade de defesa e vigilância. As TG se tornaram uma parte fundamental da capacidade operacional da MB, proporcionando maior mobilidade e flexibilidade em suas missões e contribuindo para a modernização e eficiência de sua frota naval.

1.1 Apresentação do Problema

As TG são tecnologias caras para adquirir, instalar e manter, isso pode ser um desafio financeiro para a MB, que deve alocar recursos limitados para uma variedade de necessidades de defesa. Tais turbinas requerem manutenção regular e altamente especializada para funcionar com eficiência e confiabilidade, isso inclui manutenção preventiva, reparos e treinamento adequado para os técnicos. A infraestrutura necessária para operar e manter

turbinas a gás deve estar disponível, isso engloba instalações para manutenção, armazenamento de combustível e treinamento de pessoal.

A operação de turbinas a gás requer pessoal altamente treinado e especializado, e treinar a tripulação e técnicos para operar esses sistemas pode ser um desafio de longo prazo. As condições climáticas e operacionais podem afetar o desempenho das turbinas a gás, porque é importante considerar como essas turbinas funcionarão em uma variedade de cenários, desde águas costeiras até operações de longo alcance no mar. Integrar turbinas a gás com outros sistemas a bordo, como sistemas de armas e sistemas de propulsão, pode ser complexo e requer uma engenharia cuidadosa.

É importante destacar que essas dificuldades não são exclusivas da MB, pois muitas marinhas em todo o mundo enfrentam desafios semelhantes ao implantar TG em seus navios. A decisão de empregar turbinas a gás deve ser baseada em uma avaliação cuidadosa dos benefícios em relação aos custos e desafios associados, bem como na capacidade de superar esses desafios por meio de investimento, treinamento e planejamento adequados.

1.2 Justificativa e Relevância

As turbinas a gás são conhecidas por sua capacidade de fornecer alta potência e velocidade aos navios de guerra, sendo essencial para navios que precisam de desempenho excepcional, como fragatas, destróieres e porta-aviões. As TG oferecem uma resposta rápida às mudanças de demanda de energia, permitindo uma melhor manobrabilidade dos navios em situações de combate e em manobras táticas.

Em alguns casos, as TG podem ser mais eficientes em termos de consumo de combustível do que outras formas de propulsão, como motores a diesel, podendo aumentar a autonomia dos navios, permitindo que operem por mais tempo sem reabastecimento. As TG podem ser projetadas e configuradas para atender às necessidades específicas de cada classe de navio, oferecendo flexibilidade de projeto para a MB.

Em comparação com algumas formas de propulsão, as TG tendem a produzir menos ruído e vibração, o que é importante para operações de vigilância e stealth. O seu uso é uma escolha padronizada em muitas marinhas do mundo, o que pode facilitar a cooperação e a interoperabilidade em coalizões internacionais e missões conjuntas.

A MB identificou a necessidade de navios com capacidade de resposta rápida, alta velocidade e capacidade de projeção de poder em cenários estratégicos específicos. A modernização da sua frota pode envolver a substituição de sistemas de propulsão mais antigos por TG mais avançadas, como parte de um esforço geral de atualização. Em alguns casos, navios equipados com TG podem ser mais adequados para sistemas de defesa aérea avançados, como mísseis antiaéreos de longo alcance.

Essas justificativas refletem a busca da MB por navios de guerra modernos e eficientes, capazes de atender às necessidades estratégicas e operacionais do país. É importante notar que a escolha de TG deve ser baseada em uma avaliação abrangente das necessidades e recursos da Marinha, levando em consideração custos, treinamento, manutenção e outros fatores relevantes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal é mostrar as principais causas que levaram a MB a investir em navios de guerra com propulsão a TG, fazendo uma comparação com a propulsão a diesel, a qual é bastante utilizada nos navios de guerra brasileiro. Tal comparação deve ser pautada nas vantagens e desvantagens dos dois modelos de propulsão.

1.3.2 Objetivos Específicos

Analisar por que a MB optou por utilizar turbinas a gás em sua frota, destacando a importância estratégica dessa escolha para a defesa e segurança nacional. Investigar os benefícios operacionais que as turbinas a gás oferecem à MB, incluindo mobilidade, velocidade, manobrabilidade e capacidade de projeção de poder.

Identificar e discutir os desafios técnicos associados ao uso de turbinas a gás, como manutenção, treinamento de pessoal, infraestrutura e disponibilidade de combustível. Apresentar exemplos específicos de navios ou classes de navios na MB que utilizam turbinas a gás e como essas turbinas são empregadas em missões específicas.

Investigar o impacto ambiental do uso de turbinas a gás, incluindo considerações sobre emissões e eficiência energética. Explorar se há planos ou projetos futuros relacionados ao emprego de turbinas a gás na MB, como a modernização da frota ou a aquisição de novos navios.

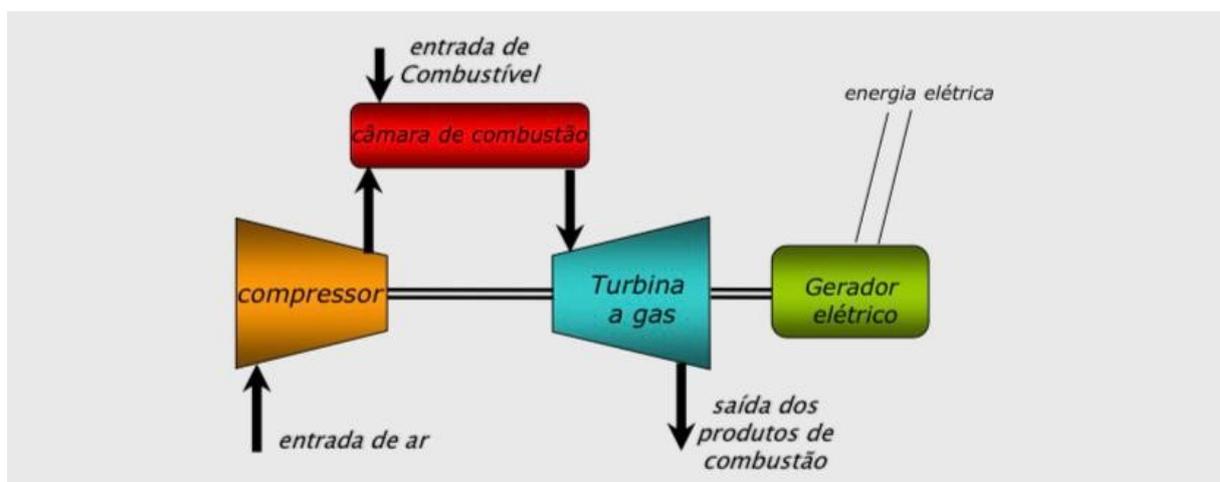
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Funcionamento da turbina a gás

Segundo Obert (1971):

Os principais elementos que formam a TG são : o compressor, a câmara de combustão e a turbina. O ar admitido no compressor é submetido a uma elevada taxa de compressão, após é direcionado para a câmara de combustão. O combustível é injetado na câmara de combustão, por meio dos bicos injetores, formando uma mistura com o ar comprimido, ocorrendo a queima de combustível, primeiramente com auxílio de uma centelha elétrica. esta combustão gera um gás de alta energia e alta temperatura, atingindo, nas maquinas mais modernas, cerca de 1350°C em operação contínua. Os gases a alta temperatura se expandem através da turbina, a qual transforma a energia térmica que estão possuídos, em energia mecânica, imprimindo-lhe um movimento rotativo, que vai acionar o compressor, continuamente, e transformar toda energia excedente em potência mecânica através do seu eixo, em empuxo propulsivo, ou uma combinação dos dois.

Figura 1 – Esquema Básico de Brayton.



Fonte: CIAA (2000).

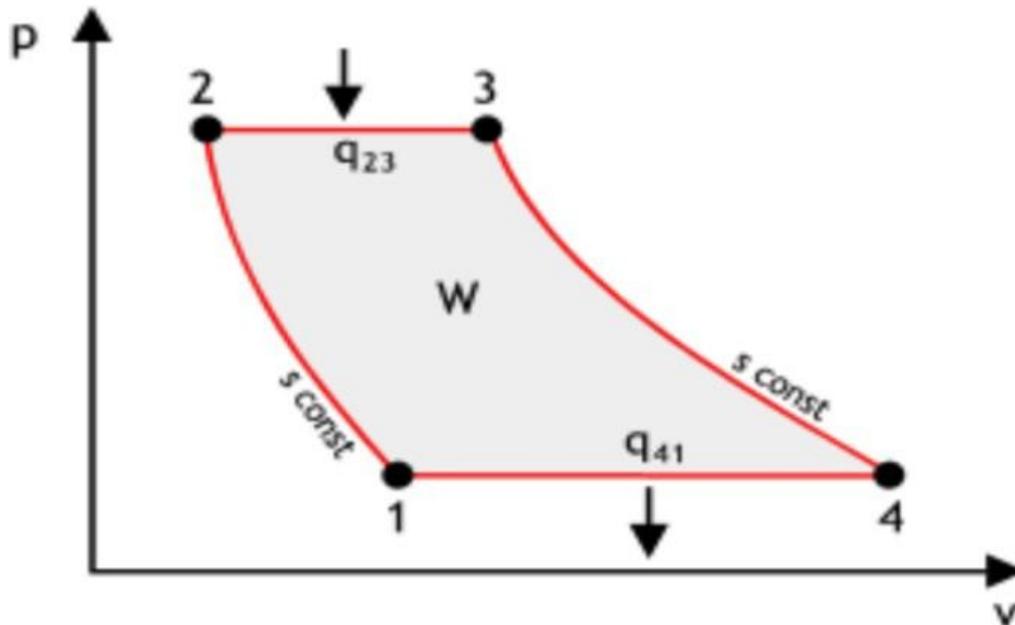
2.2 Ciclo Brayton

O ciclo Brayton é um ciclo ideal, ou seja, é uma aproximação dos processos que acontecem nas turbinas a gás, descrevendo variações de estado (temperatura e pressão) dos gases. Este ciclo é constituído de quatro etapas. Primeiramente, o ar em condição ambiente passa pelo compressor, onde ocorre compressão adiabática e isoentrópica, com aumento de temperatura e consequentemente aumento de entalpia. Sofrendo compressão, o ar é direcionado as câmaras, onde se mistura com o combustível possibilitando sua queima e aquecimento, a pressão constante. Ao sair da câmara de combustão, os gases, a alta temperatura e pressão, se expandem conforme passam pela turbina, idealmente sem variar sua entropia. Conforme o fluido exerce trabalho sobre as palhetas, a temperatura e pressão dos gases é reduzida, gerando potência mecânica. A potência extraída através do eixo da turbina é usado para acionar o compressor e eventualmente para acionar outra máquina. A última etapa não ocorre fisicamente, se tratando sim de um ciclo termodinâmico aberto. Conceitualmente, esta última etapa representa a transferência de calor do fluido para o ambiente.

Então, mesmo se tratando de um ciclo aberto, uma parte da energia proveniente da combustão é rejeitada sob a forma de calor, contido nos gases de escape. A rejeição de calor é um limite físico, atrelado ao funcionamento de ciclos termodinâmicos, mesmo nos casos ideais, como é mostrado na Segunda Lei da Termodinâmica.

A perda do ciclo ideal pode ser quantificada pela potência proveniente do combustível, descontando-se potência de acionamento do compressor e a potência líquida. Assim, diminui-se a perda conforme e reduzida a temperatura de escape e é elevada a temperatura de entrada da turbina, o que faz das resistências (a altas temperaturas) um ponto extremamente crítico na tecnologia de construção destes equipamentos (Silva, 2014). A figura 2 abaixo mostra um ciclo Brayton.

Figura 2 - Ciclo de Brayton



Fonte: Silva (2014)

2.3 Componentes da TG

2.3.1 Compressor

A configuração do Turbo-Compressor pode variar conforme o projeto, ou seja, varia o número de estágios, a arquitetura e o arranjo do projeto, mas a operação básica de todas as turbinas a gás segue o mesmo padrão.

2.3.2 Condutos Convergentes e Divergentes

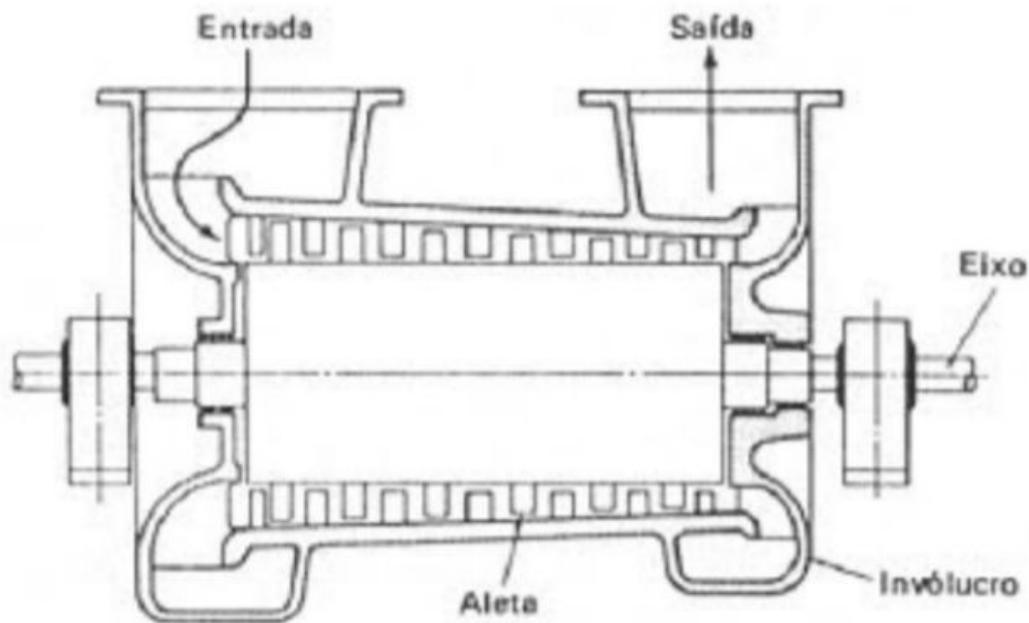
Os compressores que constituem as turbinas a gás usam condutos convergentes e divergentes para gerar as altas pressões necessárias ao bom funcionamento do tubo-

compressor. O ar ao escoar pelos condutos convergentes perde pressão, enquanto que nos condutos divergentes a pressão aumenta.

2.3.3 Compressor de Fluxo Axial

Um compressor de fluxo axial transforma um volume grande de ar com baixa pressão e baixa velocidade, em volume pequeno de ar de alta pressão e alta velocidade. A figura 3 mostra o desenho de um compressor de fluxo axial.

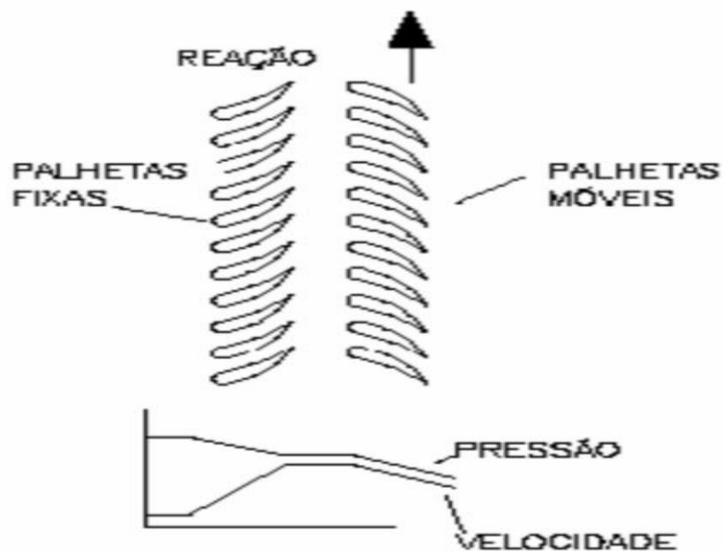
Figura 3 – Compressor de Fluxo Axial



Fonte: Silva (2014)

As palhetas rotativas do compressor em cada estágio estático aumentam a velocidade do ar, tal velocidade é transformada em pressão nos estágios fixos, como podemos ver na figura 4.

Figura 4 – Palhetas Rotativas e Fixas



Fonte: Silva (2014)

2.3.4 Palhetas de Admissão

A finalidade das palhetas fixas de admissão é alinhar o fluxo de ar para a primeira seção de palhetas rotativas, no qual a velocidade aumenta devido a adição de energia.

A seção seguinte de palheta do estator é divergente, com isso fornece um aumento em pressão estática e uma redução na velocidade do ar. O fluxo de ar então entra no segundo estágio a uma velocidade e pressão iniciais maiores do que na entrada para o estágio anterior. Cada estágio seguinte irá fornecer um aumento de velocidade e pressão estática até a faixa de pressão e velocidade desejada seja atingida.

O propósito básico das palhetas fixas do compressor é de direcionar o fluxo de ar, com ângulo adequado, para os canais formados pelas palhetas rotativas. Palhetas fixas corroboram para um melhor desempenho do compressor em regime de rotações variáveis.

2.3.5 Câmara de Combustão

A câmara de combustão tem por como finalidade queimar uma grande quantidade de combustível fornecida pelos injetores, com uma grande quantidade de ar advindo do compressor e liberar o calor de forma que o ar seja expandido e acelerado para dar uma corrente suave e uniforme do gás quente, necessária a turbina. Tudo isso com a mínima perda de pressão e a máxima eficiência. A figura 5 mostra uma câmara de combustão.

Figura 5 – Câmara de Combustão



Fonte: Silva (2014)

Existem vários tipos de câmara de combustão de turbina a gás, a câmara caneco foi o primeiro tipo de câmara utilizada em turbina a gás, nas turbinas mais recentes a câmara de combustão mais utilizada é o tipo câmara anular.

A câmara de combustão é um componente de extrema importância, pois as suas principais funções são; ter uma operação confiável em temperaturas elevadas, viabilizar uma distribuição adequada de temperatura a entrada da turbina, emitir a menor quantidade possível de poluentes durante sua vida útil.

2.4 Navios da MB que utilizam Turbina a Gás

Atualmente, são quatro classes de navios que tem TG em sua propulsão: Fragatas Classe Greenhalgh (FCG), Fragatas Classe Niterói (FCN), Corveta Classe Inhaúma (CCI) e Corveta Classe Barroso (CCB), entretanto as CCI e CCB tem o mesmo sistema de propulsão. As fragatas *Type 22* foram uma classe de navios desenvolvidos para a Marinha da Inglaterra, os quatorze navios construídos estiveram no serviço ativo pela Inglaterra de 1979 ate 2011. Conforme esses navios iam de baixa, alguns foram vendidos para o Brasil, sendo nomeados de Fragata Greenhalgh (posta fora de serviço em 2021), Fragata Dodsworth (posta fora de serviço em 2003), Fragata Bosisio (posta fora de serviço em 2015) e Fragata Rademaker (na ativa). A propulsão dessa classe de navio é combinação gás ou gás (COGAG), formada por duas turbinas Rolls Royce Tyne RM1C (para velocidades de cruzeiro) e duas turbinas Rolls Royce Olympus TM3B.

Figura 6 – Fragata Rademaker.



Fonte: Galante (2015),

Nos anos de 1970, as FCN representaram um marco de avanço tecnológico no que tange aos sistemas de combate e de manutenção, como parte do Programa de Renovação e Ampliação de Meios Flutuantes da MB. Foram incorporados cinco navios dessa classe a

armada brasileira, sendo eles as Fragatas Niterói (posta fora do serviço em 2019), Defensora (ainda na ativa), Liberal (ainda na ativa), Constituição (ainda na ativa), Independência (ainda na ativa) e União (ainda na ativa). A propulsão dessa classe de navio é “*Combined Diesel or Gas*” (CODOG ou combinado diesel ou gás), constituída por duas turbinas a gás Rolls Royce Olympus TM3B e quatro motores MTU TB91, acoplados a dois eixos.

Figura 7 – Fragata Constituição.



Fonte: Galante (2015).

O Projeto Corveta teve início em 1977, quando o Ministro da Marinha, Almirante Geraldo Azevedo Henning determinou o desenvolvimento de um projeto para a construção no Brasil de Navios Patrulha Oceânicos (NPaOc). O objetivo era substituir tanto as dez corvetas classe Imperial Marinheiro, quanto os doze antigos contratorpedeiros das classes Gearing, Allen M. Summer e Fletcher, fornecidos pelos Estados Unidos pelo programa de assistência militar (Galante, 2015).

Foram incorporadas a Armada brasileira quatro CCI, são elas as Corvetas Inhaúma (posta fora do serviço em 2016), Jaceguai (posta fora do serviço em 2019), Júlio de Noronha

(ainda na ativa) e Frontin (posta fora do serviço em 2014). A propulsão dessa classe de navio é CODOG, formada por uma turbina a gás GE LM 2500 e dois motores diesel MTU 16V956 TB91, acoplados a dois eixos e dois hélices passo variável e estabilizadores Vosper.

Figura 8 – Corveta Jaceguai

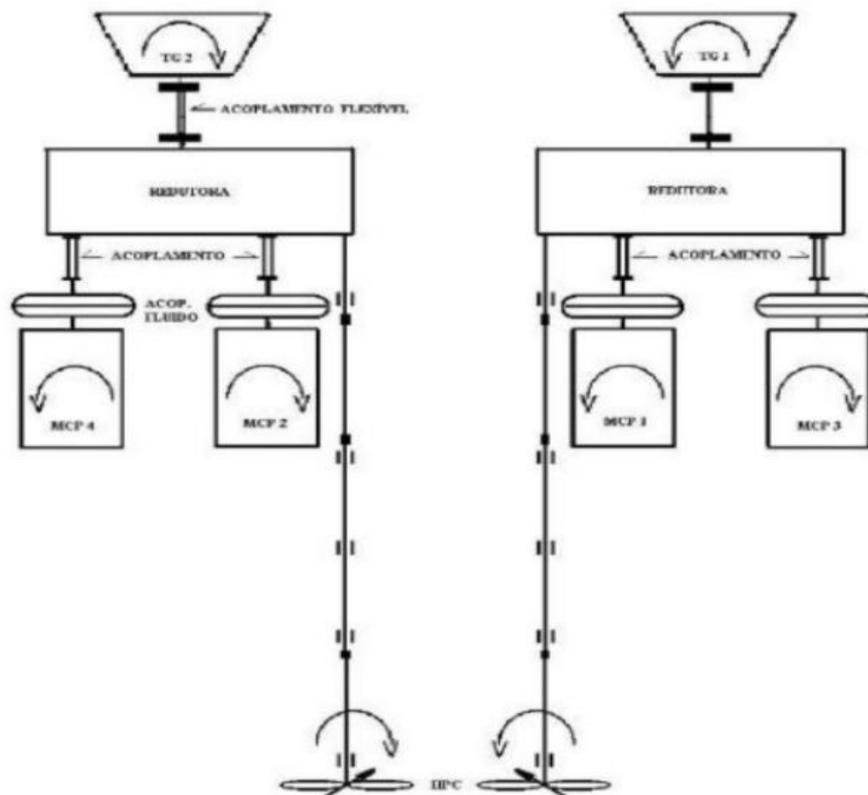


Fonte: Galante (2015)

2.5 Turbina Olympus TM3B

Uma FCN possui duas turbinas do tipo Olympus TM3B e tem como propulsão CODOG, que é o acionamento do eixo através TG ou pelo motor diesel. As turbinas são localizadas na Bravo 2 (praça de maquinas numero 2). A figura 9 mostra o esquema dos propulsores a bordo das FCN (Silva, 2018).

Figura 9 – Sistema CODOG das Fragatas Classe Niterói



Fonte: Ballal e Lefebvre (1972 apud Silva, 2018)

2.5.1 Vantagens e Desvantagens

Segue abaixo as vantagens e desvantagens da TG em relação ao motor diesel, de acordo com Ballal e Lefebvre (1972 apud Silva, 2018).

A) Vantagens:

- Tem maior razão de potência / peso;
- Partidas e paradas mais rápidas;
- Tempo de resposta baixo;
- Equipe de operação e manutenção reduzida;
- Consome menos matéria prima na fabricação;
- Menor custo;
- Produz menor vibração; e
- Não requer água de resfriamento.

B) Desvantagens:

- Menor eficiência;
- Menor vida útil;
- Mais sensível a qualidade do combustível;
- Muitos componentes sob alta tensão mecânica;
- Ruídos de alta frequência;
- Necessidade de grande quantidade de ar;
- Produção de grande quantidade de gases quentes; e
- Não pode ser reparado de planta.

2.5.2 Dados Operacionais

Segue abaixo dados operacionais da Turbina a gás Olympus TM3B, segundo Morgan, Lamport e Smith (1970 apud Silva, 2018).

- Potência 27.200 BHP, 25.000SHP;
- Rotação de alta pressão - 7810 rotações por minuto (rpm);
- Rotação do compressor de baixa pressão - 6200 rpm;
- Rotação da turbina de potência - 5660 rpm;
- Razão de pressão - 10,3;
- Eficiência com máxima potência - 28%;
- Eficiência com a metade da potência - 23,2%;
- Vazão mássica de ar na máxima potência - 103,419 Kg / s;
- Temperatura na entrada da turbina - 917°C;
- Número de câmaras de combustão - 8;
- Tipo de câmara de combustão - tubo anular;
- Número de estágios do compressor de baixa pressão - 5;
- Número de estágios do compressor de alta pressão - 7;
- Número de estágios da turbina de baixa pressão- 1;
- Número de estágios da turbina de alta pressão – 1; e
- Número de estágios da turbina de propulsão - 1.

2.5.3 Rendimento

De acordo com (Silva, 2014) o rendimento da TG está diretamente ligado aos máximos valores de temperatura dos gases, que se consegue na saída da câmara de combustão, tal temperatura será nomeada de Power Turbine Enter Temperature (PTET). Quanto maior for a PTET, maior será a energia cinética disponível a ser transformada em

trabalho nas palhetas da turbina. O grande obstáculo para a tecnologia atual é obter um tipo de material que resista a essas temperaturas, que chegam a ultrapassar 2000°C. Esta temperatura pode ser aumentada em função do débito de combustível que se queima na câmara de combustão. Por conta de um sistema de resfriamento de palhetas, ciscos e diafragmas, bem como superfícies de irradiação de calor e ventilação da carcaça do isolamento acústico, tem-se obtido condições para que os materiais existentes suportem entre 1500°C a 2000°C.

Conforme maior a eficiência do compressor, maior é sua pressão de saída para um mesmo trabalho recebido em seu eixo. As compressões mais eficientes são as isotérmicas e exigem resfriadores entre os estágios, tornando a instalação muito complexa.

Com relação aos dutos, passagens e carcaças, existem perdas de energia por causa do atrito no escoamento, condução de calor para o exterior por deficiência do isolamento térmico e turbulência no crescimento de dutos de forma diferente do ideal.

Na TG Olympus, dois terços do trabalho, por ela produzido, é utilizado para movimentar os seus compressores. Temos, portanto um rendimento ainda baixo e, além disso, a turbina é obrigada a diluir a mistura ar combustível a proporção de 250Kg de ar para 1Kg de combustível, por causa das limitações do material da turbina.

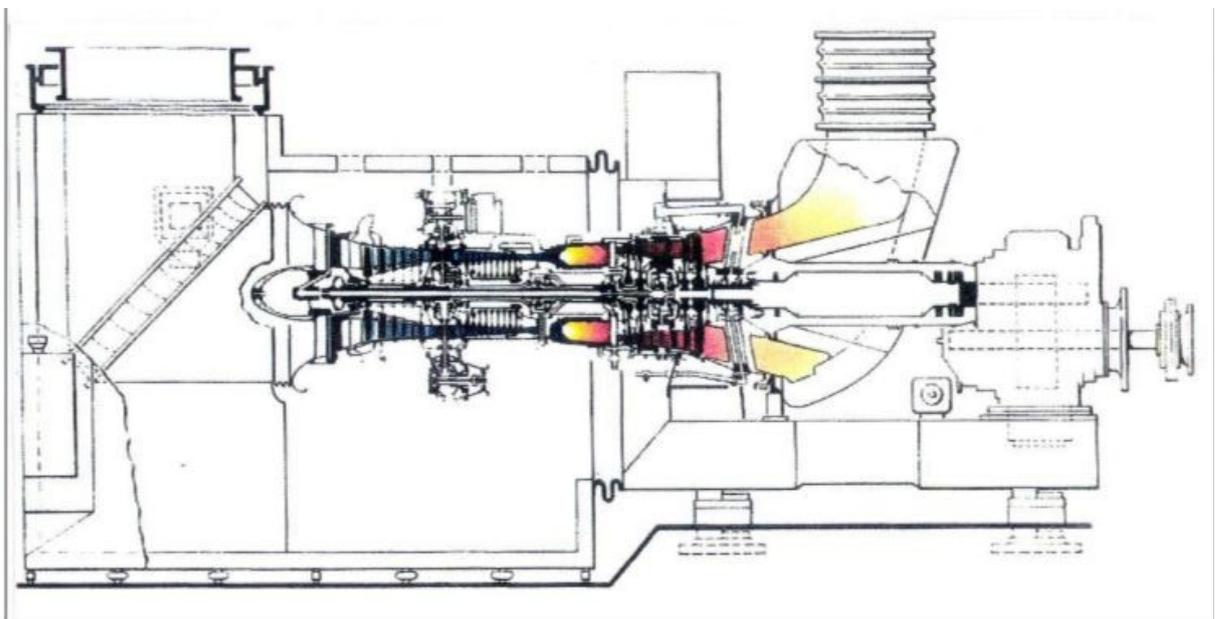
2.6 Turbina Tyne

O gerador de gás Marine Tyne incorpora duas turbinas independentes de um único estágio, uma acionando um compressor de baixa pressão de fluxo axial de seis estágios e a outra um compressor de alta pressão de fluxo axial de nove estágios. Uma turbina de potência de fluxo axial de dois estágios aciona uma redutora primária através de um eixo de saída.

O gerador de gás e a turbina de potência juntos, formam uma Unidade de Troca de Turbina a Gás (GTCU) e é este conjunto que é removido durante uma substituição de máquina. A GTCU é instalada em um módulo que incorpora um involucro acústico ventilado, um 'Cascade bend' que recebe o fluxo de ar do duto de entrada do navio e direciona-o suavemente para dentro do gerador de gás, uma estrutura de montagem e um duto de escape.

A potência necessária para dar partida ao gerador de gás é baixa porque somente o eixo do compressor de alta pressão tem que ser girado no início do funcionamento. Um sistema de ar anti- congelamento previne o aparecimento de gelo quando operando em clima extremamente frios. Catracas são instaladas para prevenir o efeito brinel (amalgamento das esferas dos mancais) quando o gerador de gás não estiver em uso (CIAA, 2007).

Figura 10 – Turbina Tyne



Fonte: CIAA (2007)

De acordo com CIAA (2007), as principais características técnicas da turbina são:

- Lubrificante da GTCU - EXON 23 80;
- Capacidade do tanque – 115 litros ou 25 galões;
- Óleo lubrificante da engrenagem redutora primaria – OM 100;
- Agente de limpeza – CCIF ZOK 27;
- Fluido de inibição – PX24 ARDROX;
- Razão da engrenagem primaria – 4,01 7

- Velocidade Máxima da turbina de potência -n 13.800 a 14.500 rpm;
- PTET máxima – 700C (alarme) a 750C (desarme);
- Pressão de entrada na bomba de óleo combustível (OC) – 5 a 25 psi;
- Pressão de descarga de OC ralenti – 500 a 580 psi;
- Pressão máxima da bomba de OC – 1250psi;
- Pressão máxima da bomba de óleo lubrificante (OL) – 50 a 55 psi;
- Pressão mínima da bomba de OL – 40 a 45 psi;
- Consumo máximo de OL – 2,5 pint / h em 5000 horas de funcionamento;
- Consumo máximo de OL – 1,5 pint / h em 0 horas de funcionamento;
- Consumo médio de óleo lubrificante – 0,5 pint / h; e
- Nota 1 pint = 571ml.

Tabela 1 – Dados Comparativos entre OLYMPUS (RALANTI) e Tyne.

LEITURA	TYNE	OLYMPUS
LP rpm (N _i)	6350±150	2000 a 2200
HP rpm (N _H)	10500±150	4200
PT rpm (N _{pT})	5000 ± 150	2200
PTET	± 400°C	±300°C
FPDP*	540 ± 40 psi	450 a 470 psi
Press OC	5 a 25 psi	5 a 25 psi
Press OL	3 a 3,5 bar	3 a 3,5 bar
P3	18 a 20 psi	9 a 11 psi
P3P	2 a 3 psi	1 a 2 psi
* Pressão da bomba de combustível		

Fonte: Oliveira (2011).

2.7. Motor 16V956 TB91

Como mencionado anteriormente nesse trabalho, uma FCN possui quatro motores MTU 16V956 TB91, sendo os motores número 1 e número 3 para o eixo de boreste e os motores número 2 e número 4 para o eixo de bombordo. Estes motores ficam situados na praça de máquinas número 3.

2.7.1. Dados operacionais

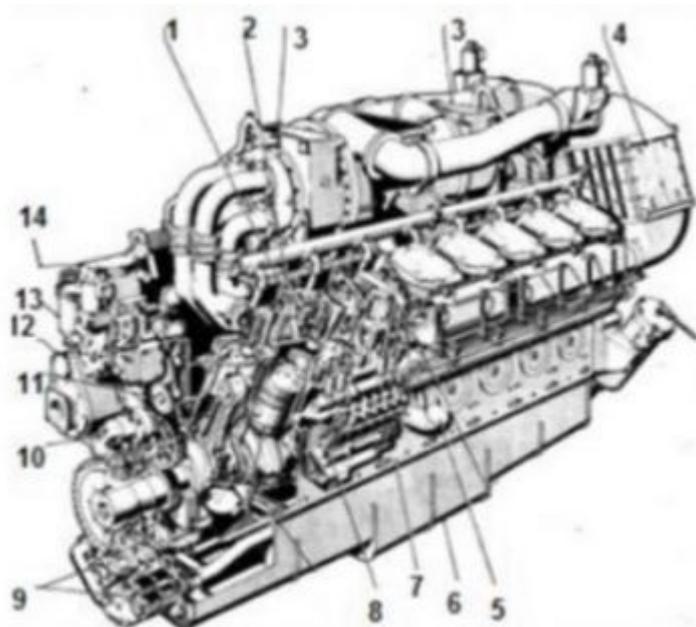
Segue abaixo dados operacionais do motor, de acordo com (Fernandez, 2018 apud Silva, 2018).

- Processo de trabalho – a quatro tempos, de simples efeito
- Processo de combustão – injeção direta
- Tipo de sobrealimentação – por turbocompressor a gás de escapamento
- Tipo de refrigeração – a água
- Forma construtiva – motor em V, a 50°
- Diâmetro interno do cilindro – 230 mm
- Curso do pistão – 230 mm
- Cilindrada por cilindro – 9,55cc
- Número de cilindros – 16
- Taxa de compressão – 13
- Ordem de ignição – A1-B3-A3-B7-A7-B4-A4-B8-A8-B5-A6-B2-A2
- Potência contínua – 4000 CV a 1515 rpm
- Potência máxima durante meia hora a cada seis horas – 4500 CV a 1575 rpm
- Pressão de injeção de combustível – 260 kp /
- Peso da instalação completa – 16.600 Kg
- Peso do motor (incluindo acessórios, sem enchimento de água e de óleo) – 13.000Kg

- Capacidade da água de refrigeração (incluindo as tubulações montadas no motor) – 750 litros
- Capacidade de água do radiador do ar de sobrealimentação – 40 litros
- Capacidade do óleo do motor (marca inferior) – 250 litros
- Capacidade do óleo do motor (marca superior) – 395 litros.

2.7.2. Componentes

Figura 11 – Componentes do Motor 16V956 TB91



Fonte: Fernandez (2018) apud Silva (2018)

1. Cabeça do cilindro
2. Bico injetor
3. Turbo compressor
4. Refrigerador de ar
5. Cotovelo preenchido com óleo
6. Cárter do motor

7. Bloco do motor
8. Bomba de injeção
9. Bomba de óleo
10. Bomba de combustível
11. Trem de engrenagem
12. Bomba de água salgada
13. Filtro de óleo combustível
14. Regulador.

2.8. Emissão de Poluentes gerados pela Turbina a Gás.

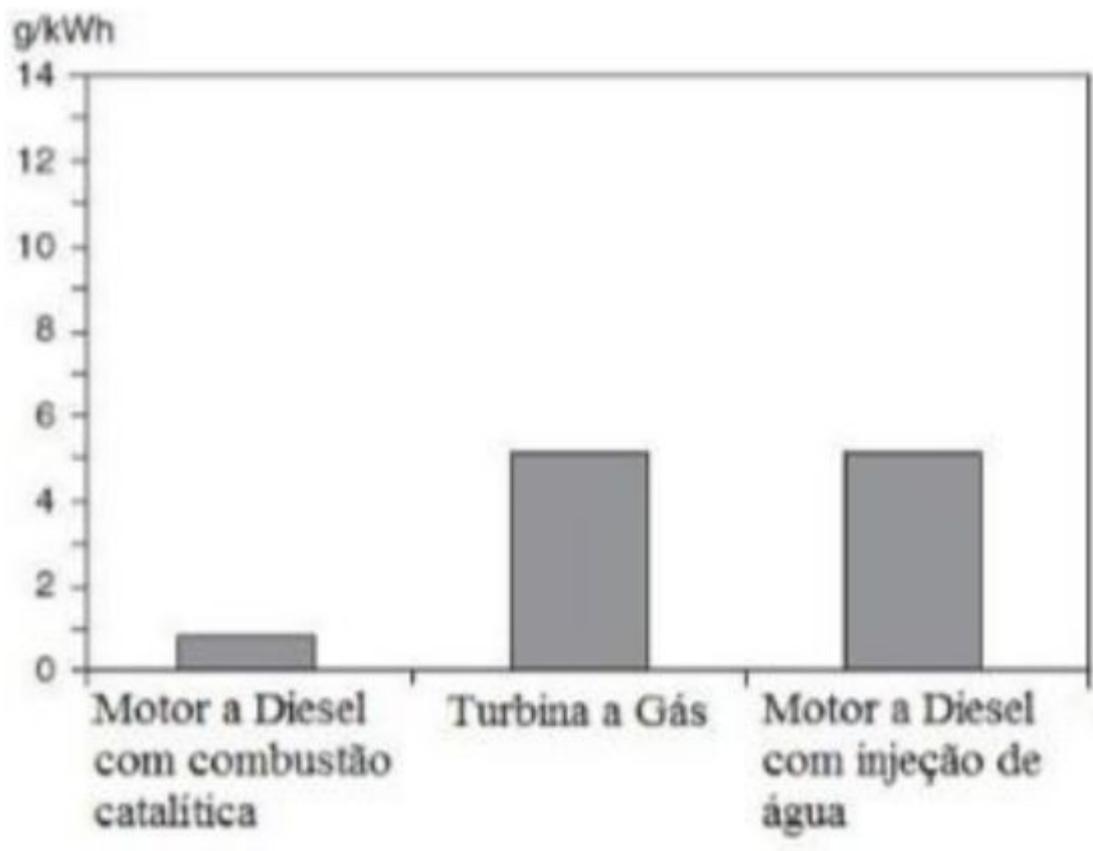
No Brasil, elas são amplamente utilizadas em termelétricas, navios e, principalmente, em plataformas offshore. Além disso, o investimento nessa área vem chamando a atenção, influenciando inclusive a construção de um centro de manutenção dessas turbinas na região serrana do Rio de Janeiro, que veio trazer para o país serviços que anteriormente eram realizados em fábricas no exterior (GE BRASIL, 2013 apud Amaral, 2014).

Como todo motor de combustão, as turbinas emitem gases como produto de seu funcionamento, que são prejudiciais para a saúde humana e podem causar alterações climáticas quando em altas concentrações. Dentre os gases produtos da combustão encontram-se os óxidos de nitrogênio, também conhecidos como NOx.

A denominação NOx é definida por regulamento como o somatório do óxido nítrico, NO, e o dióxido de nitrogênio, o NO₂ (Correa, 1998 apud Amaral, 2014). Além dos danos para a saúde humana, os óxidos de nitrogênio se destacam por sua crítica capacidade de oxidação na atmosfera (Kohl, 1997 apud Amaral, 2014). Mesmo acontecendo avanços para o desenvolvimento de tipos alternativos de combustão com menor emissão desses gases, eles continuam a ser uma grande preocupação e, portanto, sua emissão está sujeita a limites estabelecidos por órgãos internacionais.

Combustão em turbinas a gás é um processo contínuo, com temperaturas médias e pressões inferiores aos níveis de pico em motores a diesel. A característica fundamental de combustão contínua em uma turbina de gás é que o tempo de permanência em temperaturas elevadas, uma das principais causas da formação de NO_x, como será visto adiante, é possível de ser controlada. No gráfico 1, é possível observar como as emissões de NO_x reagem em diferentes motores de propulsão utilizando o mesmo tipo de combustível marítimo.

Gráfico 1 – Emissões de NO_x específicas para motores



Fonte: Molland (2018) apud Amaral (2014)

2.8.1 LEGISLAÇÃO

A Organização Marítima Internacional das Nações Unidas (da sigla em inglês, IMO) foi fundada para promover a segurança marítima, e atualmente agrupa 169 Estados-Membros e três membros associados. Suas regras relativas à poluição por navios estão contidas na "Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios", conhecida como MARPOL 73/78. Em 1997, foi alcançado um acordo sobre o controle da emissão de gases poluentes, em um anexo sobre poluição do ar, durante uma convenção sobre poluição marítima.

Nessa convenção foi estabelecido o Anexo VI, que entrou em vigor em 2005 e definia um limite global sobre o teor de NOx e SOx contidos no combustível marítimo e nos gases de exaustão dos navios (Amaral, 2014). Além disso, foram estabelecidas disposições que permitiam a designação de áreas de supervisão de emissões com controle mais rígido, chamadas ECAs (Silva, 2008 apud Amaral, 2014). Foi observado, porém, que a IMO não considera as turbinas a gás no grupo de motores abrangidos pelas normas.

O aumento no controle dessas emissões, todavia, já demonstra como, no futuro, não haverá equipamento que fuja dessa regulação. Recentemente, as normas de emissão de NOx foram reforçadas. Membros da IMO votaram e, de maneira unânime, concordaram em reforçar as normas de emissão. Esse corte foi chamado de Tier II, já que Tier I se referia às primeiras normas adotadas em 2005. Em uma segunda etapa, denominada de Tier III, as emissões seriam reduzidas em 80%, até 2016 (Nilsson, 2011 apud Amaral, 2014). O aumento da rigidez dessas normas após pouco tempo de sua criação é um indicador do que é esperado para os próximos anos.

2.9. Futuros Navios da MB

Em 2017, a MB iniciou o Programa Classe “Tamandaré” com o objetivo de promover a renovação da esquadra com quatro navios modernos, de alta complexidade tecnológica,

construídos no país, com previsão de entrega para o período entre 2025 e 2028. O Programa Classe “Tamandaré” é oriundo de uma necessidade imediata de renovação dos meios navais da esquadra brasileira, com o intuito de incrementar a capacidade de defesa, monitoramento e proteção da “Amazônia Azul”. Além do controle de áreas marítimas de interesse, evitando o acesso de meios não desejáveis pelo mar.

No que tange à propulsão, as Fragatas Classe “Tamandaré” (FCT) serão equipadas com um sistema CODAD, dotado de 4 motores MAN 12V 28/33D STC de 6.000 kW de potência, dois eixos, duas engrenagens redutoras e hélices de passo controlado, alcançando a velocidade máxima de 26,5 nós.

Como importante informação para este trabalho, o projeto será baseado nos navios Classe MEKO, da Thyssenkrupp Marine Systems, com a MEKO A-200, usada pela Marinha da África do Sul, como modelo que mais se aproxima das características das FCT (Lopes, 2021)

Tabela 2 – Comparativo entre os navios que usam TG e a FCT

Classe	FCT	FCN	FCG	CCB	CCI
Ano de batimento de quilha	2023 (previsão)	1972	1975	1994	1983
Comprimento (m)	107,2	129,2	131,2	103,4	95,77
Boca (m)	15,95	13,5	14,8	11,4	11,4
Calado (m)	5,2	5,5	6,1	5,3	5,3
Deslocamento (t)	3500	3800	4500	2.350	1.970
Propulsão	CODAD	CODOG	COGOG	CODOG	CODOG
Potência (kW)	4 x 6.000	4 x 2.900 2 x 20.000	2 x 7.200 4 x 40.000	2 x 4.800 1 x 20.000	2 x 2.900 1 x 20.000
Velocidade Máxima (nós)	26,5	30	30	29	29
Velocidade de cruzeiro (nós)	14	15	18	15	15
Autonomia (MN)	6.050	5.300	4.100	4.000	4.000
Propulsor	2 hélices	2 hélices	2 hélices	2 hélices	2 hélices

Fonte: Lopes (2021)

Quanto à velocidade máxima de operação dos meios, os novos escoltas apresentam um valor inferior, o que, em conjunto com a evolução tecnológica no projeto dos propulsores e casco, influencia diretamente no valor de potência requerida, 24 MW contra 40 MW da FCN. Tal diferença de potência requerida, junto a eficiência do motor diesel, contribuem para a não adoção de turbinas no sistema propulsivo das FCT.

Os navios equipados com propulsão CODOG, quando estão operando somente com a turbina a gás, possuem a maior parte da sua instalação propulsora parada, haja vista que sua engrenagem não combina a potência de todos os acionadores, constituindo assim peso e volume morto para o navio. Enquanto que nos navios com sistema de propulsão CODAD, apesar de ser necessária uma engrenagem redutora mais complexa, quando o navio necessita navegar em velocidade máxima, toda a sua potência embarcada estará em uso. Além disso, caso o sistema seja composto por acionadores iguais (exemplo das FCT), é possível utilizar os motores alternadamente, o que aumenta o tempo necessário para paradas de manutenção e permite a redundância em caso de avaria que limitasse ou impedisse o uso de um dos acionadores (Anderson, 2013 apud Lopes, 2021).

Também pela análise da tabela 2, pode-se indicar uma outra vantagem do sistema CODAD no caso em questão. O seu baixo consumo, que agregado a um maior espaço disponível para o transporte de óleo combustível, resulta numa maior autonomia, de forma que as FCT propiciarão o maior raio de ação entre os navios escoltas em operação na MB (Lopes, 2021)

De acordo com informações obtidas diretamente com oficiais engenheiros da EMGEPRON (empresa pública responsável pelo gerenciamento do projeto das FCT), além das vantagens citadas acima, o custo e a autonomia foram os principais fatores responsáveis pela escolha da configuração CODAD. A experiência obtida nos mais de 30 anos de operação das FCN e FCG mostra que os fatores do sistema de propulsão que mais limitaram a operação desses navios foram seu custo de manutenção e operação, principalmente das TG (fato este que se acentua ainda mais nas FCG, que têm um elevado custo por dia de mar, visto que só possuem turbinas a gás). Este fator, atrelado ao vasto território marítimo sob responsabilidade

da MB, pautaram a escolha pelo sistema CODAD, unindo grande raio de ação e baixo custo (Lopes, 2021).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada foi pautada no estudo de pesquisas bibliográficas de caráter expositivo e descritivo dos principais assuntos pertinentes ao tema proposto por meio de artigos técnicos e científicos, livros, monografias, dissertações e teses. No que tange as TG, foram realizadas consultas a profissionais que trabalham ou já trabalharam na divisão MIKE dos navios que utilizam turbina em sua propulsão.

3.1 Classificação da Pesquisa

Pode ser classificada quanto aos fins ou quanto aos meios.

3.1.1 Quanto aos fins

O presente trabalho tem a finalidade básica estratégica, de caráter expositivo e descritivo.

3.1.2 Quanto aos meios

A apresentação do trabalho foi executada de forma bibliográfica.

3.2 Limitações do Método

O presente trabalho limitou-se ao método hipotético-dedutivo.

3.3 Coleta e Tratamento de Dados

Os dados foram coletados em artigos técnicos e científicos, manuais, dissertações, teses e consultas a militares que trabalham com TG.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO CASO

Com as informações expostas durante o trabalho infere-se que para velocidade de cruzeiro o mais recomendável é o navio operar com um motor diesel por eixo, pois o consumo de combustível e o custo serão menores. Apesar de que, nestas condições, o motor opera em carga parcial, ou seja, não opera com sua máxima eficiência. Para velocidades maiores, apesar de consumir um pouco mais de combustível, recomenda-se operar com dois motores diesel por eixo, pois os motores não ficam carregados. A TG neste caso não é recomendável, pois o seu consumo de combustível e custos são altos, além de operar com cargas muito menores da ideal. Entretanto, quando o mesmo opera com velocidade de 30 nós ou mais, o navio chega bem mais rápido ao destino, porém o consumo de combustível e o custo são muito elevados.

Por fim, a turbina a gás é recomendável para altas velocidades e curtas distâncias, além de ser utilizada quando o navio está sob ameaça submarina, pois quando a turbina está em funcionamento, esta vibra menos que o motor diesel, dificultando a detecção. Porém elas emitem mais gases poluentes que os motores a diesel.

5 CONCLUSÃO

Com o surgimento das novas tecnologias e a própria evolução técnica no campo da engenharia, nota-se que os navios acompanharam esta progressão, fazendo surgir belonaves mais confiáveis, flexíveis e versáteis. Sendo assim, a tendência das Marinhas mais desenvolvidas é enveredar para navios com propulsões combinadas e cada vez mais flexíveis, não deixando de observar as questões ambientais e a maior autonomia, principalmente no que concerne ao consumo de óleo combustível.

Destaca-se que a segurança do território brasileiro e sua soberania só serão mantidas através da valorização de ações diplomáticas e do seu Poder Militar. Considerando o cenário brasileiro atual, a MB empenha-se no aperfeiçoamento dos procedimentos de emprego das arquiteturas das plantas combinadas. Passando por diversas etapas, a Força busca o conhecimento conforme suas classes de navios evoluem, de forma a aprimorar seus meios navais para exercerem a defesa, vigilância e controle das Águas Jurisdicionais Brasileiras.

A seleção do sistema propulsivo é parte vital para o sucesso do projeto de um navio, especialmente aqueles com fins bélicos, os quais possuem importantes demandas como grande elasticidade de potência, redundâncias e pequeno espaço disponível. Tão vital quanto complexa, é importante salientar que a proposição de um sistema de propulsão combinada e posterior seleção dos acionadores dependem de inúmeros fatores, muitos dos quais só podem ser abordados em um projeto completo.

A utilização de TG em navios da MB apresenta desafios específicos devido as características operacionais e ambientais únicas dos navios militares e dos mares brasileiros. Os mares brasileiros podem apresentar condições climáticas desafiadoras, como tempestades e ventos fortes, contudo as TG devem ser capazes de operar de forma confiável sob essas adversidades. Garantir um suprimento constante de combustível adequado para as turbinas a gás pode ser desafiador, especialmente em operações em locais remotos ou em águas internacionais. A MB deve lidar com esses desafios de forma abrangente, considerando fatores técnicos, logísticos, financeiros e ambientais para garantir o desempenho confiável das

turbinas a gás em seus navios. A cooperação com fabricantes, a pesquisa contínua e o investimento em infraestrutura e treinamento são essenciais para superar esses desafios.

Assim sendo, conclui-se que todo esse conjunto de circunstâncias fortalece os argumentos que recomendam e justificam ao país contar com os projetos de meios navais que tangem as plantas propulsoras combinadas, de forma mais eficaz e com custos operacionais reduzidos, destacando-os como melhor estratégia para dar continuidade aos seus vetores do poder naval e, preservar então, seus soberanos interesses no mar.

5.1 Sugestões para Futuros Trabalhos

A recomendação para trabalhos futuros é apresentar um modelo termodinâmico e aprofundar a análise econômica, pois neste trabalho não foi levantado custos de manutenção e aquisição de sobressalentes.

REFERÊNCIAS

OBERT, Edward F. Motores de combustão interna, 2.ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1971

CIAA -118/055: **Turbina Tyne**, 1ª Edição – 2007.

SILVA, Cláudio. **Otimização das Turbinas: Vantagens e Desvantagens da Turbina a Gás Olympus em Relação ao Motor Diesel da Fragatas Classe Niterói**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk.

Fundamentos da termodinâmica; Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag; 7ªEd. Americana – SP: Blucher, 2009.

LOPES, Thiago. **Sistemas de Propulsão Combinada: O caso de estudo das Fragatas Classe Tamandaré**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro de Instrução Almirante Wandenkolk.

AMARAL, Maria. **Estudo Sobre a Emissão De NOx Por Turbinas A Gas**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitario Da Zona Norte.

CIAA -118/028: **Turbina a Gás**, 1ª Revisão – 2000.

OLIVEIRA, Clayton. **Turbina a Gás**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro De Instrução Almirante Graça Aranha.

GALANTE, Alexandre. **As Corvetas Classe Inhaúma e Barroso**. Poder Naval, 2015. Disponível em: <<https://www.naval.com.br/blog/2015/12/27/as-corvetas-classe-inhauma-e-barroso/>> . Acesso em: 22 out.2023.

SILVA, Rodrigo. **Turbina a Gás**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro De Instrução Almirante Graça Aranha.

LAURYA, M.L. **Análise de rendimento de uma turbina a gás utilizando resfriamento do ar de aspiração**. 2014. Tese (Mestre em Engenharia Mecânica) - Departamento de Educação Superior, CEFET, Rio de Janeiro.

FERNANDEZ, Manuel. **Motor M.T.U. 16V956TB-91**. Disponível em <<https://www.scribd.com/presentation/23567417/MOTOR-MTU-16-V-956-TB-91-01-DESCRIPCION>>. Acesso em: 22 out.2023.

FONSECA, M. **Arte Naval**. 8 ed. Rio de Janeiro-RJ: Serviço de documentação da Marinha, v. 1, 2019.

MARINHA DO BRASIL. **Apostila de Instalação de Máquinas do Curso de Formação de Oficiais da Marinha**. Rio de Janeiro, 2001.