

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

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
SISTEMAS DE CONTROLE E ELETRICIDADE DE NAVIOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROPULSÃO ELÉTRICA DE NAVIOS: Desafios na implementação do sistema propulsivo
de corrente contínua em média tensão.**



PRIMEIRO-TENENTE ERICK BONIOLI BERTO CORO

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE ERICK BONIOLI BERTO CORO

PROPULSÃO ELÉTRICA DE NAVIOS: Desafios na implementação do sistema propulsivo de corrente contínua em média tensão.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Controle e Eletricidade de Navios.

Orientadores:

Dr. Luiz Antônio Vaz Pinto

CT (EN) Ronei Erlacher

CIAA
Rio de Janeiro
2023.

PRIMEIRO-TENENTE ERICK BONIOLI BERTO CORO

PROPULSÃO ELÉTRICA DE NAVIOS: Desafios na implementação do sistema propulsivo de corrente contínua em média tensão.

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistema de Controle e Eletricidade de Navios.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Luiz Antônio Vaz Pinto, D. Sc. – UFRJ

Ronei Erlacher, CT (EN) .– DEN

Dedico este trabalho à minha mãe, irmão e namorada, que se fizeram como porto seguro em toda esta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha mãe, Márcia Bonioli Berto, que com muito esforço e sem ajuda paterna, me criou, educou e com todo apoio e carinho, me acompanhou e me incentivou nesta caminhada.

Aos meus falecidos avós, Odaléa e Onofre, que até hoje enchem meu peito de saudade.

Ao meu irmão, Breno Bonioli, pelos momentos de motivação, diversão e principalmente camaradagem, aos quais levo com muito carinho no coração.

À minha companheira, Larisse Chagas, por todo apoio e amor dado nesta trajetória.

Aos meus orientadores, o CT (EN) Erlacher e o Professor Luiz Vaz, pelos momentos de orientação, paciência e ensino neste trabalho.

A todos, a minha gratidão. Levarei cada um com muito carinho no peito.

“Nenhuma deficiência resiste ao trabalho.”

Bernardino.

PROPULSÃO ELÉTRICA DE NAVIOS: Desafios na implementação do sistema propulsivo de corrente contínua em média tensão.

Resumo

Esta monografia trata sobre uma revisão bibliográfica que aborda a tecnologia de Média tensão e corrente contínua (MVDC) no sistema propulsivo de um navio. O estudo elucidou a história e evolução da propulsão elétrica, sua comparação com outro sistema propulsivo, suas peculiaridades na corrente contínua como tipo principal da propulsão elétrica e o progresso na eletrônica de potência. O foco principal deste trabalho foi destacar as vantagens da propulsão elétrica, com ênfase no sistema propulsivo em corrente contínua e média tensão.

Com o objetivo de sustentar esta tese, este trabalho dedicou atenção a intenção de outras marinhas do mundo mais desenvolvidas, como a norte-americana e inglesa, de investir nesta tecnologia MVDC em seus navios de guerra, e as vantagens e desvantagens associadas a ela.

Palavras-chave: propulsão elétrica, MVDC, eletrônica de potência.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Contratorpedeiro “Type 45” da classe “Daring”	16
Figura 02 – DDG 1000	16
Figura 03 – Esboço simplificado do sistema de propulsão e iluminação a bordo do SS Columbia	21
Figura 04 – USS “Júpiter”	22
Figura 05 – Desenho simplificado do sistema de geração e distribuição turboelétrica instalada no USS New México	23
Figura 06 – Sistema de Propulsão Elétrica Integrada	25
Figura 07 – Navio de Socorro Submarino NSS Guillobel	26
Figura 08 – Propulsão convencional Diesel mecânica	29
Figura 09 – Partes do Motor de Corrente Contínua	39
Figura 10 – Princípio de funcionamento de um Motor CC	40
Figura 11 – Circuito elétrico do Conversor Buck	48
Figura 12 – Circuito elétrico do Conversor Boost	49
Figura 13 – Circuito elétrico do Conversor Buck-Boost	50
Figura 14 – A topologia da conversão de energia elétrica do VSI	51
Figura 15 – Controlador de eletrônica de potência PEBB	52
Figura 16 – Diagrama de blocos MVDC funcional simplificado destacando os equipamentos de eletrônica de potência incluídos em cada bloco funcional	54
Figura 17 – Rede de Distribuição MVDC a bordo de um navio	56
Figura 18 – Conceito do sistema de distribuição de energia MVDC	58
Figura 19 – Exemplo de projeto teórico de sistema de navio MVDC de alto desempenho ...	60
Figura 20 – Força Naval Elétrica	61
Figura 21 – Avanço tecnológico esperado pela USN	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Comparação entre os navios de guerra que possuem IEP	27
Tabela 02 – Comparação entre os dispositivos semicondutores	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Gráfico de potência, consumo específico e torque de um motor diesel	31
Gráfico 02 - Consumo de combustível	32
Gráfico 03 - Gráfico da emissão de poluentes x Tipo de propulsão	33

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

KW	kilo-Watts (Unidade de medida de potência) – 1.000 Watts.
MW	mega-Watts (Unidade de medida de potência) – 100.000 Watts.
MEP	Motor elétrico de propulsão
CC	Corrente contínua
CA	Corrente alternada
V	Volts (Unidade de medida de potencial elétrico)
MB	Marinha do Brasil
AES	<i>All electric ship</i>
CO2	Dióxido de carbono
Nox	Número de oxidação
SOx,	Óxido de enxofre
NSS	Navio de Socorro Submarino
NApAnt	Navio de Apoio Oceanográfico
MARPOL	Convenção Internacional para a prevenção da poluição causada por navios.
IMO	Organização Marítima Internacional
MVDC	<i>Medium voltage direct current</i>
MVAC	<i>Medium voltage alternated current</i>
DSV	<i>Dive Suport Vessel</i>
IGBT	<i>Insulated gate bipolar transistor</i>
MOSFET	<i>Metal-oxide-semiconductor field effect transistor</i>
BJT	<i>Bipolar junction transistor</i>
SCR	<i>Silicon controlled rectifier</i>
IEP	<i>Integrated Electric Propulsion</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Apresentação do Problema	15
1.2. Justificativa e Relevância	15
1.3. Objetivos	17
1.4. Estrutura da dissertação	17
2. METODOLOGIA	19
3. PROPULSÃO ELÉTRICA	20
3.1. Um breve histórico sobre a propulsão elétrica	20
3.2. Cenário atual	24
3.2.1. Visão geral da propulsão elétrica de navios	24
3.2.2. A propulsão elétrica na Marinha do Brasil	26
3.2.3. A propulsão elétrica nas demais marinhas	27
3.3 Comparação entre a propulsão elétrica e a propulsão diesel	28
3.3.1. Sistema diesel mecânico	28
3.3.2. Sistema diesel elétrico	29
3.4. As principais vantagens da Propulsão Elétrica.	29
3.4.1. Redução do consumo de combustível	29
3.4.2. Redução da emissão de poluentes	32
3.4.3. Redução da tripulação	33
3.4.4. Flexibilidade do projeto	33
3.4.5. Redução dos custos de manutenção	34
3.4.3. Redução da assinatura acústica	34
3.4.3. Aumento da capacidade de sobrevivência do navio	35
3.4.3. Aumento da vida útil do navio	35
3.5. Desvantagens da Propulsão elétrica	36
3.5.1. Eficiência	36
3.5.2. Peso	36
3.5.3. Qualidade da energia	37

4. PROPULSÃO ELÉTRICA POR CORRENTE CONTÍNUA	38
4.1 Máquinas CC	39
4.1.1. Parte do Motor CC	39
4.1.2. Funcionamento do Motor CC	40
4.2. Vantagens e Desvantagens da Propulsão Elétrica por Corrente Contínua	41
5. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA	43
5.1 Dispositivos de comutação de potência	44
5.1.1. Diodos de potência	44
5.1.2. Transistores	45
5.1.3. Tiristores	46
5.1.4. Conversores CC/CC	47
5.1.4.1. Conversor abaixador (Buck)	48
5.1.4.2. Conversor elevador (Boost)	49
5.1.4.3. Conversor Buck-Boost	50
5.1.5. Inversores	51
5.1.6. Power Electronic Building Block (PEBB)	51
6. MEDIUM VOLTAGE DIRECT CURRENT (MVDC)	53
6.1. IEEE	57
7. CONCLUSÃO	61
7.1 Considerações finais	63
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	63
REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

No mundo militar, os navios devem ser projetados de tal maneira a conciliar flexibilidade operativa e robustez. Junto a isto, o aspecto econômico envolvendo toda a vida útil operativa do meio naval, é extremamente importante e decisivo, pois deve ser o menor possível. [2]

Um dos aspectos mais significativos do projeto de um navio, é o método de propulsão utilizada. A propulsão elétrica vem sendo utilizada como uma propulsão padrão por diversas Marinhas desenvolvidas do mundo, como a dos Estados Unidos e da Inglaterra. [2]

Adicionalmente, a propulsão elétrica emergiu como uma solução inovadora e altamente eficaz no setor marítimo. As regulamentações internacionais, como o acordo MARPOL (Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios), estabelecido pela IMO (Organização Marítima Internacional), têm como objetivo mitigar a poluição marinha e atmosférica, bem como reduzir os impactos ambientais negativos causados pelas emissões de gases poluentes.

A Indústria naval, neste contexto, introduz a propulsão elétrica nos navios como um potencial considerável não só para minimizar as emissões de poluentes atmosféricos, como óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que têm implicações diretas nas questões climáticas globais e na qualidade do ar nas áreas portuárias e costeiras, mas também em diversas vantagens em detrimento da propulsão diesel convencional, que veremos adiante neste trabalho. [10]

Após a etapa de desenvolvimento, a propulsão elétrica estará pronta para ser implementada nos navios militares do século XXI. Sua adoção resultará na eliminação ou significativa redução do uso de engrenagens redutoras, proporcionando maior flexibilidade na disposição dos equipamentos a bordo. Isso permitirá que o motor principal funcione com frequência em sua faixa de desempenho ideal, levando a uma redução do consumo de combustível, menor necessidade de manutenção e emissões de poluentes reduzidas, se não eliminadas por completo. [2]

1.1 Apresentação do Problema

O Tema proposto neste trabalho, é uma particularidade da propulsão elétrica, que pode ser configurada de diversas formas. A escolha da propulsão elétrica em corrente contínua e média tensão possui diversas peculiaridades, vantagens e desvantagens que serão elucidadas ao longo deste trabalho, mostrando também sua relevância no cenário naval atual.

1.2 Justificativa e Relevância

Atualmente, a tecnologia de Corrente Contínua de Média Tensão (MVDC) representa uma nova possibilidade de renovação do sistema de energia a bordo de grandes Navios Elétricos (navios de cruzeiro ou embarcações militares). Essa inovação apresenta inúmeras vantagens, incluindo a simplificação da integração do sistema, modularidade e eficiência aprimorada, além da perspectiva de redução do espaço dedicado aos sistemas técnicos, um fator de extrema importância, sobretudo em navios de guerra. [28]

Recentemente, o conceito de *All-electric-ships* (AES) ganhou popularidade não apenas em aplicações de grandes navios de cruzeiro, mas também em embarcações militares. Na verdade, as principais marinhas de todo o mundo têm proposto projetos de pesquisa e designs inovadores baseados na arquitetura AES. Alguns exemplos notáveis dessas aplicações militares incluem o Tipo 45 do Reino Unido (Figura 01), o FREMM italo-francês e o DDG 1000 (Figura 02) dos Estados Unidos. Essas embarcações modernas estão equipadas com propulsão elétrica e sistemas de Corrente Alternada de Média Tensão (MVAC) integrados para proporcionar as mesmas vantagens desejáveis típicas dos grandes navios de cruzeiro totalmente elétricos. Isso inclui notáveis benefícios, como dinâmica considerável dos motores elétricos, menor vibração dos motores e posicionamento racional dos geradores a diesel. [28]



Figura 01 – Contratorpedeiro “Type 45” da classe “Daring” [2]



Figura 02 – DDG 1000. [3]

Dado que, em um AES, a maioria das cargas é conectada ao barramento principal por meio de conversores de potência, um novo conceito de distribuição foi concebido para aprimorar ainda mais a densidade de potência e a eficiência do sistema: a topologia de distribuição de Corrente Contínua de Média Tensão (MVDC). [28]

Graças às vantagens mencionadas anteriormente, essa inovadora distribuição MVDC não apenas desempenha um papel crucial em aplicações militares, mas também representa uma oportunidade empolgante para embarcações mercantes. [28]

1.3. Objetivos

O Objetivo principal deste trabalho, é a elucidação da tecnologia MVDC aplicada à navios, bem como suas vantagens, desvantagens e configuração, e elencar as principais dificuldades na instalação e desenvolvimento deste tipo de tecnologia a bordo dos navios da Marinha do Brasil.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se dividida em capítulos que foram organizados de forma a facilitar o entendimento do tema proposto. A seguir é apresentado de forma sucinta, o conteúdo e tema de cada capítulo:

Capítulo 1 – Introdução, que contém o escopo, motivação e justificativa da realização deste trabalho.

Capítulo 2 – Metodologia utilizada neste trabalho.

Capítulo 3 – Propulsão Elétrica, que contém um breve histórico e evolução da propulsão, os navios da Marinha do Brasil e do mundo que possuem esse tipo de tecnologia, uma breve comparação com a propulsão diesel, vantagens e desvantagens do sistema propulsivo proposto.

Capítulo 4 – Propulsão Elétrica por corrente contínua, explicando essa particularidade na propulsão elétrica, evidenciando também o funcionamento e partes de uma Máquina CC, assim como suas vantagens e desvantagens.

Capítulo 5 – Eletrônica de Potência, apresentando um breve histórico, evolução, e alguns de seus componentes básicos, que serão utilizados para explicar o tema principal desse trabalho.

Capítulo 6 – *Medium Voltage Direct Current* (MVDC). Média tensão com corrente contínua, uma tecnologia bastante recente e avançada no que tange o sistema propulsivo de navios. É

descrito suas características, particularidades e apresentado a norma internacional IEEE que descreve o assunto a bordo de navios.

Capítulo 7 – Conclusões.

2. METODOLOGIA

Na confecção deste trabalho, foi adotado o método de revisão bibliográfica como principal abordagem de pesquisa. Este método consiste em um processo de análise e síntese de um gama de fontes literárias, tais como artigos, livros e documentos técnicos.

Quanto aos fins, este trabalho tenta elucidar as vantagens e as dificuldades do Sistema propulsivo proposto nos navios da Marinha do Brasil, para que nossa Marinha se iguale em termos de tecnologia naval as demais marinhas desenvolvidas do mundo.

3. PROPULSÃO ELÉTRICA

3.1. Um breve histórico sobre a propulsão elétrica

No final da década de 1830, o então alemão Moritz Hermann von Jacobi inventou um motor elétrico de corrente contínua (CC) e realizou alguns experimentos, dentre eles pequenos barcos capazes de transportar cerca de 12 passageiros usando a propulsão elétrica utilizando esse motor elétrico. Em seu último experimento, o motor (com cerca de 1kW de potência) era alimentado por uma bateria, resultando em uma velocidade de cerca de 4 km/h. [1]

Em 1878, Thomas Edison (1847-1931) desenvolveu uma lâmpada incandescente elétrica para o mercado consumidor. Após sua demonstração bem-sucedida em sua propriedade localizada em Nova Jersey em 1879, ele esbarrou com o ceticismo de líderes empresariais e potenciais investidores convidados. Porém, entre os presentes estava o então presidente da *Oregon Railway and Navigation Company*, Henry Villard, que, após a demonstração, percebeu os benefícios do avanço tecnológico demonstrado por Thomas Edison. [1]

Embora Thomas Edison tivesse criado o projeto da lâmpada incandescente sem imaginar sua aplicação no setor naval, Henry Villard encomendou a instalação do sistema de iluminação para o seu novo Navio a vapor de sua empresa, o SS Columbia, que estava em construção por um estaleiro em Chester, Pensilvânia. O SS Columbia foi equipado com 120 lâmpadas incandescentes, alimentadas por quatro dínamos de 6kW cada, acionados por correias. Esses dínamos eram conectados à máquina de vapor que movia o único hélice de quatro pás através de um eixo mecânico. [1]

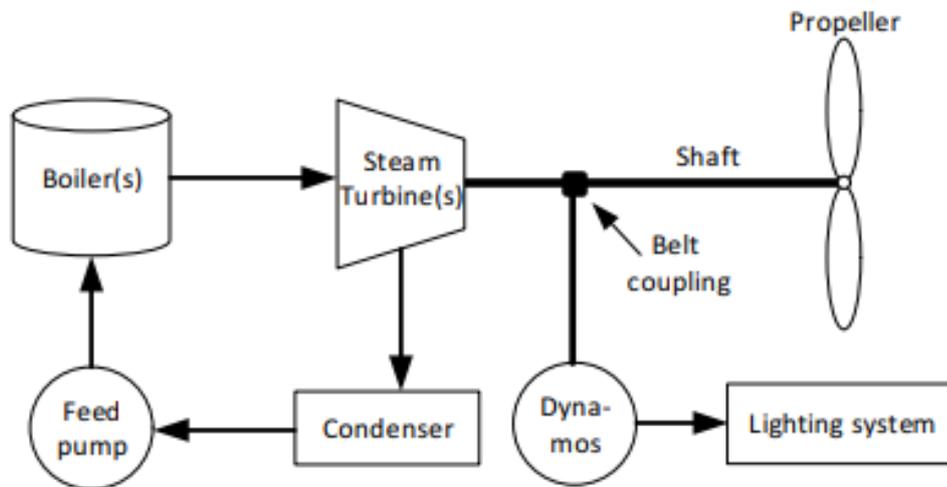


Figura 03 - Esboço simplificado do sistema de propulsão e iluminação a bordo do SS Columbia. [1]

A instalação do sistema de iluminação a bordo do SS Columbia provou ser um sucesso e, em 1883, a *Edison Company for Isolated Lightning* instalou seu sistema de iluminação em mais um navio, o USS Trenton. No ano seguinte, o *Bureau of Navigation* decidiu que os navios Atlanta, Boston e Omaha deveriam também ser equipados com um sistema de iluminação elétrica. Logo após, a iluminação elétrica se tornou um recurso padrão em navios militares e comerciais. Esse período em si, pode ser considerado o marco do nascimento da rede de energia de embarcações marítimas. [1]

Nos primeiros anos de 1900, tecnologias como engrenagens redutoras marítimas e sistemas de propulsão elétrica foram desenvolvidas para melhorar o desempenho do hélice, tendo em vista que os navios da época possuíam os hélices acoplados diretamente nos motores de alta velocidade à vapor, o que causava um rendimento ruim desse equipamento. [1]

Em 1903, sabe-se da primeira aplicação da propulsão diesel-elétrica no setor naval, com o navio russo Vandal, da empresa *Nobel Petroleum Company*. Embora esse navio tenha sido o primeiro com essa propulsão funcional, o uso de sistemas diesel-elétrico só se tornou popular no mundo com a entrada dos submarinos na Primeira Guerra Mundial. [1]

Já nos Estados Unidos, em 1912, foi construído o USS Júpiter, seu primeiro navio com propulsão elétrica. O Navio possuía tanto propulsão por motor diesel, quanto turboelétrica [2], além de propulsão por turbina a vapor diretamente acoplada nos hélices. [2]

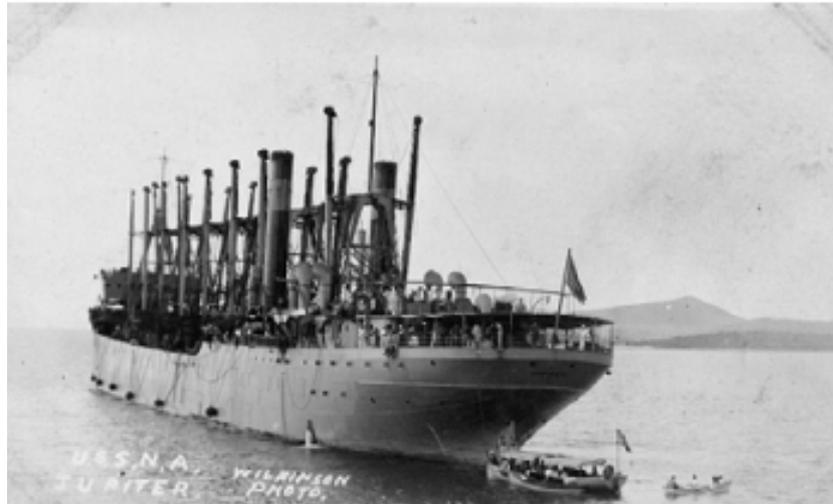


Figura 04 – USS “Júpiter”. [2]

O Projeto do USS Júpiter foi um sucesso e, os Estados Unidos decidiram equipar todos os encouraçados com o mesmo sistema de propulsão. Em 1914, três encouraçados da classe New Mexico foram encomendados e, durante sua construção, foi decidido que o navio que daria nome a classe, fosse o navio que seria equipado com um sistema de propulsão turbo-elétrico e ser o primeiro navio com esse tipo de propulsão. [1]

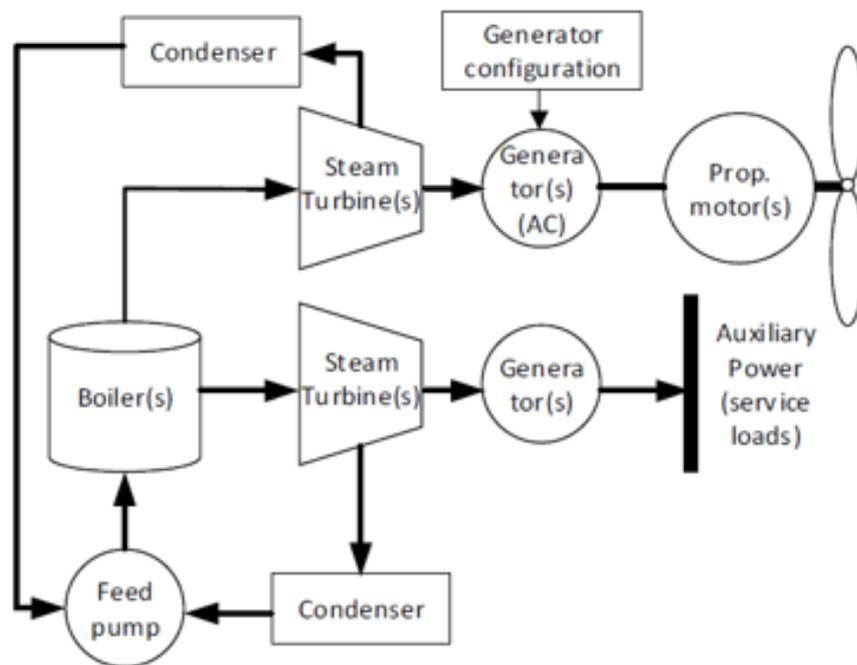


Figura 05 – Desenho simplificado do sistema de geração e distribuição turboelétrica instalada no USS New México. [1]

Já em um período entre a Primeira Guerra Mundial e a Segunda Guerra Mundial, o setor naval passou por uma falta de capacidade de fabricação de engrenagens redutoras, fator este que alavancou a utilização da Propulsão elétrica em navios de guerra. [1]-[2]. Por conta disso, durante a Segunda Guerra mundial, mais de 600 navios foram construídos para a Marinha Americana, entre eles navios de pequeno porte e escoltas, utilizando tanto a propulsão com turbo-gerador ou diesel gerador. [1]

No entanto, em meados do século XX, surgiram no mercado motores a diesel mais econômicos e eficientes, comparados aos motores elétricos. Eles acabaram ganhando terreno porque, naquela época, os motores elétricos tinham algumas desvantagens, como serem mais pesados, volumosos e menos eficientes. Então, esses motores a diesel ficaram populares e foram muito usados nas décadas seguintes. [2]

Essa situação dos motores a diesel durou até cerca de meados do século XXI, quando a sua capacidade de transmitir energia de forma mecânica atingiu o auge em termos de tecnologia e viabilidade econômica. Além disso, com o surgimento dos semicondutores, a propulsão elétrica voltou a ser considerada para aplicação nos projetos de navios civis e militares. [2]-[3]

3.2. Cenário atual

3.2.1. Visão geral da propulsão elétrica de navios

Através do advento dos materiais semicondutores e do avanço da Eletrônica de Potência, assunto que será abordado mais adiante neste trabalho, a propulsão elétrica voltou a ser uma opção mais vantajosa, por conta da facilidade em controlar a velocidade dos motores elétricos através dos semicondutores de potência, fazendo também com que o navio opere em valores de eficiência próximos da nominal. [3]

Neste contexto, para superar as limitações de projeto da propulsão diesel-elétrico, foi desenvolvido o sistema de propulsão elétrica integrada (*Integrated Electric Propulsion – IEP*). Nesse sistema, as principais fontes geradoras de energia da embarcação são responsáveis tanto pela alimentação dos motores elétricos da propulsão quanto pelo suprimento de energia para as demais cargas auxiliares do navio. [3]

O Sistema opera de forma integrada e, conforme a Figura 06 abaixo, essa configuração proporciona uma maior flexibilidade na geração de energia, aumento da confiabilidade do sistema e otimização do arranjo dos equipamentos dentro da Praça de Máquinas do navio. [3]

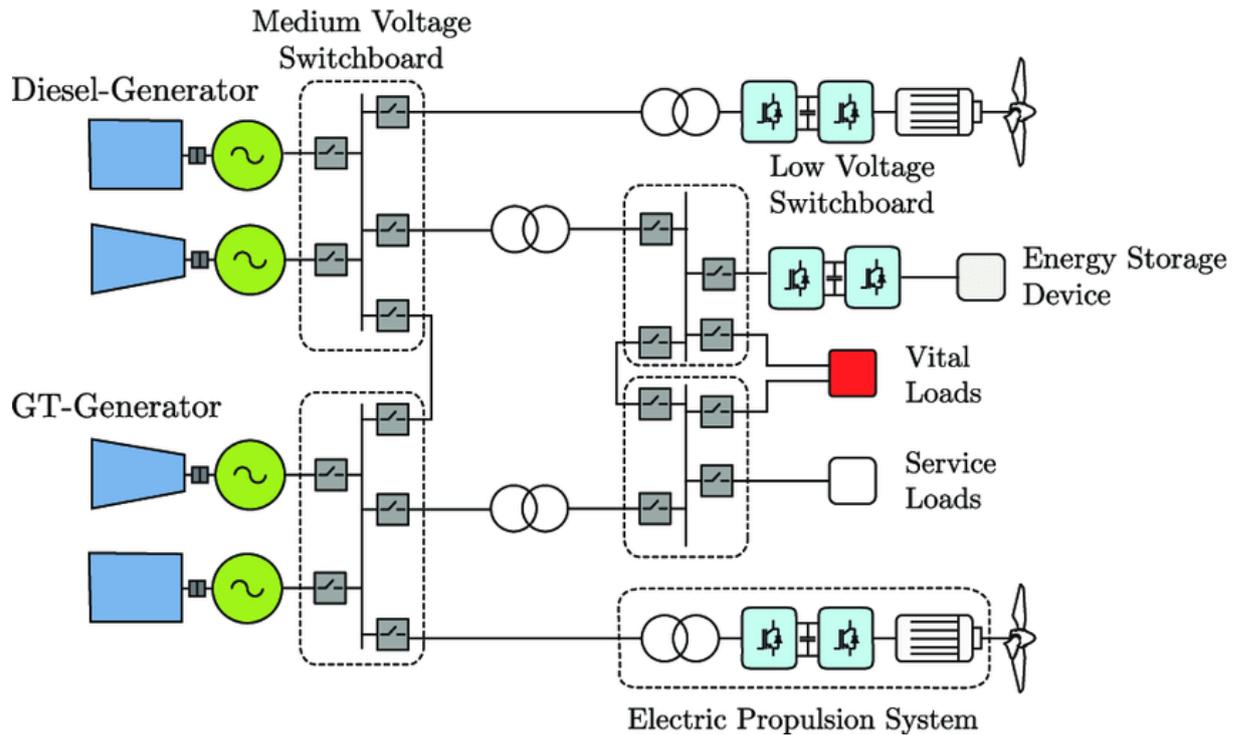


Figura 06 – Sistema de Propulsão Elétrica Integrada [4].

Nessa disposição, os grupos geradores fornecem energia para um único barramento ou painel de distribuição em média tensão (*Medium Voltage Switchboard*). A energia elétrica necessária para o sistema de propulsão é então direcionada diretamente a partir desse barramento por meio de conversores de energia, que utilizam uma tecnologia ativa para condicionar a qualidade da energia e possibilitar a recuperação de energia durante a frenagem dinâmica de velocidade e manobras. [4]

Essa energia recuperada pode ser armazenada em baterias, supercapacitores ou dispositivos similares, a fim de ficar disponível durante transições de velocidade e respostas rápidas às mudanças de empuxo no navio. Por outro lado, os sistemas auxiliares do navio são alimentados a partir do barramento principal, utilizando transformadores de potência para reduzir a voltagem. [4]

A demanda total de energia e a potência disponível são gerenciadas por meio de uma estratégia de otimização de eficiência energética, que determina o número e a capacidade dos grupos geradores a serem operados no ponto de operação mais eficiente dentro de sua classificação máxima contínua, contribuindo, assim, para o aumento da eficiência no uso de combustível e a redução de emissões, vantagens essas que serão discernidas mais adiante neste trabalho.

3.2.2. A Propulsão elétrica na Marinha do Brasil

Desde 1973, a Marinha Brasileira tem gradualmente incluído em sua frota Navios de Socorro Submarino movidos por propulsão elétrica, chegando ao ponto mais recente em 2019 com a aquisição do NSS Guillobel. (Figura 05). Estas embarcações, também conhecidas como *Dive Support Vessel (DSV)*, desempenham um papel vital no suporte a operações de mergulho profundo, plataformas e submarinos, utilizando um Sistema de Posicionamento Dinâmico (DPS) especialmente concebido para essa finalidade. A fim de garantir a eficiência dessas operações, a escolha de um sistema de propulsão que oferecesse robustez, segurança e precisão foi de importância crucial. Portanto, a opção recaiu sobre a propulsão elétrica, que atualmente é implementada através de propulsores azimutais. [5]



Figura 07 – Navio de Socorro Submarino NSS Guillobel. Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/NSS_Guillobel_%28K-120%29, acessado em 15/09/2023

Além dos Navios de Socorro Submarino, a Marinha do Brasil pretende adquirir o Navio de Apoio Antártico (NAPAnt) “Almirante Saldanha”. O navio substituirá o Navio de Apoio

Oceanográfico “Ary Rongel”. Possui também uma propulsão diesel-elétrica, o navio terá uma tripulação de 95 pessoas, incluindo 26 pesquisadores. [6]

A abrangência total dos serviços fornecidos pela Wärtsilä para o NApAnt compreende três conjuntos de geradores a diesel Wärtsilä 32, um sistema de conversão de energia diesel-elétrica e dois sistemas de propulsão auxiliar (bow thruster), juntamente com o sistema de gerenciamento de energia. Essa solução, que é tanto energeticamente eficiente quanto de baixa emissão, assegura um desempenho ótimo, além de oferecer alta redundância e disponibilidade devido aos espaçados intervalos de manutenção e ao consumo de combustível reduzido. [7]

3.2.3. A Propulsão elétrica nas demais marinhas.

Grandes Marinhas ao redor do mundo como a Americana, Francesa e Britânica, conduziram grandes projetos no que tange a propulsão elétrica. Porém, diversas outras Marinhas também optaram por este tipo de propulsão, a fim de modernizar e atualizar sua frota. A Tabela 01 abaixo, apresenta as principais aplicações da propulsão elétrica integrada em navios de guerra ao redor do mundo. [3]

País	Classe	Tipo de embarcação	Propulsão			
			Eixos	Motores (total)	Tipo Motor / Propulsor	Fabricante
Reino Unido	Queen Elizabeth	Aeródromo	2	4 x 20MW	Indução Avançado / Embarcado	Converteam
Reino Unido	Daring (Type 45)	Fragata	2	2 x 20MW	Indução Avançado / Embarcado	Converteam
Reino Unido	Albion	Assalto Anfíbio	2	2 x 6MW	Síncrono / Embarcado	Alstom
Reino Unido	Wave	Tanque	1	2 x 7MW	-	Alstom
Reino Unido	Bay	Assalto Anfíbio	2	2 x 4,4MW	Indução / Embarcado	Siemens
Reino Unido	Echo	Hidrográfico Multi-propósito	2	2 x 1,75MW	Ímã Permanente / Embarcado	ABB

País	Classe	Tipo de embarcação	Propulsão			
			Eixos	Motores (total)	Tipo Motor / Propulsor	Fabricante
EUA	Zumwalt	Fragata	2	2 x 34,6MW	Indução Avançado / Embarcado	Converteam
EUA	Lewis and Clark	Carga	1	2 x 11,3MW	Síncrono em tandem / Embarcado	Alstom
EUA (Coast Guard)	Healy	Quebra-gelo	2	2 x 11,2MW	Síncrono Duplo Enrolamento / Embarcado	Alstom
França	Mistral	Assalto Anfíbio	2	2 x 7MW	Azimuth thruster	Rolls-Royce Mermaid
Holanda	Rotterdam	Assalto Anfíbio	2	4 x 3MW	2 por eixo, em tandem / Embarcado	Heloc
Espanha	Juan Carlos I	Assalto Anfíbio	2	2 x 11MW	Azimuth thruster	Siemens
Austrália	Canberra	Porta helicópteros	2	2 x 11MW	Azimuth thruster	Siemens
Japão	Shirase	Quebra-gelo	2	4 x 5,5MW	Indução / Embarcado	Hitachi
Alemanha	Planet	Pesquisa (SWATH)	2	4 x 1,04MW	Ímã Permanente / Embarcado	MM Magnet-Motor
Alemanha (German Customs Adm)	Helgoland	Patrulha (SWATH)	2	2 x 3,8MW	Síncrono / Embarcado	Siemens

Tabela 01 – Comparação entre os navios de guerra que possuem IEP. [3]

3.3. Comparação entre a propulsão elétrica e a propulsão a diesel

3.3.1. Sistema diesel mecânico

O Sistema diesel mecânico é o sistema composto por motores à combustão diesel, que são interligados com o hélice através do eixo propulsor, que por sua vez conecta-se em caixas de engrenagens redutoras, que reduzem a rotação do motor para o eixo a fim de otimizar a eficiência do hélice. [8]

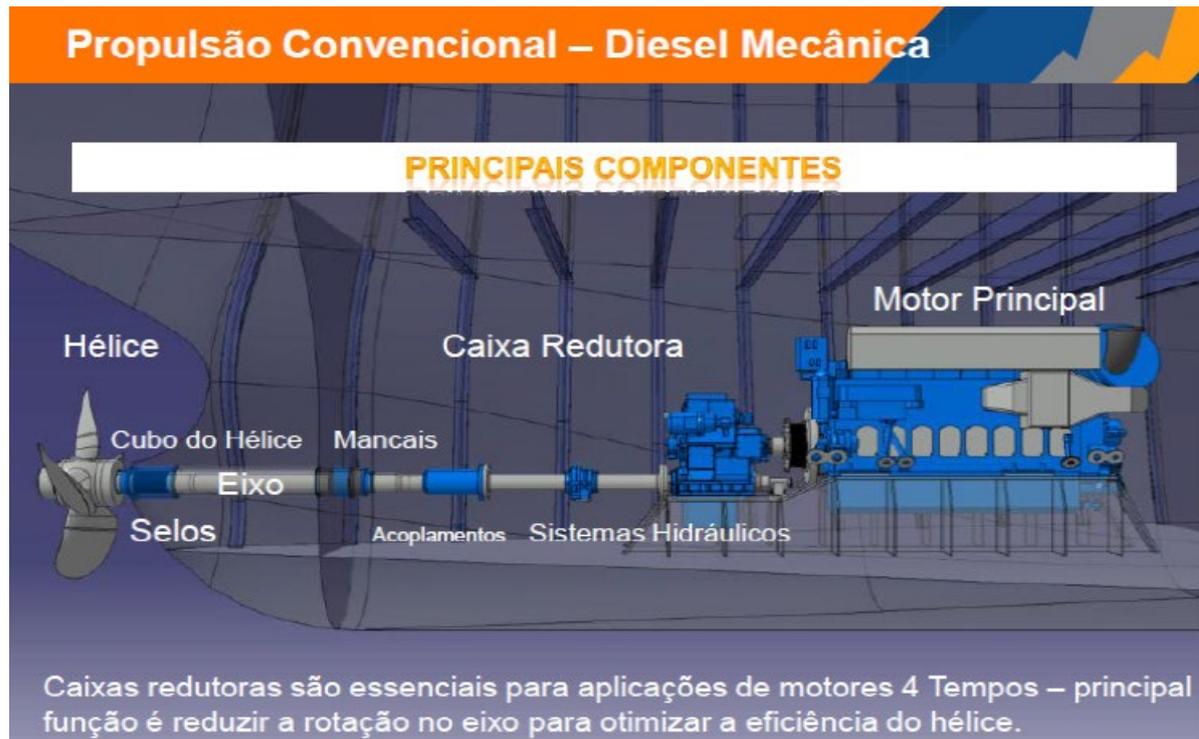


Figura 08 – Propulsão convencional Diesel mecânica. [8]

3.3.2. Sistema Diesel Elétrico

A utilização de motores elétricos para propulsionar embarcações, está em constante evolução e, nos últimos anos, tem experimentado avanços significativos em suas aplicações. O aumento crescente na demanda por energia elétrica a bordo tem impulsionado a busca incessante por soluções ideais que atendam às necessidades específicas das embarcações. Isso se torna particularmente relevante quando se trata da geração de energia, ou seja, que aloja as grandes máquinas volumosas de geração de energia. A limitação de espaço e peso sempre representa um desafio nos projetos navais. [8]

3.4. As principais vantagens da Propulsão Elétrica

A Propulsão elétrica apresenta algumas vantagens quando utilizada em detrimento da propulsão diesel convencional. Destacamos a seguir os principais benefícios de sua utilização.

3.4.1. Redução do consumo de combustível

Em navios com propulsão mecânica, a rotação do hélice é definida pela velocidade do motor à

combustão, pois estão interligados através do eixo propulsor. Dependendo então do modo de operação do navio, o motor pode operar com distintos valores de velocidade, e com isso, pode operar ou não na faixa de rendimento ótimo, associado às altas rotações. Isto significa então desperdício de combustível e desgaste mecânico nas demais faixas de não rendimento ótimo. [2]-[9]-[10]

Através do uso da propulsão elétrica, o então problema de não operar na faixa de rendimento ótimo é eliminado, pois o motor elétrico associado à propulsão pode operar no ponto de melhor rendimento, já que ele não está diretamente interligado ao hélice por meio do eixo propulsor. Além disso, operando sempre em altas rotações, a energia elétrica gerada por ele, pode ser usada em parte na propulsão, através dos MEPs, e em outros usos no navio conforme a demanda. [2]-[9]-[10]

O Gráfico 01 abaixo nos mostra as informações de um motor diesel, evidenciando sua potência, consumo específico e o torque. Podemos observar também que existe uma faixa (1000 a 1500 RPM) de ótimo rendimento do motor, grifada em azul no gráfico. Trabalhando então nessa faixa, observamos um melhor aproveitamento do combustível gasto. [2]-[9]-[10]

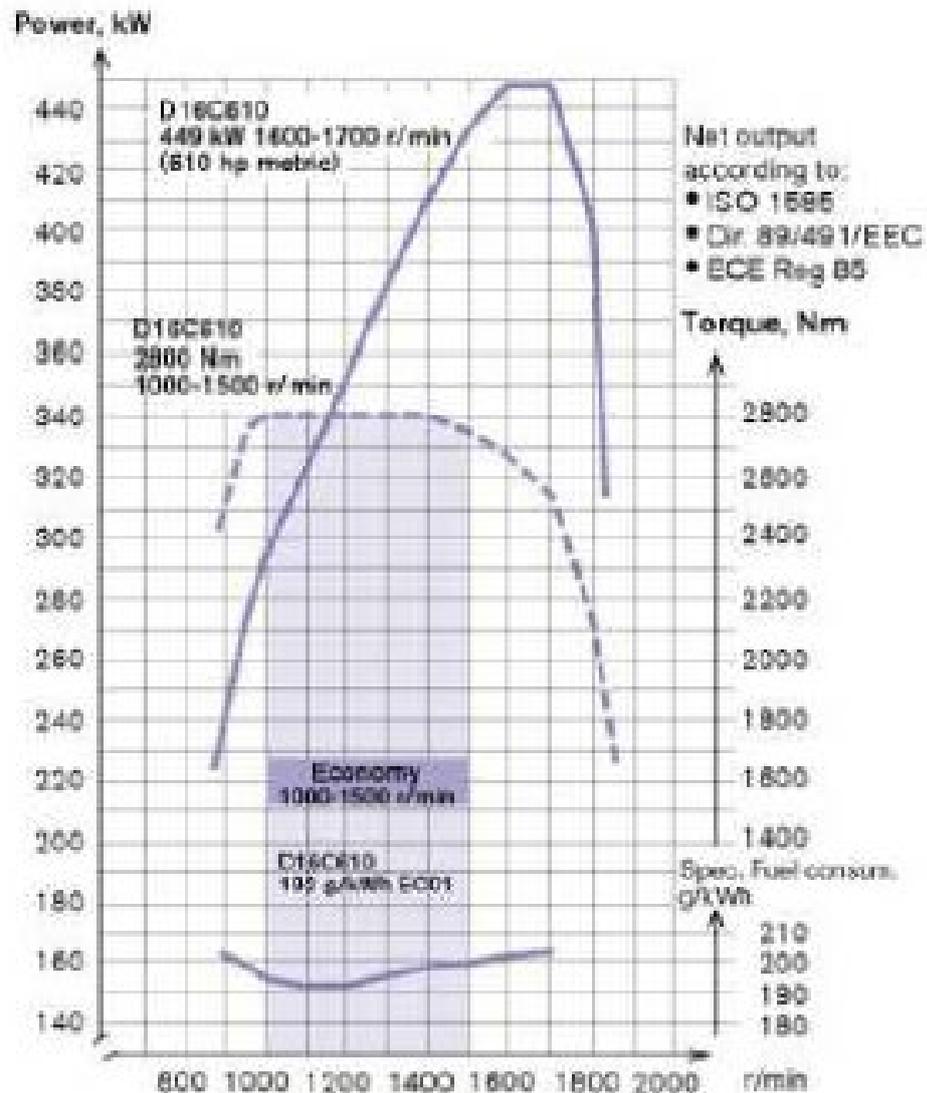


Gráfico 01 – Gráfico de potência, consumo específico e torque de um motor diesel. [8]

A Marinha Americana estimou a eficiência energética em aproximadamente 17% melhor que em relação à propulsão convencional mecânica. [2]

Além disso, de acordo com a pesquisa apresentada em [PEREIRA, N., BRINATI, H., L., 2006 apud ALVES, Renata, 2006, p. 24], para um mesmo navio Gaseiro, durante um ano de operação, que comparou três tipos de instalações propulsoras diferentes, foi constatado que a Propulsão elétrica foi a que apresentou os melhores resultados e as maiores vantagens em relação ao consumo de combustível.

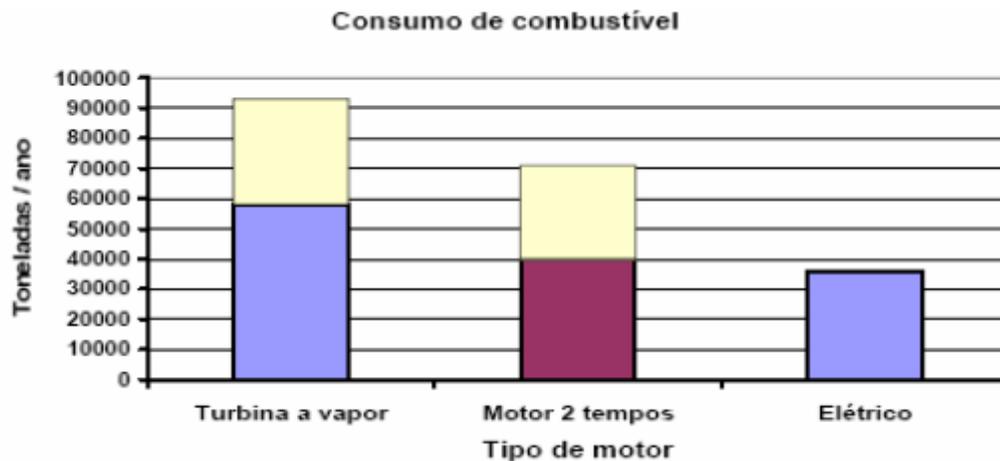


Gráfico 02 – Consumo de combustível. [2]

3.4.2. Redução da emissão de poluentes.

Atualmente, há uma pressão global por parte das autoridades ambientais para reduzir as emissões poluentes em embarcações, tanto as futuras quanto as já em operação. Isso abrange todos os tipos de poluentes (gases, líquidos e sólidos).

Para enfrentar essa pressão internacional, a busca por reduzir o uso de combustíveis fósseis é crescente. As emissões provenientes da queima de óleo diesel e gasolina contribuem significativamente para o efeito estufa. Nesse contexto, a propulsão elétrica é amplamente recomendada para embarcações, a fim de reduzir essas emissões.

Conforme evidenciado em [11], o gráfico 03 apresenta que a propulsão elétrica emite menos poluentes do que os sistemas convencionais (que usam turbinas a vapor ou motores diesel). Isso ocorre devido ao funcionamento otimizado do motor diesel da propulsão, resultando em menor consumo de combustível e, conseqüentemente, menor emissão de gases poluentes, como CO₂, Nox e SO_x, durante as operações.

No futuro, a tendência é não apenas controlar as emissões durante a vida operacional do navio, mas também todos os poluentes gerados desde a sua construção até o término de seu período operacional (incluindo a desativação do meio naval). Esta é uma nova filosofia que, embora apresente desafios práticos, está ganhando força atualmente, devido a políticas globais voltadas para questões ambientais.

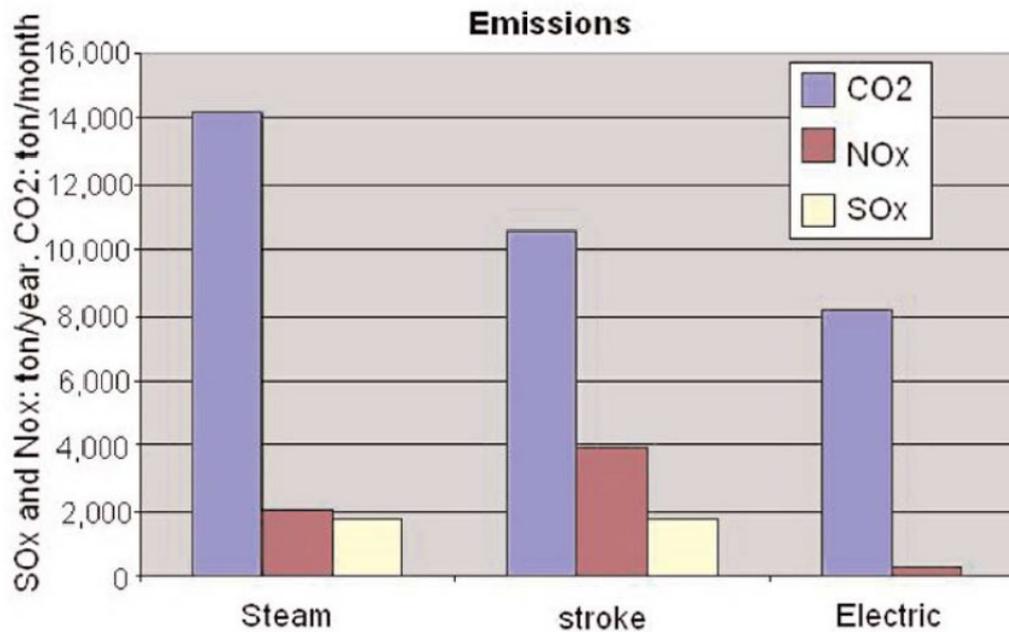


Gráfico 03 – Gráfico da emissão de poluentes x Tipo de propulsão [10]

3.4.3. Redução da tripulação

A Tendência é que navios adotem cada vez mais sistemas elétricos, substituindo os sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos existentes. Os sistemas elétricos são mais propícios ao controle à distância e se compatibilizam melhor com sistemas de controle eletrônico. Essa tendência viabilizará uma maior automatização, levando a uma redução na demanda por tripulantes e, como resultado, uma diminuição nos custos operacionais.

3.4.4. Flexibilidade do projeto

O arranjo do navio ganha em flexibilidade, pois os equipamentos da propulsão elétrica são modulares e, conseqüentemente, não precisam estar posicionados próximos uns aos outros, podendo ainda estar em compartimentos diferentes.

Dependendo do tamanho dos equipamentos, podemos deixar as máquinas e os controles da propulsão nas partes mais altas do casco do navio, deixando assim apenas o motor elétrico junto ao fundo do casco, conectado ao propulsor. [2]

Como resultado desta flexibilização do projeto, podemos distribuir os diversos equipamentos por compartimentos distintos, e não concentrar toda a propulsão na Praça de Máquinas. Isso é vantajoso pois, além do aproveitamento do espaço adquirido, os equipamentos passam a se concentrar em compartimentos menos críticos. [2]

3.4.5. Redução dos custos de manutenção

A ideia de usar uma tecnologia em comum em diferentes tipos de meios navais, como navios de superfície e submarinos, tem o potencial de simplificar o desenvolvimento e a aplicação de modelos, ferramentas de projeto, métodos de fabricação, novos materiais, componentes e sistemas compartilhados. [2]-[10]

Isso, por sua vez, pode levar a reduções significativas no risco do projeto e otimização dos custos e da logística. Além disso, ao adotar a propulsão elétrica, a necessidade de motores auxiliares é eliminada, o que resulta em custos de manutenção reduzidos. Os Equipamentos elétricos também tendem a ter custos mais baixos e períodos mais curtos de manutenção. [2]-[9]

Graças também à automação que o sistema elétrico exige, as manutenções preditivas e preventivas se tornam ferramentas eficazes para a redução dos custos totais de manutenção. [2]

3.4.6. Redução da Assinatura acústica

Na propulsão elétrica não existe a necessidade de alinhamento da linha de eixo e das máquinas de propulsão principais, tornando assim desnecessária a utilização de engrenagens redutoras. [3]

A engrenagem redutora é uma grande caixa de engrenagens que reduzem a rotação do motor para o eixo, que transmite essa rotação reduzida ao hélice. Por sua robustez, a eliminação das engrenagens reduz significativamente a redução dos níveis de vibração e ruído. [2]

Além desta diminuição com a ausência das engrenagens, o próprio motor elétrico apresenta menor nível de ruído emitido, devido as suas características construtivas e, portanto, não produzem tanta vibração quanto os equipamentos mecânicos. [2]

3.4.7. Aumento da capacidade de sobrevivência do navio

A Propulsão elétrica nos proporciona uma flexibilidade em comparação ao sistema mecânico diesel, tendo em vista que seus equipamentos podem ser rearranjados em locais distintos, além da redundância que o sistema possui. [2]

Isto nos garante uma capacidade de sobrevivência maior pois, diferente dos sistemas de propulsão tradicionais, os equipamentos de propulsão, geração e transmissão, ficam localizados no mesmo compartimento. Ou seja, qualquer dano ao compartimento de máquinas, seja por incêndio, alagamento ou mau funcionamento, pode comprometer o navio como um todo. [2]-[9]

A facilidade para o redirecionamento da energia elétrica a bordo, possibilita uma elevada gama de possibilidades de ações para minimizar os efeitos decorrentes de falhas no sistema. [2]

3.4.8. Aumento da vida útil do navio

À medida que as embarcações de apoio modernas continuam a evoluírem, elas estão cada vez mais incorporando sensores e equipamentos auxiliares de alta complexidade tecnológica. Isso as torna consideravelmente mais versáteis em comparação com as embarcações de gerações anteriores. No entanto, os investimentos necessários para adquirir essas embarcações têm aumentado em uma proporção ainda maior, tornando desafiador justificar esse gasto quando se considera o tempo de vida útil das embarcações tradicionais. [4, p.22-28]-[10]

Com o avanço da automação dos sistemas nas décadas de 80 e 90, houve uma crescente incorporação de equipamentos elétricos e eletrônicos nas embarcações, resultando em um aumento na demanda por energia elétrica. Isso levou à necessidade de instalar geradores a bordo com maior capacidade para atender à demanda existente e manter uma reserva para acomodar futuros crescimentos. [10]

No entanto, a adoção da propulsão elétrica representa uma mudança significativa nesse cenário. Os geradores a bordo alimentam simultaneamente o sistema de propulsão e os sistemas auxiliares, por meio de um sistema de distribuição redundante e reconfigurável. Os motores são dimensionados para atender à embarcação em carga máxima, com todos os sistemas vitais em funcionamento. Isso significa que, em condições de velocidade normais, a embarcação possui uma capacidade de geração em excesso, capaz de atender a todas as demandas dos usuários com folga. Isso, por sua vez, permite a incorporação fácil de substituições ou adições futuras de novos equipamentos ou sistemas.

Embarcações de apoio marítimo projetadas com propulsão elétrica podem ter uma vida útil significativamente mais longa, da ordem de 50 anos, em comparação com os 25 a 40 anos das embarcações com propulsão tradicional. [10]

3.5. DESVANTAGENS DA PROPULSÃO ELÉTRICA

Apesar de apresentar diversas vantagens associadas à sua utilização, existem desvantagens a serem analisadas quando a opção por esse sistema de propulsão é adotada, destacando as seguintes:

3.5.1. Eficiência

A eficiência da transferência de energia entre o mecanismo de acionamento principal e o eixo é diminuída. Sempre que há uma conversão na forma da energia, é comum ocorrer perda. No contexto de um sistema de acionamento direto, as perdas introduzidas pela transmissão mecânica são menores do que as que acontecem em um sistema de propulsão elétrica, no qual a energia é convertida da forma mecânica para a forma elétrica, manipulada e, posteriormente, revertida para a forma mecânica. As etapas adicionais de conversão de energia costumam resultar em uma eficiência de aproximadamente 91%, enquanto as transmissões diretas alcançam eficiências da ordem de 97% [4].

3.5.2. Peso

O Aumento do peso dos equipamentos elétricos em um navio é uma questão relevante que tem impactos significativos no projeto e operação de embarcações modernas. Essa tendência de

aumento de peso está relacionada principalmente ao crescente uso de sistemas elétricos e eletrônicos mais avançados e sofisticados a bordo de navios, que necessitam da inserção de drives e cabos associados a propulsão. [3]

3.5.3. Qualidade de energia

Existem diversas definições para qualidade de energia a bordo. No entanto, apesar das diversas divergências entre autores sobre o assunto, pode-se expressar a qualidade de energia se relaciona com a manutenção do formato da onda senoidal de tensão e corrente encontradas em uma rede de distribuição, que precisam estar dentro de limites pré-determinados de magnitude e frequência, visando a atender os requisitos específicos de operação e segurança. [13]

Em decorrência do aumento no número de equipamentos e dispositivos chaveados a bordo, fez com que aumentassem de forma significativa os problemas de qualidade de energia nas redes elétricas a bordo. A sensibilidade desses equipamentos mais modernos faz com que pequenas perturbações na rede elétrica, se tornem grandes problemas para os equipamentos, principalmente ao mau funcionamento. [3]

4. PROPULSÃO ELÉTRICA POR CORRENTE CONTÍNUA

A propulsão elétrica em corrente contínua (CC) e as máquinas de corrente contínua são elementos fundamentais em diversas aplicações modernas que exigem eficiência e controle preciso de movimento. A corrente contínua é uma forma de eletricidade na qual a carga flui de maneira constante em uma única direção, e esse tipo de energia tem desempenhado um papel essencial na evolução da tecnologia elétrica. [15]

As máquinas de corrente contínua são equipamentos eletromecânicos que convertem a energia elétrica em movimento mecânico. Elas consistem em um rotor e um estator, sendo o primeiro normalmente composto por um enrolamento de fio condutor, chamado de armadura, girando em um campo magnético criado pelo estator. O princípio de funcionamento é baseado na Lei de Faraday da indução eletromagnética, que descreve como um campo magnético em movimento relativo a um condutor gera uma força eletromotriz (f.e.m.) e, conseqüentemente, uma corrente elétrica. [15]

A aplicação mais comum das máquinas de corrente contínua é na propulsão elétrica, seja em locomotivas, metrô, veículos elétricos ou embarcações. A vantagem dessas máquinas reside na sua capacidade de fornecer torque de forma precisa e controlável, tornando-as ideais para aplicações que exigem aceleração suave, alta eficiência e controle de velocidade preciso. [15]

Neste contexto, a propulsão elétrica em corrente contínua e as máquinas de corrente contínua desempenham um papel crucial na modernização e eletrificação de sistemas de transporte e na transição para fontes de energia mais sustentáveis, contribuindo para um futuro mais limpo e eficiente em termos energéticos.

4.1. Máquinas CC

4.1.1. Partes do Motor CC

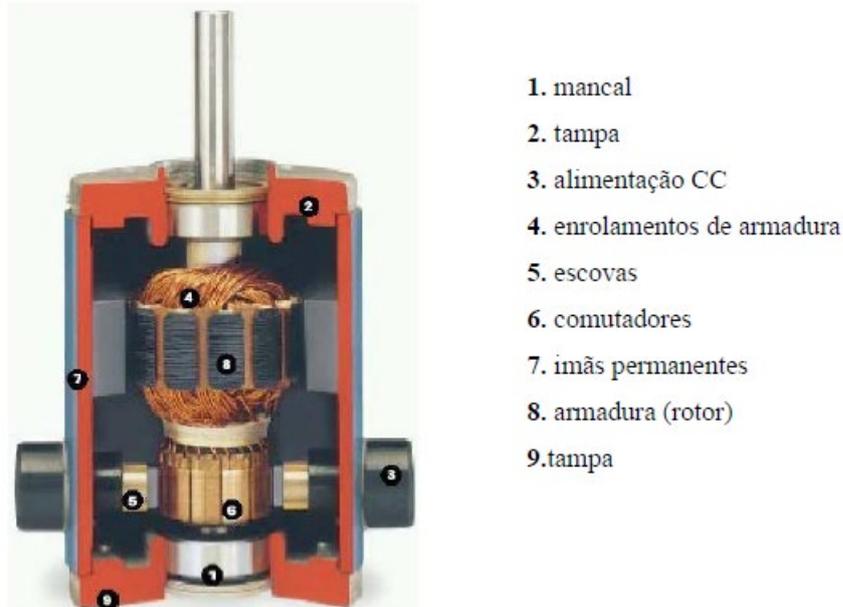


Figura 09 – Partes do Motor de Corrente Contínua [9]

O rotor, que também é chamado de armadura, é a parte que gira e é montada no eixo da máquina. Ele é feito de material ferromagnético e é cercado por espiras conhecidas como enrolamentos de armadura, que formam um eletroímã. As extremidades do rotor estão ligadas ao comutador. [9]

O estator é a parte fixa que envolve o rotor e é composta por ímãs permanentes ou enrolamentos de campo (também chamados de circuito indutor). O estator fornece o fluxo magnético que, juntamente com a corrente na armadura, cria a força eletromagnética. [9]

O comutador (ou coletor) tem a responsabilidade de inverter a direção da corrente que flui nos enrolamentos da armadura. Ele consiste em um anel condutor dividido por material isolante. Sua função é interromper temporariamente o circuito formado pelas bobinas para garantir que o torque sempre tenha a mesma direção e evite que a armadura fique parada em uma posição de equilíbrio. [9]

As escovas são componentes feitos de grafita e são montadas em molas que permitem que elas deslizem sobre os comutadores. Elas fazem a conexão entre a fonte de corrente contínua (CC) e os enrolamentos do rotor. [9]

4.1.2. Funcionamento do Motor CC

O motor de corrente contínua opera com base no princípio da indução de uma força eletromagnética causada pelo movimento das espiras do rotor em uma região de campo magnético gerado pela corrente que flui pelo estator. [9]

Os enrolamentos de campo criam um campo magnético que vai do polo Norte para o polo Sul quando alimentados pela fonte de energia. Quando a armadura é energizada, uma corrente passa pelos condutores que estão imersos no campo magnético, gerando forças eletromagnéticas. Essas forças resultam no torque (representado na figura 10 como binário), que é responsável por acionar o movimento do eixo. É importante notar que o comutador desempenha um papel fundamental no funcionamento do motor, pois permite a reversão da direção da corrente nos enrolamentos, garantindo que não ocorra mudança na direção da força nem na direção de rotação do eixo. [9]

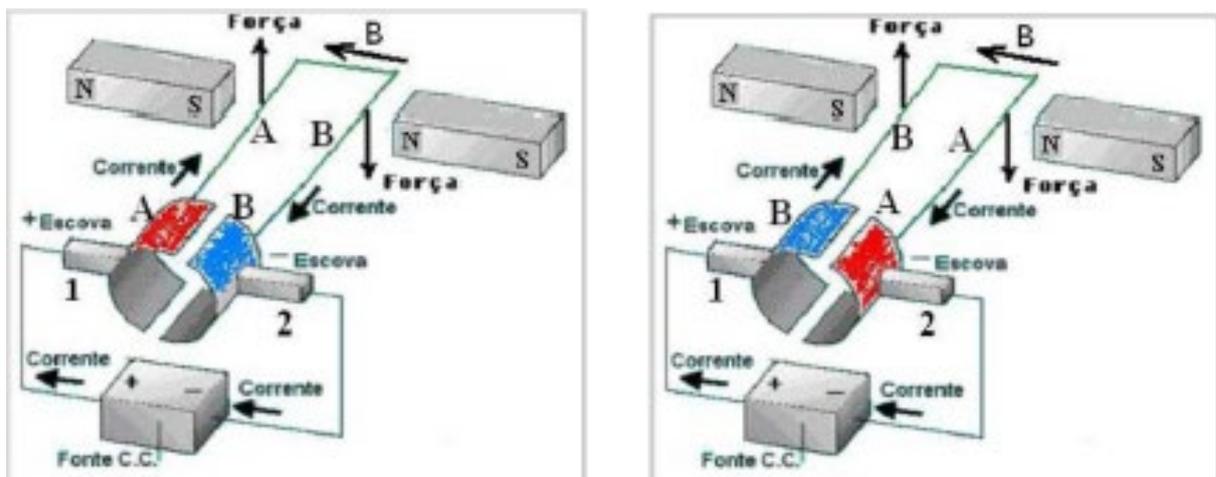


Figura 10 – Princípio de funcionamento de um Motor CC [9]

Os motores de corrente contínua (CC) podem ser classificados com base na ligação entre o enrolamento de campo e o de armadura. Dentre elas, podemos ter as excitações: Independente, Série, Paralela ou Mista. [09]-[16]

a) Excitação Independente: Neste tipo de motor, o enrolamento de campo possui uma fonte de alimentação separada da de armadura. Isso permite um controle independente do campo e da armadura, o que torna possível controlar a velocidade de três maneiras: adicionando uma resistência em série com um dos enrolamentos (rotor ou campo), alterando a tensão da armadura ou a de campo (variando o fluxo magnético). [09]-[16]

b) Excitação Série: Nos motores de excitação série, os enrolamentos de campo e de armadura estão ligados em série. Isso significa que eles compartilham a mesma fonte de alimentação CC. Esses motores podem ser alimentados tanto com corrente contínua quanto com corrente alternada, sendo conhecidos como motores universais. Eles geralmente têm alta velocidade e podem ser utilizados em aplicações que requerem altos níveis de torque. [09]-[16]

c) Excitação Paralela (Shunt ou em Derivação): Nesse tipo de motor, os enrolamentos de campo e de armadura estão em paralelo, e apenas uma fonte de alimentação CC é necessária para alimentar o circuito. Isso permite um controle mais preciso da velocidade, pois a tensão de campo pode ser ajustada separadamente da tensão de armadura. [09]-[16]

d) Excitação Mista (ou composta): Motores com excitação mista possuem duas bobinas no estator, uma série e outra em paralelo com a bobina do rotor. Isso combina os benefícios de ambas as configurações para atender a requisitos específicos de aplicação. [09]-[16]

Além disso, é importante observar que existem motores CC com ímãs permanentes, que não requerem um circuito indutor e têm suas próprias características de funcionamento e controle. [09]

4.2. Vantagens e Desvantagens da Propulsão Elétrica por Corrente Contínua

Os Navios que possuem esse tipo de máquina, possuem um melhor controle de velocidade, tendo em vista que este controle é diretamente proporcional à tensão aplicada no motor. Ou seja, aumentando ou diminuindo a tensão aplicada, haverá um aumento ou redução da velocidade do navio, respectivamente. [4]

Além disso, se tratando de navios de guerra, um fator relevante é a manobrabilidade. Máquinas CC possuem alta manobrabilidade, tendo em vista que o sentido de rotação do motor elétrico da propulsão pode ser alterado mudando apenas a polaridade da tensão do motor. [4]

Os Sistemas modernos de propulsão elétrica de CC usam geradores de Corrente alternada (CA) eficientes e compactos, que por sua vez, alimentam retificadores eletrônicos. Os retificadores convertem a energia CA em energia CC para alimentar o motor da propulsão. [4].

Já as desvantagens apresentadas neste tipo de propulsão, podemos elencar a complexidade maior do sistema, tendo em vista a necessidade de componentes adicionais, como conversores e controladores. Somado a esses componentes eletrônicos adicionais, é importante ressaltar os custos e sistema de refrigeração, tendo em vista que esses sistemas eletrônicos podem exigir uma refrigeração adequada. [4]

Além disso, a manutenção das máquinas elétricas é frequente, cara e complexa, devido aos problemas de comutação elétrica entre as escovas e o coletor, e ao fato também dos motores não serem enclausurados para fins de melhorar a ventilação. [19]

5. ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

A expressão "Eletrônica de Potência" teve origem a partir dos anos 60, após a General Electric ter feito a descoberta do Retificador Controlado a Silício (SCR) em 1957, conhecido comumente de tiristor [4].

A Eletrônica de Potência pode ser definida como uma ciência que se dedica ao estudo dos conversores estáticos de energia elétrica. Um conversor estático é um sistema composto por componentes passivos, tais como resistores, capacitores e indutores, e componentes ativos, como interruptores, que podem incluir diodos, tiristores, transistores, GTOs, Triacs, IGBTs e MOSFETs. Eles operam de acordo com uma regra predefinida. [17]

Além disso, como mencionado anteriormente, o significativo avanço nas tecnologias de Eletrônica de Potência desempenhou um papel crucial na reintrodução da Propulsão Elétrica no cenário naval. [2]

No cenário naval, a Eletrônica de Potência envolve a utilização desses dispositivos semicondutores de grande potência para transformar e regular a energia elétrica em níveis apropriados para a propulsão marítima. [2]

A Eletrônica de Potência avançou rapidamente nos últimos anos, com o desenvolvimento de dispositivos semicondutores de elevada potência capazes de comutar eficazmente correntes substanciais (em alguns casos dezenas de amperes) sob altas tensões (algumas vezes alcançando milhares de volts). Devido à confiabilidade, tamanho reduzido e custo eficaz desses dispositivos, eles permitem um controle eficiente da energia elétrica, levando à sua aplicação em diversas áreas [2].

As chaves semicondutoras de potência desempenham um papel central nos circuitos de Eletrônica de Potência. Os principais tipos de dispositivos semicondutores usados como chaves nesses circuitos incluem diodos, transistores de potência de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET), transistores bipolares de porta isolada (IGBT), bem como retificadores controlados de silício (SCR), entre outros [2].

Portanto, a eletrônica de potência desempenha um papel fundamental em uma ampla variedade de aplicações elétricas, e esse papel é particularmente significativo na indústria marítima. Avanços nos sistemas elétricos, especialmente na eletrônica de potência, desempenham um papel central na evolução dos sistemas marítimos e embarcações. É amplamente reconhecido que a maioria, se não todos, dos requisitos de energia em navios, incluindo propulsão, iluminação, comunicações, radar, guindastes, bombas, etc., dependem da eletricidade, e muitos desses sistemas dependem da conversão de eletrônica de potência, que ocorre principalmente nas cargas ou próximo a elas. [12]

A necessidade por eletricidade em navios está em constante crescimento, chegando a dezenas de megawatts e, em alguns casos, ultrapassando 100 MW. O grande desafio reside no tamanho da eletrônica de potência e dos dispositivos de comutação elétrica, os quais representam um obstáculo significativo para atender a essa demanda crescente. Em todas as aplicações, fatores como custo, peso, perdas e tamanho desempenham papéis críticos, embora suas prioridades variem dependendo do uso. No contexto dos sistemas de navios, a priorização geralmente se concentra no tamanho, seguido por perdas, custo e peso, mesmo que esses elementos estejam interligados. [12]

5.1. Dispositivos de comutação de potência

5.1.1 Diodos de Potência

De maneira ideal, um diodo é um componente que atua como uma espécie de "portão" elétrico, permitindo que a corrente flua em apenas uma direção (condução direta) e bloqueando-a na direção oposta. Em circuitos elétricos, o diodo é empregado em diversas aplicações. No contexto naval, é frequentemente utilizado em conversores de corrente alternada para corrente contínua (CA/CC), onde desempenha a função de retificação. Após a fase de condução direta, quando uma tensão reversa é aplicada, isso resulta em uma corrente reversa transitória que ocorre por um curto período. Melhorias na tecnologia dos diodos, particularmente no que diz respeito a essa corrente reversa transitória, têm o potencial de reduzir de forma significativa os custos associados aos conversores. [12]

5.1.2. Transistores

Os Transistores com alto valores nominais de tensão e de corrente são conhecidos como transistores de potência. Esses dispositivos são construídos com três camadas semicondutoras e duas junções, podendo pertencer às configurações PNP ou NPN. Eles são geralmente empregados em duas aplicações fundamentais: amplificação e chaveamento. Em eletrônica de potência, em que o objetivo principal é o controle eficaz da potência que circula pelo circuito, eles são usados como chaves. Sua diferença principal do diodo é que o diodo é uma chave que não pode ser controlada, pois tem apenas dois terminais. Os transistores, por outro lado, possuem três terminais, dois deles atuando como contatos de uma chave, enquanto o terceiro é utilizado para ligar e desligar essa chave. Assim, o circuito de controle pode ser independente do circuito que está sendo controlado. [18]

Dentre a variedade de transistores disponíveis, três são amplamente empregados em circuitos de eletrônica de potência: O Transistor bipolar de junção (*bipolar junction transistor* – BJT), o Transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (*metal-oxide-semiconductor field-effect transistor* – MOSFET) e o transistor bipolar de porta isolada (*insulated-gate bipolar transistor* – IGBT) . [18]

O BJT é um dispositivo que requer controle por meio da corrente, exigindo uma corrente de base considerável para mantê-lo ativo. Além disso, uma alta corrente reversa de base é necessária para desligá-lo rapidamente, tornando assim o circuito de controle da base mais complexo. [18]

Por outro lado, os MOSFETs de potência são dispositivos controlados por tensão. São a escolha preferencial em aplicações de alta frequência onde o ponto de chaveamento é crítico. No entanto, a queda de tensão no MOSFET durante o estado ativo é maior do que a do BJT. Assim, em operações com tensões mais elevadas, nas quais a minimização das perdas é essencial, o BJT é a opção preferida. [18]

Portanto, a criação do IGBT foi em parte uma resposta às limitações dos MOSFETs e dos BJT's. Os IGBTs são ideais para aplicações de alta tensão, apresentam baixas perdas quando ligados, exigem circuitos de controle simplificados e podem suportar velocidades de comutação consideravelmente elevadas. [18]

Em sistemas navais, os IGBTs são operados em uma faixa de tensão que vai desde 50 V até 5.000 V. A presença desses componentes eletrônicos viabilizou o avanço no desenvolvimento de conversores de potência que possibilitam o controle eficaz da velocidade de motores elétricos de alta potência, na ordem dos megawatts, por meio da variação da frequência. [2]

5.1.3 Tiristores

Tiristores são componentes semicondutores de potência compostos por quatro camadas PNPN, e funcionam como chaves eletrônicas. A sua principal vantagem é converter e controlar grandes quantidades de potência em sistemas CA ou CC, utilizando apenas uma pequena potência para o controle. Por sua grande abrangência e utilização, dentre os tiristor es, o retificador controlado de silício, ou *silicon controlled rectifier* (SCR), é um dos mais amplamente utilizados. Eles são amplamente utilizados em aplicações como fontes de alimentação reguladas de potência, chaves estáticas, inversores, cicloconversores, entre outros. Sua ampla utilização se deve ao fato de sua ação de chaveamento [18]

Cada classe de dispositivo semicondutor de potência tem suas próprias limitações e benefícios específicos. A Tabela 1 a seguir destaca algumas diferenças relacionadas a parâmetros como corrente nominal, tensão nominal e frequência de chaveamento entre os principais tipos de dispositivos. [2].

Dispositivo	Corrente Nominal (kA)	Tensão Nominal (kV)	Frequência (Hz)
Tiristor (SCR)	4	8	0,5
IGBT	3,5	6,5	90
MOSFET	0,25	1	1000

Tabela 02 – Comparação entre os dispositivos semicondutores. (Adaptado de [2])

A existência desses componentes eletrônicos, com as propriedades mencionadas anteriormente, possibilitou o avanço dos conversores de potência.

5.1.4. Conversores CC/CC

Os Conversores CC/CC são dispositivos eletrônicos ou elétricos projetados para alterar as características da corrente contínua (CC), como a tensão, a corrente ou a polaridade, com o objetivo de fornecer a saída desejada de CC. Eles são usados para converter uma fonte de energia de CC em uma forma adequada para atender às necessidades específicas de carga, como dispositivos eletrônicos, motores elétricos ou sistemas de alimentação de energia. Esses conversores desempenham um papel fundamental em diversas aplicações, como eletrônica de potência, sistemas de energia renovável e veículos elétricos [32]

Os sistemas de distribuição de corrente contínua (CC) mais recentes utilizam conversores de eletrônica de potência em estado sólido, que desempenham um papel crucial na superação de dois dos principais obstáculos associados aos sistemas de CC. Eles facilitam a conversão confiável entre corrente alternada (CA) e CC, bem como entre CC e CA, além de permitirem a interrupção segura da corrente CC em situações normais e de falha. No entanto, existem outros desafios a serem enfrentados em relação a esses sistemas, incluindo o controle do campo elétrico devido ao barramento de CC e preocupações relacionadas à segurança. [32]

Existe uma variedade de conversores CC/CC, mas iremos abordar apenas os seguintes:

- 1) Conversor Abaixador (Buck);
- 2) Conversor Elevador (Boost);
- 3) Conversor Abaixador/Elevador (Buck-Boost);

O conversor buck e o boost são topologias básicas dos conversores, já o conversor buck-boost é uma combinação das suas topologias.

5.1.4.1. Conversor Abaixador (Buck)

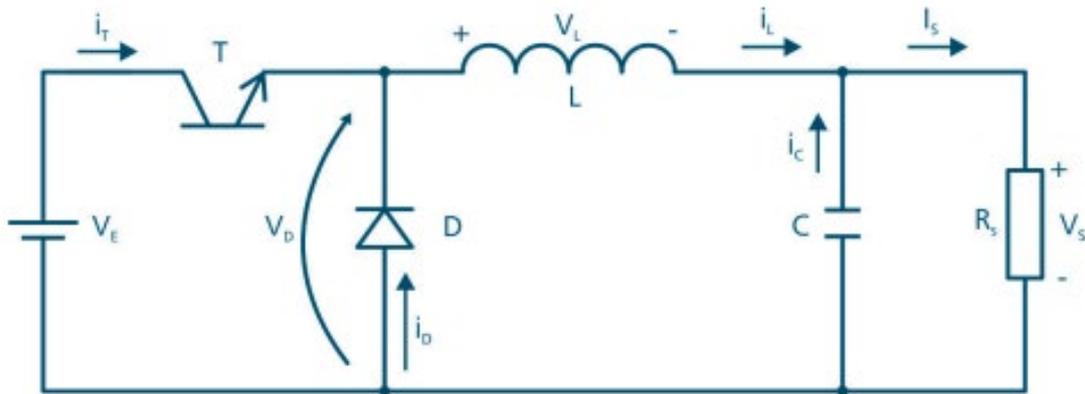


Figura 11 – Circuito elétrico do Conversor Buck [30]

É um conversor abaixador de tensão, utilizado quando se deseja ter uma diminuição na tensão de saída em relação a tensão de entrada. [30]

Empiricamente, e em condições ideais, a tensão de saída varia, de modo linear, com o ciclo de trabalho do conversor, através da seguinte fórmula:

$$V_s = D * V_e, \quad (1)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}}, \quad (2)$$

Onde:

V_s = Tensão média de saída

D = Ciclo de trabalho do conversor

V_e = Tensão de entrada

T_{on} = tempo que a chave do conversor fica aberta

T_{off} = tempo que a chave do conversor fica fechada

Como a razão do ciclo de trabalho é sempre menor que um, a relação da tensão de saída é sempre menor que a tensão de entrada, o que configura a sua razão de um conversor abaixador de tensão. [30]

5.1.4.2. Conversor Boost

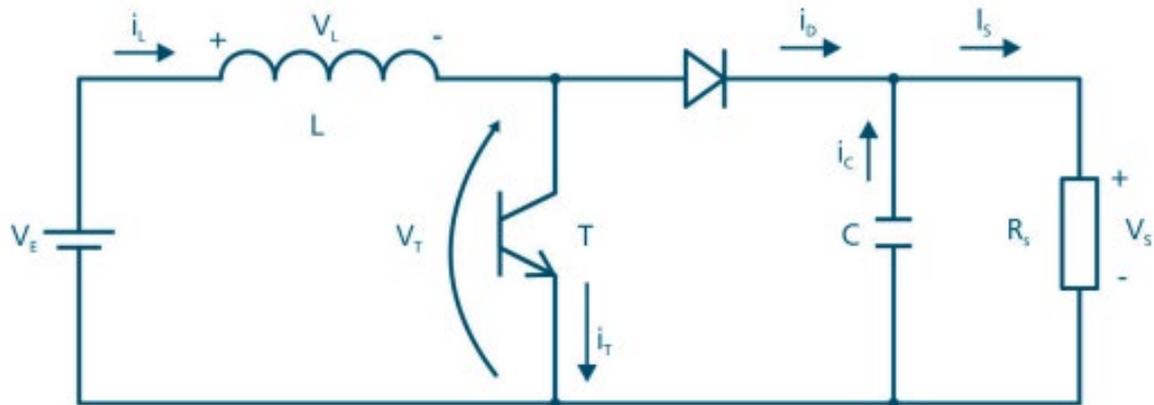


Figura 12 – Circuito elétrico do Conversor Boost. [30]

É um conversor elevador de tensão, utilizado quando se deseja aumentar a tensão de saída na carga, em relação à tensão de entrada no circuito. Sua relação entre a tensão de entrada e a de saída, fica definida pela seguinte fórmula:

$$V_s = V_e * \left(\frac{1}{1-D}\right), \quad (3)$$

Assim, como D é menor que um, a razão que multiplica a tensão de saída fica sempre maior que um, o que configura um aumento na tensão de saída em relação a tensão de entrada.

5.1.4.3. Conversor Buck-Boost

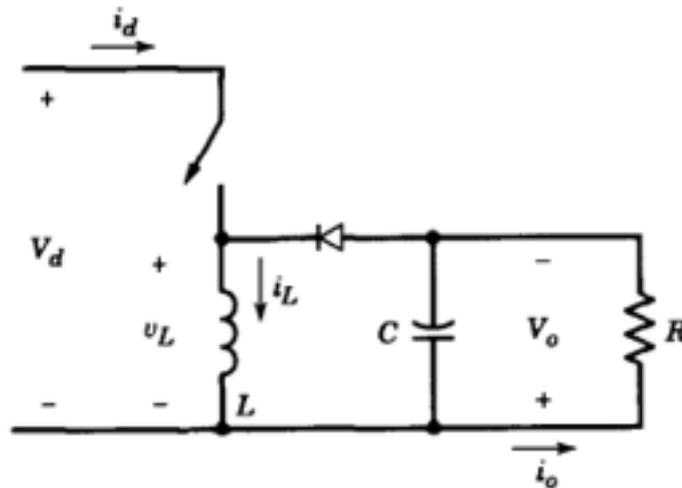


Figura 13 – Circuito elétrico do Conversor Buck-Boost [31]

A principal aplicação de um conversor Buck-Boost é a inversão da polaridade na carga. Sua construção é em cascata dos dois conversores acima mencionados, com isso em relação a magnitude de tensão na saída pode ser tanto maior, quanto menor que a tensão de entrada no sistema, porém sempre com a polaridade invertida em relação a entrada. [31]

No caso da magnitude, definimos através da equação:

$$V_o = V_d * \frac{D}{1-D} , \quad (4)$$

Onde:

V_o = Tensão média de saída

V_d = Tensão de entrada

Nesse caso, por se tratar de um conversor buck-boost, como já mencionado anteriormente, a tensão de saída pode ser tanto maior ou menor em relação a entrada. Essa relação ficará definida através do ciclo de trabalho D . Caso D seja maior que 0,5, a relação de saída será maior que a de entrada. Caso seja menor, conseqüentemente a tensão de saída será menor que a de entrada.

5.1.5. Inversores

Os Inversores convertem potência CC em potência CA, com a frequência e tensão, ou corrente de saída desejada. Dentre os vários tipos de inversores, destacamos os de fonte de tensão (*Voltage source inverters – VSI*).

O VSI consiste em um retificador, um barramento de corrente contínua e um inversor. O retificador (geralmente uma ponte de diodos) converte a frequência fixa em tensão contínua. O banco de capacitores do barramento suaviza a tensão contínua de saída do retificador e fornece uma tensão contínua estável ao inversor (dando o nome de Fonte de Tensão). O inversor, utilizando semicondutores de comutação (IGBTs ou IGCTs), converte a tensão contínua constante em uma frequência e tensão variáveis. [33]

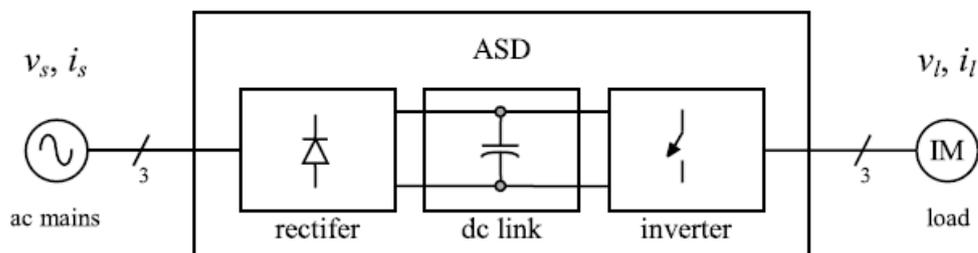


Figura 14 – A topologia da conversão de energia elétrica do VSI [34]

5.1.6. Power Electronic Building Block (PEBB)

O Power Electronic Building Block (PEBB) é um dispositivo ou módulo que pode ser integrado à fonte de alimentação. Não é um dispositivo semicondutor específico, mas sim uma integração de diversos outros dispositivos e tecnologias, tais como dispositivos de potência, circuitos de controle e outros componentes, projetados de acordo com a estrutura ideal do circuito e do sistema. Ainda que possa se assemelhar a um módulo de dispositivos semicondutores de potência, o PEBB engloba além desses dispositivos, circuitos de controle de portas, níveis de tensão, sensores, sistemas de proteção e componentes passivos. [24]-[22]

O PEBB é uma ideia estratégica geral que inclui diversos aspectos tecnológicos previstos como cruciais para diminuir significativamente os custos, perdas, dimensões e peso da eletrônica de potência. Essas reduções estão relacionadas entre si, sendo o custo o fator mais importante. [24]-[22]

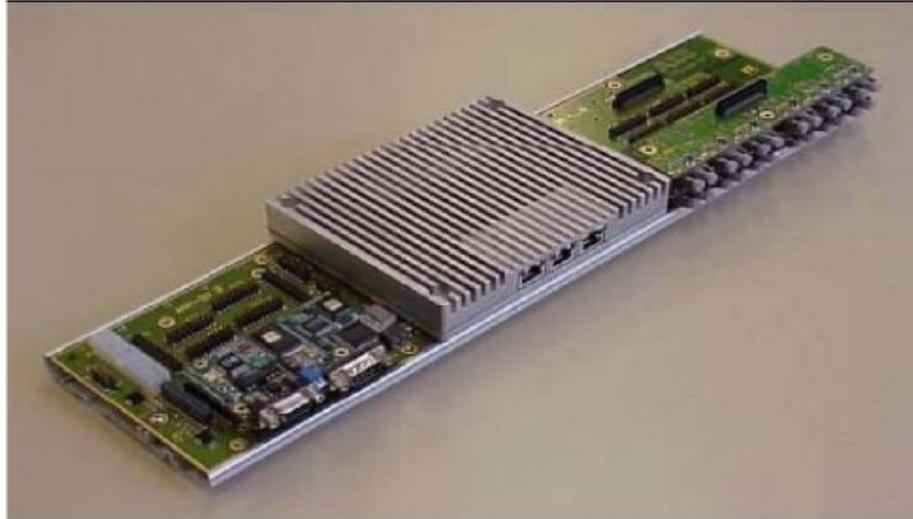


Figura 15 – Controlador de eletrônica de potência PEBB [22]

6. MEDIUM VOLTAGE DIRECT CURRENT (MVDC)

As Redes de corrente contínua em média tensão (MVDC) são redes que possuem níveis de tensão na faixa de 1500 até 30kV. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, os projetistas começaram a considerar a viabilidade de sistemas de distribuição de energia CC em diversas formas, já que no mundo atual existem poucos meios marítimos que contam com esse sistema, sendo a maioria desses sistemas em estágio de prototipagem ou experimental. [20]-[21]

Um setor líder na exploração e experimentação de sistemas de energia MVDC é a indústria marítima, onde têm sido feitos importantes investimentos para o desenvolvimento dessa tecnologia. Atualmente, o Sistema de energia integrado (*Integrated Power System – IPS*) dos maiores navios comerciais é caracterizado por uma distribuição de corrente alternada em média tensão (MVAC). Uma solução promissora para aprimorar o desempenho do IPS é a transição de MVAC para sistemas de energia MVDC. [21]

Em comparação com o equivalente em MVAC, a distribuição MVDC apresenta várias vantagens, como:

- Ausência da necessidade de sincronização de ângulo de fase das fontes de energia, o que simplifica os procedimentos de conexão e desconexão para dispositivos de geração e armazenamento de energia de diferentes tipos e tamanhos;
- Redução do tamanho e classificação dos equipamentos de comutação a bordo e eliminação de transformadores volumosos de baixa frequência;
- Melhor gerenciamento de correntes, reconfiguração do sistema e fluxo de energia em condições transitórias e de emergência;
- Eficiência aprimorada devido à eliminação de corrente reativa e à possibilidade de operação de motores de velocidade variável.
- Eliminação de restrições de frequência no projeto e operação de grupos geradores, o que resulta na redução do tamanho e peso dos geradores e na redução da diferença nos custos de operação entre turbinas a gás e motores a diesel. Isso pode tornar as turbinas a gás mais acessíveis, uma vez que são conhecidas por produzir emissões muito menos poluentes do que motores a diesel. [21]

No entanto, as desvantagens apresentadas do sistema de corrente contínua, são que os sistemas de energia MVDC apresentam vários desafios técnicos a serem enfrentados, tais como a devida proteção do sistema, estabilidade da rede, e é necessária uma maior evolução dos equipamentos industriais para aplicações MVDC, para que a transição para esse sistema de energia a bordo de navios se torne uma realidade significativa, já que poucos meios navais contam com essa tecnologia atualmente. [21]

Além desses, a viabilidade de implementar um sistema de distribuição MVDC depende da disponibilidade de três componentes essenciais: fontes de energia confiáveis e eficientes, conversores CC/CC de alta potência com custo e eficiência aceitáveis, e sistemas de proteção contra curtos-circuitos, que são muito mais críticos do que em sistemas CA, principalmente porque não é possível aproveitar as travessias por zero para interrupção de corrente, no caso de correntes alternadas. [21]

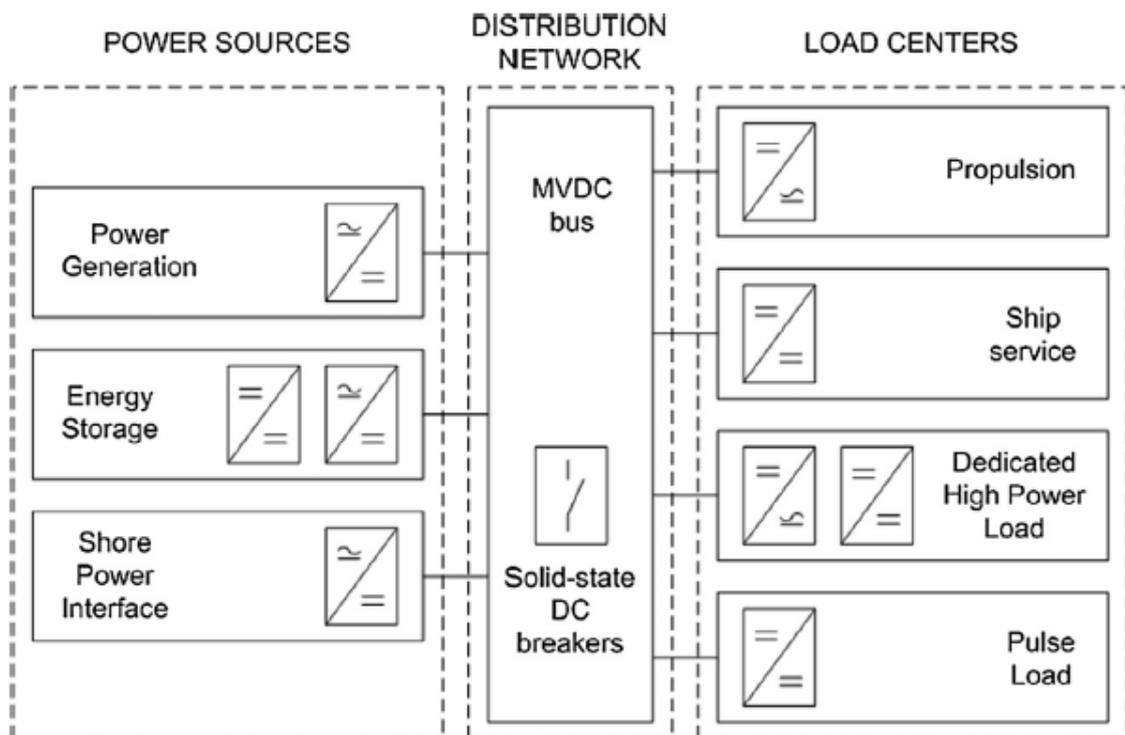


Figura 16 - Diagrama de blocos MVDC funcional simplificado destacando os equipamentos de eletrônica de potência incluídos em cada bloco funcional. [21]

Ao contrário de sistemas MVAC, os sistemas de energia MVDC exigem o uso extensivo de eletrônica de potência para conectar fontes de energia e cargas ao barramento MVDC e fornecer

proteção ao sistema. Em particular, na eletrônica de potência de sistemas de energia MVDC em navios totalmente elétricos (AES) é necessário:

1. Retificar a tensão de saída do gerador CA e realizar a interface com a energia de terra.
2. Conectar os sistemas de armazenamento de energia ao sistema de distribuição MVDC.
3. Fornecer as grandes cargas MV, como acionamentos de propulsão, cargas pulsantes e cargas de alta potência dedicadas.
4. Conectar as unidades de serviço de baixa tensão do navio ao barramento MVDC por meio de SSTs.
5. Implementar disjuntores de corrente contínua (CC). [20]

Os principais requisitos para os equipamentos de eletrônica de potência mencionados acima incluem confiabilidade, segurança funcional, design compacto e alta eficiência. Atender a esses requisitos está se tornando mais viável hoje, graças aos avanços na eletrônica de potência adequada para aplicações a bordo de navios. Além disso, é importante que os conversores de energia possuam capacidade de limitação de corrente de falha para suportar a proteção do sistema e, assim, reduzir o número de disjuntores de CC necessários. Outra especificação relevante é que os conversores de energia que conectam cargas ou fontes de energia com terras independentes ao barramento MVDC devem incluir um transformador de alta frequência. [20]-[21]

.

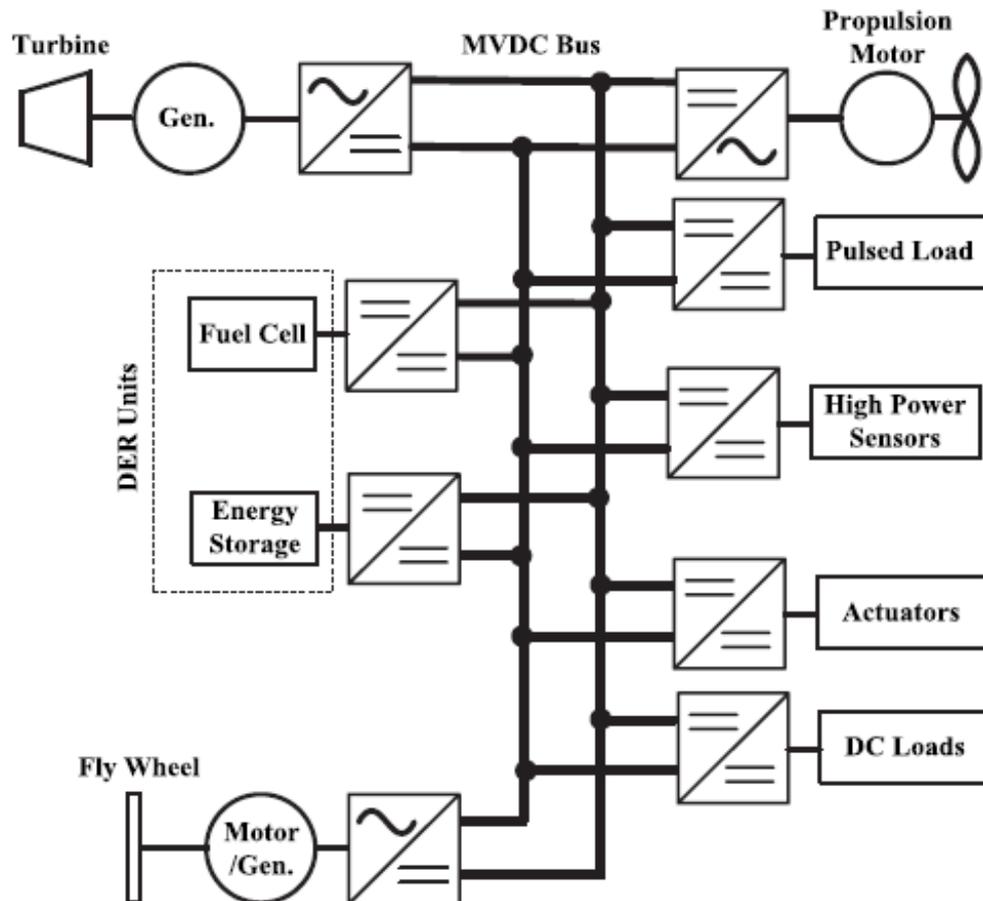


Figura 17 – Rede de Distribuição MVDC a bordo de um navio. [20]

A figura acima, exemplifica uma rede de distribuição MVDC explorada a bordo de um navio. Dadas as diversas limitações a bordo, tais como espaço e acionamento, o controle do sistema de energia a bordo de um navio é de suma importância em termos de proteção, restauração, confiabilidade. [20]-[23]

Através do avanço na tecnologia de dispositivos semicondutores, é previsto que redes de distribuição MVDC a bordo incorporem PEBBS, para as etapas de conversão de CC/CA, CC/CC e CA/CC, exemplificados na figura 13 como os quadrados ligados ao MVDC Bus. [20]-[24]

Um dos maiores desafios apresentados com este tipo de sistema interligado a bordo, é a proteção contra falhas no sistema, tendo em vista que cargas vitais e não-vitais estão ligadas no mesmo

barramento. A Proteção desse sistema depende da coordenação entre os conversores e os dispositivos de proteção. Garantir que a interrupção e o isolamento de qualquer uma dessas falhas não afetem o barramento como um todo, especialmente as cargas vitais a bordo, é de extrema importância. [20]

Atualmente, existe um foco significativo na pesquisa e desenvolvimento para incorporar a capacidade de gerenciar essa corrente de falha nos PEBBs, através da utilização de relés integrados nesses módulos. Isso permite que os PEBBs assumam a função dos disjuntores tradicionais, eliminando assim a necessidade de instalar disjuntores individuais. Adicionalmente, a integração da infraestrutura de comunicação na rede MVDC a bordo do navio facilita a proteção e o gerenciamento de situações anormais do sistema, contribuindo assim para a confiabilidade e a segurança do sistema, itens essenciais para um navio de guerra. [20]-[25]

6.1. IEEE

A norma IEEE Std 1709-2018 *Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships*, trata de práticas recomendadas para sistemas de energia de corrente contínua de média tensão (1 kV a 35 kV) em navios. Essa norma estabelece diretrizes e recomendações para o projeto, instalação e operação desses sistemas em embarcações. Ela aborda questões relacionadas à segurança, confiabilidade e desempenho desses sistemas de energia de corrente contínua em contextos marítimos. Em resumo, a norma fornece orientações técnicas para garantir o funcionamento seguro e eficiente de sistemas de energia de corrente contínua em navios. [26]

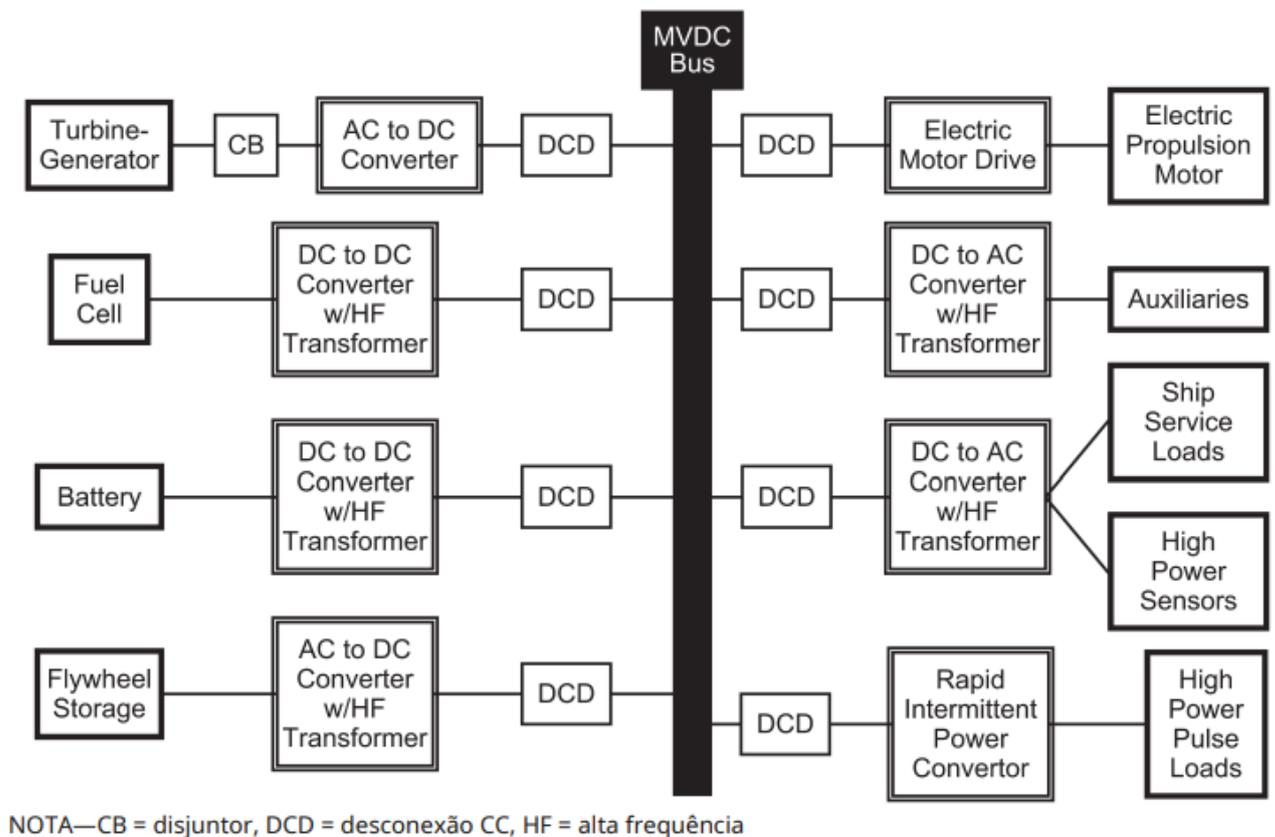


Figura 18 – Conceito do sistema de distribuição de energia MVDC [26]

Além disso, de acordo com a norma, considerando a possibilidade da eletrônica de potência de regular e interromper o fluxo de corrente, é possível substituir a maioria dos disjuntores do lado da carga por simples interruptores, como os interruptores de desligamento de corrente contínua. Em situações em que ocorra um defeito no conversor entre o gerador e o barramento de corrente contínua de média tensão (MVDC), ou se os conversores não conseguirem limitar a corrente, é fundamental contar com um dispositivo de proteção adicional contra curto-circuito entre cada gerador e o sistema de proteção correspondente. [26]

Visando a proteção do sistema como um todo, o barramento MVDC é um bloco funcional que possibilita a interrupção e o isolamento de seções do sistema. Assim, cada bloco funcional no sistema pode conectar, desconectar e isolar-se do sistema por meio de seus próprios meios. [26]

Observe que interrupção, isolamento e configuração são funções independentes. Um único dispositivo pode executar uma ou várias dessas funções. Alguns exemplos incluem:

- Disjuntor: capaz de realizar interrupção, isolamento e configuração.
- Fusível: desempenha funções de interrupção e isolamento (pois um fusível não pode ser ativado e, portanto, não é usado para configuração).
- Chave de carga: usada para isolamento e configuração.
- Eletrônica de potência na saída do gerador: responsável pela interrupção e configuração. [26]

Essa divisão funcional permite projetar qualquer tipo de sistema de energia elétrica de corrente contínua em navios. A Figura 15 abaixo, ilustra um exemplo concreto de um sistema de alto desempenho em uma embarcação. A arquitetura apresentada nessa figura foi projetada para maximizar a capacidade operacional, mesmo sob condições extremamente desfavoráveis. As cargas de serviço do navio são distribuídas em quatro zonas, estendendo-se da proa à popa da embarcação, e recebem energia MVDC a partir dos barramentos de corrente contínua de bombordo e boreste, que percorrem o navio longitudinalmente. A Zona 5 representa a superestrutura, e o único equipamento elétrico de grande relevância é um radar de alta potência. [26]

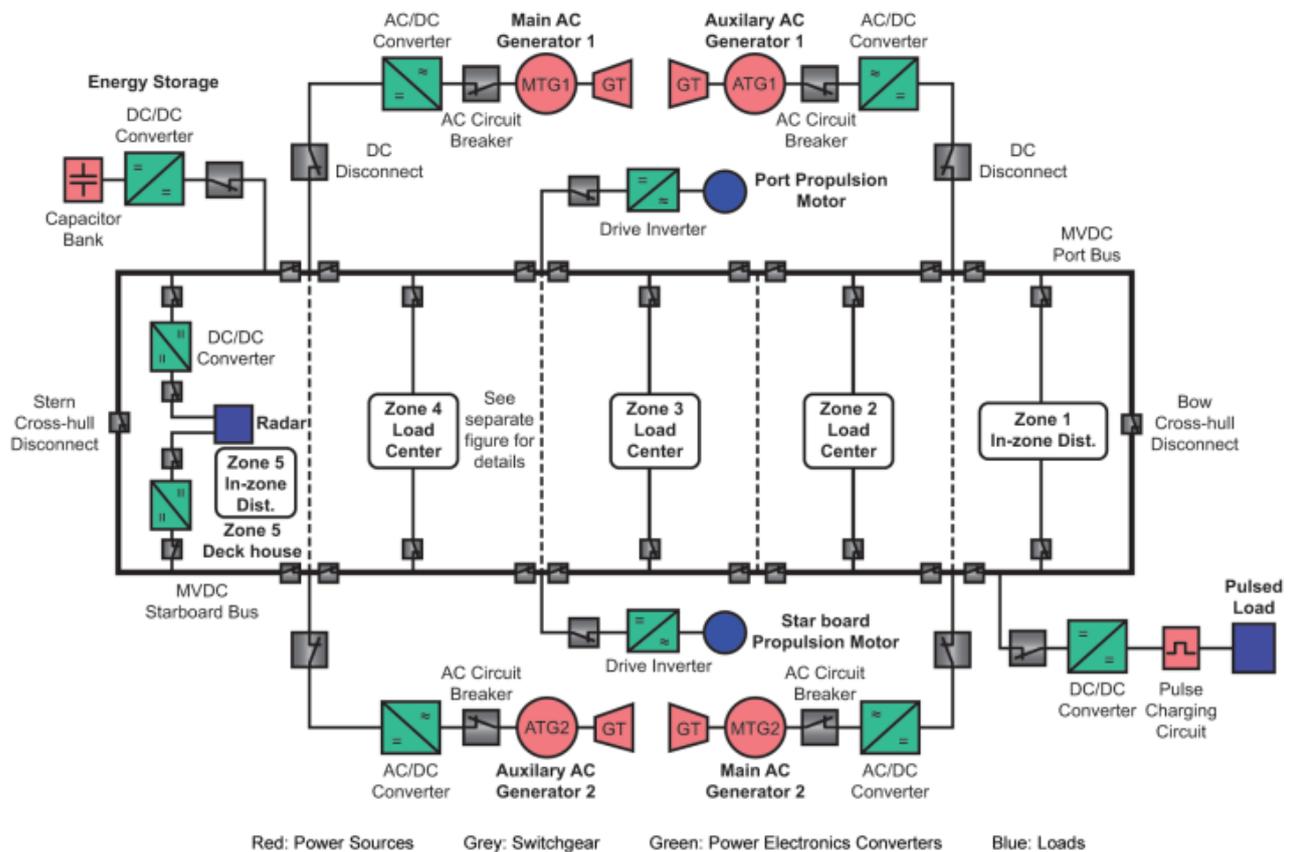


Figura 19 – Exemplo de projeto teórico de projeto de sistema de navio MVDC de alto desempenho. [26]

Para aprimorar a capacidade do sistema de energia, foram criadas ligações transversais entre a proa e a popa da embarcação, ligando os barramentos de corrente contínua de bombordo e boreste. Isso possibilita a configuração de um barramento em anel, a partir do qual os subsistemas de geração de energia e carga operam. Cada barramento longitudinal está conectado a um conjunto principal e a um conjunto auxiliar de geradores a gás. Isso significa que, ao abrir a proa, é possível melhorar a capacidade de sobrevivência do sistema de energia, e ao acionar os interruptores de desconexão na popa, é criada uma configuração de "planta dividida". [26]

7 CONCLUSÃO

Vimos ao longo deste trabalho que, diversas Marinhas ao redor do mundo vêm equipando sua frota com a propulsão elétrica. Em 2001, o Comitê Consultivo de Pesquisa Naval (NRAC) produziu um Relatório Executivo para a Marinha dos Estados Unidos, abordando as tendências e avanços recentes relacionados à transição da propulsão mecânica convencional para a propulsão baseada em sistemas elétricos [27].

Este estudo foi conduzido com a premissa de que a Marinha dos Estados Unidos tinha a intenção de desenvolver uma frota de navios equipados com sistemas de propulsão elétrica, que constituíam a base da futura Força Naval Elétrica (Figura 16) [27].

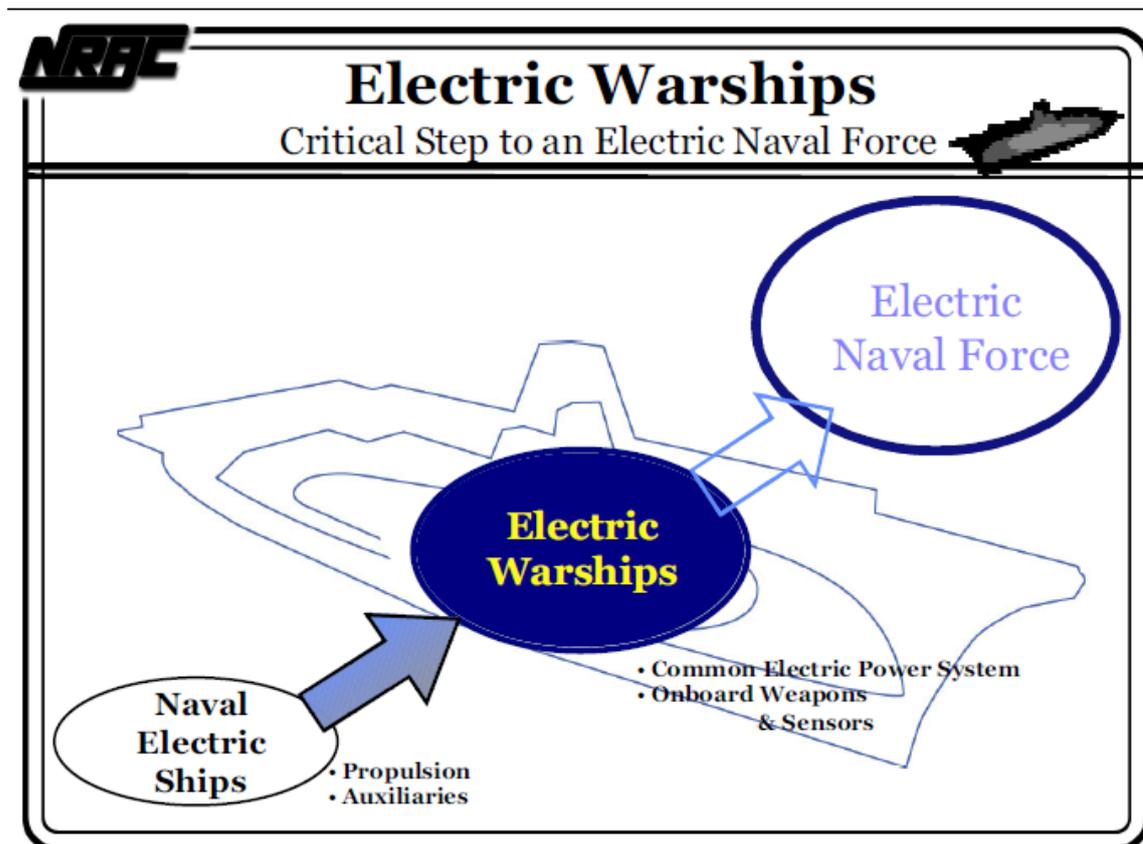


Figura 20 – Força Naval Elétrica [27]

Não obstante, a intenção de Marinhas desenvolvidas é a construção de mais navios não só com o sistema propulsivo elétrico, mas sim com a tecnologia MVDC, por conta das diversas vantagens já elucidadas neste trabalho.

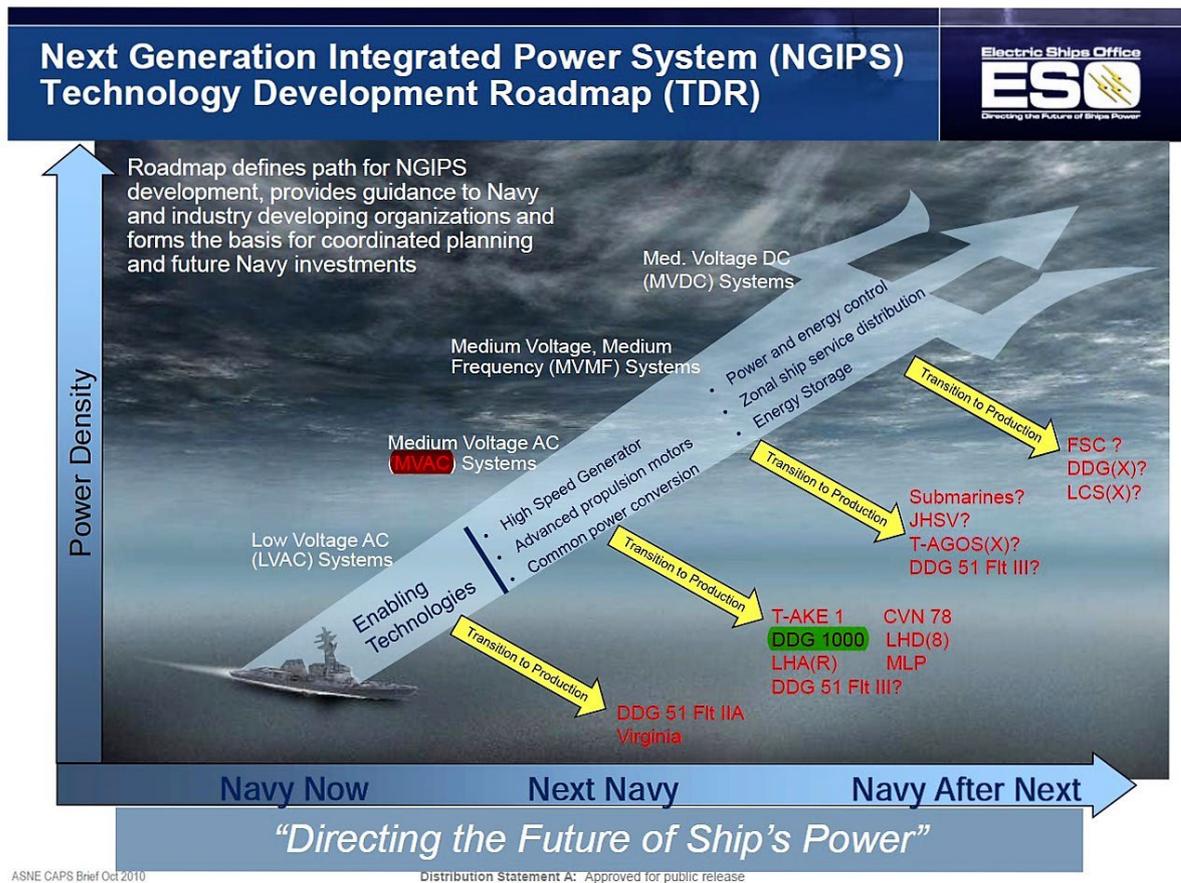


Figura 21 – Avanço tecnológico esperado pela USN [29]

Não obstante a isso, vimos também que a tecnologia CC pode oferecer uma solução superior em comparação com a tecnologia CA. No entanto, uma gama de questões técnicas está associada às redes CC, tais como: proteção das redes CC, que é um elemento essencial para navio que se faz ao mar. Além disso, é crucial desenvolver conversores de energia eficientes que atuem como interfaces nas redes CC, permitindo assim a integração de unidades de geração distribuída e cargas. Porém, a inovação neste tipo de tecnologia [20]

A inovação em tecnologias de conversores de energia e disjuntores de alta velocidade desempenha um papel fundamental no avanço das redes CC. Para efetivar a implementação de redes CC eficientes na prática, é necessário explorar e avaliar layouts conceituais em termos de eficiência, aspectos econômicos, proteção contra falhas e confiabilidade da rede. [20]

Por fim, um desenvolvimento futuro desejável dos estudos MVDC envolverá a integração do projeto do sistema de energia a bordo na concepção do navio, a fim de reduzir o espaço dedicado ao equipamento elétrico o máximo possível. [28]

6.1 Considerações Finais

Vimos que a propulsão elétrica em si possui diversas vantagens comparadas com a propulsão diesel. Não só pelos aspectos operacionais, mas também por conta da questão ambiental, que cada vez mais cresce nas pautas dos países desenvolvidos.

A Marinha do Brasil ainda está um pouco defasada neste tipo de tecnologia, possuindo apenas o NSS Guillobel, e futuramente a inclusão também do NApAnt Almirante Saldanha à sua frota de navios. Porém, a tecnologia MVDC ainda se encontra muito distante da nossa realidade. Apesar de todas as vantagens elucidadas e de ser uma tecnologia que Marinhas desenvolvidas procuram utilizar, ainda é algo muito distante da nossa realidade.

6.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

A Realização de um estudo de viabilidade do sistema elétrico citado neste trabalho, elucidando custos do projeto, dificuldades que possam ser encontradas na instalação a bordo e como aumentar a qualificação técnica do pessoal que irá operar esse sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] SKJONG, E., RØDSKAR, E., MOLINAS, M., JOHANSEN, T., CUNNINGHAM, J., **The marine vessel's electrical power system: From its birth to present day**, Proc. IEEE, vol. 103, no. 12, pp. 2410-2424, Dec. 2015
- [2] ALVES, Renata Nunes. **Propulsão Elétrica de Navios**. 2007. 201 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação De Engenharia Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [3] RODRIGUES, Thiago Almeida. **Efeito da inserção de Propulsão Elétrica na Qualidade de Energia Elétrica em Navios**. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2018.
- [4] ARRINGTON, J., W., 1998, **The Analysis of Components, Designs, and Operation for Electric Propulsion and Integrated Electrical System**, Master of Science in Electrical Engineering, Naval Postgraduate School (NPS), Monterey, California, USA.
- [5] FERREIRA, Kadson Carlos. **Propulsão elétrica nos Navios de Socorro Submarino da Marinha do Brasil**. Revista SIMEP, João Pessoa, v2, n.1, p: 158-171, Junho de 2022.
- [6] Wartisila é selecionada para fornecer sistemas de propulsão do NApAnt- Defesa Aérea & Naval. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/wartisila-e-selecionada-para-fornecer-sistemas-de-propulsao-do-napant>. Acesso em 15/09/2023.
- [7] Navio de Apoio Antártico. Disponível em: <https://www.mar.mil.br/hotsites/construcao-naval/napant.html>. Acesso em 15/09/2023.
- [8] SOUZA, Felipe Arcoverde. **Avaliação de Sistemas Diesel Elétrico, Mecânico e Híbrido para embarcações de Apoio a Plataformas**. 2013. 86 f. Projeto de Graduação em Engenharia Naval e Oceânico) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
- [9] DILÉO, Bruna Gallipoli. **Sistemas de Propulsão Elétrica**. 2013. 37 f. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2013.
- [10] MELO, Alex Eustáquio. **Análise da propulsão diesel elétrica em embarcações de apoio marítimo**. 2012. 33 f. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2012.
- [11] FEIJÓO, G. C. **Estudo do sistema elétrico em embarcações marítimas com propulsão diesel-elétrica**. 2012. 70 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

- [12] RENATA - ERICSEN, T., HINGORANI, N., KHERSONSKY, Y., “**Power Electronics and Future Marine Electrical Systems**”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 42, Nº 1, pp. 155-163, Jan. / Feb. 2006.
- [13] REIS, Rafael. **Qualidade de Energia da Fragata Liberal: Análise e problemas observados a bordo**. 2021, Centro de Instrução Almirante Wandenkolk, Rio de Janeiro, 2021.
- [14] REUSSER, Carlos., OSSES, Joel Pérez. “**Marine Science and Engineering Challenges for Zero-Emissions Ship**”, 2021, 9, 1042 <https://doi.org/10.3390/jmse9101042>.
- [15] CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas** [recurso eletrônico] / Stephen J. Chapman ; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2013.
- [16] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- [17] BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2016.
- [18] AHMED, A., **Eletrônica de Potência** / Ashfaq Ahmed ; tradução Bazán Tecnologia e Linguística ; revisão técnica João Antônio Martino. – São Paulo : Prentice Hall, 2000.
- [19] BARBOSA, Pedro Victor. **Propulsão Elétrica nos Navios Mercantes**. 2011. 45 f. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2011.
- [20] Saeedifard M, Graovac M, Dias RF, Irvani R. **DC power systems: challenges and opportunities**. Proc power and energy society general meeting. 2010. p. 1–7.
- [21] Castellan S, Menis R, Tessarolo A, Luise F, Mazzuca T. **A Review of Eletronics equipment for all-eletric ship MVDC power system** – Elsevier 2017.
- [22] PEBB - Power Electronics Building Blocks: From Concept to Reality. PCIC-2006-22, 2006.
- [23] J. Ciezki and R. Ashton, “**Selection and stability issues associated with a navy shipboard DC zonal electric distribution system**,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 665–669, April 2000.
- [24] T. Ericson, N. Hingorani, and Y. Khersonsky, “**Power electronics and future marine electrical systems**,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. 1, pp. 155–163, Jan.-Feb. 2006.
- [25] T. Ericson, “**The ship power electronic revolution: Issues and answers**,” in *IEEE Petroleum and Chemical Industry Conference*, September 2008, pp. 1–11.

- [26] IEEE Industry Applications Society – **Recommended practice for 1kV to 35 kV médium-voltage DC power system on ships** – 2018.
- [27] CNO EXECUTIVE BOARD, 2001, **Executive Summary Roadmap to na Electric Naval Force**, Naval Research Advisory Committee.
- [28] BOSICH, D.; VICENZUTTI, A.; PELASCHIAR, R.; MENIS, R.; SULLIGOI, G. **Toward the Future: the MVDC Large Ship Research Program**. 2015, University of Trieste, Trieste, Italy.
- [29] DOERRY, Capt. Norbert H. **Next Generation Integrated Power Systems for the Future Fleet**.
- [30] Rêgo Segundo, Alan Kardek. **Eletrônica de potência e acionamentos elétricos**. Ouro Preto: Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto, 2015. 130 p.il.
- [31] MOHAN, Ned. **Eletrônica de Potência**. São Paulo: Editora Unicamp, 1995.
- [32] P. Karlsson and J. Svensson, “**Dc bus voltage control for a distributed power system,**” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 18, no. 6, pp. 1405 – 1412, November 2003.
- [33] HANSEN, J. F., WENDT, F., **History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion Integrated Power Systems and Future Trends**, *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2229-2242, Dec. 2015.
- [34] RASHID, M., H., 2001, **Power Electronics Handbook**, Academic Press, USA.