

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

A SELEÇÃO DOS MOTORES DIESEL PARA A PROPULSÃO NAVAL: O caso de
estudo das Fragatas Classe “Tamandaré”



1º TENENTE GABRIEL MOREIRA DE OLIVEIRA SALVIANO

Rio de Janeiro

2023

1º TENENTE GABRIEL MOREIRA DE OLIVEIRA SALVIANO

A SELEÇÃO DOS MOTORES DIESEL PARA A PROPULSÃO NAVAL: O caso de estudo
das Fragatas Classe “Tamandaré”

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

Orientadores:

Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior.

CC (RM1-EN) Carlos Martins.

CC (EN) Júlio Cesar.

CIAA
Rio de Janeiro
2023

FOLHA DE APROVAÇÃO

1º TENENTE GABRIEL MOREIRA DE OLIVEIRA SALVIANO

A SELEÇÃO DOS MOTORES DIESEL PARA A PROPULSÃO NAVAL: O caso de estudo das Fragatas Classe “Tamandaré”

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:

Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc – UFRJ

CC (RM1-EN) Carlos Alfredo Órfão Martins, M.Sc – CIAA

CC (EN) Júlio César Silva Pontes, M.Sc – DEN

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico esse trabalho à minha família, pois sem eles, nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

O autor expressa profunda gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, com um agradecimento especial ao professor e coordenador, Comandante Carlos Martins, cujo ensinamento, disponibilidade e companheirismo foram inestimáveis, indo além das fronteiras da sala de aula.

Ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino (CIAA), agradece pela valiosa oportunidade proporcionada aos Oficiais da turma Almirante Gastão Motta, que possibilitou o aprimoramento de suas habilidades profissionais.

Destaca-se, de modo especial, a gratidão à sua recém falecida avó, Maria José Moreira de Sousa Leite. Apesar das adversidades e das suas limitações, ela sempre se empenhou em contribuir para o crescimento, evolução e conquistas do autor. Ela desempenhou o papel mais fundamental possível, o de acreditar, incentivar e instigar a busca contínua pela vitória. Sua influência e apoio serão sempre lembrados e celebrados com carinho e profundo reconhecimento.

“Mesmo desacreditado e ignorado por todos, não posso desistir, pois para mim, vencer é nunca desistir”.
(Albert Einstein)

A SELEÇÃO DOS MOTORES DIESEL PARA A PROPULSÃO NAVAL: O caso de estudo das Fragatas Classe “Tamandaré”

Resumo

O trabalho tem como objetivo principal analisar as vantagens dos motores diesel na propulsão naval, com foco especial na seleção do sistema de propulsão das Fragatas Classe "Tamandaré" da Marinha do Brasil. O estudo inicia com uma compreensão do Ciclo Diesel ideal, base fundamental para entender os demais componentes do sistema de propulsão. Em seguida, explora os diferentes tipos de motores diesel, classificando-os com base em seus princípios de funcionamento e faixas de velocidade de rotação, enquanto identifica suas aplicações na propulsão naval. O trabalho prossegue com uma análise das etapas de seleção de sistemas de propulsão naval, com ênfase na busca por soluções que otimizem a eficiência e a confiabilidade dos motores propulsores. Os índices de desempenho do motor MAN 12V 28/33D STC são detalhadamente apresentados e discutidos. Em seguida, é realizada uma comparação abrangente entre os índices de desempenho dos navios de escolta atualmente em operação na Marinha do Brasil e os da nova classe de fragatas, permitindo uma análise detalhada das diferenças e vantagens. Ao final, encontra-se uma análise conclusiva dos motivos pela preferência dos motores diesel para a propulsão naval e para a Marinha do Brasil.

Palavras-chave: Fragata Classe “Tamandaré” (FCT), Motores Diesel, Propulsão Naval, Sistema de Propulsão CODAD, Escolha do sistema de propulsão.

Abstract

The main objective of this research is to analyze the advantages of diesel engines in naval propulsion, with a special focus on the selection of the propulsion system for the "Tamandaré" Class Frigates of the Brazilian Navy. The study commences with an understanding of the Ideal Diesel Cycle, which serves as a fundamental basis for comprehending the various components of the propulsion system. Subsequently, it explores the different types of diesel engines, classifying them based on their operating principles and ranges of rotational speed, all while identifying their applications in naval propulsion. The research then proceeds with an analysis of the stages involved in selecting naval propulsion systems, with an emphasis on seeking solutions that optimize the efficiency and reliability of the propulsion engines. The performance indices of the MAN 12V 28/33D STC engine are presented and meticulously discussed. A comprehensive comparison is then conducted between the performance indices of escort ships currently in operation in the Brazilian Navy and those of the new frigate class, allowing for a detailed analysis of the differences and advantages. Finally, the study concludes with an analysis of the reasons for the preference for diesel engines in naval propulsion, particularly in the context of the Brazilian Navy.

Keywords: Tamandaré Class Frigate (TCF), Diesel Engines, Naval Propulsion, CODAD Propulsion System, Propulsion System Selection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagramas PxV e TxS Ciclo Diesel Ideal	20
Figura 2 – Fases de um motor quatro tempos	22
Figura 3 – Ciclo motor diesel dois tempos	23
Figura 4 – Relação entre Eficiência e Rotação.....	21
Figura 5 – Sistema de Propulsão Naval	22
Figura 6 –Desempenho do motor diesel	28
Figura 7 – Arranjo de Propulsão CODOG.....	30
Figura 8 – Arranjo de Propulsão COGOG.....	30
Figura 9 – Fragata Classe “Tamandaré”	32
Figura 10 – Desempenho Motor MAN 12V 28/33D STC	34
Figura 11 – Arranjo de Propulsão CODAD.....	35
Figura 12 – Motor MAN 12V 28/33D STC.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quadro de Especificações do Motor MAN	33
Tabela 2 – Tabela Comparativa entre as classes de navios escolta	36

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

MB	Marinha do Brasil
PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
FCT	Fragata Classe “Tamandaré”
FCN	Fragata Classe “Niterói”
FCG	Fragata Classe “Greenhalgh”
CCB	Corveta Classe “Barroso”
CCI	Corveta Classe “Inhaúma”
CODOG	<i>Combined Diesel or Gas</i>
COGOG	<i>Combined Gas or Gas</i>
CODAG	<i>Combined Diesel and Gas</i>
COGAG	<i>Combined Gas and Gas</i>
CODLAD	<i>Combined Diesel-electric and Diesel</i>
CODLAG	<i>Combined Diesel-electric and Gas</i>
CODAD	<i>Combined Diesel and Diesel</i>

LISTAS DE SÍMBOLOS

P_e	Potência efetiva
P_i	Potência indicada
W_i	Trabalho indicado do êmbolo
n_t	Rendimento térmico
\dot{Q}	Fluxo de calor
n	Velocidade de Rotação do eixo
\dot{m}_c	Vazão de massa de combustível
pc_c	Poder calorífico do combustível
n_m	Rendimento mecânico do motor
T	Torque do motor
F	Força no êmbolo, gerada pela combustão
A	Área da superfície do êmbolo
L	Comprimento do curso do êmbolo
Z	Número de cilindros

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa e Relevância	16
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	16
1.3 Etapas do Trabalho	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Ciclo Diesel	19
2.1.1 Processos do Ciclo	20
2.2 Motores Diesel	21
2.2.1 Motores Quatro Tempos	21
2.2.2 Motores Dois Tempos	22
2.2.2 Faixas de Rotação dos Motores Diesel	23
2.3 Aplicações na Propulsão Naval	25
2.3.1 Sistemas de Propulsão a Diesel	26
3 METODOLOGIA	27
3.1 Como Selecionar o Sistema de Propulsão	27
3.1.1 Potência e Torque do Motor Principal.....	28
3.1.2 Relação Peso e Dimensões	29
3.1.3 Flexibilidade de Manobra	30
3.1.4 Custos de Projeto e de Operação	31
4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	32
4.1 Análise dos resultados	32
4.2 Aplicação dos resultados	36
5 CONCLUSÃO	37
5.1 Considerações Finais	37
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	38
REFERÊNCIAS	39
ANEXO A – Códigos de MATLAB utilizados	40

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos séculos, o oceano tem desempenhado um papel fundamental para as nações mundiais na economia e na projeção de poder, por exercer funções cruciais no comércio, no transporte e até militar. Nos primórdios, as embarcações eram impulsionadas pela força humana, contudo os egípcios introduzem a vela como fonte propulsora, por volta do ano 3000 a.C., dando início a ideia de propulsão naval. Inovação que possibilitou a construção de navios maiores dotados de um sistema de propulsivo, que apesar de rudimentar, facilitou a navegação de águas mais distante e ainda inexploradas.

Somente no século XIX, com a Primeira Revolução Industrial, que houve a introdução do motor a vapor em navios, revolucionando o transporte marítimo, permitindo-os alcançarem velocidades significativamente maiores do que as possíveis com uso de velas. O motor a vapor desempenhou um papel crucial nas Grandes Guerras Mundiais como a principal fonte de propulsão das embarcações militares. Ao final do mesmo século, surgem os motores a diesel, com aplicações em meios civis e militares, ampliando ainda mais o conceito de propulsão naval. Posteriormente, impulsionados pelas demandas militares, surgem o advento das turbinas a gás e os reatores nucleares.

Os navios de guerra, ao contrário dos navios civis de transportes e os mercantes, são projetados atuar em uma gama de missões, como o controle da área marítima em águas interiores e litorânea, a negação do uso do mar, a projeção de poder sobre terra e a capacidade dissuasória. Para alcançar o êxito nessas demandas, se faz necessário uma Marinha possuidora de belonaves versáteis, robustas e com flexibilidade operativa. Além disso, todo esse planejamento tem que estar alinhado economicamente, pois existem os custos de projeto, de construção, de manutenção e de apoio logístico durante todo o ciclo de vida do meio até sua baixa.

Uma das particularidades no projeto de um novo navio militar é o sistema de propulsão a ser adotado, que, diferentemente dos demais, deve levar em consideração as funções operativas específicas, a capacidade de desenvolver altas velocidades e a estabilidade necessária para sua plataforma de tiro. Portanto, um navio de guerra, dependendo da sua área de atuação, por exemplo um escolta requer uma maior potência, enquanto um patrulha mais agilidade e assim por diante, deve selecionar a propulsão mais adequada. Contudo, este tipo de embarcação deve buscar uma configuração propulsiva que lhe proporcione a maior flexibilidade de manobra possível para corresponder aos mais variados cenários adversos que

podem vir a enfrentar. Por essa razão, é comum utilizarem sistemas de propulsão combinados, com diferentes arranjos para atender a essas diversas exigências de manobra e de velocidade.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo central realizar uma análise na opção de adotar um sistema de propulsão totalmente baseado em motores diesel para as novas Fragatas Classe “Tamandaré”. Além disso, visa elaborar uma breve comparação qualitativa com os demais arranjos propulsivos existentes nos navios escolta da Marinha do Brasil, em particular nas Fragatas Classe “Niterói”. Assim, essa síntese tem o propósito de identificar e respaldar as razões que levaram a instituição a escolher esse arranjo propulsivo.

Assim sendo, a motivação por trás desta pesquisa é demonstrar que, até os dias atuais, os motores diesel e seus arranjos continuam sendo a escolha mais vantajosa para a Marinha do Brasil, levando consideração os fatores críticos de manutenção e logística, eficiência e confiabilidade. Esse estudo é fundamental para a tomada de decisões estratégicas relacionadas à modernização, construção e expansão da frota naval brasileira, bem como para o uso eficaz dos recursos públicos aplicados.

1.1 Justificativa e Relevância

A principal missão da Marinha do Brasil (MB) é de assegurar a soberania nacional nas águas territoriais brasileira. A imensa extensão de área oceânica brasileira, com uma abrangência de milhões de quilômetros quadrados que corresponde a mais da metade do território nacional terrestre, conhecida como “Amazônia Azul” que possui primordial importância tanto econômica como de preservação ambiental, exige a presença de meios navais modernos e capacitados para garantir sua proteção.

Para cumprir com essas exigências, a MB tem diversos programas estratégicos de defesa, englobando desde táticas de operação até obtenção de novos navios. Nesse caso, surgiu o projeto de construção de uma nova classe de fragatas que tem como característica a presença de uma propulsão fundamentada em motores diesel, sistema esse chamado de CODAD (Combined Diesel and Diesel – Combinação de motor diesel com outro motor diesel).

Certamente, a tecnologia dos motores diesel pode ser percebida como antiga e menos sofisticada se comparada as inovações que surgiram ao longo dos anos. No entanto, essa percepção não é suficiente para classificá-la como obsoleta ou em declínio. Considerando, a

durabilidade, a ampla aplicação e a aceitação global desses equipamentos, a melhor descrição seria de uma solução simples, economicamente viável e confiável para os meios da Marinha do Brasil (MB), no quesito sistema de propulsão. Isso é particularmente relevante dado o cenário de recursos limitados e a crescente demanda imposta aos navios da instituição.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é conduzir uma investigação abrangente e avaliação comparativa das vantagens dos motores diesel na propulsão naval. Esse estudo enfoca particularmente em possíveis soluções para as plantas propulsoras de navios de escolta da Marinha do Brasil, tomando como modelo a seleção da propulsão baseada em quatro motores diesel, como foi observado nas Fragatas Classe "Tamandaré". Esta análise será realizada por meio de uma revisão literária especializada.

1.2.2 Objetivos Específicos

- 1) Explorar os fatores essenciais envolvidos na seleção de um sistema de propulsão naval, levando em consideração a finalidade para a qual o meio será destinado;
- 2) Realizar uma análise dos requisitos de potência necessários dos motores, correlacionando-os com as velocidades exigidas para o funcionamento da embarcação;
- 3) Investigar os custos associados a operação do meio como consumo de combustível, manutenção e qualificação da tripulação;
- 4) Definir e discutir o conceito de flexibilidade de manobra no âmbito da escolha do sistema de propulsão mais adequado para atender às necessidades da embarcação;
- 5) Apresentar uma avaliação qualitativa que destaca as vantagens da propulsão com motores a diesel em comparação com outras alternativas disponíveis na marinha.

1.3 Etapas do Trabalho

O intuito deste trabalho é apresentar os benefícios dos motores diesel para a aplicação na propulsão naval, tendo a Fragata Classe “Tamandaré” como modelo de estudo de caso. Essa escolha de referencial, se destaca pela adoção de uma configuração de propulsão baseada em uma combinação de motores diesel, em contraste com os sistemas empregados em outras classes de fragatas

Para atingir esse objetivo, é fundamental, em primeiro lugar, compreender o Ciclo Diesel ideal, uma vez que todos os outros componentes e equipamentos operam com base nesse ciclo termodinâmico como fundamento.

Posteriormente, iremos conceituar e categorizar os motores diesel, considerando seu funcionamento e faixas de velocidade de rotação, enquanto destacamos suas aplicações no contexto da propulsão naval.

Uma vez estabelecidas essas concepções iniciais, passaremos a abordar os princípios que orientam as etapas de seleção de sistemas de propulsão naval, com ênfase na busca por soluções que otimizem a eficiência e a confiabilidade dos motores propulsores, baseando-nos em modelos referenciados na literatura.

Além disso, serão apresentados e discutidos os índices de desempenho associados ao motor MAN 12V 28/33D STC, que servirá como referência.

Por fim, realizaremos uma comparação abrangente entre os índices de desempenho dos navios de escolta atualmente em operação na Marinha do Brasil e os da nova classe de fragatas, e analisaremos os resultados decorrentes dessas comparações.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Com o propósito de sustentar as teorias apresentadas neste trabalho, o capítulo a seguir, visa apresentar os estudos realizados ao longo dos anos, do ciclo e dos motores diesel, bem como os demais arranjos propulsivos marítimos, de modo que ao fim deste trabalho, o entendimento da sua viabilidade para a Marinha do Brasil.

2.1 Ciclo Diesel

O ciclo diesel, concebido pelo inventor alemão Rudolf Diesel na década de 1890, representa um método de combustão eficiente caracterizado por sua ignição por compressão e seu funcionamento de combustão interna. Inicialmente, Diesel propôs um ciclo de temperatura constante, mas logo percebeu suas limitações. Este ciclo demandava uma injeção contínua de combustível para manter a temperatura constante, resultando em alto consumo de combustível e, um aspecto particularmente relevante nos tempos atuais, na emissão significativa de gases poluentes.

Como resultado, o motor Diesel evoluiu para operar de acordo com um ciclo de pressão constante. No motor diesel, a combustão se inicia por meio da compressão do ar até atingir uma temperatura suficientemente alta para que a injeção de combustível cause sua ignição de forma espontânea. Essa característica apresenta uma distinção notável em relação aos motores de ignição por centelha, como o ciclo Otto, que requer uma vela de ignição para iniciar a combustão e, conseqüentemente, elimina o risco de autoignição do combustível. (ÇENGEL, 2013).

2.1.1 Processos do Ciclo

No ciclo diesel ideal, podemos identificar quatro processos fundamentais. Estes consistem em dois processos adiabáticos reversíveis isentrópicos, intercalados por um processo isobárico e um processo isocórico. Abordaremos esses processos de forma mais detalhada a seguir.

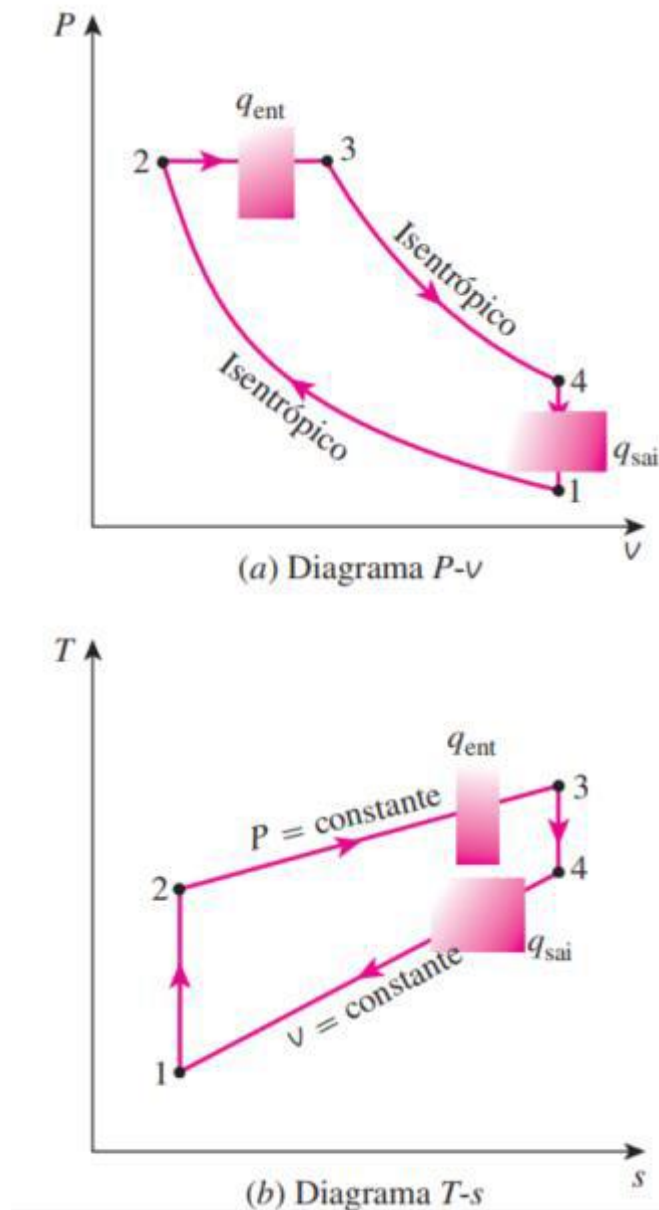


Figura 1 - Diagramas PxV e TxS do Ciclo Diesel Ideal. (ÇENGEL, 2013)

1º- Compressão isentrópica: Conforme demonstrado nos gráficos da Figura 1, nesse estágio, o ar sofre uma compressão adiabática do ponto 1 ao ponto 2. À medida que a pressão aumenta, a temperatura também se eleva, mas a entropia permanece constante, devido a ser um processo reversível ideal. As variações de volume são denominadas de taxa de compressão.

2º- Expansão isobárica (fase de combustão): Durante essa fase, que ocorre entre os pontos 2 e 3 na mesma Figura, calor é adicionado ao combustível injetado a pressão constante. Esse calor provém da compressão do ar e leva à combustão.

3º- Expansão isentrópica: Devido ao aumento da temperatura após a combustão, os gases se expandem adiabaticamente, mantendo a entropia constante e aumentando o volume entre os pontos 3 e 4. Essa variação de volume resulta no trabalho mecânico proveniente da energia a térmica da queima do combustível.

4º- Descompressão isocórica (rejeição de calor/exaustão): Após a expansão completa dos gases, ou seja, quando atingem o ponto de volume máximo (ponto 4), a válvula de escape se abre, permitindo a rejeição de calor a volume constante. Isso faz com que a pressão interna caia instantaneamente até retornar ao ponto 1, reiniciando assim o ciclo.

2.2 Motores Diesel

Os motores diesel são máquinas térmicas que operam com base no ciclo diesel ideal previamente descrito. Sua função principal é converter a energia resultante da queima do combustível em trabalho mecânico. Esses equipamentos, também conhecidos como motores de compressão, são categorizados com base no número de etapas necessárias para completar um ciclo de funcionamento, sendo classificados como motores de dois tempos ou de quatro tempos. Além disso, sua classificação envolve, também, a faixa de rotação, abrangendo motores de baixa, média e alta rotações. Portanto, a seguir, forneceremos uma concisa explicação, com exemplos, dos critérios de classificação e dos indicadores de desempenho desses motores.

2.2.1 Motores Quatro Tempos

Os motores de quatro tempos são assim denominados devido ao fato de executarem o seu ciclo de funcionamento ao longo de quatro cursos do êmbolo. Isso significa que o êmbolo percorre o interior do cilindro desde o Ponto Morto Inferior (PMI) até o Ponto Morto Superior (PMS) quatro vezes, equivalendo a duas voltas completas do eixo de manivela. Essa numeração está em concordância com os quatro processos distintos que constituem o ciclo diesel ideal. Esses motores são amplamente conhecidos devida à sua eficiência e confiabilidade, possuindo uma variedade de aplicações nos meios navais.

As fases desse ciclo motor são, em ordem, as seguintes: admissão, compressão, expansão e descarga. Cada uma dessas fases ocorre em momentos específicos, em sincronia com o movimento do êmbolo, desempenhando funções cruciais para o funcionamento eficiente do motor diesel de quatro tempos. (BRUNETTI, 2012)

As quatro fases do ciclo operam conforme:

1. Admissão: Nesta fase, o êmbolo está no ponto mais alto de sua trajetória (PMS), e a válvula de admissão se abre. O ar é aspirado do ambiente externo e entra na câmara de combustão. Não ocorre a injeção de combustível nessa fase.
2. Compressão: Com a válvula de admissão e de escape fechadas, o êmbolo se move para cima, comprimindo o ar que foi admitido na fase de admissão. A elevação da temperatura durante essa compressão é significativa. No final desta fase, o êmbolo volta ao ponto mais alto de sua trajetória.
3. Combustão: No ponto mais alto do curso do êmbolo, o combustível diesel é injetado na câmara de combustão por meio de um injetor. A alta temperatura do ar comprimido faz com que o diesel se inflame espontaneamente. Esse é o momento da explosão controlada, que empurra o pistão de volta para o ponto mais baixo (PMI).
4. Exaustão: Após a fase de combustão, o pistão se move de volta para cima, empurrando os gases de escape resultantes da queima de combustível para fora da câmara de combustão. A válvula de escape se abre, permitindo que os gases sejam liberados para o sistema de escapamento. Neste ponto, o êmbolo está novamente no ponto mais alto de sua trajetória, pronto para reiniciar o ciclo. (GANESAN, 2012)

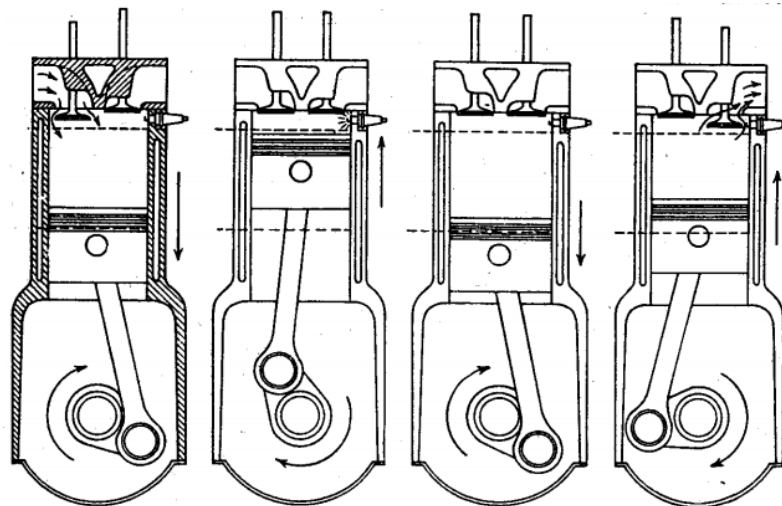


Figura 2 – Fases de um motor quatro tempos. (HEYWOOD, 1988)

2.2.2 Motores Dois Tempos

Os motores de dois tempos têm um funcionamento diferente dos motores de quatro tempos, sendo mais simples em termos de operação e compreensão. Eles realizam seu ciclo completo em apenas duas fases de curso do êmbolo, em oposição às quatro fases dos motores de quatro tempos. Então nesse princípio de funcionamento as etapas do ciclo são divididas em: admissão/compressão e expansão/descarga. Na primeira fase, o ar é admitido no cilindro enquanto o êmbolo se move para cima, comprimindo o ar. Na segunda fase, o combustível é

injetado diretamente no cilindro enquanto o ar ainda está sob alta pressão e temperatura, causando sua autoignição. Essa explosão empurra o êmbolo de volta para baixo, gerando a energia mecânica do motor.

De acordo com Ganesan (2012), a principal diferença entre os motores de dois e de quatro tempos consiste na indução de carga de ar fresca para dentro do cilindro remove os produtos da combustão de forma simultânea. Portanto, não sendo necessários os quatro cursos separados para sua operação. Ainda segundo Ganesan (2012), nessa disposição, teoricamente, a potência desses motores duplicaria se comparado ao de quatro tempos tradicional para uma mesma velocidade de revolução. Isso os torna mais compactos e simples em relação aos demais. Contudo, tendo em vista essas particularidades, possui uma eficiência térmica baixa e uma índice de emissão de poluentes devido as altas temperaturas e o alto consumo de óleo lubrificantes.

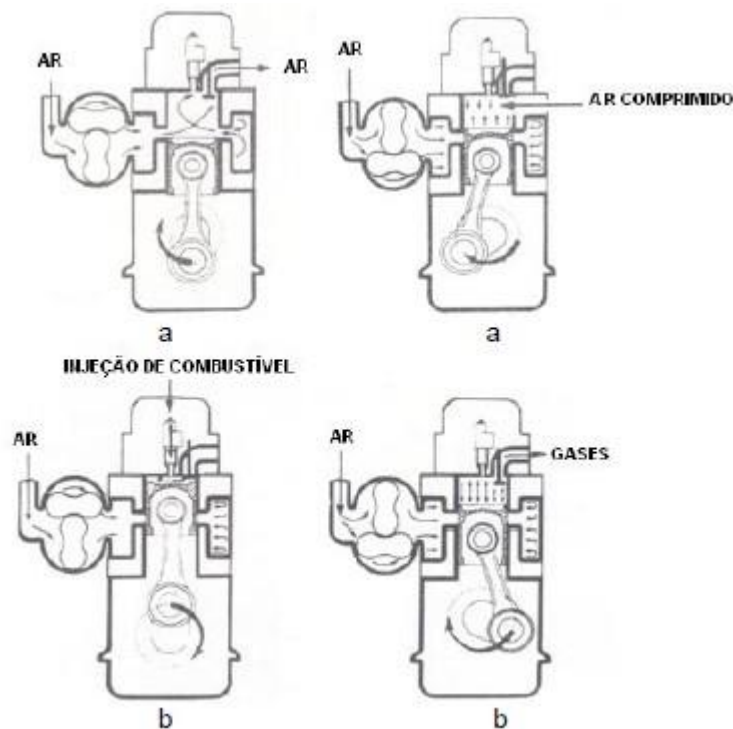


Figura 3 – Ciclo motor diesel dois tempos: a) 1º tempo; b) 2º tempo. (HEYWOOD, 1988)

2.2.3 Faixas de Rotação dos Motores Diesel

Os motores diesel se enquadram em mais uma classificação, na qual os motores de dois e de quatro tempos também estão inseridos, que é relativa à sua velocidade de rotação: baixa, média e alta. Cada categoria possui características distintas que as tornam mais adequadas para diferentes tipos de aplicações.

Motores de baixa rotação, operando a velocidades até 300 RPM, são essencialmente motores diesel de dois tempos. São especialmente projetados para equipar navios de grande porte, como petroleiros e cargueiros. Essa escolha se baseia em várias vantagens significativas.

Primeiramente, esses motores se destacam por seu baixo custo operacional, principalmente devido ao seu Consumo Específico de Combustível (CEC) notavelmente reduzido. Além disso, a preferência pelo uso de combustíveis pesados contribui para a economia, uma vez que esses combustíveis tendem a ser mais acessíveis em termos de custo por unidade de energia.

Além disso, o funcionamento desses motores em velocidades mais lentas permite a integração direta com o eixo propulsor, evitando a necessidade de sistemas de engrenagens intermediárias. Isso não apenas simplifica o arranjo, mas também reduz as perdas de potência ao longo do sistema de propulsão. Em resumo, os motores de baixa rotação oferecem eficiência econômica e operacional, tornando-os ideais para embarcações de grande porte.

Os motores de média rotação operam em uma faixa intermediária, geralmente variando entre 300 e 1000 RPM. São notáveis por sua versatilidade e encontram aplicações diversas em navios de cruzeiro, embarcações de pesca, embarcações militares e instalações industriais. O que os distingue é a capacidade de equilibrar eficazmente o torque e a velocidade, oferecendo eficiência variável para se adaptar a uma ampla gama de condições operacionais. Em embarcações menores, esses motores podem ser conectados diretamente ao hélice, enquanto em embarcações de maior porte, costuma-se empregar engrenagens de redução. Além disso, esses motores são frequentemente utilizados em sistemas de propulsão diesel-elétrico, contribuindo para a flexibilidade e eficiência em muitos contextos navais.

Por fim, os motores de alta rotação, operando geralmente acima dos 1000 RPM, são projetados para aplicações que demandam alta potência em relação ao seu tamanho e peso. Particularmente, possuem maior eficiência em velocidades mais altas, priorizando a entrega de potência em detrimento do torque. Uma desvantagem é que consomem exclusivamente óleo diesel de menor viscosidade, que geralmente é mais caro em comparação com combustíveis mais pesados. Eles são comuns em navios comerciais menores e em embarcações que empregam sistemas de propulsão diesel-elétrico. Além disso, são a escolha ideal para embarcações militares, onde a necessidade de alta potência em espaços reduzidos é essencial (VALHE FILHO, 2011).

Para esclarecer as características desses motores, a Figura 4 ilustra a eficiência em relação às rotações, enfatizando as faixas de rotação mencionadas.

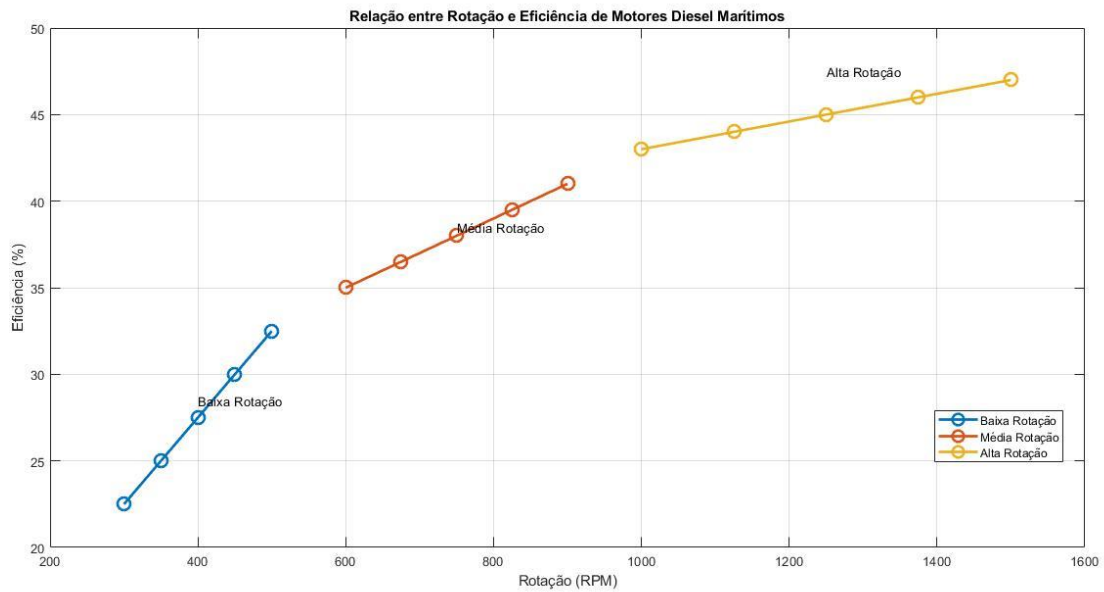


Figura 4 – Relação entre Eficiência e Rotação. Fonte: Autor.

Assim, torna-se evidente que, teoricamente, os motores diesel com rotações mais elevadas apresentarão uma eficiência superior. Entretanto, como destacado anteriormente, essa métrica não é necessariamente conclusiva para determinar qual motor é superior. Cada equipamento possui suas próprias vantagens, desvantagens e limitações. Portanto, a melhor escolha dependerá da aplicação específica em que o motor será utilizado.

2.3 Aplicações na Propulsão Naval

Por definição a propulsão naval engloba todo mecanismo capaz de produzir energia mecânica necessária para o deslocamento de uma embarcação na água. Essa variedade abrange desde métodos mais rústicos, como o uso remos e velas, até os sistemas mais sofisticados. Em sua essência, o sistema de propulsão é composto de três elementos básicos: o motor principal, a linha de transmissão e o propulsor.

O motor principal constitui o ponto inicial desse sistema e desempenha o papel crucial de converter a energia química gerada pela combustão em energia mecânica, que é então transmitida como torque pelo eixo de acionamento. Atualmente, existem diversas opções de máquinas propulsoras, incluindo turbinas a vapor, turbinas a gás e os motores diesel.

O sistema de transmissão, por sua vez, serve como a ligação entre o motor e o propulsor, facilitando a transferência, de forma eficaz, da energia mecânica gerada por todo o sistema propulsor. Esse subsistema é composto por três elementos principais: a linha de eixo, a caixa de engrenagens e os mancais.

Por fim, os propulsores, frequentemente reconhecido como hélice, têm como função primordial acelerar a massa líquida de água, criando uma diferença de pressão no fluido, que por sua vez, impulsiona a embarcação para frente. Existem diversos tipos de hélices, mas os mais usuais são aqueles categorizados com base na capacidade de ajustar o ângulo de suas pás, denominados como hélices de passo controlável, e os que mantêm o ângulo fixo, chamados de hélices de passo fixo (BRINATI, 1980).

A Figura 5 ilustra um sistema de propulsão naval completo com todos os componentes supracitados:



Figura 5 - Sistema de Propulsão Naval. (SOUZA, 2013)

Dessa forma, a seguir será elencado como os motores diesel são empregados nas plantas de propulsão marítimas, bem como suas variações. Em seguida será mencionado as demais instalações propulsoras, priorizando as aplicações militares.

2.3.1 Sistemas de Propulsão a Diesel

O sistema de propulsão a diesel, como o próprio nome indica, é caracterizado pelo uso de um ou mais motores a diesel como a principal fonte de energia na planta propulsora de uma embarcação. Esse sistema tem uma ampla aplicação, especialmente no contexto naval, sendo amplamente adotado em navios de médio e grande porte, sejam eles de natureza militar ou comercial. Conforme cita Woodyard (2004), essa preferência deve-se às suas notáveis características de eficiência, autonomia e confiabilidade. Assim, a partir das classificações dos motores diesel definidas neste trabalho podemos dividir as aplicações na propulsão naval de acordo:

- **Motores de Baixa Rotação:** Encontrados em navios mercantes, como petroleiros e cargueiros de grande porte, os motores de baixa rotação são projetados para operar de maneira eficiente em velocidades de cruzeiro constantes. Sua ênfase está na

economia de combustível, tornando-os ideais para viagens de longa distância em águas oceânicas, onde a eficiência energética é de suma importância.

- **Motores de Média Rotação:** Os motores de média rotação são versáteis e atendem à uma variedade de embarcações, desde navios mercantes até embarcações militares de menor porte, abrangendo fragatas, navios patrulha em águas interiores e oceânicas, navios de apoio logístico e rebocadores. Esses motores conseguem equilibrar eficiência e capacidade de resposta. Eles são a escolha ideal para operações de patrulha, transporte marítimo e missões de escolta, onde as velocidades de cruzeiro precisam ser ajustadas de acordo com as necessidades.
- **Motores de Alta Rotação:** Presentes em embarcações de alta velocidade, como navios de combate, embarcações de ataque rápido e lanchas de patrulha costeira, os motores de alta rotação são projetados para fornecer uma grande quantidade de potência em curtos períodos. Sua capacidade de aceleração rápida é fundamental em missões que exigem manobras táticas ágeis e respostas imediatas.

Além de seu uso na propulsão principal, os motores a diesel desempenham um papel crucial nos sistemas auxiliares de embarcações, desencadeando a geração de energia elétrica a bordo. Eles alimentam geradores responsáveis por produzir eletricidade para abastecer uma série de sistemas críticos, incluindo navegação, comunicação, iluminação, equipamentos de cozinha e muitos outros dispositivos a bordo.

Atualmente, observa-se a combinação de motores a diesel com outros tipos de propulsores para melhorar o desempenho. Um exemplo comum é o sistema diesel-elétrico, amplamente utilizado em submarinos, demonstrando a flexibilidade e a capacidade de adaptação contínua dos motores a diesel para atender às demandas diversas da propulsão naval.

3 METODOLOGIA

A próxima seção apresentará os critérios fundamentais para a seleção do sistema de propulsão principal para os meios da Marinha do Brasil. Esse método será baseado num caráter expositivo, dedutivo e descritivo, respaldado por pesquisas bibliográficas que incluem artigos técnicos, manuais, livros, monografias, dissertações e materiais de referência discutidos em sala de aula. Além disso, será realizada uma análise detalhada sobre a escolha do sistema de propulsão disposto integralmente por motores diesel, por meio de consultas ao manual e ao site do fabricante dos motores da Fragata Classe "Tamandaré". Essa análise também incluirá uma comparação com os sistemas de propulsão adotados nos demais navios escolta da instituição.

3.1 Como Selecionar o Sistema de Propulsão

De acordo com Woodyard (2004), a escolha do sistema de propulsão de uma embarcação é um procedimento extremamente complexo, caracterizado pela interdependência de diversos fatores, formando um ciclo de dimensionamento no qual cada parâmetro influencia diretamente os demais, estabelecendo uma relação intrincada. Então, além dos componentes centrais, como motores principais, propulsores e eixos de transmissão, vários outros aspectos desempenham um papel importante nessa escolha. Estes elementos vão desde a arquitetura e dimensões da embarcação até a missão que ela desempenhará, os custos totais envolvidos ao longo do ciclo de vida, incluindo construção e descomissionamento, a disponibilidade de recursos, a conformidade com regulamentos de emissões de poluentes atmosféricos e a consideração da sustentabilidade.

Dada a amplitude do escopo desses requisitos, a abordagem neste trabalho se concentrará especificamente nos elementos diretamente relacionados aos motores de combustão principal (MCP) de um navio militar do tipo escolta.

3.1.1 Potência e Torque do Motor Principal

Serão considerados dois parâmetros essenciais para avaliar o desempenho e a eficiência do motor principal. Inicialmente, será abordado o conceito de torque, seguido pela análise da potência efetiva do motor. Ambos aspectos estão diretamente ligados aos critérios de desempenho, como a capacidade de aceleração e a velocidade máxima alcançada.

Segundo Woodyard (2004), o torque (T) é a grandeza que quantifica a força rotacional gerada pelo motor e aplicada sobre o eixo de manivelas que, conseqüentemente, transmite para o hélice do navio. Ele está intimamente ligado com a aceleração do motor e pode ser representado em termos da força gerada pelo movimento do êmbolo e do raio do eixo de manivelas, como mostrado na equação (3.1).

$$T = F \cdot r \tag{3.1}$$

Onde,

T → É torque do motor, [N.m];

F → É a força gerada pelo motor, [N];

r → É o raio do eixo de manivelas, [mm]

Conforme Varella (2007), a real potência fornecida pelo motor, denominada de potência efetiva (Pot_e), é definida por ser proveniente do trabalho mecânico gerado no eixo de manivela. Pode ser determinada através de equações que consideram a energia entregue pelo combustível multiplicada pelo rendimento mecânico daquele equipamento, como descrito na equação (3.2).

$$Pot_e = Pot_i \cdot n_m \quad (3.2)$$

Onde,

Pot_e → É a potência efetiva do motor, [w];

Pot_i → É a potência indicada do motor, [w];

n_m → É o rendimento mecânico do motor, que considerada as perdas energéticas devido ao atrito e outros fatores mecânicos.

A potência indicada (Pot_i) é determinada como a potência bruta desenvolvida pelo motor, dentro do cilindro, durante a combustão. Ela é medida sem considerar quaisquer perdas devido ao atrito e aos efeitos térmicos. Pode ser calculada em função da pressão média indicada dentro do cilindro multiplicada pela velocidade de rotação e o número de cilindros do motor, pelo curso e pela a área da superfície do êmbolo, e divididos pelo fator de correção para motores 4T e 2T, como descrito na equação (3.3).

$$Pot_i = \frac{p_{mi} \cdot A \cdot L \cdot Z \cdot n}{\Delta} \quad (3.3)$$

Onde,

p_{mi} → É a pressão média indicada no cilindro, [N/m²];

A → É a área da superfície do êmbolo, [m²];

L → É o comprimento do curso do êmbolo, [mm];

Z → É o número de cilindros do motor;

n → É a velocidade de rotação do eixo, [RPM];

Δ → É o fator de correção para motores de 4T e 2T, sendo igual a 2 e 1 respectivamente.

Outro parâmetro que pode ser definido para facilitar o entendimento dos cálculos é o rendimento térmico (n_t) do motor que, por sua vez, relaciona a potência indicada com o fluxo de calor (\dot{Q}) gerado na combustão. Assim, temos a equação (3.4) a seguir.

$$n_t = \frac{Pot_i}{\dot{Q}}. \quad (3.4)$$

E o fluxo de calor é definido conforme a equação (3.5).

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot pc_c \quad (3.5)$$

Onde,

$\dot{m}_c \rightarrow$ É a vazão de massa de combustível, [kg/s];

$pc_c \rightarrow$ É o poder calorífico do combustível, normalmente é tabelado [kcal/kg];

De posse disso, podemos utilizar a equação (3.6), a seguir, para relacionar as potências: efetiva e indicada, e contabilizar também as suas perdas mecânicas. Essas perdas, conhecidas como potência de atrito (Pot_a) que é a energia consumida pelo motor internamente, são importantes para a determinação da eficiência do motor em relação ao seu consumo de combustível.

$$Pot_i = Pot_e + Pot_a \rightarrow Pot_e = Pot_i - Pot_a. \quad (3.6)$$

Assim, conseguimos definir, também, o rendimento mecânico (n_m) do motor, de acordo com a equação (3.7).

$$n_m = Pot_e / Pot_i. \quad (3.7)$$

Dessa forma, utilizando as relações da termodinâmica e substituindo as demais equações na (3.1), obtemos a seguinte expressão:

$$Pot_e = \dot{m}_c \cdot pc_c \cdot n_t \cdot n_m \quad (3.8)$$

Portanto, foram realizados os cálculos da potência exigida do fabricante do motor, a fim de avaliar se o motor atende aos requisitos de torque e velocidade necessários no projeto do navio.

Entretanto, é importante destacar que a potência efetiva também pode ser medida diretamente no eixo do motor utilizando um dinamômetro para a aferição. Embora o conceito de potência efetiva seja uma abordagem habitual aos motores de propulsão marítima para avaliar o seu desempenho, o método aplicado anteriormente é voltado para os motores de combustão interna. É essencial lembrar que há diversos tipos de motores que podem atuar como o sistema de propulsão de uma embarcação.

Por fim, é importante notar que a potência e o torque de um motor estão inter-relacionados e podem limitar um ao outro em diferentes faixas de rotação. Isso significa que, em determinadas rotações, o aumento do torque pode resultar em uma limitação da potência disponível, e vice-versa, dependendo das características do motor e das condições de operação, conforme representado na equação (3.9).

$$Pot_e = T \cdot n \rightarrow T = \frac{Pot_e}{n} \quad (3.9)$$

A figura 6, esboça melhor a relação entre o torque e a potência em diferentes faixas de rotação, bem como as relações de rendimento e consumo específicos de forma genérica para motores diesel.

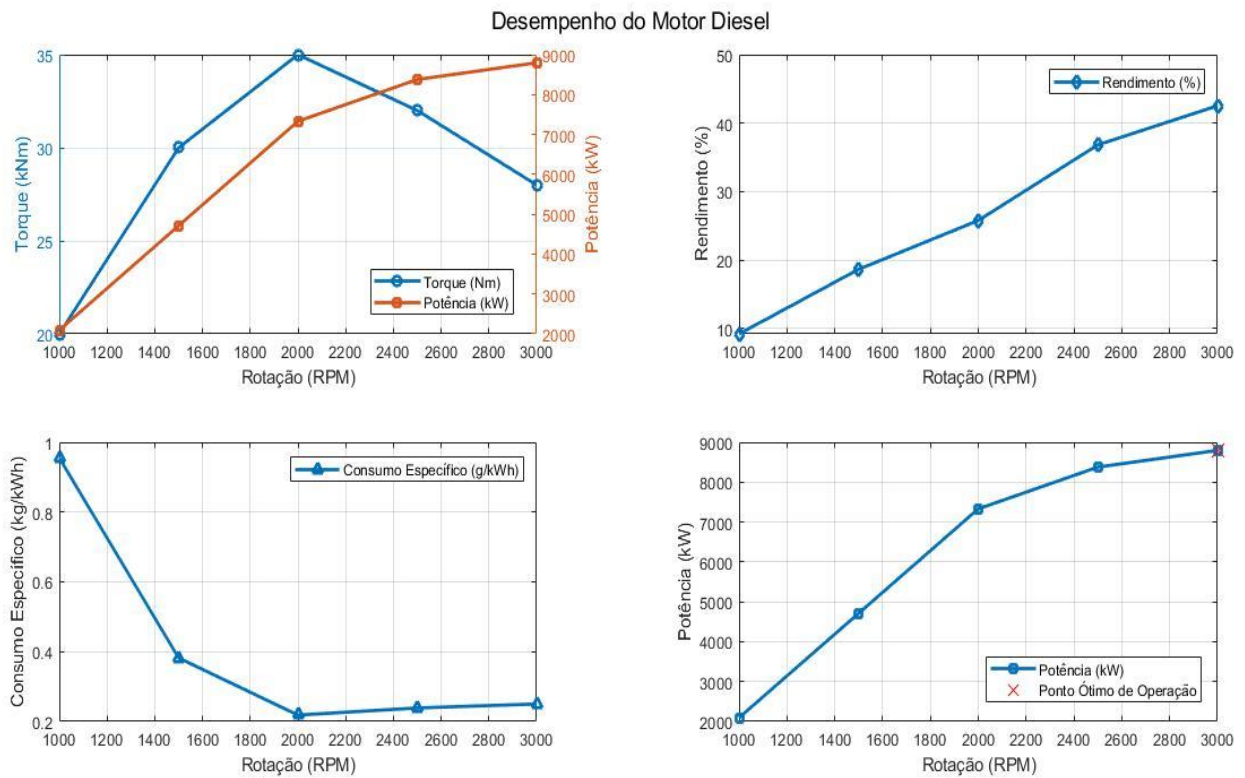


Figura 6 – Desempenho do Motor Diesel. Fonte: Autor.

3.1.2 Relação Peso e Dimensões

Ao avaliar os requisitos para a escolha do sistema de propulsão, um aspecto crítico a ser considerado é a relação entre o peso e as dimensões dos motores principais. Especificamente, em navios de guerra do tipo escolta, o objetivo primordial é encontrar um equilíbrio entre a faixa de potência requerida, o espaço disponível e o peso adicional a bordo.

Conforme Woodyard (2004), as embarcações militares de escolta devem ser habilitadas a alcançar altas velocidades, ao mesmo tempo em que mantêm sua estabilidade e a agilidade nas manobras. Fatores fundamentais, uma vez que essas embarcações precisam ter manobrabilidade e, ao mesmo tempo, manter uma plataforma de direção de tiro estável para as situações de efetivo combate. Portanto, a consideração e avaliação cuidadosa nessa relação é vital para a escolha de sua propulsão, visto que está diretamente atrelada ao desempenho operativo do meio.

3.1.3 Flexibilidade de Manobra

A flexibilidade de manobra em navios de guerra se refere à capacidade desses meios de realizar manobras táticas e evasivas de forma ágil durante operações de combate. Primeiramente, com o intuito de maximizar a potência, conseqüentemente, a velocidade, foi introduzida a implementação de arranjos propulsivos que empregavam dois ou mais motores, com o objetivo de aumentar a chamada elasticidade de potência do meio, ou seja, a habilidade de operar eficazmente em diversas faixas de velocidade. Assim, surgiram os sistemas de propulsão combinada, que buscam a combinação de motores distintos, e por vezes, semelhantes, a fim de aprimorar a capacidade operativa do navio, proporcionando, assim, uma vantagem estratégica no campo de batalha.

Existem várias configurações de propulsão combinada, como os sistemas CODOG (Combinação de motor diesel ou turbina a gás), CODAG (Combinação de motor diesel e turbina a gás), COGOG (Combinação de turbina a gás ou turbina a gás), COGAG (Combinação de turbina a gás e turbina a gás), CODLAG (Combinação de motor diesel-elétrico e turbina a gás), CODLAD, (Combinação de motor diesel-elétrico e turbina a gás) e o CODAD (Combinação de motor diesel e motor diesel), entre outros. Cada um desses sistemas oferecem uma proposta de eficiência e capacidade de manobras distintas. Então, uma diferenciação clara entre eles, que facilita ainda mais o entendimento sobre esses arranjos, é a letra que representa a combinação, onde o “e” indica que os sistemas podem operar de forma conjunta, somando as contribuições de cada motor, e o “ou” implica que as plantas operam alternadamente, com apenas uma propulsão assumindo toda a carga do navio de cada vez.

Na Marinha do Brasil, é possível encontramos dois desses sistemas em operação: os arranjos CODOG, presentes nas Fragatas da Classe "Niterói," e COGOG, utilizados nas Fragatas da Classe "Greenhalgh". Nas Figuras 7 e 8 podemos observar esses modelos.

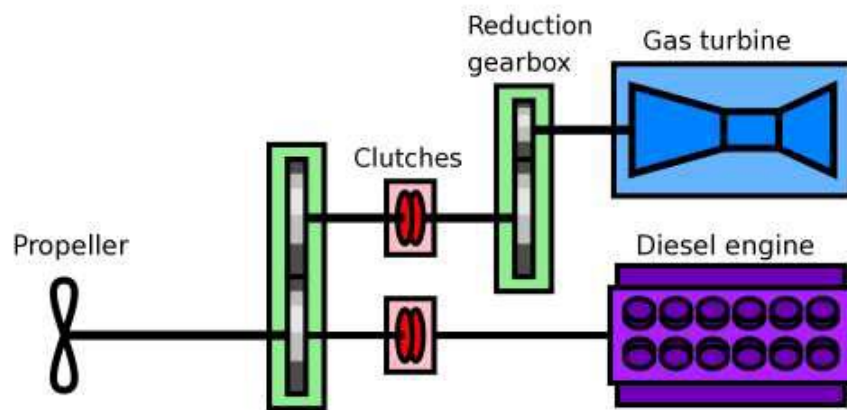


Figura 7 – Arranjo de Propulsão CODOG. (R. White, 2021)

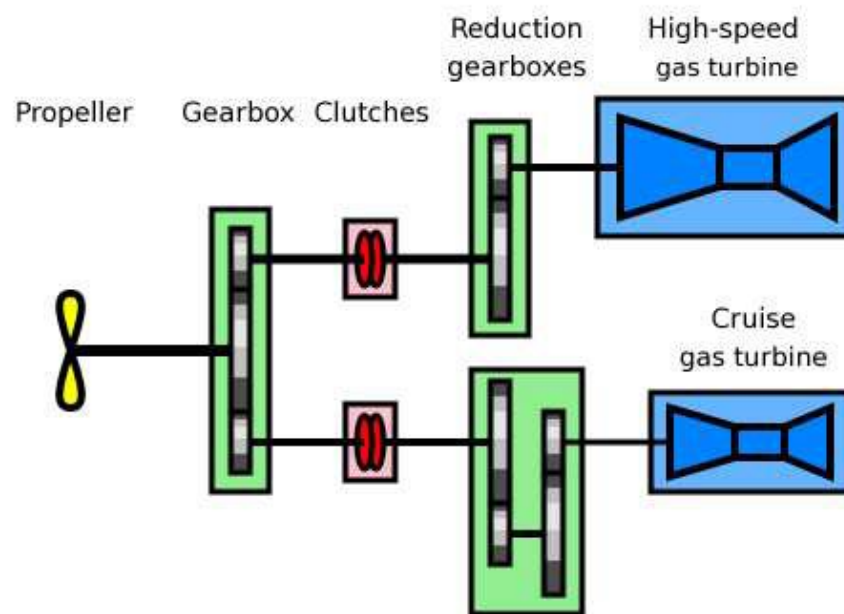


Figura 8 - Arranjo de Propulsão COGOG. (R. White, 2021)

3.1.4 Custos de projeto e de operação

A escolha do sistema de propulsão está aliada especialmente aos custos iniciais de projetos para construção ou aquisição do sistema e os custos de operação que englobam os aspectos de manutenção, consumo de combustível e a capacitação de uma tripulação treinada no manuseio correto dos equipamentos. Cada um desses elementos deve ser minuciosamente

observado e ponderado, de forma a lograr os custos mais acessíveis para o projeto final, evitando desperdícios.

Os custos de projeto estão estreitamente associados ao investimento para adquirir ou fabricar todo o sistema de propulsão. Portanto, o primeiro passo é avaliar estratégia mais adequada. Isso envolve decidir se é vantajoso produzir os motores localmente, o que dependerá do nível de tecnologia disponível para o sistema de propulsão e da disponibilidade de engenheiros qualificados para participar desse processo, ou se é mais sensato adquirir os sistemas prontos, sujeitando-se aos preços e ao suporte oferecidos pelos renomados fabricantes mundiais.

Por outro lado, os custos relacionados a operação, incluem desde diversos requisitos, desde a habilitação dos tripulantes para operar o sistema até o Consumo Específico de Combustível (CEC) dos motores, que é calculado a partir do consumo diário de combustível em razão da potência produzida pelo motor. Além disso, esses custos operacionais devem ser considerados durante todo ciclo operativo do meio até o momento do seu descomissionamento ao final de sua vida útil.

Dessa forma, a análise detalhada de custos é impreterível para garantir a eficiente alocação dos recursos disponíveis, reconhecendo que o poder naval de uma nação é reflexo direto do governo, logo dos esforços da sociedade em sua totalidade.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 A escolha da propulsão das Fragatas Classe “Tamandaré”

A Marinha do Brasil lançou o projeto de concepção da nova classe de fragatas com o propósito de modernizar a frota naval de sua esquadra, introduzindo novas tecnologias com construção nacional. A meta estipulada é de entregar quatro navios até o final dessa década.

O Programa Classe “Tamandaré” foi ambicionado devido a necessidade iminente de renovação dos meios navais ativos da esquadra brasileira. Com a principal finalidade de fortalecer e ampliar a capacidade de defesa, patrulha, proteção e soberania nas águas jurisdicionais, como na “Amazônia Azul”. Este acervo foi idealizado, por meio de parcerias com empresas nacionais e internacionais, com intuito de, além do papel operativo de defesa, desempenhar importante estratégia política para o desenvolvimento do indústria e tecnologia do país. Fato este que possibilitaria que o Brasil tivesse mais protagonismo no cenário mundial.



Figura 9 - Fragata Classe “Tamandaré”. (DEFESANET, 2023)

Dada sua qualificação de fragata, essa nova classe terá uma plataforma similar as Fragatas Classe “Niterói”, em termos de poder combatente, dimensões, capacidade de manobra e velocidade máxima mantida. Dessa forma, a marinha, exercendo o papel de projetista, teve que avaliar minuciosamente os equipamentos e instrumentos que seriam instalados no navio. Assim sendo, chegou-se à conclusão de selecionar os motores diesel MAN 12V 28/33D STC, devidamente dispostos num arranjo de propulsão combinada chamada de CODAD (combinação de motor diesel com outro motor diesel).

Para analisar melhor o motor escolhido, utilizaremos a Tabela 1, a seguir, e seguiremos os critérios elencados no capítulo 3.

Tabela 1 – Quadro de Especificações do Motor.

Especificações Motor MAN 12V 28/33D STC		
Cilindros	Disposição	V
	Quantidade	12
	Diâmetro (mm)	280
	Curso do Êmbolo (mm)	330
Dimensões	Altura (mm)	3.734
	Comprimento (mm)	6.207
	Largura (mm)	2.473
Peso (ton)		33,6
CEC (g/Kwh)		185
Rotação máxima (RPM)		1.032
Potência (kw)		5460/6000
Torque (kN.m)		52,1

Fonte: Autor com informações do manual do fabricante.

O motor em questão é um V12 com um diâmetro de 280 mm e curso do êmbolo de 330 mm. Equipado com um turbocompressor para otimizar o rendimento térmico, ele gera uma potência impressionante de 5460 kW. Essa faixa de potência é razoavelmente próxima daquela obtida com as turbinas a gás, como o modelo Tyne fabricado pela Rolls-Royce, que se destacam por seu melhor desempenho em altas rotações.

Assim para complementar a análise do desempenho isolado do motor, seguimos de acordo com a metodologia apresentada na avaliação, explorando três principais métricas: rendimento, relação entre potência e torque, e consumo específico do motor. Essas avaliações estão representadas na Figura 10.

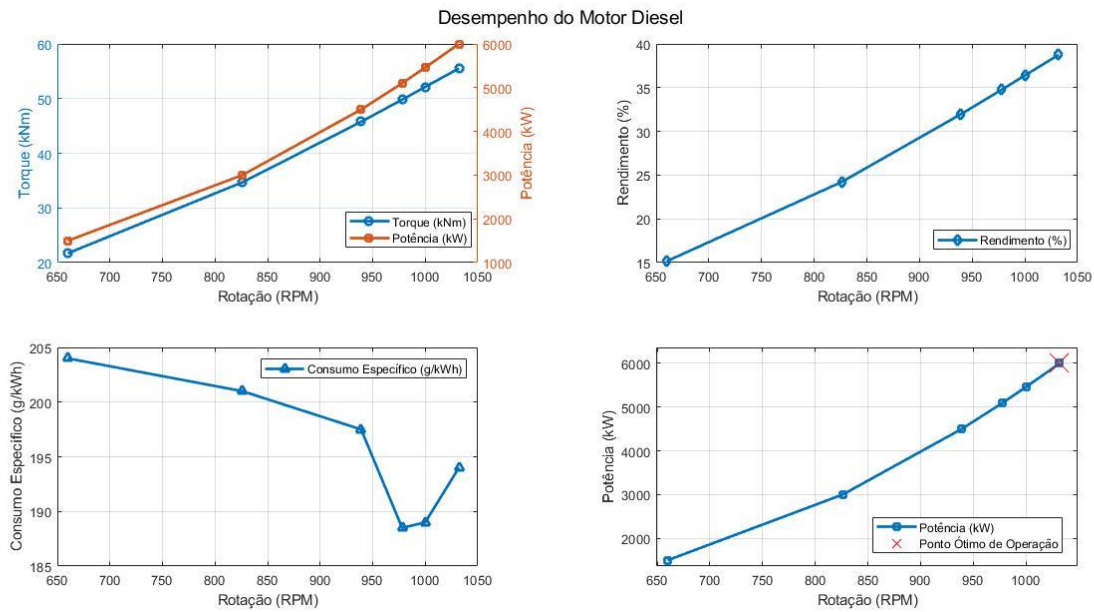


Figura 10 – Desempenho Motor MAV 12V 28/33D STC. Fonte: Autor.

Dessa forma, é possível analisar o desempenho do motor em todas as faixas de operação, observando como ele se desenvolve em relação às diferentes rotações. Vale ressaltar que o funcionamento do motor é otimizado em rotações mais elevadas, conforme indicado na Figura 9, evidenciado pelos índices de consumo específico, potência e rendimento.

Quando consideramos as dimensões, o motor tem 6207 mm de comprimento, 3734 mm de altura e 2473 mm de largura, pesando 33,6 toneladas. Esses números resultam em uma relação de cubagem e peso que é considerada razoável. (WOODYARD, 2004)

Para aprimorar a flexibilidade de manobra, foi adotado o sistema CODAD (Combinação de motor diesel e motor diesel). Este arranjo envolve quatro motores diesel semelhantes, combinados na categoria "e," permitindo que operem de forma conjunta. Isso proporciona a capacidade de operar eficazmente em baixas, médias e altas velocidades, o que é uma vantagem em relação às turbinas a gás, que têm melhor desempenho em altas rotações e, portanto, em velocidades na faixa de 26,5 nós.

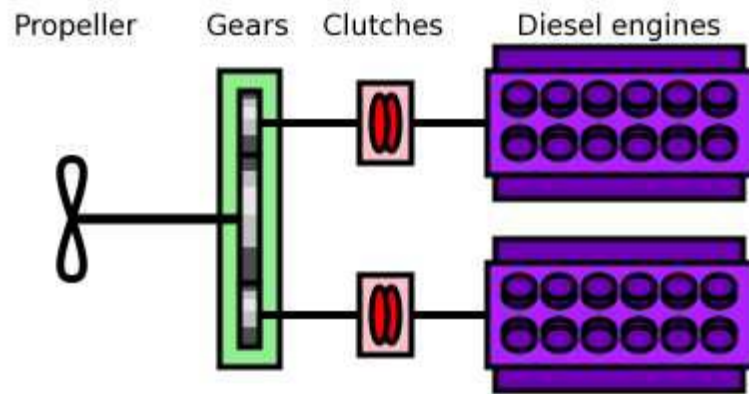
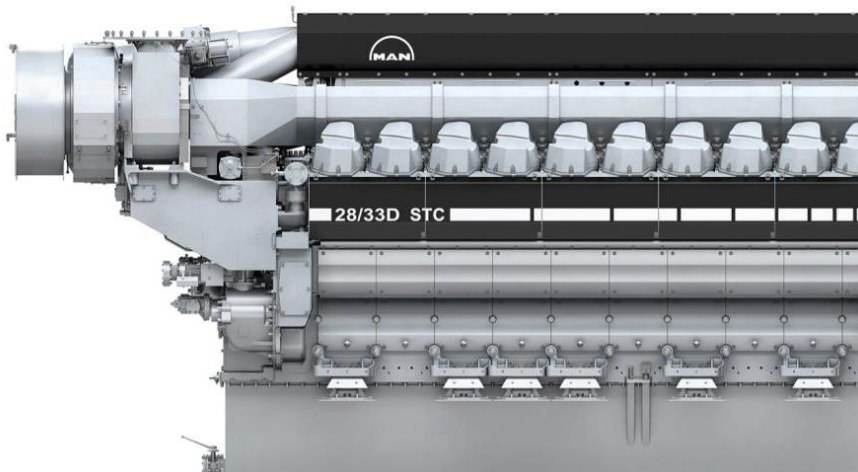


Figura 11 – Arranjo da Propulsão CODAD. (R. White, 2021)

Ao analisarmos os custos, focamos apenas nos custos de operação, uma vez que os custos iniciais de projeto e logística envolvem diversos fatores adicionais. Além disso, não prevemos um custo adicional específico para a qualificação dos tripulantes, uma vez que os motores diesel compartilham princípios semelhantes aos de outras classes. Nossa avaliação se concentra principalmente no custo de consumo de combustível, estimando o gasto diário.

Figura 12 – Motor MAN 12V 28/33D STC



Fonte: site do fabricante.

4.2 Análise Comparativa com os Navios escoltas da Marinha do Brasil

Tabela 2 – Tabela Comparativa entre as classes de navios escolta

Navios Escolta da Marinha do Brasil						
Classes		FCT	FCN	FCG	CCB	CCI
Dimensões do navio	Comprimento (m)	107,2	129,2	131,2	103,4	95,8
	Boca (m)	15,95	13,5	14,8	11,4	11,4
	Calado (m)	5,2	5,9	7,5	5,3	5,5
Deslocamento (ton)	Padrão (ton)	3.455	3.200	3.900	1785	1670
	Plena Carga (ton)		3.800	4.400	2350	1970
Propulsão	Motores	4 Motores diesel MAN 12V 28/33D	2 Turbinas a gás Rolls-Royce Olympus TM3B; 4 Motores diesel MTU 16V956 TB91	2 Turbinas a gás Rolls-Royce Olympus TM3B; 2 Turbinas a gás Rolls- Royce Tyne RM1A	1 Turbina a gás GE LM 2500; 2 Motores MTU 1163 TB93	1 Turbina a gás GE LM 2500; 2 Motores MTU MTU 16V956 TB91
	Arranjo	CODAD	CODOG	COGOG	CODOG	CODOG
	Potência (kw)	4 x 5.460	2 x 20.880; 4 x 2940	2 x 20.880; 2 x 3050	1 x 20.500; 2 x 3.000	1 x 20.500; 2 x 5.600
Velocidade	Cruzeiro (nós)	14	15	18	14	15
	Máxima (nós)	26,5	30,5	29	29	27
Autonomia	Cruzeiro (MN)	6.050	4.200	4.500	4.600	4.600
	Plena Carga (MN)	4.000	1.300		4.000	4.000

Fonte: Autor com dados dos sites “Defesnet”, “Wikipédia” e “Águas azuis”.

Com base nos dados apresentados na Tabela 2, podemos realizar uma análise qualitativa das vantagens e desvantagens da escolha feita pela Marinha do Brasil ao optar por um arranjo de propulsão composto integralmente por motores diesel, em detrimento de outras formas de propulsão disponíveis.

Inicialmente, é importante notar que todas as embarcações apresentam dimensões e deslocamentos semelhantes, especialmente em relação às fragatas. Essa similaridade é relevante para a análise, uma vez que esses meios compartilham as mesmas atribuições operativas por definição. Em termos de potência, a Classe "Tamandaré" se encontra em desvantagem em comparação com os demais meios considerados. No entanto, a classe se destaca em parâmetros como velocidade, que se encontra dentro da faixa média das velocidades máximas das outras embarcações, e autonomia, onde, mantendo uma velocidade de cruzeiro, seu alcance é cerca de 30% maior do que as demais.

Adicionalmente, com base na análise da autonomia e nos tipos de motores utilizados em cada arranjo de propulsão, é possível constatar que as questões relacionadas ao consumo de combustível desses meios são, em geral, bastante semelhantes, exceto pela Classe "Tamandaré". Esta última tem uma vantagem significativa nesse aspecto devido ao seu maior alcance, apesar de compartilhar dimensões e peso semelhantes com as demais embarcações, logo possui semelhança nos espaços destinados a tanque e, também, sofre com as mesmas

resistências ao avanço, aspecto com relevância nos cálculos de velocidade e potência de um meio.

Em resumo, a referida opção da Marinha do Brasil por um sistema de propulsão composto inteiramente por motores diesel, leva em consideração, além dos fatores de custos de projetos, de manutenção e das necessidades de realização de parcerias com várias empresas para a concepção dos navios, as vantagens apontadas. Essas, estão compreendidas nos parâmetros de velocidade, de autonomia e de eficiência no consumo de combustível, que apesar da potência diminuta em relação as demais, ainda assim tornou-se uma opção viável para suprir a demanda desta nova classe de meios navais da esquadra brasileira e para o cumprimento da sua missão de soberania nas águas territoriais.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações Finais

Esta análise reforça a importância de escolher cuidadosamente a configuração do sistema de propulsão para navios, especialmente aqueles com aplicações militares e estratégicas. A evolução tecnológica e as demandas crescentes por eficiência, flexibilidade e autonomia têm levado as Marinhas de nações desenvolvidas a optar por sistemas de propulsão combinada, visando ao equilíbrio entre diversas considerações, incluindo potência, eficiência operacional e questões ambientais.

No contexto atual do Brasil, a Marinha Brasileira busca aprimorar suas capacidades navais, reconhecendo que a segurança do território e a soberania do país dependem da combinação de esforços diplomáticos e poder militar. A escolha do sistema de propulsão é uma parte vital desse processo, considerando a complexidade e as demandas específicas dos meios navais. Nesse sentido, a opção pela configuração CODAD (Combinação de motor diesel e motor diesel) destaca-se como uma estratégia eficaz, capaz de reduzir os custos operacionais, promover a flexibilidade, manter redundâncias nos acionamentos dos eixos e permitir o revezamento dos motores, otimizando a manutenção.

Além disso, a análise dos motores específicos, como o motor MAN 12V 28/33D STC, demonstra que a escolha foi criteriosa, equilibrando aspectos como consumo de óleo combustível, relação peso/potência e volume ocupado. Considerando as restrições orçamentárias da Marinha do Brasil e a necessidade de minimizar custos com aquisição,

manutenção e operação, sem comprometer a eficiência operacional, a opção pelo motor MAN 12V 28/33D STC parece ser a mais adequada para os interesses do país.

Portanto, a conclusão é que a escolha da configuração de propulsão combinada CODAD e do motor MAN 12V 28/33D STC para as Fragatas Classe "Tamandaré" é fundamentada em critérios sólidos e estratégicos, reforçando a ideia de que a tecnologia dos motores diesel está amplamente consolidada, moderna e, ainda, continua a evoluir. Dessa forma, essa decisão permitirá que a Marinha do Brasil continue a cumprir suas tarefas de defesa, vigilância e controle das Águas Jurisdicionais Brasileiras de forma eficaz, preservando seus interesses soberanos no mar, ao mesmo tempo em que busca a economia de recursos e a sustentabilidade operacional.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Para avançar na pesquisa e no entendimento da propulsão com motores diesel, é recomendada uma análise mais abrangente, com o intuito de aprimorar as combinações existentes e até mesmo propor novos arranjos, bem como mais aplicações. Isso pode envolver a avaliação de propulsões combinadas que utilizam motores diesel de diversas rotações, tamanhos e potências, com o objetivo de adaptar cada arranjo às necessidades específicas de navios militares e comerciais. Além disso, deve-se considerar a exploração de combinações com sistemas elétricos, como baterias, visando aprimorar a resposta e eficiência desses sistemas de propulsão e a ideia de Propulsão Híbrida.

REFERÊNCIAS

- BRUNETTI, F. (2012). **Motores de Combustão Interna**. S.l.: EDGARD BLUCHER.
- ÇENGEL, Y. A. (2013). **TERMODINÂMICA**. 7ed Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.
- GANESAN, V. (2012). **IC Engines**. Nova Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited
- GIAMPAOLO, A. **Gas turbine handbook: principles and practices**. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- HEYWOOD, J. B. (1988). **Internal combustion engine fundamentals**. Nova York: McGraw-Hill
- LOPES, G. **Análise Termodinâmica, Cinemática e Dinâmica de um motor com taxa de compressão variável**. Universidade de Campinas, São Paulo, 2014.
- MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship Resistance and Propulsion**. New York, 2011.
- MORISHITA, Helio Mitio. **Modulo 5: Instalações Propulsoras e sistemas auxiliares**. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- Padovezi, Carlos. Daher (2003b). **A importância do projeto hidrodinâmico de cascos e de sistemas de propulsão de navios**, ipen.org.br
- Souza, F. A. (Setembro de 2013). Avaliação de Sistemas Diesel Elétrico, Mecânico e Híbrido para embarcações de Apoio a Plataformas. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- TRINDADE, J. **Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de Máquinas**. Portugal, 2012.
- VALHE FILHO, G. D. do. **AVALIAÇÃO DAS INSTALAÇÕES DE MÁQUINAS EM NAVIOS VISANDO REDUÇÃO DE USO DE COMBUSTÍVEL FÓSSIL**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP - Brasil: Universidade de São Paulo, 2011.
- WOODYARD, D. (2004). **Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turnies**. 8ed, Nova Delhi:Elsevier Ltd.

Anexo A – Códigos do MATLAB utilizados

1 – Relação entre os rendimentos dos motores diesel e suas faixas de rotação:

```
function graficoteste()

    % Dados de eficiência para motores de baixa, média e alta rotações
    eficiencia_baixa = (22.5:2.5:32.5); % Eficiência de um motor de baixa rotação
    (%)
    eficiencia_media = (35:1.5:42); % Eficiência de um motor de média rotação (%)
    eficiencia_alta = (43:1:47); % Eficiência de um motor de alta rotação (%)

    % Rotações correspondentes
    baixa_rotacao = (300:50:500);
    media_rotacao = (600:75:900);
    alta_rotacao = (1000:125:1500);

    % Vetor com os dados de eficiência
    eficiencias = [eficiencia_baixa, eficiencia_media, eficiencia_alta];

    % Gráfico comparativo
    figure;
    plot(baixa_rotacao, eficiencia_baixa, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 10,
'DisplayName', 'Baixa Rotação');
    hold on;
    plot(media_rotacao, eficiencia_media, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 10,
'DisplayName', 'Média Rotação');
    plot(alta_rotacao, eficiencia_alta, '-o', 'LineWidth', 2, 'MarkerSize', 10,
'DisplayName', 'Alta Rotação');

    % Gráfico composto com as faixas de eficiências e rotações
    title('Relação entre Rotação e Eficiência de Motores Diesel Marítimos');
    xlabel('Rotação (RPM)');
    ylabel('Eficiência (%)');
    grid on;

    % Legendas para as curvas
    text(400, 28, 'Baixa Rotação', 'VerticalAlignment', 'bottom');
    text(750, 38, 'Média Rotação', 'VerticalAlignment', 'bottom');
    text(1250, 47, 'Alta Rotação', 'VerticalAlignment', 'bottom');

    % Legenda
    legend('Location', 'Best');

end
```

2 – Relação de desempenho dos motores diesel em função da sua rotação:

```
% Dados de exemplo (substitua pelos seus próprios dados)
rotacao = [1000, 1500, 2000, 2500, 3000]; % em RPM
torque = [20, 30, 35, 32, 28]; % em kNm
vazaodecombustivel = [2000, 1800, 1600, 2000, 2200]; % em Kg/s

% Poder calorífico do diesel (J/g)
poderCalorificoDiesel = 45.5e6; % em kJ/g

% Consumo específico de combustível (g/kWh)
consumoEspecifico = vazaodecombustivel ./ potencia; % em g/kWh
```

```

% Cálculo da potência
potencia = torque .* (2 * pi * rotacao / 60) ; % em kW

% Cálculo do fluxo de calor
fluxoCalor = poderCalorificoDiesel ./ vazaodecombustivel; % em J/s (W)

% Cálculo do rendimento
rendimento = potencia ./ fluxoCalor;

% Encontrar ponto ótimo de operação (máxima potência)
[maxPotencia, idxMaxPotencia] = max(potencia);

% Gráficos
figure;

% Gráfico de Torque, Potência e Rendimento
subplot(2, 2, 1);
yyaxis left;
plot(rotacao, torque, '-o', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Torque (Nm)');
ylabel('Torque (kNm)');
hold on;
yyaxis right;
plot(rotacao, potencia, '-s', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Potência (kW)');
ylabel('Potência (kW)');
xlabel('Rotação (RPM)');
legend;
grid on;

% Gráfico de Rendimento
subplot(2, 2, 2);
plot(rotacao, rendimento * 100, '-d', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Rendimento (%)');
xlabel('Rotação (RPM)');
ylabel('Rendimento (%)');
legend;
grid on;

% Gráfico de Consumo Específico
subplot(2, 2, 3);
plot(rotacao, consumoEspecifico, '-^', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Consumo Específico (g/kWh)');
xlabel('Rotação (RPM)');
ylabel('Consumo Específico (kg/kWh)');
legend;
grid on;

% Destacar ponto ótimo de operação
subplot(2, 2, 4);
plot(rotacao, potencia, '-s', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Potência (kW)');
hold on;
plot(rotacao(idxMaxPotencia), maxPotencia, 'rx', 'MarkerSize', 10, 'DisplayName', 'Ponto Ótimo de Operação');
xlabel('Rotação (RPM)');
ylabel('Potência (kW)');
legend;
grid on;

% Ajustar o layout

```

```
sgtitle('Desempenho do Motor Diesel');
```

3 – Plotagem de desempenho do motor MAN 12V 28/33D STC:

```
% Dados de exemplo (substitua pelos seus próprios dados)
```

```
rotacao = [660, 826, 939, 978, 1000, 1032]; % em RPM
```

```
potencia = [1500, 3000, 4500, 5100, 5460, 6000]; % em kNm
```

```
vazaodecombustivel = [306000, 603000, 888750, 961350, 1031940, 1164000]; % em g/s
```

```
% Poder calorífico do diesel (J/g)
```

```
poderCalorificoDiesel = 45.5; % em J/g
```

```
% Cálculo do torque
```

```
torque = potencia ./ (2 * pi * rotacao / 60) ; % em kW
```

```
% Consumo específico de combustível (g/kWh)
```

```
consumoEspecifico = vazaodecombustivel ./ potencia; % em g/kWh
```

```
% Cálculo do fluxo de calor
```

```
fluxoCalor = poderCalorificoDiesel ./ vazaodecombustivel; % em kJ/s (W)
```

```
% Cálculo do rendimento
```

```
rendimento = (potencia ./ (15 * rotacao));
```

```
% Encontrar ponto ótimo de operação (máxima potência)
```

```
[maxPotencia, idxMaxPotencia] = max(potencia);
```

```
% Gráficos
```

```
figure;
```

```
% Gráfico de Torque, Potência e Rendimento
```

```
subplot(2, 2, 1);
```

```
yyaxis left;
```

```
plot(rotacao, torque, '-o', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Torque (kNm)');
```

```
ylabel('Torque (kNm)');
```

```
hold on;
```

```
yyaxis right;
```

```
plot(rotacao, potencia, '-s', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Potência (kW)');
```

```
ylabel('Potência (kW)');
```

```
xlabel('Rotação (RPM)');
```

```
legend;
```

```
grid on;
```

```
% Gráfico de Rendimento
```

```
subplot(2, 2, 2);
```

```
plot(rotacao, rendimento * 100, '-d', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Rendimento (%)');
```

```
xlabel('Rotação (RPM)');
```

```
ylabel('Rendimento (%)');
```

```
legend;
```

```
grid on;
```

```
% Gráfico de Consumo Específico
```

```
subplot(2, 2, 3);
```

```
plot(rotacao, consumoEspecifico, '-^', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Consumo Específico (g/kWh)');
```

```
xlabel('Rotação (RPM)');
```

```
ylabel('Consumo Específico (g/kWh)');
```

```
legend;
```

```
grid on;

% Destacar ponto ótimo de operação
subplot(2, 2, 4);
plot(rotacao, potencia, '-s', 'LineWidth', 2, 'DisplayName', 'Potência (kW)');
hold on;
plot(rotacao(idxMaxPotencia), maxPotencia, 'rx', 'MarkerSize', 20, 'DisplayName',
'Ponto Ótimo de Operação');
xlabel('Rotação (RPM)');
ylabel('Potência (kW)');
legend;
grid on;

% Ajustar o layout
sgtitle('Desempenho do Motor Diesel');
```