

**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

**MOTORES DIESEL DE PROPULSÃO DE ALTA, MÉDIA E BAIXAS ROTAÇÕES:
aplicação em função do tipo e emprego dos navios.**



1ºTen PEDRO HENRIQUE DE LIMA NOGUEIRA

Rio de Janeiro
2023

1ºTen PEDRO HENRIQUE DE LIMA NOGUEIRA

MOTORES DIESEL DE PROPULSÃO DE ALTA, MÉDIA E BAIXAS ROTAÇÕES:
aplicação em função do tipo e emprego dos navios.

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 Pontes

Dr. Carlos Rodrigues Pereira Belchior

1ºTen PEDRO HENRIQUE DE LIMA NOGUEIRA

MOTORES DIESEL DE PROPULSÃO DE ALTA, MÉDIA E BAIXAS
ROTAÇÕES: aplicação em função do tipo e emprego dos navios.

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:

Carlos Alfredo Órfão Martins, CC (RM1-EN), MSc – CIAA

Júlio César Pontes, CC (EN), MSc – DEN

Carlos Rodrigues Pereira Belchior, Dr.Ing.– UFRJ

CIAA
Rio de Janeiro
2023

Dedico esse trabalho àqueles que sempre acreditaram em mim, ainda que eu mesmo duvidasse de mim: minha amada família.

AGRADECIMENTOS

Impossível não começar este agradecimento sem citar o meu Deus, que me deu forças durante toda a minha vida, e não seria diferente ao longo desse ano tempestuoso.

À minha esposa, Jullianny, que foi durante esse ano o meu refúgio, apesar das adversidades que passamos. Por todo o carinho, compreensão e amor, que nunca faltaram, o meu eterno amor e devoção.

Aos meus pais e irmãos, que forma meu auxílio por muitas vezes no decorrer deste curso. Sou profundamente grato por tê-los ao meu lado em cada passo que dei. Não há palavras suficientes para expressar minha gratidão, mas saibam que cada conquista minha é também um reflexo do amor e apoio que recebi de vocês. Obrigado por serem a base sólida que me permite crescer e prosperar.

Ao Capitão de Corveta (RM1-EN) Carlos Martins, coordenador do curso, pelos ensinamentos transmitidos no Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval de 2023, que contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao Primeiro-Tenente Salviano, pela camaradagem e apoio na realização do trabalho.

“[...] Com mão forte e com
braço estendido, porque a sua
benignidade dura para sempre;
[...]”

Bíblia Sagrada (Sl 136: 12)

MOTORES DIESEL DE PROPULSÃO DE ALTA, MÉDIA E BAIXAS ROTAÇÕES: aplicação em função do tipo e emprego dos navios.

Resumo

Os motores diesel desempenham um papel central na indústria marítima, impulsionando diversas embarcações por meio de uma variedade de faixas de rotação. Este estudo aprofunda-se na aplicação específica desses motores em navios, explorando motores de alta rotação, ideais para embarcações de alta velocidade, motores de média rotação, que se destacam em viagens de longa distância e economia de combustível, e motores de baixa rotação, essenciais para grandes embarcações e manobras complexas. Além disso, são apresentados métodos detalhados para calcular potência, torque e rendimentos desses motores, realçando a importância dessas métricas cruciais para avaliar o desempenho dos sistemas de propulsão marítima. Este estudo sublinha a vital importância de selecionar o tipo de motor apropriado, levando em consideração as necessidades operacionais específicas de cada navio, visando a otimização da eficiência e economia de combustível nas operações marítimas.

Palavras-chave: Motor; Diesel; Potência; Consumo e Rotação

DIESEL ENGINES FOR HIGH, MEDIUM, AND LOW-SPEED PROPULSION:
Application Based on Ship Type and Usage.

Abstract

Diesel engines play a central role in the maritime industry, propelling a variety of vessels across different ranges of rotation. This study delves into the specific applications of these engines in ships, exploring high-speed engines suitable for fast vessels, medium-speed engines ideal for long-distance travel and fuel efficiency, and low-speed engines essential for large ships and intricate maneuvers. Furthermore, detailed methods for calculating power, torque, and efficiency of these engines are presented, highlighting the critical importance of these metrics in evaluating maritime propulsion systems. This study underscores the vital significance of selecting the appropriate engine type, considering the specific operational needs of each vessel, aiming for optimized efficiency and fuel economy in maritime operations.

Key words: Engine; Diesel; Power, Consumption and Revolution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rudolf Diesel	16
Figura 2- Esquema de funcionamento de um motor Diesel.....	17
Figura 3 - Cilindro de um Motor a Diesel de 2 Tempos	18
Figura 4 - Motor MAN D7 de Alta rotação	21
Figura 5 - Motor de navio RT-flex96C, projetado para grandes navios	23
Figura 6 - Força tangencial F_{By} aplicada a uma distância R do ponto P0	25
Figura 7 - Motor MAN 28V-33D STC	33
Figura 8 - Gráficos de Potência, Consumo Específico e Rendimento do MCP MAN 28V-33D STC	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de PCI entre diferentes combustíveis	28
------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Ciclo Diesel Pressão x Volume	19
Gráfico 2 - Ciclo Diesel Temperatura x Entropia	20
Gráfico 3 - Potência, Torque e Consumo Específico em Função da Rotação	32

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo entre Ciclo Diesel e Otto **Error! Bookmark not defined.**

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
MCI	Motor de Combustão Interna
MCP	Motor de Combustão Principal

LISTAS DE SÍMBOLOS

P	Pressão
V	Volume
V_{cil}	Volume do Cilindro
\dot{m}_c	Consumo de combustível
PCI	Poder Calorífico Inferior
n	Número de cilindros
N	Velocidade angular (rpm)
η_t	Rendimento térmico
η_e	Rendimento efetivo
η_v	Rendimento volumétrico
η_i	Rendimento indicado
π	Constante matemática com valor aproximado de 3,1415
\dot{Q}	Fluxo de Calor
\dot{W}_e	Potência Efetiva
\dot{W}_i	Potência Indicada
\dot{W}_a	Potência de Atrito
T	Torque
c_e	Consumo específico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Breve Histórico.....	16
2.2 Funcionamento dos motores a Diesel.....	17
2.2.1 Motor Diesel 4 tempos.....	17
2.2.2 Motor 2 Tempos.....	18
2.3 O Ciclo Diesel.....	19
3 MOTORES DE ALTA, MÉDIA E BAIXA ROTAÇÕES.....	20
3.1 Motores de Alta Rotação.....	21
3.2 Motores de Média Rotação.....	22
3.3 Motores de Baixa Rotação.....	23
4 Medições de Potência e Rendimentos.....	24
4.1 Potência Teórica.....	24
4.2 Potência Efetiva.....	25
4.3 Potência Indicada.....	26
4.4 Potência de Atrito.....	26
4.5 Fluxo de Calor.....	27
4.6 Rendimento Indicado.....	28
4.7 Rendimento Mecânico.....	29
4.8 Rendimento Efetivo.....	29
4.9 Rendimento Termomecânico.....	30
4.10 Rendimento Volumétrico.....	30
4.11 Consumo Específico.....	30
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	31
5.1 Potência, Torque e Consumo Específico.....	31
5.2 Curvas de Potência, Consumo Específico e Eficiência do MCP das Fragatas Classe Tamandaré.....	32
6 CONCLUSÃO.....	34
6.1 Sugestões Para Futuros Trabalhos.....	35
REFERÊNCIAS.....	36
APÊNDICES.....	37
APÊNDICE A – Código do GNU OCTAVE utilizado para calcular a potência, o consumo específico e o rendimento do motor MAN 28V-33D STC.....	37

1 INTRODUÇÃO

A indústria naval, caracterizada por sua natureza técnica e exigências operacionais rigorosas, depende fortemente da eficácia dos motores de propulsão para garantir o desempenho seguro e eficiente das embarcações. Entre os diferentes tipos de motores disponíveis, os motores Diesel de alta, média e baixas rotações são amplamente utilizados devido a sua confiabilidade e eficiência comprovadas. No entanto, a escolha adequada entre esses tipos de motores é determinada pela interseção complexa entre as características específicas do motor e as necessidades particulares de diferentes tipos de navios.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A proposta do referencial teórico verte ao esclarecimento do tema em conformidade com os objetivos propostos para este. Para tanto, a descrição dos tópicos seguirá a ordem de contexto, visando uma descrição clara e concisa de toda a temática.

2.1 Breve Histórico

Figura 1 – Rudolf Diesel



Fonte: Volkswagen-diesels door de mangel op sterfdag Rudolf Diesel

O motor a diesel, patenteado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel em 1893, representou uma revolução no mundo dos motores. Ao utilizar a compressão do ar para

inflamar o combustível, eliminou a necessidade de velas de ignição, proporcionando uma alternativa altamente eficiente aos motores a vapor que dominavam a época (PLANAS, 2021).

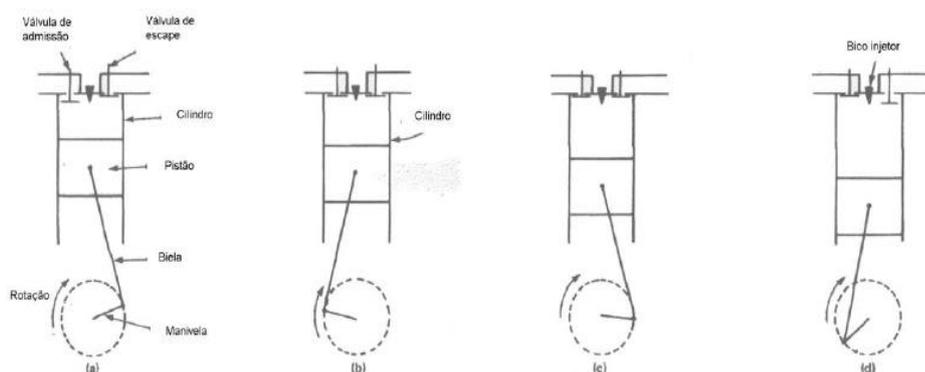
Em 1897, Diesel demonstrou com sucesso seu motor em uma exposição em Paris, inaugurando assim a era dos motores a diesel em diversas aplicações industriais. Ao longo do século XX, esses motores encontraram utilidade em vários setores, incluindo transporte marítimo, ferrovias, navios comerciais e até mesmo navios de grande porte, devido à sua eficiência e durabilidade (PLANAS, 2021).

2.2 Funcionamento dos motores a Diesel

Neste tópico, será fornecida uma breve, mas abrangente explicação sobre os funcionamentos dos motores a diesel de dois e quatro tempos. Serão determinados de forma concisa as fases que os êmbolos atravessam em ambos os sistemas, desde a admissão do combustível até a exaustão dos gases da combustão. O objetivo é proporcionar uma compreensão clara e sintetizada das diferenças fundamentais entre esses dois tipos de motores, oferecendo uma visão abrangente dos processos operacionais que impulsionam uma variedade de embarcações e máquinas em várias aplicações.

2.2.1 Motor Diesel 4 tempos

Figura 2- Esquema de funcionamento de um motor Diesel



Fonte: CC(EN) Carlos Martins

Na figura acima, pode-se observar o funcionamento de um motor a Diesel de quatro tempos. Um motor de quatro tempos é chamado assim por possuir as suas fases de operação em 4 fases diferentes. Essas fases são: admissão, compressão, expansão e exaustão.

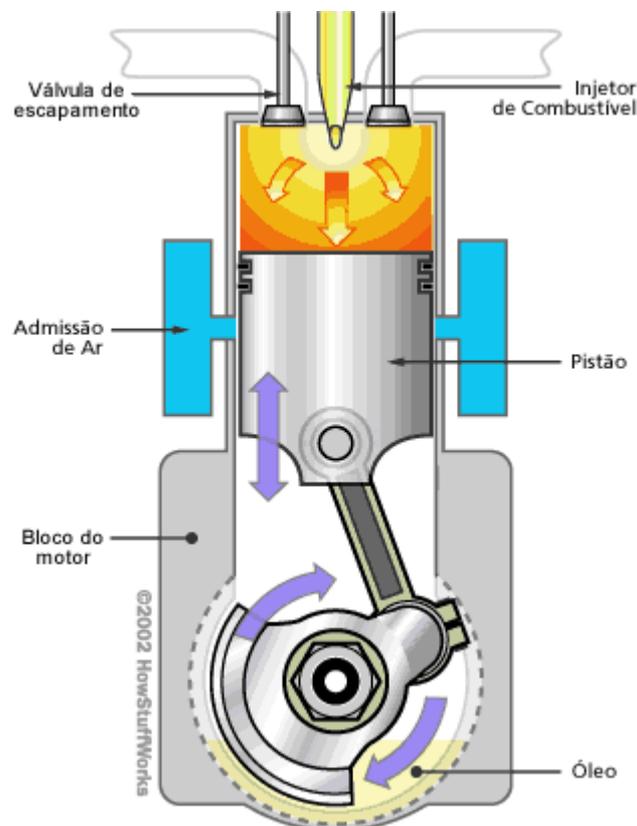
Primeiro, durante a fase de admissão, o ar é aspirado para dentro do cilindro enquanto o êmbolo se move para baixo, sem a presença de combustível. Depois, na fase de compressão, o embolo se move para cima, comprimindo o ar dentro do cilindro. A compressão é tão intensa que o ar aquece significativamente, característica única dos motores a diesel, pois não usam velas de ignição, sendo o aumento de temperatura o suficiente para realizar a ignição do combustível.

No terceiro estágio, a combustão propriamente dita, o diesel é injetado no cilindro e entra em ignição devido à alta temperatura mencionada anteriormente. Essa ignição gera uma explosão dentro do cilindro, que acaba movendo o embolo para baixo e gerando o movimento necessário para impulsionar o navio.

Essas quatro fases se repetem continuamente, seguindo assim o ciclo, e são de muita importância para transformar o combustível em energia para movimentar a embarcação.

2.2.2 Motor 2 Tempos

Figura 3 - Cilindro de um Motor a Diesel de 2 Tempos



Fonte: Motor Diesel – Como Funcionam os Motores a Diesel 2 Tempos

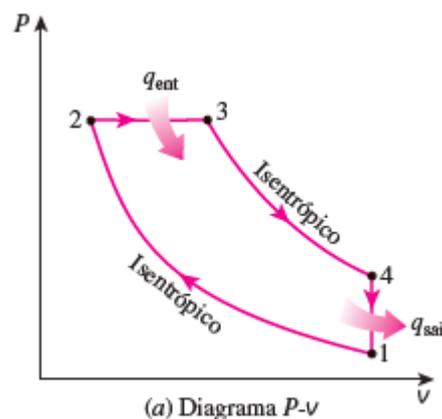
Na figura 2 podemos observar o esquema de funcionamento de um motor de 2 tempos. Nesses motores, as fases de admissão, compressão, expansão e exaustão se resumem a apenas 2 ciclos, ao invés de um motor de quatro tempos (VARELLA C. A., Sem data).

Durante a fase de admissão e compressão, o êmbolo desce do PMS ao PMI, aspirando ar para o cilindro e injetando combustível ao mesmo tempo. Logo após, durante a fase de expansão e exaustão, a mistura ar-combustível é inflamada por conta da alta pressão. Este processo de queima acaba por impulsionar o êmbolo ao PMI, gerando energia e movimento para o motor. Por fim, para expulsar os gases da combustão, o embolo retorna ao PMS e assim se encerra o ciclo (VARELLA C. A., Sem data).

2.3 O Ciclo Diesel

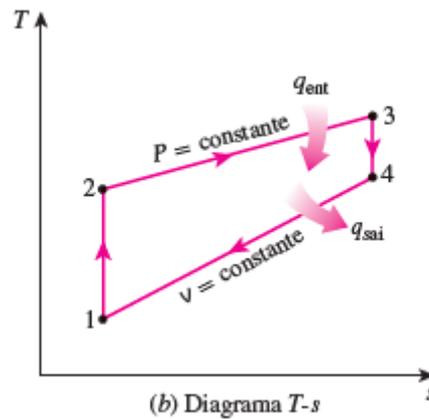
O Ciclo Diesel representa o padrão ideal para motores alternativos de ignição por compressão (ÇENGEL & A. BOLES, 2013). Os gráficos 1 e 2 ilustram o ciclo termodinâmico ideal para os motores a diesel.

Gráfico 1 - Ciclo Diesel Pressão x Volume



Fonte: Termodinâmica 7ª Edição

Gráfico 2 - Ciclo Diesel Temperatura x Entropia



Fonte: Termodinâmica 7ª Edição

Nos gráficos, podemos discriminar os processos que ocorrem no motor diesel durante um ciclo completo. De 1 para 2 acontece uma compressão isentrópica (ou adiabática, ou sem troca de calor com o ambiente externo) do gás. De 2 para 3, há um fornecimento de calor a pressão constante. De 3 para 4, uma expansão isentrópica do gás e de 4 para 1º resfriamento do gás, por meio da rejeição de calor, a volume constante (ÇENGEL & A. BOLES, 2013).

3 MOTORES DE ALTA, MÉDIA E BAIXA ROTAÇÕES

Neste segmento, será apresentada uma análise dos motores a diesel de baixa, média e alta rotação. Serão delineadas de forma sucinta as características distintivas de cada tipo de motor, O objetivo é proporcionar uma compreensão abrangente das particularidades e das áreas de utilização dos motores a diesel de baixa, média e alta rotação em contextos marítimos, permitindo uma visão clara das escolhas de motorização nesse ambiente específico.

3.1 Motores de Alta Rotação

Figura 4 - Motor MAN D7 de Alta rotação



Fonte: Large MAN Hi-Speed Diesel Launched

A figura acima ilustra um motor a Diesel de alta rotação lançado em 2012. Motores a diesel de alta rotação, operando em velocidades que ultrapassam 1000 RPM, são notáveis por sua capacidade de fornecer uma potência específica significativamente elevada em relação ao seu tamanho físico (PEREIRA, sem data). Esses motores, devido à sua eficiência e desempenho, desempenham um papel crucial em diversas aplicações, especialmente no setor marítimo. Em embarcações de alta velocidade, como navios de cruzeiro e ferries, os motores a diesel de alta rotação são a escolha preferida devido à sua habilidade em oferecer uma combinação excepcional de potência e velocidade, garantindo viagens rápidas e eficientes. (PEREIRA, sem data)

Além do setor marítimo, esses motores também encontram aplicação em várias outras áreas industriais. Em ambientes terrestres, são comuns em sistemas de geração de energia elétrica, especialmente em instalações industriais e hospitais, onde a confiabilidade e a alta potência são fundamentais para manter as operações em curso, mesmo em emergências (PEREIRA, sem data).

Essa versatilidade e desempenho superior tornam os motores a diesel de alta rotação essenciais em setores críticos, desempenhando um papel vital tanto no

transporte marítimo quanto em aplicações industriais importantes (PEREIRA, sem data).

3.2 Motores de Média Rotação

Os motores a diesel de média rotação, operando em uma faixa de velocidade de aproximadamente 500 a 1000 RPM, são notáveis por sua versatilidade e eficiência em uma variedade de contextos industriais e marítimos. Caracterizados por sua robustez e durabilidade, esses motores são construídos com componentes resistentes, tornando-os capazes de suportar cargas de trabalho intensas ao longo do tempo. Além disso, sua eficiência energética é notável, convertendo eficazmente o combustível em energia mecânica utilizável.

Esses motores são essenciais em embarcações de médio porte, como navios de carga, navios-tanque e ferries, oferecendo confiabilidade e eficiência energética cruciais. Além disso, desempenham um papel fundamental em plantas de energia marítima, impulsionando geradores para fornecer eletricidade às embarcações e às comunidades costeiras. Sua capacidade de manter uma operação constante mesmo em condições adversas faz deles a escolha preferida em ambientes marítimos desafiadores, proporcionando a potência necessária para atravessar mares tempestuosos com confiança e eficiência.

3.3 Motores de Baixa Rotação

Figura 5 - Motor de navio RT-flex96C, projetado para grandes navios



Fonte: Motores do Nosso Dia a Dia

A figura 5 ilustra um motor de baixa rotação Wartsila RT flex 96C, que possui cerca de 27 metros de comprimento. Motores a diesel de baixa rotação são amplamente reconhecidos por sua robustez e durabilidade, operando em uma faixa de velocidade geralmente entre 300 e 500 RPM (rotações por minuto). Sua característica distintiva reside na capacidade de oferecer um torque poderoso em velocidades mais baixas, tornando-os particularmente adequados para situações que demandam uma força de tração considerável, mas não necessariamente alta velocidade de rotação.

Estes motores desempenham um papel vital em diversas indústrias, especialmente no contexto marítimo. Em navios de grande porte, como cargueiros e petroleiros, os motores a diesel de baixa rotação são cruciais para proporcionar uma propulsão estável e eficiente, mesmo durante viagens de longa distância. Sua habilidade de operar de forma contínua com manutenção mínima os torna uma escolha confiável em travessias marítimas desafiadoras.

Além do cenário marítimo, esses motores são indispensáveis em usinas de energia, onde acionam geradores para fornecer eletricidade a comunidades e indústrias. Sua eficiência e confiabilidade são especialmente valiosas em situações em que um fornecimento de energia constante é essencial para manter operações críticas.

No setor industrial, motores de baixa rotação são frequentemente utilizados em maquinários pesados, como trituradores e moinhos, onde a força de torque é

fundamental para manipular materiais robustos. Sua capacidade de gerar força de tração também os torna vitais em aplicações de transporte de carga pesada, sendo amplamente empregados em indústrias de mineração e construção.

4 Medições de Potência e Rendimentos

Neste capítulo, serão discutidos métodos fundamentais para calcular uma variedade de potências e rendimentos em motores a diesel. Esta exploração proporcionará uma compreensão aprofundada das métricas essenciais, oferecendo ferramentas analíticas cruciais para avaliar o desempenho dos motores. Ao apresentar esses métodos, os leitores serão capacitados com conhecimentos valiosos para analisar e aprimorar sistemas de propulsão, tornando-se recursos indispensáveis para engenheiros, pesquisadores e profissionais na indústria marítima.

4.1 Potência Teórica

A potência teórica em um MCI é uma projeção teórica da máxima capacidade do motor para realizar trabalho, estabelecida com base em cálculos idealizados usando parâmetros teóricos e condições ideais de operação. Esta medição é derivada considerando variáveis como o volume de deslocamento dos cilindros e a velocidade de operação, aplicadas em equações termodinâmicas (VARELLA C. A., 2010).

No entanto, na prática, devido a diversas fontes de perda, incluindo atrito interno, perdas de calor e ineficiências no processo de combustão, a potência teórica nunca é plenamente alcançada.

Contrastando com esse cenário teórico, a potência efetiva, como será exposto no próximo tópico, representa uma medição mais realista e precisa do desempenho de um MCI. Isso ocorre porque a potência efetiva leva em consideração todas as perdas e ineficiências reais que ocorrem durante o funcionamento do motor (VARELLA C. A., 2010). Perdas de calor, atrito e outras ineficiências são fatores que impactam a eficiência do motor no mundo real. Portanto, enquanto a potência teórica oferece uma visão teórica e idealizada da capacidade do motor, a potência efetiva reflete a verdadeira habilidade do MCI para transformar energia térmica em trabalho mecânico, considerando as complexidades e desafios enfrentados em condições reais de operação.

A expressão para a potência teórica é:

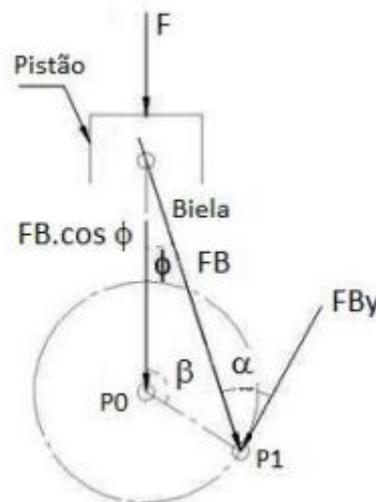
$$\dot{W}_t = PCI * \dot{m}_c * d \quad (1)$$

4.2 Potência Efetiva

A potência efetiva em um MCI refere-se à capacidade real do motor em realizar trabalho mecânico para impulsionar a embarcação (VARELLA C. A., 2010). Em um contexto marítimo, essa medida representa a quantidade de energia que o motor pode converter em força propulsora para superar a resistência da água e mover o navio. É uma medida crucial para garantir o desempenho adequado do navio, especialmente em condições marítimas variáveis, como ondas, correntes e ventos.

Durante o ciclo de operação do motor, várias formas de energia são dissipadas devido ao atrito entre as partes móveis, às perdas de calor para o sistema de resfriamento e ao ambiente, entre outras fontes de ineficiência. Em outras palavras, com isso, a potência efetiva representa a quantidade de energia que realmente está disponível para realizar trabalho útil. É uma medida fundamental para os engenheiros, pois fornece uma visão precisa da performance real do motor, levando em conta todas as complexidades e perdas que ocorrem durante o processo de combustão e conversão de energia. Portanto, é uma métrica essencial para avaliar e otimizar a eficiência dos motores de combustão interna em diversas aplicações industriais e de transporte. A estimativa da potência efetiva se baseia na energia mecânica gerada por uma força tangencial aplicada à circunferência de raio R conforme a figura 6.

Figura 6 - Força tangencial F_B aplicada a uma distância R do ponto P0



Fonte: Estimativa da potência dos motores de combustão interna (2010)

A força F_B é obtida da seguinte forma, segundo Varella:

$$F_B = \frac{P * A}{\cos\phi} \quad (2)$$

Com isso torque, para o cálculo da potência efetiva, é obtido da seguinte forma:

$$T = F_B * \cos\phi * R, \quad (3)$$

onde R é o raio da circunferência.

Ela é expressa pela seguinte fórmula:

	$\dot{W}_e = 2\pi * T * N$	(4)
--	----------------------------	-----

4.3 Potência Indicada

A potência indicada em um MCI é uma estimativa teórica da potência máxima que o motor poderia gerar durante um ciclo de operação, conhecido como ciclo indicado. Essa medida é calculada com base na pressão média efetiva (PME) dentro dos cilindros e no volume deslocado pelo êmbolo durante o ciclo (VARELLA C. A., 2010). Em termos simples, representa a potência ideal que o motor poderia produzir em condições teoricamente perfeitas, sem considerar as perdas por atrito, ineficiências na combustão ou outras formas de dissipação de energia (TAYLOR, Análise dos Motores de Combustão Interna, 1974).

No entanto, é importante notar que a potência indicada não reflete as perdas reais que ocorrem no mundo real, como atrito interno, perdas de calor e ineficiências nos sistemas mecânicos e de exaustão. Portanto, a potência indicada é sempre mais alta do que a potência efetiva ou a potência disponível para realizar o trabalho real, como a potência na roda de um navio (TAYLOR, Análise dos Motores de Combustão Interna, 1974)

Apesar de sua natureza teórica, a potência indicada é uma medida valiosa para os engenheiros, pois fornece informações essenciais sobre o potencial máximo do motor e auxilia no processo de aprimoramento do projeto para melhorar a eficiência energética. A expressão para o cálculo da potência indicada para um motor 2 tempos é:

$$\dot{W}_{i2T} = P * V_{cil} * N * n \quad (5)$$

E a fórmula para o cálculo da potência indicada para um motor 4 tempos é:

$$\dot{W}_{i4T} = \frac{1}{2} P * V_{cil} * N * n \quad (6)$$

4.4 Potência de Atrito

A potência de atrito em um MCI representa a energia que se perde devido à fricção entre as várias partes móveis do motor durante a operação (TAYLOR, Análise

dos Motores de Combustão Interna, 1974). Enquanto o motor está em funcionamento, componentes como êmbolos, anéis, eixo de cames, mancais e engrenagens estão em constante movimento e interação. Essa interação gera atrito, uma força que se opõe ao movimento, surgindo do contato direto entre as superfícies desses componentes.

Essas perdas causadas pelo atrito são particularmente notáveis nos cilindros, onde os êmbolos se movem para cima e para baixo, e nos mancais, onde o eixo de cames gira. Além disso, o atrito também desempenha um papel relevante nos anéis dos êmbolos, nas engrenagens do sistema de distribuição, nas válvulas e em outros pontos de contato dentro do motor (TAYLOR, Análise dos Motores de Combustão Interna, 1974).

A energia dissipada devido a esse atrito não é convertida em trabalho útil para impulsionar o navio; em vez disso, transforma-se em calor. Essa dissipação de energia, causada pelo atrito, pode ter um impacto significativo na eficiência global do motor. Portanto, minimizar as perdas devido ao atrito é crucial no design de motores, não apenas para melhorar a eficiência energética, mas também para promover um funcionamento mais suave, aumentar a durabilidade das peças e melhorar a economia de combustível do navio (TAYLOR, Análise dos Motores de Combustão Interna Vol. II, 1984). A expressão que calcula a potência de atrito é dada por:

$$\dot{W}_a = \frac{T \cdot n}{cte * 2\pi} \quad (7)$$

Onde a constante, vezes o valor de 2π , para utilizar o valor do torque em N.m (Newtonmetro) e a velocidade de rotação em rpm (rotações por minuto) é igual a 9.549,3. Assim, a equação fica na seguinte forma:

$$\dot{W}_a = \frac{T \cdot n}{9.549,3} \quad (8)$$

Com isso, pode-se escrever a seguinte relação entre as potências efetiva, indicada e de atrito (TAYLOR, Análise dos Motores de Combustão Interna, 1974):

$$\dot{W}_i = \dot{W}_e + \dot{W}_a \quad (9)$$

4.5 Fluxo de Calor

Em um MCI, a expressão que define o fluxo de calor é dada por:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c * PCI \quad (10)$$

Esta fórmula descreve a relação entre o calor gerado durante o processo de combustão e as características do combustível utilizado. Quando o MCI está em operação, uma quantidade específica de combustível é injetada nos cilindros do motor

(representada por m). Essa fórmula quantifica o fluxo de calor produzida durante a queima desse combustível.

O símbolo $\dot{m}c$ representa a taxa de transferência de massa de combustível, que é a quantidade de combustível que é consumida ou transferida por unidade de tempo (geralmente em quilogramas por segundo).

O termo PCI refere-se ao Poder Calorífico Inferior do combustível, uma medida da quantidade de calor liberada quando o combustível é completamente queimado. Esta é uma propriedade intrínseca do combustível e varia conforme o tipo de combustível utilizado.

Portanto, a fórmula expressa a quantidade de calor por tempo gerada durante a combustão em relação à vazão do combustível e sua capacidade de armazenar calor. Esse calor é então transformado em trabalho mecânico, movendo pistões e gerando energia mecânica usada para impulsionar veículos ou realizar outras tarefas mecânicas. Compreender e otimizar essa relação é essencial para melhorar a eficiência e o desempenho dos motores de combustão interna, sendo crucial para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis.

Segue abaixo uma tabela com as propriedades dos combustíveis mais utilizados em MCI, enfatizando o óleo diesel, combustível dos motores do trabalho em questão.

Tabela 1 - Comparação de PCI entre diferentes combustíveis

	Diesel	Etanol Hidratado	Metanol	Gasolina E22
Densidade (kg/L)	0,84	0,81	0,80	0,74
PCI (kcal/kg)	10.200	5.970	4.760	9.400
PCI (kcal/L)	9.568	4.836	3.808	6.956

Fonte: Autoria Própria

4.6 Rendimento Indicado

O rendimento indicado em motores de combustão interna é uma relação entre a potência indicada, que representa o trabalho teórico ideal que o motor poderia realizar sob condições ideais, e a fluxo de calor liberado durante o processo de combustão. A

potência indicada é calculada com base nas características do combustível e na quantidade de calor que pode ser potencialmente convertida em trabalho mecânico (TAYLOR, Análise dos Motores de Combustão Interna, 1974). Este é expresso pela seguinte fórmula:

$$\eta_i = \frac{\dot{W}_i}{\dot{Q}} \quad (11)$$

Essa medida oferece uma visão da eficiência teórica do motor, mostrando quão eficazmente ele pode transformar a energia do combustível em trabalho mecânico, considerando as condições ideais de operação.

4.7 Rendimento Mecânico

O rendimento mecânico em motores a diesel representa a eficiência com que o motor converte a potência indicada, que é o trabalho teórico ideal que poderia ser realizado sob condições ideais, em potência mecânica efetiva, que é a quantidade real de trabalho útil produzido pelo motor (VARELLA C. A., 2010). Essa relação é matematicamente expressa pela fórmula:

$$\eta_m = \frac{\dot{W}_e}{\dot{W}_i} \quad (12)$$

Essa fórmula quantifica quão eficientemente o motor está transformando a energia do combustível em trabalho mecânico útil, oferecendo uma medida crucial de sua eficácia operacional específica para motores desse tipo.

4.8 Rendimento Efetivo

O rendimento efetivo em motores a diesel é uma métrica fundamental que avalia quão eficientemente o motor converte fluxo de calor liberado durante o processo de combustão do diesel em potência mecânica efetiva, representando o trabalho mecânico real produzido pelo motor (VARELLA C. A., 2010). O rendimento efetivo é definido pela fórmula:

$$\eta_e = \frac{\dot{W}_e}{\dot{Q}} \quad (13)$$

Essa fórmula proporciona uma visão detalhada da eficiência operacional do motor a diesel, indicando quão bem ele está transformando a energia contida no combustível diesel em trabalho mecânico útil, levando em consideração todas as perdas e ineficiências durante o processo de combustão. O rendimento efetivo é uma medida

crucial para avaliar o desempenho prático e a eficiência energética de um motor a diesel. Uma relação entre os rendimentos efetivo, indicado e mecânico é dada pela seguinte fórmula:

$$\eta_e = \eta_i * \eta_m \quad (14)$$

4.9 Rendimento Termomecânico

O rendimento termomecânico em um MCI é uma métrica que avalia a eficiência com que o motor converte a potência teórica, que é o trabalho teórico máximo que o motor poderia realizar sob condições ideais, em potência efetiva, que representa a quantidade real de trabalho útil produzido pelo motor (VARELLA C. A., 2010). Este é calculado da seguinte forma:

$$\eta_{tm} = \frac{\dot{W}_e}{\dot{W}_t} \quad (15)$$

4.10 Rendimento Volumétrico

O rendimento volumétrico representa a eficiência com que o motor é capaz de encher seus cilindros com uma quantidade adequada de mistura ar-combustível durante o ciclo de admissão (TAYLOR, Análise dos Motores de Combustão Interna, 1974). Ele é calculado como a razão entre a massa de ar realmente aspirada e a massa de ar que os cilindros poderiam teoricamente conter se estivessem completamente cheios, considerando o volume do cilindro, a densidade do ar ρ , e o número de cilindros n . Expressando essa informação em uma fórmula, para um motor de 4 tempos, obtemos:

$$\eta_v = 120 \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_{ar} * V_{cil} * n} \quad (16)$$

4.11 Consumo Específico

O consumo específico representa a quantidade de combustível necessária para produzir uma unidade de potência efetiva. Essa métrica é calculada dividindo o consumo de combustível pela potência efetiva do motor (VARELLA C. A., 2010).

Geralmente expressa em litros ou quilogramas por hora por unidade de potência (quilowatts ou cavalos de potência), o consumo específico oferece uma medida clara da eficiência do motor. A fórmula para o cálculo do consumo específico é:

$$c_e = \frac{\dot{m}_c}{\dot{W}_e} \quad (17)$$

Quanto menor o valor do consumo específico, mais eficiente é o motor, indicando que ele utiliza menos combustível para gerar uma quantidade específica de potência efetiva.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste segmento, serão apresentadas as curvas características do motor diesel. Essas curvas fornecem informações cruciais sobre o desempenho do motor em diferentes condições operacionais. Elas representam graficamente a relação entre diversos parâmetros, como potência, torque e consumo específico, em diversas faixas de rotação do motor. O estudo dessas curvas permite uma análise detalhada do comportamento do motor em diferentes cargas e velocidades, sendo essencial para engenheiros e técnicos na otimização do desempenho do motor diesel em variadas situações de operação. Além disso, essas curvas são fundamentais para entender a resposta do motor a diferentes demandas de carga, contribuindo para a tomada de decisões em projetos de engenharia.

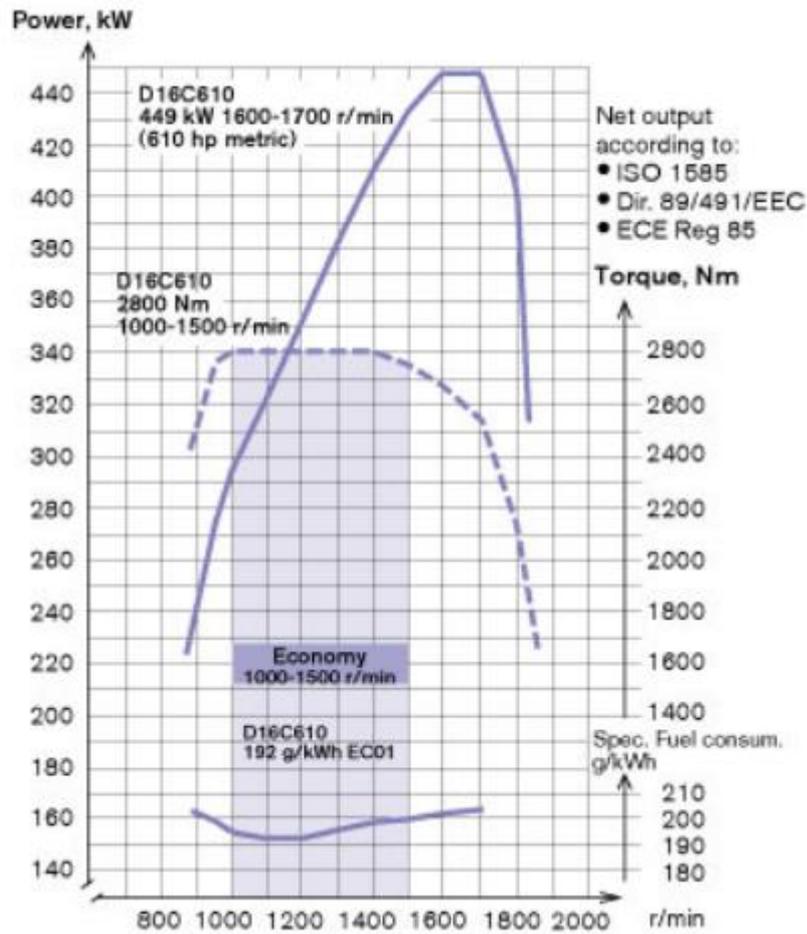
5.1 Potência, Torque e Consumo Específico

A curva de consumo específico, como mostra o gráfico 5, revela que este diminui à medida que o motor opera em rotações mais baixas. Isso significa que o motor é mais eficiente em baixas velocidades, o que é crucial para economizar combustível durante operações de cruzeiro prolongadas, como foi mencionado no referencial teórico, características essenciais de navios de transporte de passageiros.

A curva de torque nos mostra que em baixas rotações o torque costuma ser maior, o que é benéfico para iniciar movimentos e superar resistências, característica fundamental dos motores de baixa rotação. Conforme a rotação aumenta, o torque geralmente diminui, o que afeta a capacidade do motor de superar resistências mais intensas.

Por fim, a curva de potência tende a aumentar à medida que as rotações aumentam, atingindo um ponto máximo em uma determinada faixa de rotação antes de começar a diminuir, ponto fundamental para os motores de alta rotação, como os navios militares.

Gráfico 3 - Potência, Torque e Consumo Específico em Função da Rotação

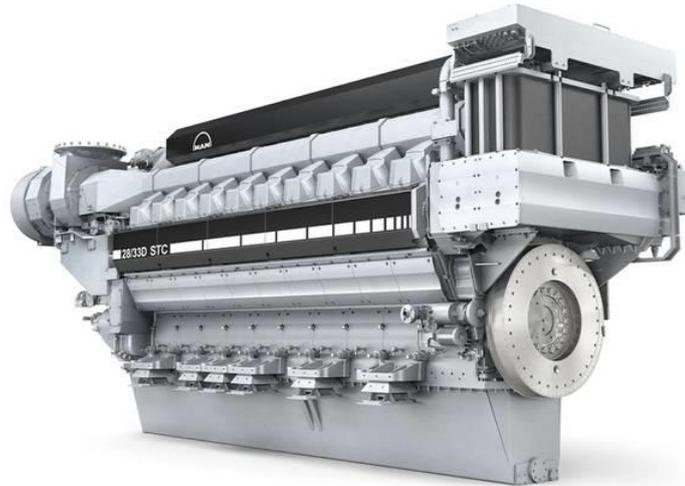


Fonte: Estimativa da potência dos motores de combustão interna

5.2 Curvas de Potência, Consumo Específico e Eficiência do MCP das Fragatas Classe Tamandaré

A figura a seguir ilustra o motor a diesel MAN V28-33D, selecionado para ser o MCP das fragatas classe “Tamandaré”.

Figura 7 - Motor MAN 28V-33D STC



Fonte: V28 33D Series Engines – For Offshore Patrol Vessels

Utilizando os parâmetros deste motor, foram realizados os cálculos de potência, consumo específico e rendimento, utilizando a ferramenta GNU OCTAVE. O quadro a seguir expõe alguns dados importantes relacionados a este motor.

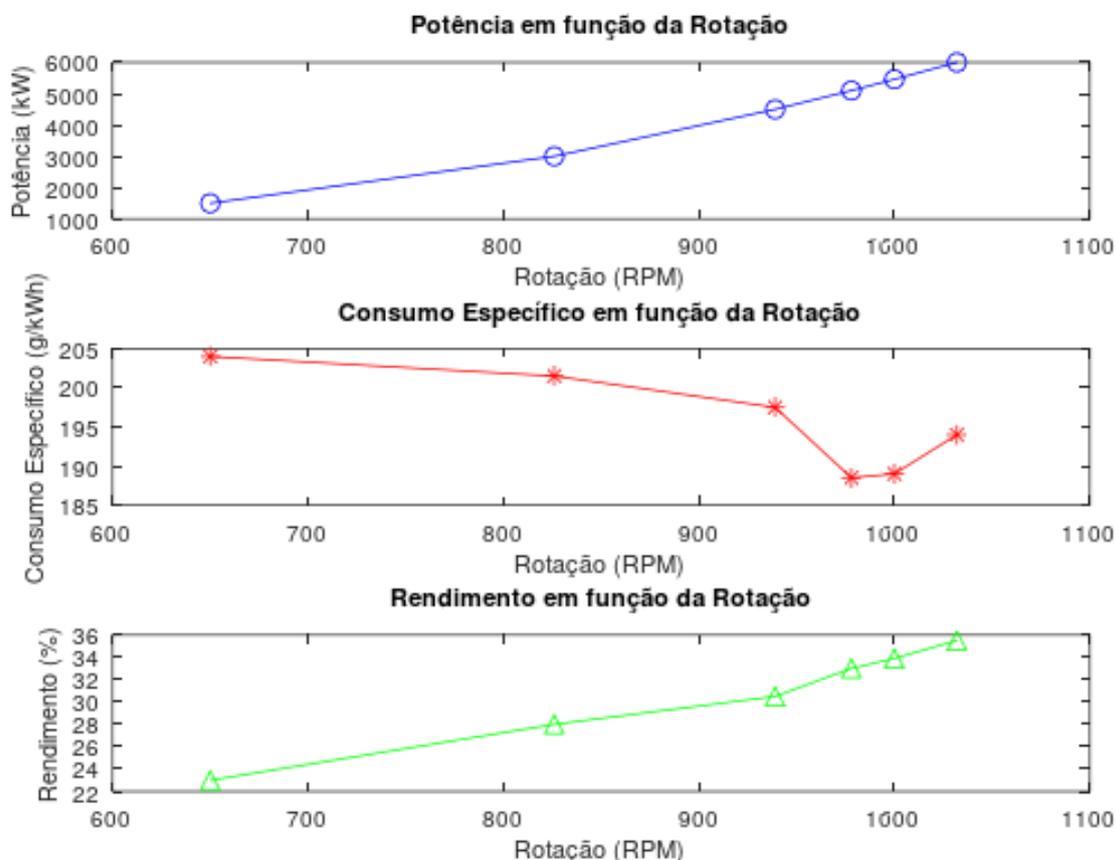
Quadro 1 – Dados nominais do motor MAN 28V-33D STC

Parâmetro	Valor
Tipo	4 tempos
Potência nominal	Entre 3.500 a 6.000kW
Rotação	720 a 1032 RPM
Cilindros	12
Diâmetro	280 mm
Curso	330 mm

Fonte: Autoria Própria

Ao realizar os cálculos de potência, rendimento e consumo específico deste motor, foram obtidos os resultados expostos nos gráficos a seguir.

Figura 8 - Gráficos de Potência, Consumo Específico e Rendimento do MCP MAN 28V-33D STC



Fonte: Autoria Própria

Nos gráficos acima, pode-se observar que o MCP possui potência máxima, com valor de 6.000kW em sua rotação máxima, com valor de 1.032 RPM. No gráfico de consumo específico em função da rotação, observa-se que o consumo mais baixo está um pouco antes das 1.000 RPM, atingindo o valor mais baixo de 189 g/kWh. Por fim, o gráfico de rendimento expõe justamente o melhor rendimento em sua velocidade máxima, alcançando a faixa de 35% de rendimento com 100% de carga do motor. Os códigos utilizados para calcular esses parâmetros serão expostos no apêndice deste trabalho.

6 CONCLUSÃO

Após uma análise minuciosa das características distintas dos motores a diesel em diversas faixas de rotação, torna-se evidente que a escolha criteriosa do tipo de motor desempenha um papel vital nas operações marítimas. Os motores de média rotação, meticulosamente projetados para otimizar a economia de combustível, destacam-se como a opção ideal para viagens prolongadas no mar, onde a eficiência energética é de

suma importância. Por sua vez, os motores de baixa rotação, com seu notável torque em velocidades mais baixas, além do seu consumo de combustível baixo, tornam-se indispensáveis para superar resistências iniciais e realizar manobras complexas, especialmente em embarcações de grande porte. Enquanto isso, os motores de alta rotação surgem como protagonistas em cenários que exigem velocidade e agilidade, sendo essenciais para embarcações que necessitam de alto desempenho em altas velocidades. A consideração cuidadosa dessas características específicas ao escolher o tipo de motor é imperativa para garantir uma operação marítima eficaz e econômica. Assim, ao ponderar sobre as exigências operacionais particulares de uma embarcação, a seleção criteriosa entre motores de diversas faixas de rotação emerge como um fator crucial para o sucesso das operações no vasto cenário marítimo.

6.1 Sugestões Para Futuros Trabalhos

O Papel dos Motores a Diesel de Alta e Média Rotações na Modernização da Frota Naval Brasileira.

REFERÊNCIAS

- BORGNACKE, C., & SONNTAG, R. (2013). *Fundamentos da Termodinamica. 8ed.* Blucher.
- ÇENGEL, Y. A., & A. BOLES, M. (2013). *Termodinâmica, 7ª Edição.* [s.l.]: Bookman.
- CONNOR, N. (26 de Janeiro de 2020). *O que é o Ciclo Otto - Motor de Otto - Definição.* Fonte: Thermal Engineering: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-ciclo-otto-otto-engine-definicao/>
- GANESAN, V. (1988). *Internal Combustion Engines 4th Edition.* Nova Delhi: Tata McGraw-Hill.
- PEREIRA, J. C. (sem data). *Motores, Geradores e Dinamômetros.* Fonte: joseclaudio.eng : www.joseclaudio.eng.br/grupos_geradores_2
- PLANAS, O. (22 de Novembro de 2021). *História do Motor Diesel, Primeiros Motores e Invenção.* Fonte: DeMotor: <https://pt.demotor.net/motores-termicos/motor-a-diesel/historia>
- SIMPLÍCIO. (19 de Junho de 2020). *Motor Ciclo Otto: Entenda o Funcionamento.* Fonte: Simplo: <https://blog.simplusbr.com/motor-ciclo-otto/>
- TAYLOR, C. F. (1974). *Análise dos Motores de Combustão Interna.* Edgar Blucher.
- TAYLOR, C. F. (1984). *Análise dos Motores de Combustão Interna Vol. II.* Edgar Blucher.
- VARELLA, C. A. (27 de Abril de 2010). *Estimativa da potência dos motores de combustão interna.* Fonte: UFRRJ: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/estimativa%20da%20potencia%20dos%20motores.pdf
- VARELLA, C. A. (Sem data). *Princípios de Funcionamento dos Motores de Combustão Interna.* Fonte: UFRRJ: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/apresenta/principios%20de%20funcionamento%20dos%20motores.pdf

APÊNDICES

APÊNDICE A – Código do GNU OCTAVE utilizado para calcular a potência, o consumo específico e o rendimento do motor MAN 28V-33D STC

% Dados fornecidos

rotaoes = [650, 826, 939, 978, 1000, 1032]; % Rotações em RPM

cargas = [0.25, 0.5, 0.75, 0.85, 0.91, 1]; % Cargas em porcentagem

% Potência por cilindro para cada carga

potencia_por_cilindro = [125, 250, 375, 425, 455, 500]; % Potência por cilindro em kW

% Número de cilindros

num_cilindros = 12;

% Inicializando matrizes para armazenar os resultados

potencia = zeros(length(rotaoes), length(cargas));

eficiencia = zeros(length(rotaoes), length(cargas));

consumo_especifico = zeros(length(rotaoes), length(cargas));

% Calculando os resultados para diferentes rotações e cargas

for i = 1:length(rotaoes)

for j = 1:length(cargas)

potencia(i, j) = potencia_por_cilindro(j) * num_cilindros; % Potência total

eficiencia(i, j) = potencia(i, j) / (rotaoes(i) * cargas(j) * num_cilindros); %

Fórmula da eficiência

consumo_especifico(i, j) = potencia(i, j) / (rotaoes(i) * cargas(j) *

num_cilindros); % Fórmula do consumo específico

end

end

% Plot dos gráficos

figure;

```
subplot(3, 1, 1);  
plot(rotacoes, potencias, 'b-o');  
title('Potência em função da Rotação');  
xlabel('Rotação (RPM)');  
ylabel('Potência (kW)');
```

```
subplot(3, 1, 2);  
plot(rotacoes, consumos_especificos, 'r-*');  
title('Consumo Específico em função da Rotação');  
xlabel('Rotação (RPM)');  
ylabel('Consumo Específico (g/kWh)');
```

```
subplot(3, 1, 3);  
plot(rotacoes, eficiencia, 'g-^');  
title('Rendimento em função da Rotação');  
xlabel('Rotação (RPM)');  
ylabel('Rendimento (%)');
```