

**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 EM NAVIOS DE GUERRA: Uma revisão de literatura**



**PRIMEIRO-TENENTE WILLIAN GARCIA GARCEZ**

Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE WILLIAN GARCIA GARCEZ

PROPULSÃO ELÉTRICA EM NAVIOS DE GUERRA: Uma revisão de literatura

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.

Orientador:

D.Sc. Elkin Ferney Rodriguez Velandia

CT (EN) Ronei Erlacher

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

PRIMEIRO-TENENTE WILLIAN GARCIA GARCEZ

PROPULSÃO ELÉTRICA EM NAVIOS DE GUERRA: Uma revisão de literatura

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.

Aprovada em 21/11/2023

Banca Examinadora:

Elkin Ferney Rodriguez Velandia, D.Sc – UFRJ \_\_\_\_\_

Ronei Erlacher, CT(EN) – DEN \_\_\_\_\_

Paulo Ricardo Donário Dos Santos, CT \_\_\_\_\_

CIAA  
Rio de Janeiro  
2023

Dedico esse trabalho à minha esposa, minha maior incentivadora e força motriz para todos os meus desafios.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, fonte de todo poder e força neste tempo.

A minha esposa, companheira e amiga Emily Corrêa, por todo suporte oferecido, pelos momentos de cumplicidade, pela paciência nos momentos de ausência e por todo aporte e amor dedicado dentro de casa.

A minha avó, Maria da Conceição, por ser o exemplo de força, determinação em toda a minha vida e sempre colocar minha educação em primeiro lugar.

A minha mãe, Rosinete Garcia, pela dedicação e abnegação para que eu conseguisse trilhar a minha carreira.

À minha filha, Sophia Garcez, por ser a luz da minha vida, fonte de amor e carinho.

A Marcio Broell e Leonardo Lopes, meus mentores, com quem aprendi a importância do conhecimento técnico para liderança dos subordinados. Obrigado por cada segundo de aprendizado, tanto na vida profissional quanto no pessoal.

Aos meus orientadores, Elkin e Erlacher, que não mediram esforços para que este trabalho fosse possível, sempre presentes e solícitos.

Por fim, agradeço a Marinha do Brasil, por ser meu lar durante esses longos anos e aos professores que fizeram parte deste capítulo da minha vida.

“É um paradoxo, ainda verdadeiro, dizer que quando mais nós sabemos mais ignorantes nos tornamos no senso absoluto, pois é somente através da iluminação que nos tornamos conscientes de nossas limitações”

Nikola Tesla

## Resumo

Essa monografia versa sobre uma revisão de literatura da propulsão elétrica em navios de guerra. É realizada uma abordagem a respeito do seu atual cenário e como o desenvolvimento na área de eletrônica de potência vem proporcionando o investimento e desenvolvimento desse tipo de propulsão, pelas marinhas americanas e inglesas.

O presente estudo elenca as características da propulsão elétrica e suas vantagens, em relação a propulsão convencional. As quais são destacadas sua eficiência, flexibilidade, redução do consumo de combustível e emissões de poluentes, que têm motivado sua adoção em várias marinhas.

O potencial para revolucionar a operação de meios navais, bem como a compreensão das implicações da propulsão elétrica em navios de guerra, são desafios abordados nesse estudo. Ainda é explorado como a propulsão elétrica influencia a disposição dos equipamentos a bordo e permite que os motores operem na faixa de desempenho ideal, trazendo inúmeras vantagens.

Os resultados esperados incluem uma visão global das vantagens da propulsão elétrica em navios de guerra, bem como suas implicações estratégicas e ambientais. A pesquisa destaca a importância desse avanço tecnológico para os meios navais e como seu potencial para transformar a eficiência operacional e a manutenção das frotas de navios de guerra em todo o mundo, vem influenciando o futuro da Marinha do Brasil.

Para sustentar essa tese, será abordado sobre o sistema de propulsão do Navio de Socorro Submarino (NSS) Guillobel e sobre como será a propulsão do novo Navio Polar Antártico (NaPAnt) Almirante Saldanha.

**Palavras-chave: Propulsão elétrica, eletrônica de potência, Marinha do Brasil (MB), NSS Guillobel, NaPAnt Almirante Saldanha.**

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Histórico de temperatura anual comparada com a média do século 20.....</b>	<b>13</b>
<b>Figura 2 – Navio Vandal .....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 3 – USS “Júpiter” .....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 4 – Sistema de Acionamento Elétrico Integrado.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 5 – Diagramas em blocos de um Sistema de Propulsão Elétrica .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 6 – MF Ampere .....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 7 – Potência de Chaveada vs Frequência de chaveamento .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 8 – Potência Chaveada x Frequência de chaveamento .....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 9 – Conversor DFE .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 10 – Efeito do aumento do número de pulsos .....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 11 – Fragata italiana FREMM .....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 12 – Conversor AFE .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 13 – CSI alimentado por retificador .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 14 – Inversor de Fonte de Tensão .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 15 – Cicloconversor .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 16 – Principais componentes do Motor Síncrono HTS.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 17 – Consumo de Combustível .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 18 – Esquema da propulsão diesel elétrica .....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 19 – Esquema IEP .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 20 – USS Zumwalt DGG 1000 .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 21 – Planta Elétrica do navio DGG 1000 .....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 22 – Contratorpedeiro Type 45 .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 23 – Configuração elétrica do contratorpedeiro Type 45 .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 24 – Porta aviões Queen Elizabeth .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 25 – Navio Mistral.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 26 – Navio de Socorro Submarino Guillobel .....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 27 – Planta Elétrica propulsora com tecnologia Azipods.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 28 – Motor Wartsila 32 .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 29 – Escopo do projeto da planta elétrica propulsora do NaPant .....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 30 – Diagrama de blocos de uma planta elétrica MVDC .....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 31 – Avanço tecnológico esperado pela USN.....</b>	<b>53</b>

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1- Comparação entre dispositivos .....</b>	<b>21</b>
<b>Tabela 2- Principais navios que utilizam a propulsão elétrica.....</b>	<b>45</b>

## LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AFE	<i>Active Front End</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CSI	<i>Currente Source Inverter</i>
DFE	<i>Direct Front End</i>
HTS	<i>High-Temperature Superconductors</i>
MB	Marinha do Brasil
MVAC	<i>Medium Voltage Alternating Current</i>
MVDC	<i>Medium Voltage Direct Current</i>
RN	<i>Royal Navy</i>
USN	<i>United State Navy</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>1.1 Apresentação do problema</b> .....	13
<b>1.2 Justificativa e Relevância</b> .....	15
<b>1.3 Objetivos</b> .....	15
1.3.1 Objetivo Geral .....	15
1.3.2 Objetivo Específico .....	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
<b>2.1 Breve Histórico</b> .....	16
<b>2.2 Comparação entre a Propulsão Elétrica e a Propulsão Mecânica</b> .....	18
<b>2.3 Propulsão Puramente Elétrica</b> .....	20
<b>2.4 A Eletrônica de Potência</b> .....	21
<b>2.5 Conversores de Frequência Aplicados a Propulsão de Navios</b> .....	23
2.5.1 Retificadores “ <i>Direct Front End</i> ” (DFE) .....	23
2.5.2 Retificadores “ <i>Active Front End</i> ” (AFE) .....	24
2.5.3 Inversor de Fonte de Corrente (“ <i>Current Source Inverter</i> ”) .....	25
2.5.4 Inversor de Fonte de Tensão (“ <i>Voltage Source Inverter</i> ”) .....	26
2.5.5 Cicloconversores.....	27
<b>2.6 Motores Elétricos Aplicados a Propulsão de Navios</b> .....	28
2.6.1 Motores de Indução .....	28
2.6.2 Motores Síncronos.....	29
2.6.3 Motor Síncrono HTS .....	30
2.6.4 Motor Homopolar CC Supercondutor .....	32
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	33
<b>3.1 Classificação da Pesquisa</b> .....	33
<b>3.2 Coleta e Tratamento de Dados</b> .....	33
<b>4 DISCUSSÃO</b> .....	34
<b>4.1 Principais Vantagens da Propulsão Elétrica</b> .....	35
4.1.1 Redução do consumo de combustível .....	36

4.1.2 Redução da emissão de poluentes .....	37
4.1.3 Redução dos custos operacionais e de manutenção .....	37
4.1.4 Redução da Tripulação .....	38
4.1.5 Aumento da Capacidade de Sobrevivência do Navio .....	38
4.1.6 Redução da Assinatura Acústica .....	38
<b>4.2 Propulsão Elétrica em navios de Guerra.....</b>	<b>39</b>
<b>4.3 Propulsão Elétrica em navios de marinhas estrangeiras.....</b>	<b>40</b>
<b>4.4 Propulsão Elétrica em navios da Marinha do Brasil.....</b>	<b>46</b>
<b>4.5 Perspectiva Futura.....</b>	<b>50</b>
4.5.1 Densidade Energética das bancadas de baterias.....	50
4.5.2 Tecnologia MVDC.....	51
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1 Considerações Finais .....</b>	<b>54</b>
<b>5.2 Sugestões para futuros trabalhos .....</b>	<b>55</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação do problema

De acordo com o Relatório Anual do Clima de 2021 da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), temperaturas concomitantes do oceano e da terra aumentaram, desde 1880,  $0,08^{\circ}\text{C}$  a cada década. Não obstante, desde 1981, a taxa de aumento médio cresceu em mais de duas vezes,  $0,18^{\circ}\text{C}$ . Mesmo que o aquecimento em todo o planeta não tenha sido uniforme, a tendência de crescimento na temperatura média global demonstra que mais áreas aquecem do que esfriam (Lindsey et al, 2021).

Na figura 1, pode se notar que as barras vermelhas abordam os anos com maior temperatura do que a média, já as barras azuis mostram os anos com menor temperatura que a média.

## GLOBAL AVERAGE SURFACE TEMPERATURE

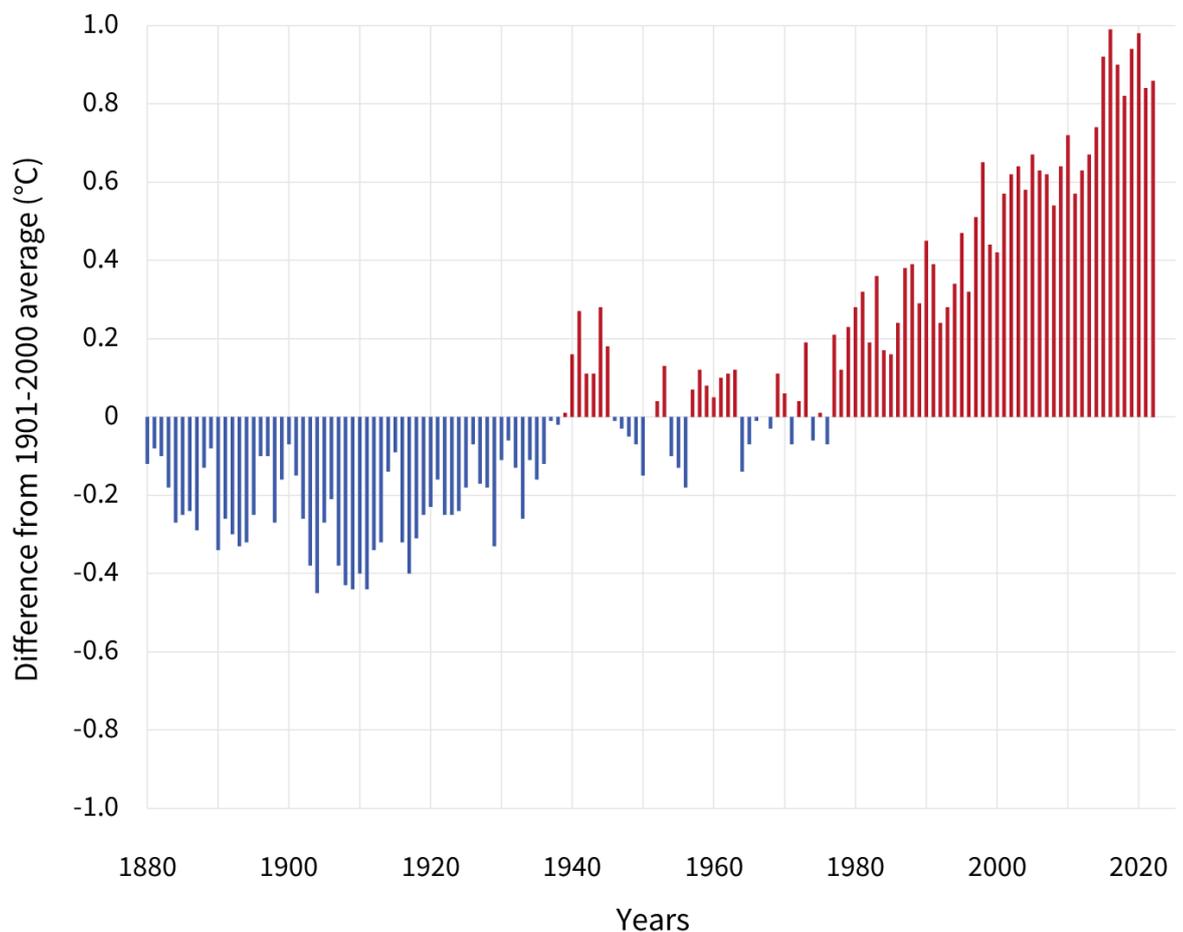


Figura 1: Histórico de temperatura anual comparada com a média do século 20 (Lindsey et al, 2021).

As temperaturas médias aumentaram exponencialmente nos últimos 20 anos, além disso, existem previsões que as emissões de gases do efeito estufa, produzidos pela indústria marítima, aumentem até 30% de sua totalidade (Walker et al., 2018).

Navios utilizam tipicamente o óleo pesado *bunker* como combustível, que tem baixa qualidade e contém quantidades relevantes de enxofre. Com a queima desse combustível, são emitidos gases de efeito estufa (GEE) e outros gases poluentes como os óxidos de nitrogênio (NOx) e os óxidos de enxofre (SOx). Atualmente o setor marítimo é responsável por 3% das emissões totais de GEE, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Andrade et al.,2021).

Roel Hoenders, CEO de descarbonização da Organização Marítima Internacional (IMO), afirmou que mesmo que muitos olhem com irrelevância para a participação da indústria marítima, a contribuição desse setor é igual à participação de países como Alemanha ou México. Não obstante, é de vital importância que o setor marítimo diminua as emissões de GEE (IMO,2020).

Sabendo que para os navios de guerra, acredita-se que desde o surgimento das turbinas a gás e dos reatores nucleares, há 70 anos atrás, a Propulsão Elétrica Integrada, empregando o acionamento elétrico, seja o futuro das marinhas (Whitman, 2001). E que através da utilização da propulsão elétrica em detrimento da propulsão convencional, a emissão de poluentes diminui 20% (Bastos, 2019).

Segundo Alves, nos dias de hoje, os meios navais militares têm como desafio angariar as seguintes vantagens: maior capacidade operativa e robustez. Além disso, é de extrema importância avaliar os custos de projeto, de construção, de manutenção e de operação, durante a vida útil do navio, com o intuito que esses custos sejam o menos oneroso possível (Alves,2007).

Vale ressaltar, o sucesso da propulsão elétrica nas marinhas norte-americana e inglesa, através da eficácia com que essas forças militares incorporaram essa tecnologia em suas embarcações e como as experiências e conquistas dessas marinhas forneceram descobertas valiosas sobre as aplicações da propulsão elétrica em navios de guerra.

Para Alves, após o desenvolvimento e diminuição de riscos, a propulsão elétrica será o futuro das embarcações militares. O uso desse sistema diminuirá ou até mesmo eliminará a necessidade de engrenagens de redução, proporcionará uma disposição mais flexível dos equipamentos a bordo dos navios, permitirá que o motor principal funcione frequentemente em sua faixa de desempenho ideal, resultando em menor consumo de combustível, redução da necessidade de manutenção e emissão reduzida de poluentes (Alves,2007).

## **1.2 Justificativa e Relevância**

Com o intuito de diminuir os custos operacionais, a propulsão elétrica vem sendo cada vez mais utilizada no setor marítimo. Não obstante, diversas Marinhas de guerra estão investindo altos recursos na pesquisa desta tecnologia. Destacam-se a Marinha Americana (USN) e a Marinha Inglesa (RN), que estão em processo de renovação de sua frota, construindo navios de superfície com propulsão efetuada pelo acionamento elétrico (CNO, 2001).

Estima-se que os sistemas elétricos serão cada vez mais utilizados na construção dos navios de Guerra, graças aos sucessos obtidos (ERICSEN et al.,2006).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal dessa revisão é compreender as vantagens do sistema de propulsão elétrica para os navios da Marinha do Brasil (MB). Para concluir esse objetivo, será abordado o sucesso desta tecnologia nas Marinhas amigas, elucidando o que há de mais atual e projeção futura nesta área.

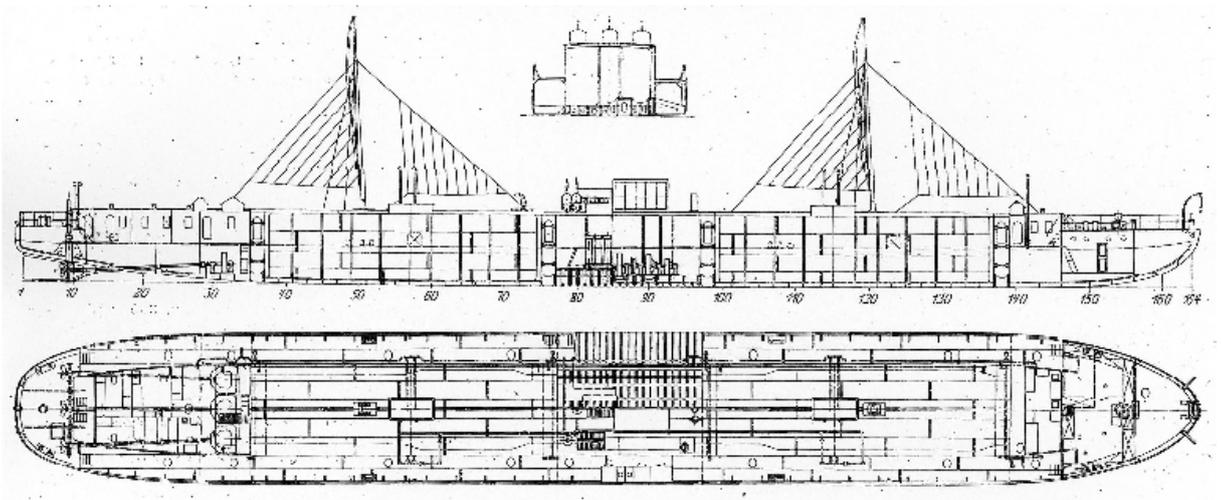
### **1.3.2 Objetivo Específico**

O objetivo específico é exemplificar a utilização dessa tecnologia na MB, através do Navio de Socorro Submarino (NSS) Guilhobel, a construção do novo Navio Polar Antártico (NAPAnt) Almirante Saldanha e comentar a respeito da proposta, que foi realizada pelo consórcio Damen, Saab e Wilson Sons para a construção das Fragatas Classe Tamandaré.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Breve Histórico

Segundo Arrington, foi a Rússia, no século XIX, o primeiro país a utilizar a propulsão de uma lancha de passageiros com motores elétricos alimentados através de baterias (Arrington, 1998). Em 1903, foram os russos os pioneiros na construção de um navio que continha 3 motores diesel, de 120 HP cada, com transmissão elétrica para os propulsores, navio Vandal, figura 2 (Hansen et al,2015).



**Figura 2: Primeiro navio construído com a propulsão elétrica, Vandal. (Hansen, et al. 2015).**

Já a USN, em 1913, comissionou o carvoeiro USS “Jupiter” (Figura 3). O navio possuía o sistema de propulsão elétrica, que basicamente utilizava dois motores de indução com rotor bobinado os quais eram alimentados por um turbo gerador em corrente alternada (CA). O sucesso foi considerado tão grande que posteriormente o USS “Jupiter” foi modificado e tornou-se o primeiro porta aviões americano, USS “Langley”. Cabe ressaltar ainda que o segundo e terceiro porta aviões americano, USS Lexington e USS Saratoga, foram construídos com o mesmo sistema de propulsão (Rodrigues,2018).



**Figura 3: USS “Jupiter”, primeiro navio militar dotado de propulsão elétrica (Arrington,1998).**

A USN, construiu mais de 160 navios escoltas com propulsão elétrica, dotados de turbo ou diesel geradores entre 4.5 e 9.0 MW, durante a Segunda Guerra Mundial (2ª GM). Além de projetar entre 450 e 500 navios menores, com a mesma tecnologia, os quais utilizavam corrente contínua (CC) e potência na faixa de 225 kW a 15 MW (Arrington,1998).

Contudo, após a 2ª GM, os altos custos para utilização da propulsão elétrica possibilitaram os preços competitivos entre as duas propulsões. A construção de navios com propulsão mecânica convencional ganhou protagonismo em relação a propulsão elétrica, devido aos avanços tecnológicos nos sistemas de engrenagens de dupla redução. Vale salientar que outros fatores foram preponderantes para esta mudança drástica na construção de navios militares e mercantes, como o menor volume e maior eficiência energética por parte da propulsão mecânica. Este cenário permaneceu inalterado até o início do século XXI, quando o poder de transmissão de energia mecânica chegou ao ápice de sua tecnologia e de exequibilidade econômica (Arrington,1998).

Segundo Alves, graças aos avanços na área de Eletrônica de Potência, entre as décadas de 1980 e 1990, a propulsão elétrica ressurgiu de uma forma mais eficiente em navios oceanográficos, tanques e quebra-gelos. Nos anos 2000, os estudos relativos à eletrônica de potência aplicada a motores elétricos vêm aumentando exponencialmente e apresentaram resultados significativos no que tange à redução de peso e volume, ao torque que geram altas faixas de potência, à resistência ao impacto e menores valores de assinatura eletromagnética e à acústica, sendo esses os maiores aliados desse tipo de propulsão nas embarcações militares (Alves, 2007).

Olhando para o futuro, é de suma importância entender que há perspectivas de aumento na utilização da propulsão elétrica em navios de guerra. Os Destroyers da classe Daring, RN, dotados de propulsão elétrica, e que exigem uma grande necessidade de energia devido aos seus sensores, equipamentos elétricos e sistema de armas, são exemplos de viabilidade deste tipo de propulsão em unidades operativas. Esses navios oferecem perfis operacionais mais versáteis, conseguindo vantagens táticas em situações diversas e ainda um menor custo operacional do meio (Koumentakos, 2019; Wu. et al, 2016).

## 2.2 Comparação entre a Propulsão Elétrica e a Propulsão Mecânica

A definição de propulsão elétrica (Figura 4) é a utilização de um sistema no qual um gerador elétrico produz e fornece energia, por meio de um componente de acionamento, para um motor elétrico que gera a força necessária para mover a embarcação. A alimentação desses geradores pode ser feita através de motores a diesel, turbina a gás ou a vapor. Vale destacar que o sistema de controle de velocidade do navio é controlado pela rotação do motor elétrico (Alves, 2007).

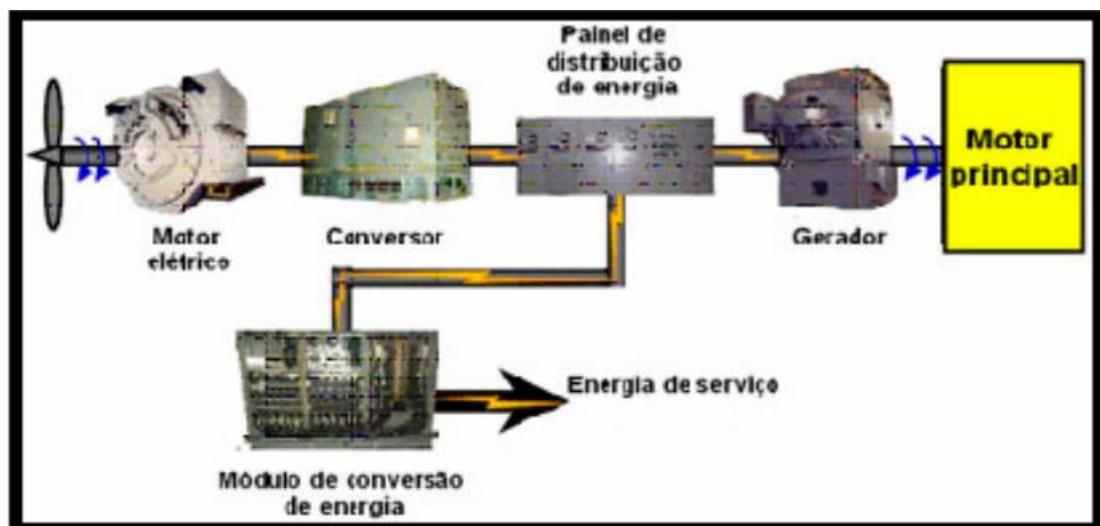
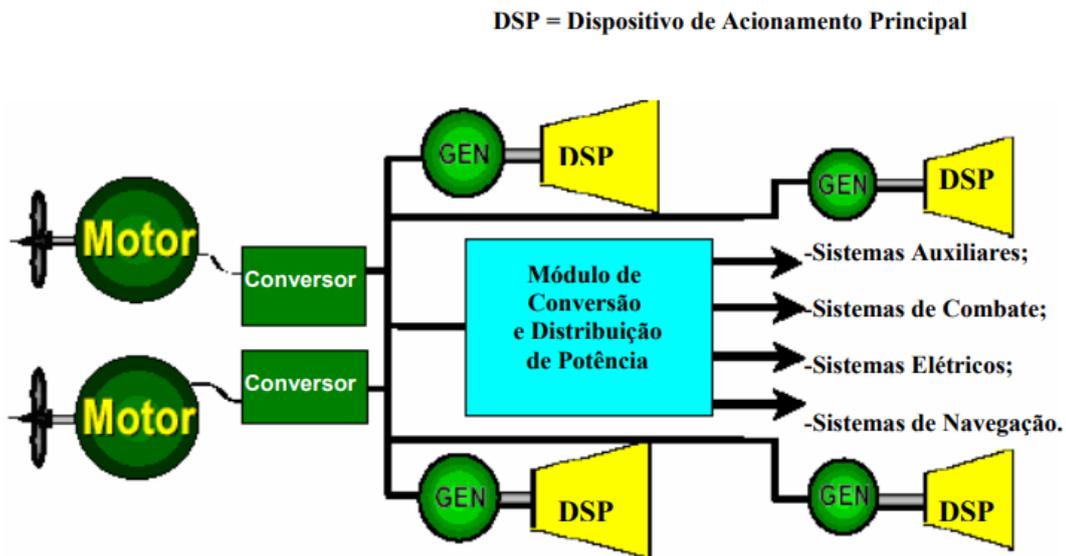


Figura 4: Sistema de Acionamento Elétrico Integrado (Pereira, 2006).

Outra característica que cabe ressaltar é que, ao contrário da propulsão mecânica, que possui dois sistemas de potência separados, um para a propulsão e um para sistemas auxiliares. E esses sistemas possuem sua própria capacidade de geração de energia e limitações de carga. A propulsão elétrica tem a capacidade única de gerar energia e distribuí-la simultaneamente para diversos sistemas. (Figura 5). Ou seja, um gerador pode ser utilizado

tanto para a propulsão quanto para a parte de conforto, radares e outros sistemas auxiliares de bordo (McCOY, 2002).



**Figura 5: Diagrama em blocos de um Sistema de Propulsão Elétrica (Alves, 2007).**

Em suma, a propulsão elétrica tem como objetivo integrar o sistema auxiliar e o sistema de propulsão. Além disso, com a automatização dos sistemas auxiliares, aumenta a probabilidade de utilizar estruturas modulares com uma grande flexibilidade para expansões futuras (Alves, 2007).

Não obstante, a propulsão mecânica utiliza um motor convencional, turbina a vapor ou turbina a gás que, após serem acoplados a uma engrenagem redutora e acionarem o eixo, definem a rotação do hélice. Pode-se então concluir que a rotação do hélice é definida pela rotação do motor a diesel, então, em diversas ocasiões o motor não opera na faixa de ótimo rendimento, ocasionando um desperdício de combustível (Alves, 2007).

A grande diferença entre as duas formas de propulsão é a sensibilidade da velocidade do eixo propulsor, enquanto a embarcação navega com velocidade mais baixa, a propulsão mecânica é menos eficiente que a elétrica. Segundo Alves, a faixa de operabilidade de um navio militar é de 85% do tempo com velocidades reduzidas, logo essa torna-se a grande justificativa para a adoção da transmissão elétrica como forma de propulsão (Alves, 2007).

### 2.3 Propulsão Puramente Elétrica

O surgimento tecnológico da absorção de energia solar através de células solares iniciou a inovação de barcos de pequeno porte movidos a baterias. Com as inovações de veículos 100% elétricos, é impossível evitar que os navios das próximas décadas, contenham diferentes tipos de propulsão e armazenamento de energia. (Bjorn-Johan. et al, 2016).

Com a utilização de baterias de ion-lítio, o ramo marítimo vem cada vez mais utilizando esta tecnologia como forma de armazenamento de energia no ramo naval, bem como em navios de superfície, rebocadores e patrulhas. Essas baterias mesmo que tenha alto custo, garantem a esses navios diversas vantagens, como redução das cargas nos picos de potência, aumento da disponibilidade energética fora dos picos, garantia de uma reserva energética eficaz e um método de propulsão livre de ruídos e emissões (Lino, 2021).

A utilização desta tecnologia como fonte única de energia para a propulsão está sendo utilizada apenas para embarcações que não efetuem grandes trajetos, como embarcações de transporte de pessoal “Ferry”. Um exemplo de sucesso na implantação desta tecnologia é o MF Ampere (Figura 6), com capacidade de transportar mais de 350 passageiros e 120 veículos, o navio é dotado de sistema de baterias que tem a capacidade de armazenarem um total de 1 MWh. O carregamento total das baterias é realizado rapidamente em cerca de 10 minutos (Lino, 2021).



**Figura 6: MF Ampere (Wu et al, 2016).**

Como consequência, com o objetivo de atingir a meta de zero emissões, a Noruega está investindo na utilização de meios de transporte de pessoas e/ou mercadorias 100% elétricos nos seus mares (Bjorn-Johan et al., 2016).

## 2.4 A Eletrônica de Potência

Com a descoberta do Retificador Controlado a Silício (SCR), comumente chamado de tiristor, em 1957, pela General Electric, deu-se início ao termo conhecido como eletrônica de potência (Arrington, 1998). Essa invenção, que cresce exponencialmente, basicamente tem como princípio de funcionamento a utilização de níveis de potência compatíveis com a propulsão de embarcações, operando com a conversão e controle da energia elétrica através de semicondutores de potência, como transistores e tiristores (Ahmed, 2000).

A rapidez no aprimoramento dos dispositivos semicondutores fez com que a eletrônica de potência evoluísse cada vez mais. O eficiente controle automático da potência elétrica, baixo custo, porte pequeno e confiabilidade alta são aspectos que fizeram com que essa expansão fosse justificada (Rashid, 2001).

Diodos, transistores de potência de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET), transistores bipolares de porta isolada (IGBT), retificadores controlados de silício (SCR), tiristores bidirecionais de porta controlada (TRIACS), tiristores de desligamento por porta (GTO) e tiristor comutado com porta integrada são os dispositivos mais utilizados como chaves semicondutoras (Alves, 2007).

Cada dispositivo possui sua particularidade, através da Tabela 1, pode-se observar o ano de fabricação, a corrente nominal, tensão nominal e frequência de chaveamento de alguns elementos. (Alves, 2007).

<b>Dispositivo</b>	<b>Ano de Fabricação</b>	<b>Corrente Nominal (kA)</b>	<b>Tensão Nominal (kV)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
SCR	1957	4	8	0,5
GTO	1962	6	6	2
MOSFET	1976	0,25	1	1000
IGBT	1983	3,5	6,5	90

**Tabela 1: Comparação entre dispositivos (Alves, 2007).**

A escolha da chave semicondutora a ser empregada no sistema conversor, para efetuar o controle de velocidade do motor, é realizada através da análise dos seguintes fatores: faixa de

potência suportada pelo dispositivo, o tipo de comutação empregada, a frequência de chaveamento, o sistema de controle exigido e a eficiência do dispositivo. Por meio das figuras 7 e 8 pode-se verificar que quanto mais potência aumenta a frequência de chaveamento diminui (Alves,2007).

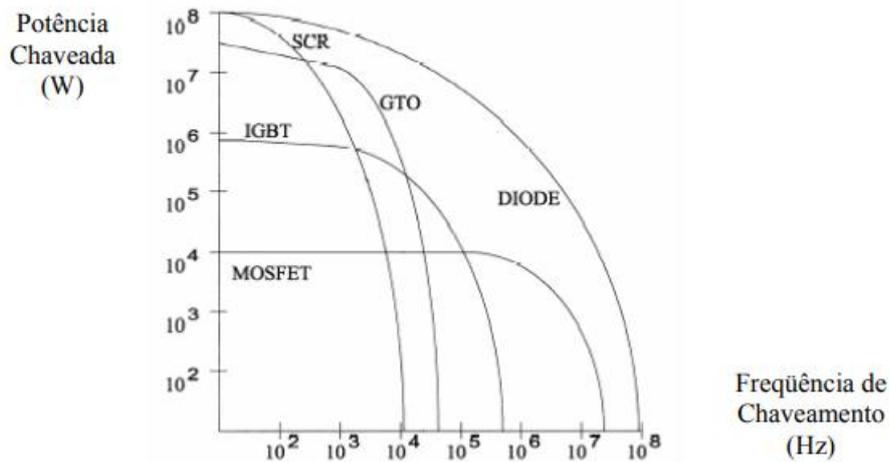


Figura 7: Potência Chaveada VS Frequência de chaveamento (Alves, 2007).

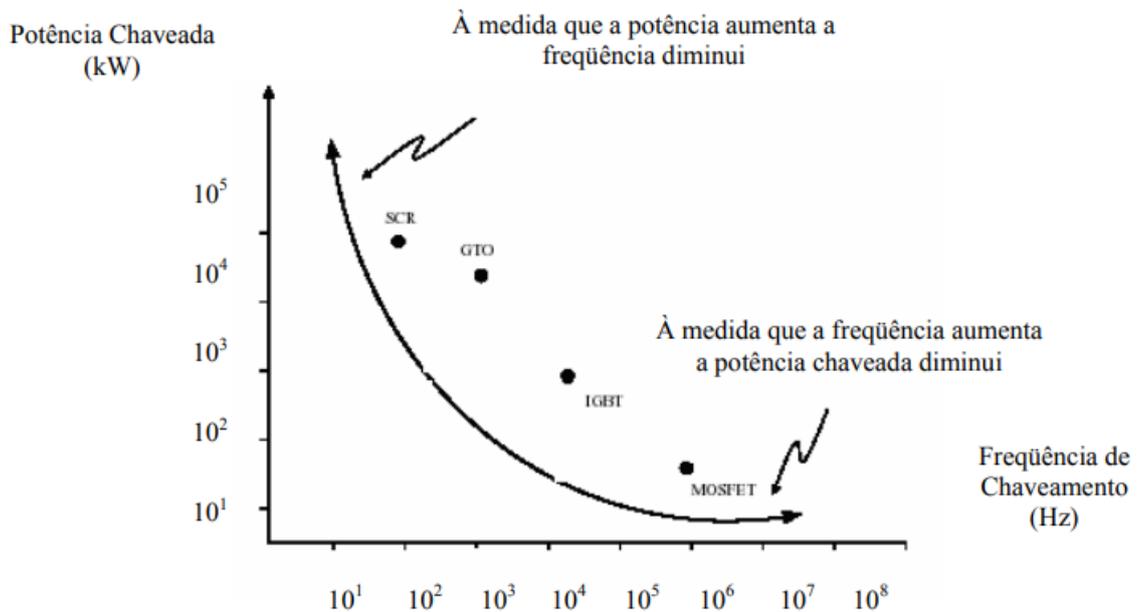


Figura 8: Potência Chaveada x Frequência de chaveamento (Alves, 2007).

Vale ressaltar que quanto menor for a utilização de filtros, nos circuitos de potência, menor será o peso e o volume do circuito, sendo estas especificações de suma importância

para um navio militar. Não obstante, a baixa demanda de filtros é obtida através de uma alta frequência de chaveamento (Alves, 2007).

Segundo Alves, com a descoberta do IGBT, tornou-se viável controlar efetivamente a velocidade de motores elétricos com alta potência, utilizando conversores de potência. Vale ressaltar ainda que, graças às inovações utilizadas nos conversores, desenvolveu-se os novos tipos de motores de indução multifásicos (Alves, 2007).

## **2.5 Conversores de Frequência Aplicados a Propulsão de navios**

Os conversores de frequência são utilizados para controlar a velocidade e o torque de motores elétricos. Esses dispositivos eletrônicos, comumente chamados de drives de velocidade variável ou inversores de frequência, quando aplicados a sistemas de propulsão naval garantem diversos benefícios como por exemplo:

- **Eficiência Energética:** Permitir ajustar a velocidade do motor de acordo com as necessidades operacionais, otimizando o consumo de energia e flexibilização operacional;
- **Redução de Desgastes:** Aumentar a vida útil dos componentes, devido ao controle suave proporcionado fazendo com que haja a redução no desgaste do sistema mecânico;
- **Redução de Vibrações e Ruídos:** Controlar precisamente a velocidade os ruídos e vibrações são reduzidos (Rashid, 2001).

### **2.5.1 Retificadores “*Direct Front End*” (DFE)**

O conversor DFE, figura 9, usa uma ponte retificadora de diodos para fornecer CC a partir da rede elétrica. Isso pode trazer benefícios como simplicidade e custo, mas gera uma alta taxa de distorção harmônica (THD) devido à falta de controle na retificação. Para reduzir harmônicos, é possível aumentar o número de pulsos dos retificadores, como na configuração padrão de seis pulsos. Múltiplos retificadores de seis pulsos conectados resultam em configurações de doze, dezoito, vinte e quatro e trinta e seis pulsos, usando transformadores defasadores para o ajuste das formas de onda de tensão, como pode ser notado na figura 10 (Rodrigues, 2018).

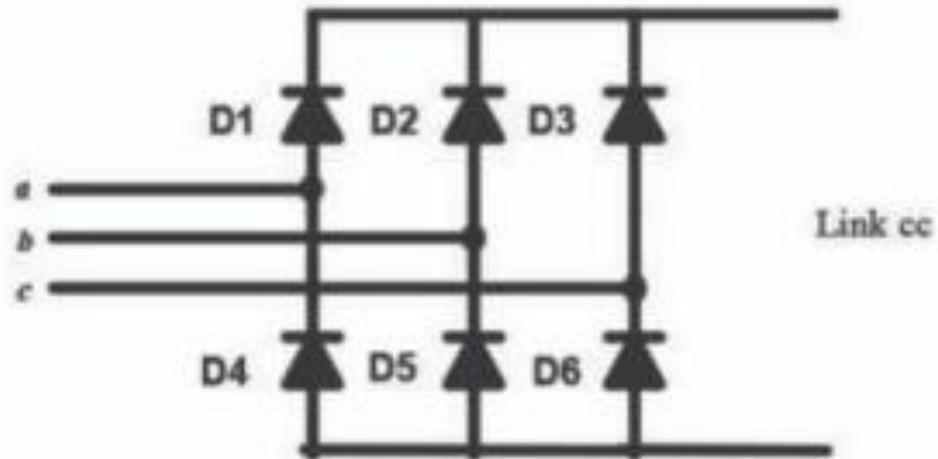


Figura 9: Conversor DFE (Cupertino, 2020).

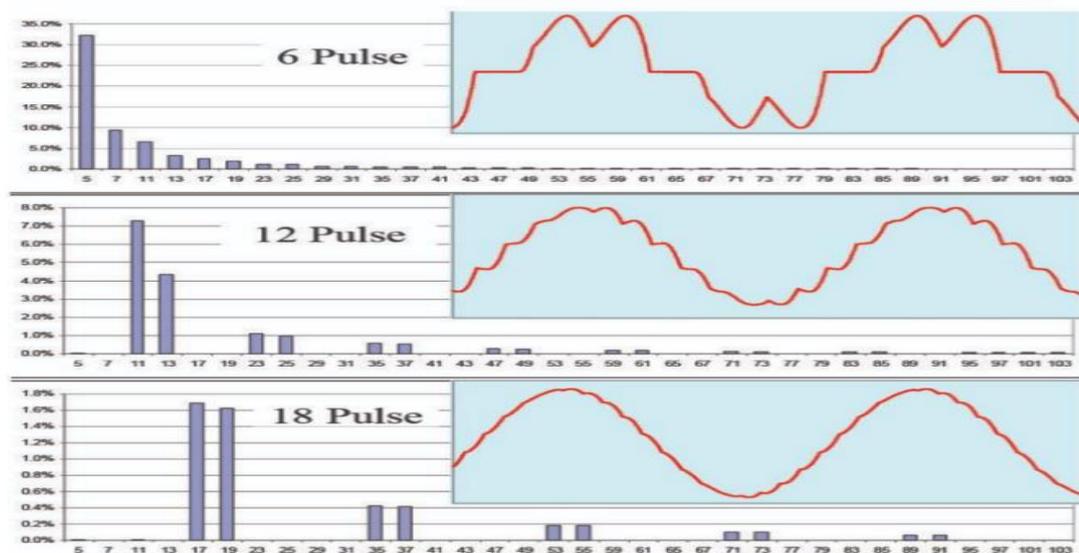


Figura 10: Efeito do aumento do número de pulsos (Cupertino, 2020).

### 2.5.2 Retificadores “Active Front End” (AFE)

Segundo Sulligoi, na última década, o sistema de propulsão começou a utilizar os retificadores AFE em detrimento dos DFE. Projetos que necessitam de uma melhor resposta ao comando, de um controle mais preciso e que utilizam sistema híbrido de propulsão (utilizam máquinas elétricas tanto como gerador como motor), Fragatas Italianas FREMM Figura 11, vem utilizando esta tecnologia que permite aos navios a utilizarem a energia oriunda da frenagem operativa na rede elétrica (Sulligoi et al., 2016).



Figura 11: Fragata Italiana FREMM (Site brasileiro Poder Naval).

Através da energia oriunda da rede elétrica, os retificadores AFE, Figura 12, provem corrente contínua, quando operando como motor, e regulam a energia para o sistema elétrico, quando operam como gerador. Contudo, o maior custo para aquisição, ao ser comparado com os retificadores a diodo, inviabiliza a utilização dos AFE em algumas aplicações (Rodrigues, 2018).

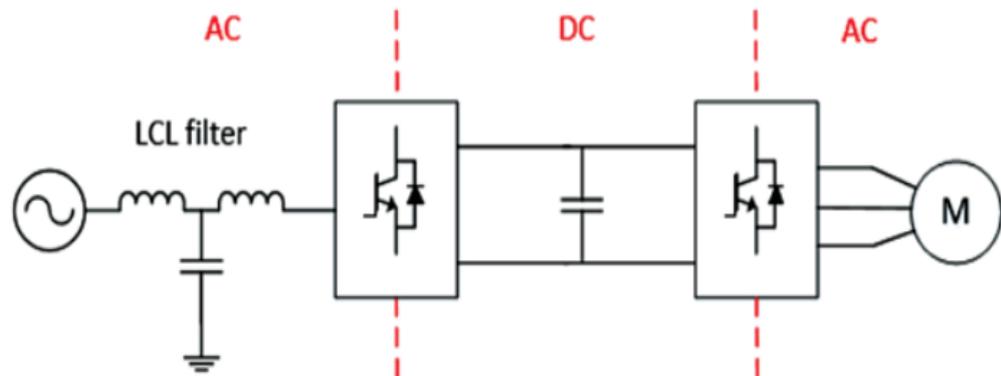
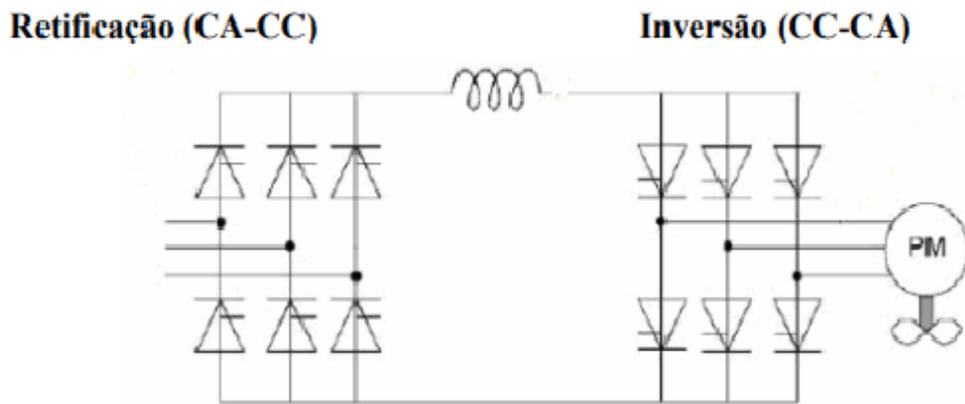


Figura 12: Conversor AFE (Wolff).

### 2.5.3 Inversor de Fonte de Corrente (“*Current Source Inverter*”)

Comumente chamado de inversor comutado de carga (“*Load Commutated Inverted*” – LCI), o CSI, Figura13, tem como característica a alimentação por um retificador e suavização por um indutor através do link CC. Quando utilizados em um motor síncrono, o CSI obtém a energia de comutação do enrolamento de campo do motor (Hansen et al., 2015).



**Figura 13: CSI alimentado por retificador (Alves,2007).**

Segundo Alves, é através da fonte de alimentação, que a seção retificadora, formada por tiristores, recebe a potência elétrica com frequência de 60 Hz e transforma em uma tensão contínua controlada (Alves, 2007). No que diz respeito à carga, o motor síncrono precisa entregar a tensão de comutação ao inversor, o que implica que ele deve operar com um ângulo de fase em modo capacitivo (Rodrigues, 2018).

#### **2.5.4 Inversor de Fonte de Tensão (“Voltage Source Inverter”)**

O Inversor de Fonte de Tensão (VSI) (Figura 14) conversor mais utilizado para acionamentos de propulsão e propulsores na última década, é alcançado por meio de um inversor, link CC e retificador. Seu princípio de funcionamento é através da convergência da frequência fixa em tensão CC, utilizando geralmente uma ponte de diodo (Retificador). A suavização da tensão de saída CC do retificador e o fornecimento de uma tensão CC estável ao inversor é realizado pelo banco de capacitores do barramento. Por conseguinte, inversor transforma a tensão CC constante em uma frequência e tensão variáveis, usando IGBTs (Hansen et al., 2015).

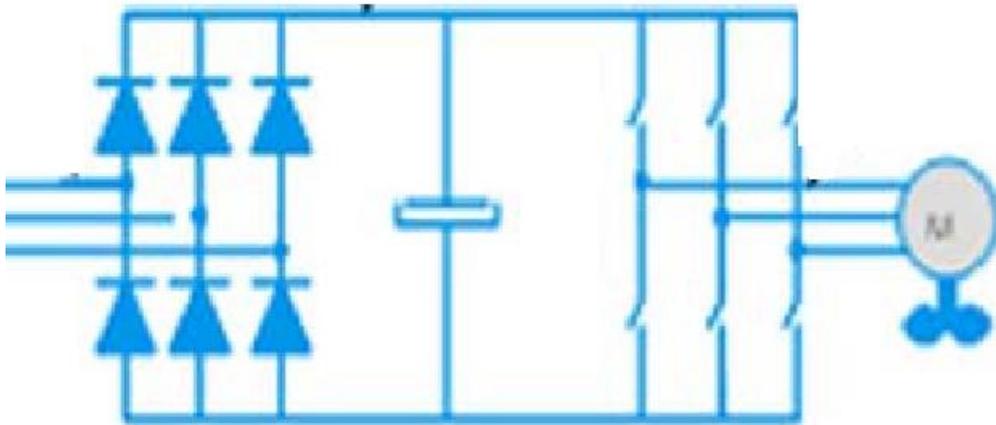


Figura 14- Inversor de Fonte de Tensão (Hansen,2015)

### 2.5.5 Cicloconversores

O cicloconversor (Figura 15) foi o primeiro dispositivo utilizado como eletrônica de potência para realizar a conversão de energia com a finalidade de controlar o torque ou rotação dos motores elétricos. Seu funcionamento é através da conversão direta de tensão e frequência constantes em grandezas variáveis, sem a necessidade de utilizar um link de CC (Alves,2007).

A utilização de várias pontes de conversão com a finalidade de conseguir altos valores de potência e a possibilidade de operar com altas sobrecargas são características vantajosas dos cicloconversores, contudo sua principal vantagem é o seu elevado torque a baixas velocidades (Alves,2007).

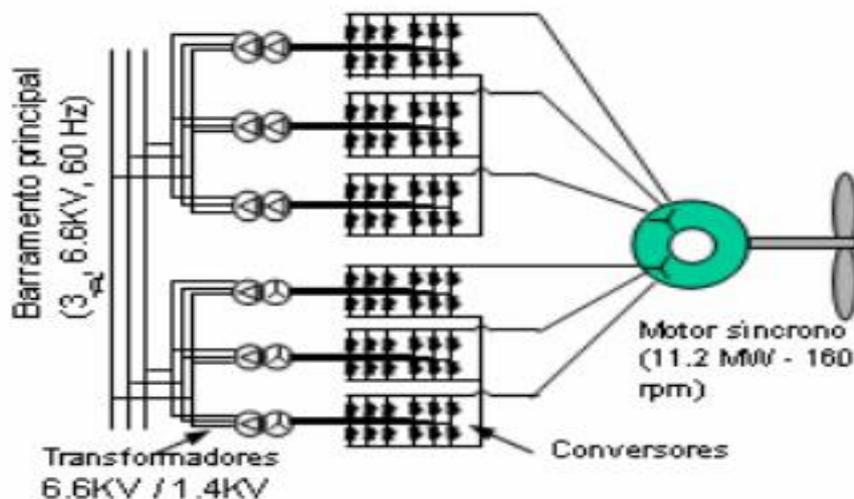


Figura 15: Cicloconversor (Alves, 2007).

## 2.6 Motores Elétricos aplicados a Propulsão de Navios

Com a crescente demanda por embarcações que utilizam sistemas de propulsão elétrica, tornou-se necessário o desenvolvimento de motores específicos para essa aplicação. Isso se deve ao fato de que a relação entre potência e tamanho é fundamental em contextos navais, uma vez que a otimização do espaço nos compartimentos das embarcações é uma necessidade constante (Rodrigues, 2018).

Assim, a busca por um aumento na densidade de potência dos motores é um tópico de grande relevância. Diferentes tecnologias de motores elétricos são empregadas na propulsão de navios, e, por conseguinte, uma análise criteriosa do perfil de operação da embarcação é essencial para escolher a opção mais adequada para uma aplicação específica (Rodrigues, 2018).

As principais tecnologias aplicadas aos motores elétricos de propulsão incluem motores de indução, motores síncronos, motores síncronos com supercondutores de alta temperatura (“*High-Temperature Superconductors*” - HTS) e motores CC homopolares. A seleção entre essas tecnologias depende das características operacionais da embarcação e dos requisitos específicos de potência e eficiência (Rodrigues, 2018).

### 2.6.1 Motores de Indução

Na indústria naval, os motores elétricos de indução desempenham um papel de destaque devido à sua ampla adoção, que é motivada pela sua relativa economia e pela simplicidade de sua construção. A facilidade de realizar manutenção e a confiabilidade desses motores os tornam uma escolha atraente para serem usados como fonte de propulsão em embarcações. É importante destacar que os motores de indução podem ser categorizados em dois grupos distintos: os motores de gaiola de esquilo e os motores de rotor bobinado. No entanto, devido às limitações físicas relacionadas ao espaço ocupado pelos motores de rotor bobinado, torna-se impraticável utilizá-los em sistemas de propulsão naval (Rodrigues, 2018).

Diante das consideráveis limitações físicas inerentes aos motores de indução de rotor bobinado, que tornam sua aplicação em sistemas de propulsão naval inviável, surge a necessidade premente de aprimorar a tecnologia dos motores de indução para uso nesse contexto desafiador.

Nesse sentido, a empresa ALSTOM, ao longo de um período de mais de 15 anos de pesquisa e desenvolvimento, liderou a iniciativa de conceber o Motor de Indução Avançado (Rodrigues, 2018). Este motor, que se distingue por possuir quinze fases, foi projetado para

atender às demandas específicas das aplicações navais, notadamente, a busca pelo aumento da densidade de potência e a redução da assinatura acústica. Essa tecnologia inovadora foi escolhida para alimentar o sistema de propulsão de navios da RN, incluindo os contratorpedeiros Type-45 e o imponente porta-aviões Queen Elizabeth II. Além disso, ela também foi adotada no navio de guerra de última geração da classe Zumwalt, o DDG-1000 da USN (Rodrigues, 2018).

### **2.6.2 Motores Síncronos**

O funcionamento desses motores baseia-se na eletricidade fornecida ao estator, que cria um campo magnético girante. Esse campo interage com o rotor, induzindo o movimento e fazendo o rotor girar à mesma velocidade da eletricidade fornecida. A velocidade do motor é fixa e depende da frequência da fonte de alimentação. Esses motores são ideais para aplicações que requerem uma velocidade constante.

Os motores síncronos desempenham um papel fundamental em aplicações navais comerciais, englobando desde navios cargueiros até cruzeiros. Dentro da categoria dos motores síncronos, os motores síncronos de ímãs permanentes se destacam como a escolha predominante para propulsão naval, devido à sua excepcional densidade de potência e funcionamento silencioso, característica necessária para a propulsão naval. Esses motores síncronos podem ser classificados em três tipos com base na direção do fluxo magnético: motor síncrono de fluxo axial, motor síncrono de fluxo radial e motor síncrono de fluxo transversal (Rodrigues,2018).

O motor síncrono de fluxo axial, apresenta um fluxo magnético que segue paralelo ao eixo do rotor, ou seja, na mesma direção. Ele consiste em um rotor magnético cilíndrico girando dentro de um estator também em formato cilíndrico. A adoção desse tipo de motor confere uma notável vantagem em termos de densidade de potência (Rodrigues,2018).

Por outro lado, o motor síncrono de fluxo radial segue os princípios convencionais das máquinas elétricas rotativas. Nesse caso, o fluxo magnético ocorre de forma radial, ou seja, ao longo do raio da máquina. (Rodrigues,2018).

Já o motor síncrono de fluxo transversal é um tipo de motor que usa um disco com uma borda que gira no meio de dois anéis conectados. Esse disco tem ímãs presos na sua beirada. No centro, existem bobinas enroladas como fios. Essas bobinas no centro funcionam junto com os ímãs nas bordas. Elas pegam a energia dos ímãs e a devolvem para o disco, fazendo

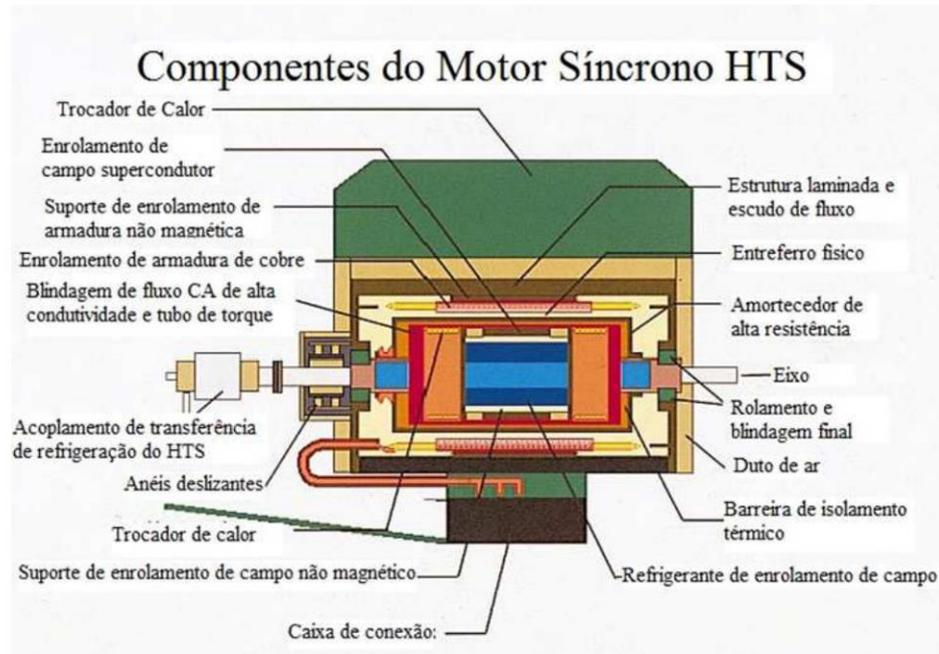
com que ele gire, ou seja, a energia é usada para fazer o disco girar e, assim, criar movimento (Rodrigues,2018).

Uma análise comparativa dos motores síncronos aplicados em veículos elétricos, como documentado em (Zhang,2018), demonstra níveis de eficiência notáveis nas três categorias de motores estudados. Resumidamente, o motor de fluxo axial apresenta a faixa mais ampla e elevada de eficiência ótima. Por sua vez, o motor de fluxo transversal mantém alta eficiência em uma ampla gama de velocidades, particularmente em aplicações com baixos torques e velocidades reduzidas (Rodrigues, 2018).

### **2.6.3 Motor Síncrono HTS**

Nos recentes avanços no campo da Supercondutividade de Alta Temperatura (HTS), surgiu uma categoria inovadora de motores síncronos denominados "super motores". Em comparação com motores tradicionais de potência equivalente, os motores equipados com tecnologia HTS apresentam notáveis benefícios, como redução de peso, menor custo, tamanho mais compacto e eficiência aprimorada. Além disso, eles contribuem significativamente para melhorar a estabilidade dos sistemas de energia de maneira geral (Rodrigues,2018).

A utilização de fios HTS, operando em temperaturas aproximadamente entre 35 e 40 K, consideravelmente mais elevadas em relação aos fios de Supercondutividade de Baixa Temperatura (LTS), permitiu simplificar e reduzir os custos dos sistemas de resfriamento. Isso também superou os desafios associados ao isolamento térmico em temperaturas tão baixas. Nos motores HTS, os condutores do estator são confeccionados com cobre convencional, enquanto os enrolamentos do rotor consistem em fios HTS. O resfriamento desses motores é realizado por meio de um sistema de criogenia que fornece fluido frio e retira fluido aquecido do rotor, sendo o nitrogênio líquido o meio de resfriamento utilizado (BASSHAM,2003). A Figura 16 mostra uma representação visual dos principais componentes desses motores.



**Figura 16: Principais componentes do Motor Síncrono HTS- Rodrigues, 2018.**

Em síntese, os progressos na tecnologia HTS têm desempenhado um papel de destaque na melhoria da eficiência e na redução de custos de motores síncronos. Esses avanços contribuem substancialmente para aprimorar a estabilidade e a eficiência global dos sistemas de energia (Rodrigues, 2018).

A literatura oferece diversas propostas de topologias para máquinas supercondutoras. Muitas delas empregam fios e fitas como elementos principais nos enrolamentos, bem como gaiolas e blocos sólidos que podem funcionar como ímãs permanentes. No entanto, é relevante destacar que os blocos sólidos apresentam desvantagens econômicas e tecnológicas em comparação com as fitas supercondutoras. A fabricação em larga escala de blocos sólidos não é comum, o que pode resultar em variações de qualidade entre diferentes amostras do material (Santos, 2019).

Por outro lado, as fitas supercondutoras são produzidas em escala industrial por diversos fabricantes. Isso torna as fitas uma opção mais viável em termos de disponibilidade e uniformidade do material. Conseqüentemente, há um interesse crescente na literatura em substituir blocos por fitas supercondutoras em diversas aplicações. Um exemplo recente é a proposta desenvolvida no Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), que sugere a utilização de laços de fitas em lugar de blocos em mancais magnéticos supercondutores (Santos, 2019).

Além disso, a substituição de blocos por fitas em máquinas de fluxo confinado tem sido objeto de investigação recente, com base em resultados promissores relacionados ao

confinamento de campo magnético em empilhamentos de fitas. Uma pesquisa de doutorado, realizada em colaboração entre o LASUP e o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), introduz uma topologia inovadora para uma máquina rotativa de fluxo confinado que incorpora empilhamentos de fitas supercondutoras de segunda geração (2G) no rotor (Santos, 2019).

O motor 2G HTS opera de duas maneiras: síncrono e assíncrono. Quando o torque da carga é maior que o torque de aprisionamento, o motor opera no regime assíncrono, ou seja, funciona como um motor de histerese, gerando perdas, apresentando escorregamento e, como resultado, o rotor não atinge a velocidade síncrona. Já quando o torque da carga é menor que o torque de aprisionamento, o motor gira na velocidade síncrona e sem perdas, em suma, opera como um motor síncrono (Dias et al, 2018).

#### **2.6.4 Motor Homopolar CC Supercondutor**

Os motores de CC homopolares empregam, assim como os motores síncronos HTS, a tecnologia de supercondutores para amplificar a intensidade dos campos magnéticos em comparação com as tecnologias convencionais de motores. Devido à sua natureza como motores CC, o sistema de acionamento é mais simples e, portanto, menos custoso (Basham,2003).

Reconhecendo as vantagens potenciais desse tipo de motor, houve uma concentração de esforços em seu desenvolvimento a partir da metade da década de 1970. A USN, em particular, liderou pesquisas nesse campo, conduzindo experimentos a bordo de uma embarcação de teste. Posteriormente, a tecnologia começou a ser testada em escala maior, utilizando cabos de supercondutores (Basham,2003).

É importante observar que os requisitos para aplicações militares são rigorosos em relação aos equipamentos utilizados a bordo. Portanto, a adoção de motores elétricos para propulsão naval progrediu de maneira mais gradual na indústria militar em comparação com os navios de uso civil. No entanto, tendências recentes, especialmente nas RN e USN, indicam que a constante evolução das tecnologias relacionadas aos motores elétricos garantirá sua adoção em larga escala nos próximos anos (Rodrigues,2018).

### **3 METODOLOGIA**

Neste estudo, será utilizada a metodologia de estudo de caso, uma abordagem apropriada quando o pesquisador busca uma compreensão ampla e concentra-se em questões conceituais, em contraste com uma abordagem estatística predominante. Essa metodologia possibilitará uma análise mais detalhada das temáticas em discussão, visando obter um entendimento mais abrangente e objetivo (Rocha, 2008).

A vantagem da propulsão elétrica em navios de guerra é um fenômeno em constante evolução e, além disso, é um tema altamente especializado. Nesse cenário, a escolha da metodologia de pesquisa se justifica devido à necessidade de estabelecer uma estrutura de investigação adequada. Realizar um estudo dessa natureza apresenta inúmeras vantagens, incluindo a possibilidade de contribuir para o desenvolvimento de novas teorias e aprimorar nossa compreensão de eventos reais contemporâneos. Vale ressaltar que muitos dos conceitos modernos nas áreas de gestão de operações e engenharia evoluíram a partir de investigações baseadas em estudos de caso (Souza, 2005).

#### **3.1 Classificação da Pesquisa**

Em relação à abordagem utilizada, quanto aos meios, essa pesquisa se enquadra como um estudo bibliográfico. Para alcançar os objetivos definidos, foram realizadas pesquisas por meio da consulta a monografias, artigos científicos e artigos de revistas militares. Quanto aos fins, com a finalidade de examinar os elementos qualitativos, mais especificamente em relação aos benefícios da propulsão elétrica nos navios de guerra, este trabalho buscou descrever o funcionamento dessa tecnologia e destacar sua importância nos meios navais das principais marinhas do mundo e da MB.

#### **3.2 Coleta e Tratamento de Dados**

Para a realização desta monografia, foi realizada uma pesquisa bibliográfica detalhada. Inicialmente, analisou-se minuciosamente os títulos e resumos dos estudos disponíveis, com o propósito de identificar e selecionar os materiais que mais se relacionavam com o tema de pesquisa. Em seguida, procedeu-se à leitura completa desses materiais, dando prioridade à escolha de monografias, artigos científicos e reportagens provenientes de sites militares, considerando-os fontes de informação valiosas e pertinentes para alcançar os objetivos propostos na pesquisa, que incluem a análise da planta elétrica do novo NApAnt e a proposta do consórcio Damen/Saab para a construção das Fragatas Classe Niterói.

## 4 DISCUSSÃO

Todos os sistemas de propulsão elétrica possuem quatro componentes fundamentais em comum: o dispositivo de acionamento principal (DSP), o gerador, o motor elétrico e o conversor associado (Alves, 2007).

Embora esses elementos sejam universais em sistemas de propulsão elétrica, a maneira como operam e como estão organizados pode variar consideravelmente. Quando se trata de selecionar a configuração de um sistema de propulsão elétrica, quatro aspectos principais merecem atenção (Newell, 2000):

- O tipo de energia elétrica utilizada entre o gerador e o motor elétrico (CA ou CC);
- O dispositivo de acionamento primário escolhido;
- A estratégia de controle do sistema de propulsão;
- A forma de controlar a velocidade (ajuste da tensão CC e/ou variação da frequência e tensão para aplicações em CA).

A seleção do dispositivo de acionamento primário é predominantemente determinada pelas dimensões e requisitos operacionais específicos da embarcação, variando de opções como turbinas a gás, motores a diesel ou motores a vapor. A maioria dos sistemas de acionamento principal em uso atualmente opera a uma velocidade constante, com as modificações na frequência ocorrendo na saída do conversor (Newell et al, 2000).

Aspectos essenciais a serem considerados na seleção do dispositivo de acionamento principal incluem tamanho, peso (incluindo calços), eficiência de consumo de combustível e custos operacionais, que englobam manutenção, estoque de peças sobressalentes, treinamento de pessoal e custos relacionados à indisponibilidade do navio durante reparos (Newell et al, 2000).

A estrutura da distribuição de energia dentro do navio também necessita de uma avaliação minuciosa. A prática mais comum nos ambientes marítimos hoje em dia envolve a distribuição de CA, que vai desde a geração de energia até o consumo final. (Alves, 2007)

Uma opção consiste na organização da distribuição de energia em zonas com CC, empregando um barramento para direcionar a eletricidade para diferentes áreas da embarcação, onde a tensão é regulada até o valor desejado. Dentro de cada zona de distribuição de CC, a energia pode ser transformada em CA e usada por dispositivos locais, muitas vezes em espaços de conforto do navio, como as áreas de convivência. Esse sistema de distribuição por zonas em CC simplifica o monitoramento e o controle eletrônico da corrente

elétrica, permitindo uma detecção praticamente instantânea de falhas e a rápida troca entre as fontes geradoras em operação. (Alves,2007).

Outro ponto importante a considerar na escolha da configuração da distribuição elétrica a bordo está relacionado à estratégia adotada durante a permanência do navio no porto, quando ele recebe energia de terra. Uma prática comum consiste em utilizar unidades geradoras de menor capacidade enquanto o navio está atracado, já que a demanda elétrica a bordo é significativamente menor nessa situação (aproximadamente 30% da carga total). (Alves, 2007).

#### **4.1 Principais Vantagens da Propulsão Elétrica**

Na comparação entre a propulsão elétrica e a propulsão convencional, é importante destacar que a propulsão elétrica traz uma série de vantagens significativas. Abaixo listamos os principais benefícios desse sistema (Arrington,1998):

- **Maior Flexibilidade no Arranjo do Navio:** Isso significa que é possível alocar motores, transformadores e conversores de frequência em compartimentos independentes, aumentando a flexibilidade no design do navio.
- **Precisão no Controle de Velocidade:** A propulsão elétrica permite um controle de velocidade muito mais preciso, graças à rápida resposta dos semicondutores de potência.

**Operação Silenciosa:** a propulsão elétrica proporciona uma operação consideravelmente mais silenciosa quando comparada com os sistemas de propulsão mecânica tradicionais.

- **Redução do Número de Geradores:** Maior eficiência em termos de recursos e espaço devido.
- **Menor Assinatura Acústica:** Isso contribui para reduzir a detecção acústica, tornando o navio menos detectável.
- **Economia de Combustível:** Os geradores operam próximo ao ponto de eficiência máxima na geração de energia elétrica, resultando em economia de combustível.
- **Redução de Custos de Manutenção:** A operação próxima ao ponto de eficiência reduz a necessidade de manutenção frequente, e um projeto bem planejado pode permitir a alternância das máquinas em algumas situações.
- **Versatilidade na Fonte de Energia:** A propulsão elétrica permite a utilização de várias fontes geradoras diferentes, incluindo geradores com diferentes fontes primárias.

A adoção da propulsão elétrica oferece uma série de vantagens que melhoram a eficiência, economia e flexibilidade das operações navais.

#### **4.1.1 Redução do consumo de combustível**

Em navios equipados com a tradicional propulsão mecânica, a velocidade do motor dita o ritmo da rotação do hélice. Isso significa que, em determinadas circunstâncias de operação da embarcação, o motor pode não operar na faixa ideal de eficiência, especialmente quando se navega em altas velocidades. Isso acarreta um uso ineficiente de combustível e um desgaste mecânico excessivo (Freire, 2004).

A propulsão elétrica soluciona esse dilema ao permitir que o motor principal opere no ponto de máxima eficiência, independentemente da velocidade com que o hélice gira. A eliminação da conexão mecânica entre o motor principal, que produz energia por meio da combustão de combustível, e o eixo da hélice resulta na quebra da relação direta entre a velocidade do eixo do motor principal e a rotação da hélice. De acordo com informações contidas no documento de referência (Whitman,2001), a USN calculou que a eficiência energética pode ser aprimorada em aproximadamente 17% em comparação com a propulsão mecânica convencional (Alves,2007).

Uma pesquisa conduzida com base na metodologia descrita em (Pereira,2006), que comparou três tipos diferentes de sistemas de propulsão em um navio gaseiro operando por um ano, revelou que a Propulsão Elétrica alcançou os resultados mais promissores e ofereceu as maiores vantagens em termos de economia de combustível (Figura 17) (Alves,2007).

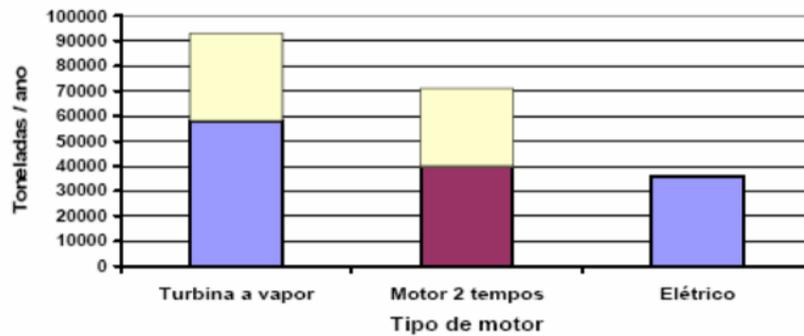


Figura 17: Consumo de combustível (Alves,2007).

### 4.1.2 Redução da emissão de poluentes

Seja devido à capacidade dos motores elétricos de operar eficientemente, como detalhado na seção acima, ou devido à crescente supervisão das emissões poluentes conforme regulamentos mais rigorosos, ou ainda devido à crescente conscientização e mudança de paradigma em relação ao impacto ambiental das atividades humanas, a redução das emissões poluentes no meio ambiente tem surgido como a principal vantagem na transformação do conceito tradicional das instalações de propulsão em navios (Lino,2021).

Pesquisas conduzidas pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Academia Naval dos Estados Unidos (USNA) confirmaram que a adoção de sistemas de propulsão elétrica em embarcações pode levar a uma diminuição de até 20% nas emissões poluentes liberadas na atmosfera, quando comparada aos sistemas de propulsão diesel convencionais (Bastos, 2019).

### 4.1.3 Redução dos custos operacionais e de manutenção

A operação altamente automatizada dos motores elétricos leva a intervalos de manutenção mais espaçados e menos frequentes. Reduzir a quantidade de equipamentos instalados ao eliminar motores auxiliares também ajuda a cortar custos operacionais, custos de manutenção e despesas relacionadas a reparos. A redução da equipe necessária para operar esses sistemas desempenha um papel fundamental na economia de despesas resultante da adoção de sistemas de propulsão elétrica (Lino,2021).

A substancial diminuição do número de componentes móveis nos motores elétricos, quando comparada aos motores de combustão interna, possibilita a manipulação de cargas de potência mais elevadas. Menos partes móveis se traduzem em maior eficiência de combustível, menores custos de aquisição, necessidades de manutenção reduzidas e exigências de mão de obra inferiores (Doerry et al., 2015).

#### **4.1.4 Redução da Tripulação**

Segundo Alves, A visão para o futuro da propulsão elétrica naval prevê uma ampla disseminação de sistemas auxiliares e componentes operados eletricamente, substituindo gradualmente os sistemas mecânicos, hidráulicos e pneumáticos. Os sistemas elétricos oferecem vantagens consideráveis em termos de controle remoto e são altamente compatíveis com dispositivos eletrônicos de controle. Essa direção aponta para uma maior automação, o que, por sua vez, levará a uma diminuição na tripulação, resultando em redução adicional dos custos operacionais (Alves,2007).

#### **4.1.5 Aumento da Capacidade de Sobrevivência do Navio**

Graças à capacidade da tecnologia integrada nos sistemas contemporâneos de detecção e controle de avarias, é viável otimizar a distribuição de energia elétrica de acordo com as necessidades oriundas da operação naval ou da gestão unificada de erros em seus sistemas. Isso proporciona a redução dos impactos provenientes dessas avarias e das pequenas falhas que ocorrem em sistemas hidráulicos tradicionais, viabilizando o funcionamento adequado e contínuo de todo o sistema da embarcação (Lino, 2021).

#### **4.1.6 Redução da Assinatura Acústica**

Uma das principais vantagens do sistema de propulsão elétrica em navios de guerra é a notável capacidade de evitar a detecção por parte de unidades adversárias, um fator de extrema relevância em ambientes de guerra anti-submarina (ASW). Devido à expressiva diminuição da assinatura acústica do meio naval. Essa melhoria decorre não apenas da eliminação do uso de sistemas de redução de engrenagens, mas também da ausência de acoplamento direto entre os motores a diesel e o sistema de propulsão. No lugar, utilizam-se motores elétricos que, em virtude de suas características, geram menos ruído e vibração em comparação aos sistemas mecânicos convencionais (Alves,2007).

O avanço da tecnologia na área de armazenamento de energia, aliado ao aumento da densidade energética, está impulsionando a crescente adoção de sistemas integrados de armazenamento de energia a bordo, como as baterias. A viabilidade da utilização desses sistemas proporciona aos navios a oportunidade de melhorar seus padrões de controle de ruído, diminuindo sua assinatura total, o que, por sua vez, amplia as chances de êxito no emprego de contramedidas contra ameaças inimigas (Lino,2021).

## 4.2 Propulsão Elétrica em navios de Guerra

Como mencionado anteriormente, os avanços na eletrônica de potência possibilitaram a viabilidade da propulsão elétrica em navios, contanto que se leve em conta as especificidades de cada embarcação. Portanto, é crucial considerar essa alternativa ao conduzir as avaliações para definir o sistema de propulsão. A capacidade de ajustar a velocidade das máquinas elétricas por meio de semicondutores de potência permite que as embarcações modifiquem sua velocidade ao longo da curva de potência, operando com eficiência próxima ao valor nominal (Rodrigues,2018).

A implementação de motores elétricos na propulsão naval está em constante evolução e, nos últimos anos, tem adotado abordagens inovadoras. O aumento da demanda por energia elétrica a bordo tem incentivado a busca contínua por soluções ideais que atendam às necessidades da embarcação, especialmente no que se refere à usina de energia, onde limitações de peso e espaço são desafios constantes nos projetos navais. Dentro desse contexto, a propulsão diesel-elétrica, que envolve motores a diesel acionando geradores elétricos que, por sua vez, alimentam os motores de propulsão (Figura 18), tornou-se obsoleta, uma vez que não proporciona a flexibilidade necessária exigida em projetos navais (Rodrigues,2018).

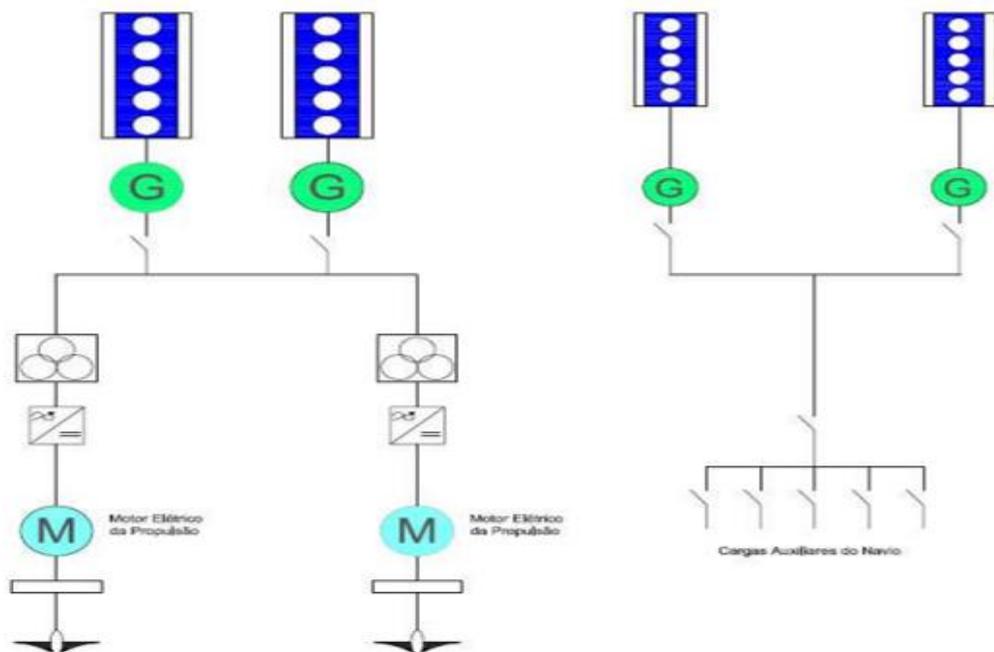


Figura 18: Esquema da propulsão diesel-elétrica (Rodrigues, 2018).

Para enfrentar esses desafios de projeto, foi introduzido o conceito de sistema de propulsão elétrica integrada (“*Integrated Electric Propulsion*” - IEP). Nesse sistema, as principais fontes geradoras da embarcação são responsáveis tanto pelo fornecimento de energia aos motores elétricos de propulsão quanto às cargas auxiliares a bordo. Em outras palavras, o sistema opera de maneira integrada (Figura 19). Esse design proporciona maior flexibilidade no projeto de energia, elevando o grau de confiabilidade do sistema e otimizando o espaço das praças de máquinas dos navios (Rodrigues,2018).

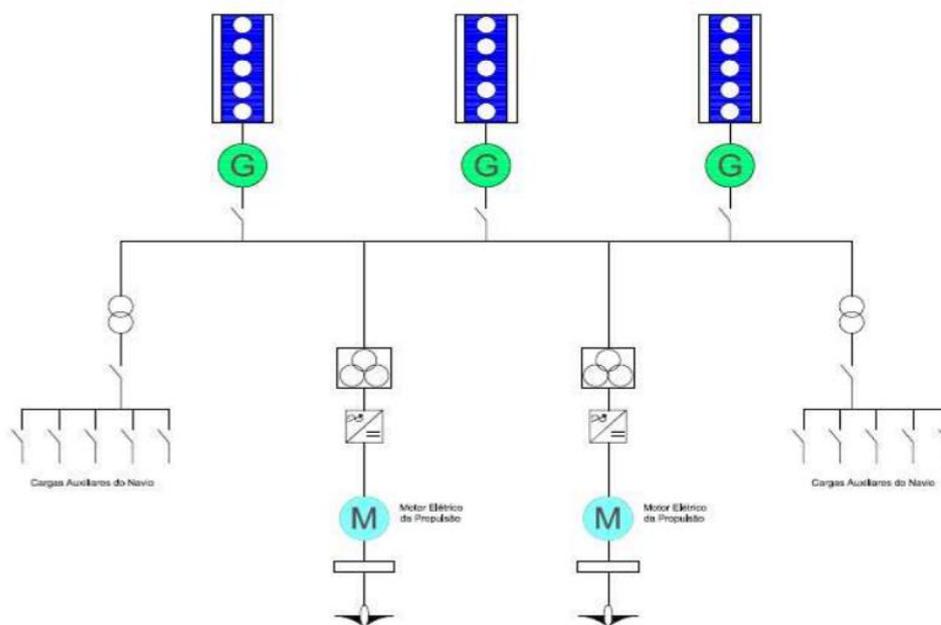


Figura 19: Esquema da IEP - (Rodrigues, 2018).

### 4.3 Propulsão Elétrica em navios de Marinhas Estrangeiras

Desde o final da Guerra Fria, a Força Naval Americana vem se empenhando na pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para operações de combate marítimo. Uma parcela considerável desses esforços tem como principal foco a inovação de sistemas e aparelhagem elétrica, garantindo completa integração (Rodrigues,2018).

Diversos fatores desempenham um papel relevante na decisão de adotar embarcações movidas à eletricidade, e a USN chegou a um patamar notável de experiência na concepção de projetos e na construção de navios equipados com sistemas de propulsão elétrica. Esse processo culminou na produção do contratorpedeiro USS Zumwalt, DDG 1000 (Figura 20), considerado o mais moderno navio já construído (Rodrigues,2018).



**Figura 20: USS Zumwalt DGC 1000 – (Rodrigues,2018)**

O DDG 1000 se destaca por ser o pioneiro no uso de um inovador Sistema de Energia Integrado, composto por dois geradores de turbina principal (MTG), dois geradores de turbina auxiliar e dois motores de 34,6MW, como podemos ver na Figura 21, com o propósito de aprimorar sua capacidade de sobrevivência (Navy, 2023).

A principal característica notável deste sistema é sua habilidade de fornecer energia para a propulsão, operações a bordo e sistemas de combate, tudo isso por meio dos mesmos motores principais, incluindo a turbina a gás. Isso traz benefícios na diminuição da assinatura acústica, aumenta a potência disponível para sistemas de armas e melhora a qualidade de vida da tripulação. A propulsão totalmente elétrica da classe Zumwalt também gera uma potência adicional de 58MW, o que permite a integração de futuras armas e sistemas de alto desempenho (Navy, 2023)

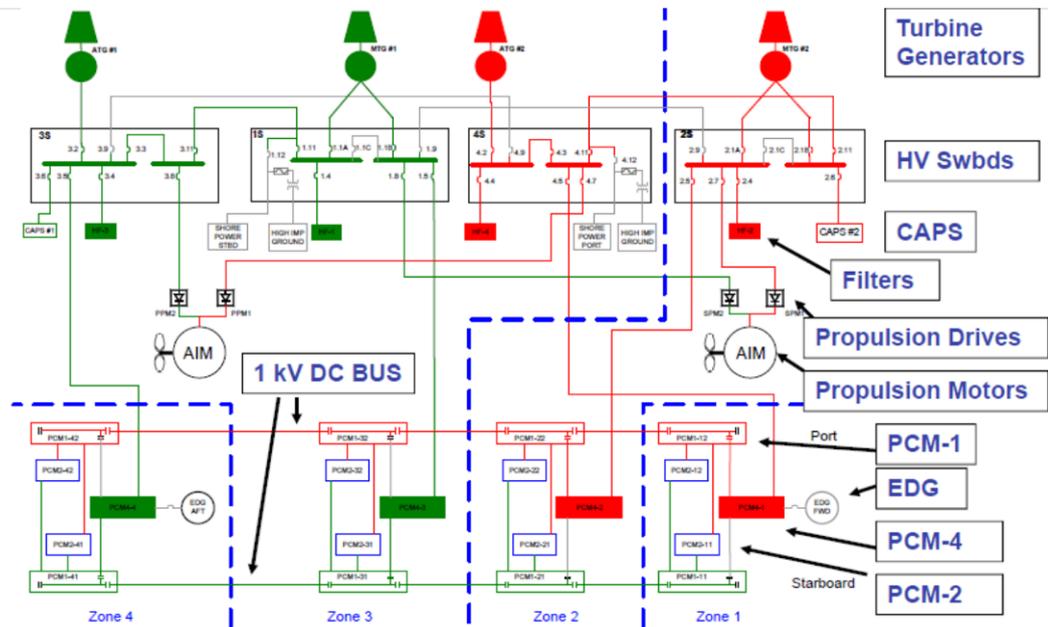


Figura 21: Planta elétrica do navio DGG 1000 - AMY et al, 2016.

No início de 1999, os ministérios da defesa da França e do Reino Unido concordaram em financiar um laboratório dedicado a testar equipamentos para navios elétricos. Esse projeto, chamado de “*Electric Ship Technology Demonstrator*” (ESTD), recebeu apoio do Direction générale de l'armement (DGA) e resultou na assinatura de um acordo técnico de cooperação entre os dois países em 2000, com ênfase em pesquisa e tecnologia de defesa (Rodrigues,2018).

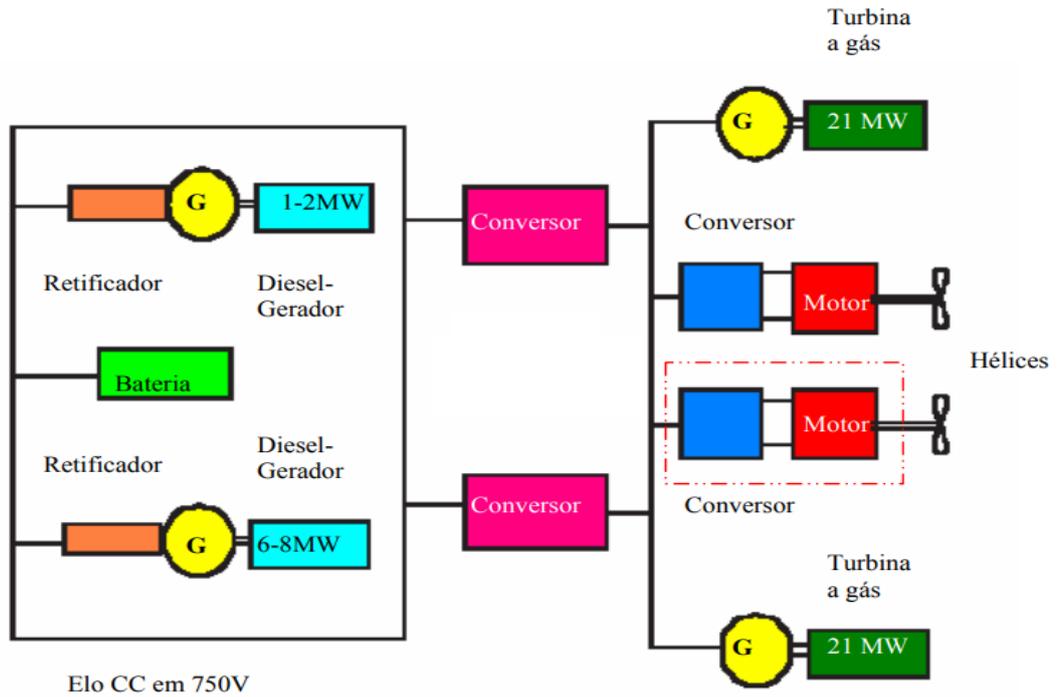
A implementação do ESTD levou em conta aspectos cruciais para a utilização de navios elétricos, tais como motores elétricos de alta potência adequados para as necessidades navais, geradores com baixa emissão acústica, capacidade de resistência a choques e desempenho consistente sob diversas condições de carga, bem como a confiabilidade do sistema de alta tensão em condições adversas, estabilidade da rede elétrica, qualidade da energia e a capacidade de integrar futuros sistemas de armas elétricas (Rodrigues,2018).

Os testes realizados no ESTD também abrangeram configurações propostas para os contratorpedeiros type-45 (Figura 22) da RN, que representam uma das classes mais modernas de navios na frota britânica e utilizam um sistema de propulsão baseado em motores de indução (Rodrigues,2018).



**Figura 22: Contratorpedeiro Type-45- (Rodrigues,2018).**

Segundo Alves, todos esses equipamentos, dos contratorpedeiros type-45, funcionam com CA de 4,16 kV. A ligação entre esse sistema de CA e o sistema de CC de 750 V é realizada através de dois retificadores/conversores de energia. O sistema de CC é composto por dois motores diesel-geradores com uma potência nominal menor(1-8MW). Esses motores acionam geradores para a geração de eletricidade, que posteriormente é convertida para alimentar os sistemas a bordo. Durante as paradas no porto, os geradores a diesel conseguem satisfazer completamente as demandas de energia reduzidas a bordo. As baterias foram projetadas para fornecer energia às cargas essenciais em momentos em que o sistema principal de alimentação do navio estiver inoperante, conforme mostrado na (Figura 23) (Alves,2007).



**Figura 23: Configuração Elétrica contratorpedeiro type-45(Alves,2007).**

Além disso, a RN equipou, com IEP, dois navios de assalto anfíbio, um navio auxiliar, dois navios-tanque e dois navios hidrográficos, bem como os porta-aviões da classe Queen Elizabeth (Figura 24) mais importante meio naval da RN, o que reflete um compromisso significativo com a tecnologia elétrica em sua frota (Rodrigues,2018).



**Figura 24: Porta aviões Queen Elizabeth (Rodrigues, 2018)**

Em 1997, a Marinha da França (MN) lançou o programa de construção de navios de assalto anfíbio da classe Mistral, optaram pela tecnologia IEP devido à necessidade da multifuncionalidade. Em 2006, o navio Mistral (Figura 25) foi comissionado, nomeando a classe. Em 2012, o navio Tonnere entrou em serviço, e o terceiro navio da classe, chamado

Dismude, também foi adicionado. A classe Mistral se destaca como uma das maiores da MN e é altamente inovadora, servindo como referência para futuros programas navais franceses (Rodrigues,2018).



Figura 25: Navio Mistral da MN (Rodrigues, 2018).

Além da RN, USN e DGA outros países investiram na propulsão elétrica como forma de reforçar sua força naval, como pode ser visto na Tabela 2 (Rodrigues, 2018). O Brasil já possui em sua frota o NSS Guillobel e, até 2025, contará com o NApAnt Almirante Saldanha. Importante mencionar que o consórcio Damen/Saab, composto por Damen Schelde, Saab AB, Consub Defesa e Tecnologia, e o estaleiro Wilson Sons, propôs um sistema de propulsão diesel-elétrico para as novas Fragatas Classe Tamandaré. No entanto, essa proposta foi preterida em favor do consórcio Águas Azuis.

País	Classe	Tipo de embarcação	Propulsão		
			Eixos	Motores	Tipo Motor/Propulsor
Reino Unido	Queen Elizabeth	Aeródromo	2	4 x 20MW	Indução Avançado/Embarcado
	Daring (Type-45)	Fragata	2	2 x 20MW	Indução Avançado/Embarcado
	Albion	Assalto Anfíbio	2	2 x 6MW	Síncrono/Embarcado

País	Classe	Tipo de embarcação	Propulsão		
			Eixos	Motores	Tipo Motor/Propulsor
	Wave	Tanque	1	2 x 7MW	-
	Bay	Assalto Anfíbio	2	2 x 4,4MW	Indução /Embarcado
	Echo	Hidrográfico	2	2 x 1,75MW	Ímã Permanente/Embarcado
EUA	Zumwalt	Fragata	2	2 x 34,6MW	Indução Avançado/Embarcado
	Lewis and Clark	Carga	1	2 x 11,3MW	Síncrono em tandem/Embarcado
	Healy	Quebra-gelo	1	2 x 11,2MW	Síncrono Duplo Enrolamento/Embarcado
França	Mistral	Assalto Anfíbio	2	2 x 7MW	Azimuth Thruster
Holanda	Rotterdam	Assalto Anfíbio	2	4 x 3MW	2 por eixo em tandem/Embarcado
Espanha	Juan Carlos I	Assalto Anfíbio	2	2 x 11MW	Azimuth Thruster
Austrália	Canberra	Porta Helicópteros	2	2 x 11MW	Azimuth Thruster
Japão	Shirase	Quebra-gelo	2	4 x 5,5MW	Indução /Embarcado
Alemanha	Planet	Pesquisa	2	4 x 1,04MW	Ímã Permanente/Embarcado
	Helgoland	Patrulha	2	2 x 3,8MW	Síncrono/Embarcado
Brasil	Guillobel	Socorro Submarino	2	4 x 2,6 MW	Azimuth Thruster

**Tabela 2: Principais navios que utilizam propulsão elétrica- adaptado (Rodrigues,2018).**

#### **4.4 Propulsão Elétrica em navios da Marinha do Brasil**

Os Navios de Socorro Submarino são meios que possuem sistemas e dispositivos especiais, com a missão de resgatar tripulações de submarinos em emergências, recuperar

material submerso e prestar apoio a operações de mergulho profundo. Além disso, eles dispõem de recursos materiais e humanos para a realização de diversas operações de mergulho, contribuindo para a segurança das atividades submarinas e a preservação do patrimônio da Marinha (Ferreia,2022).

Portanto, essas embarcações precisam planejar e projetar, de forma minuciosa, sua navegação, a fim de garantir que cumpram com êxito seu propósito (Ferreia,2022). Isso realça a importância deste estudo, que se concentra na estrutura, qualidade e vantagens da utilização de sistemas de propulsão elétrica.

O NSS Guillobel (Figura 26) utiliza um Sistema de Posicionamento Dinâmico (DSP) para oferecer suporte a plataformas submarinas e executar operações de mergulho profundo. Para alcançar esse objetivo, a prioridade foi desenvolver um sistema de propulsão que fosse robusto, seguro e preciso. Portanto, optou-se por adotar a propulsão elétrica, que agora é implementada com propulsores azimutais em tais navios, conforme pode ser visto na figura 27 (Ferreira, 2022).



**Figura 26: Navio de Socorro Submarino Guillobel (Poder Naval, 2023).**

Dado a importância crucial da manobrabilidade para um Navio de Socorro Submarino, a escolha da propulsão elétrica com propulsores azimutais se apresenta como a solução ideal para garantir a eficiência durante as manobras desse tipo de embarcação. O sistema de propulsão Azipod, por exemplo, oferece benefícios notáveis, como uma maior capacidade de manobra, uma vez que permite a geração de empuxo em qualquer direção, graças à capacidade do propulsor de girar 360° em qualquer posição. Além disso, facilita a contraposição às forças externas, como vento e correnteza. Vale mencionar que os

propulsores azimutais também reduzem os custos associados às manobras de atracação e desatracação, eliminando a necessidade de utilizar rebocadores (Ferreira,2022).

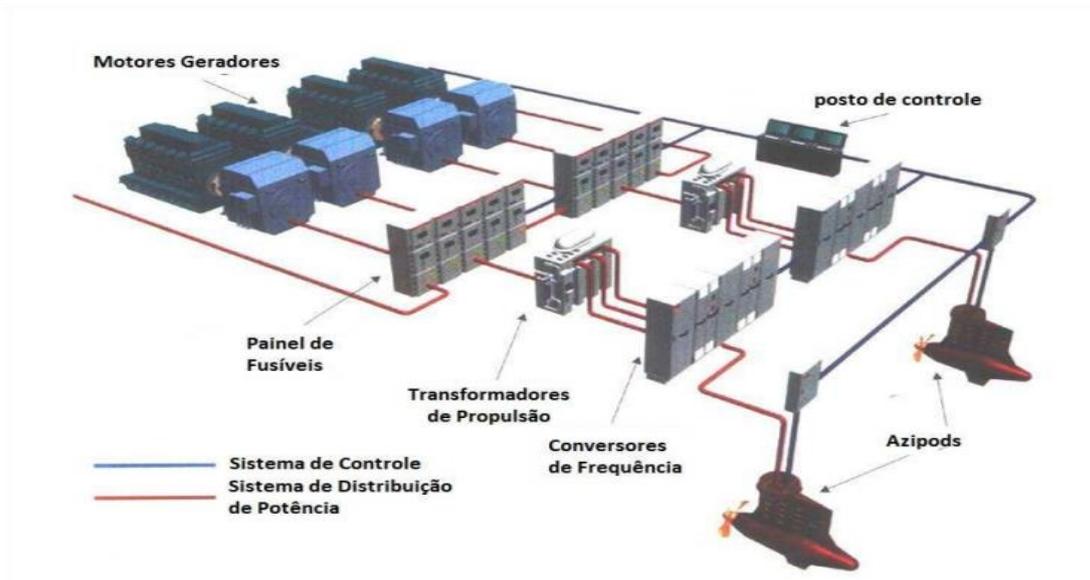


Figura 27: Planta Elétrica Propulsora com a tecnologia Azipods (Carvalho.I.S, 2016)

A importância estratégica de controlar e defender o Estreito de Drake e a Passagem do Cabo, juntamente com a relevância ambiental para o Brasil, destaca o papel significativo da Antártica para um país que busca desempenhar um papel de destaque na cena global e está em proximidade com o sexto continente (Penha,2022). Nesse contexto, o Brasil iniciou a construção do Navio Polar Antártico Almirante Saldanha, com previsão de entrega até o ano de 2025.

O projeto do novo NApAnt inclui 3 grupos geradores a diesel Wärtsilä 32 (Figura 28), um sistema de conversão de energia diesel-elétrica e dois sistemas de propulsão de proa (*bow thruster*), além do sistema de gerenciamento de energia. De acordo com a empresa, o desempenho é otimizado devido à solução de baixas emissões, resultando em alta redundância e disponibilidade, que se traduzem em menor consumo de combustível e períodos maiores entre as revisões (Wiltgen, 2023).



Figura 28: Wartsila 32 (Wiltgen, 2023).

O conteúdo da planta elétrica e do sistema de propulsão está protegido por um contrato de confidencialidade, e, portanto, não está disponível para divulgação até a conclusão deste estudo. No entanto, para ter uma ideia de como o novo NApAnt vai operar, segue abaixo a figura 29 (Wiltgen, 2023).

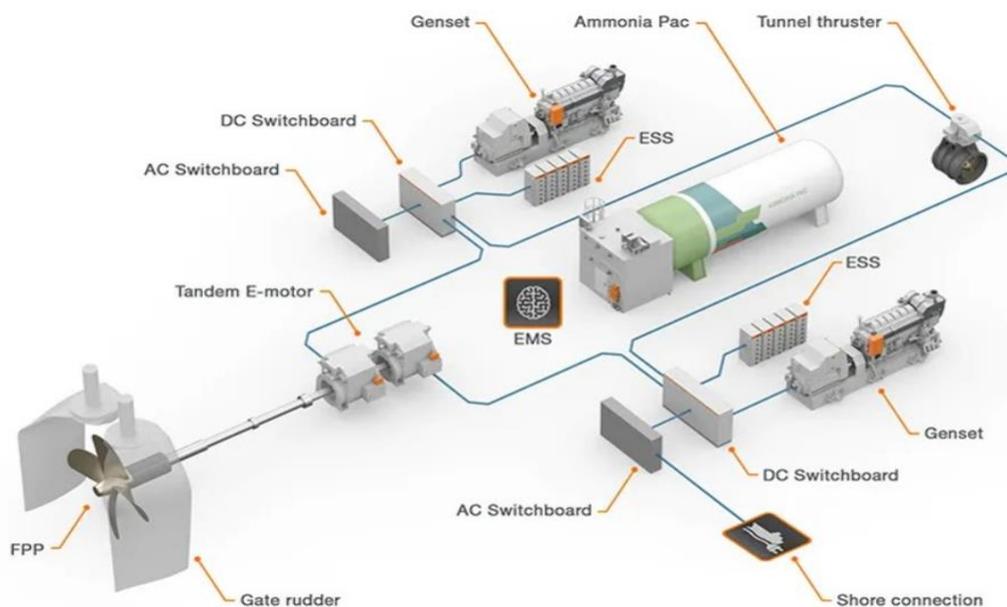


Figura 29: Escopo do projeto planta elétrica propulsora do NApAnt - (Wiltgen, 2023).

O Tandem E-motor se refere a um sistema de propulsão que utiliza dois motores elétricos em tandem, o que significa que eles estão posicionados em série.

Caso a proposta do consórcio Damen/Saab para a construção das novas Fragatas Classe Tamandaré fosse aceita, representaria o início da era da propulsão elétrica na MB. Conseqüentemente, é de extrema importância fornecer uma descrição detalhada do escopo apresentado às autoridades navais.

O estilo propulsivo “*Combined Diesel Or Electric*” (CODOE) do navio proposto consiste em dois eixos com dois hélices. Este sistema compreende dois motores diesel auxiliares, cada um com cerca de 1MW de potência, e dois motores diesel maiores, cada um com aproximadamente 10MW de potência. Ambos os motores maiores estão conectados à caixa de engrenagens, permitindo que ambos acionem os dois eixos (De Martini,2018).

Para alcançar uma operação de cruzeiro econômica, onde o navio navega a velocidades em torno de 14 nós, proporcionando um alcance de 5.000 milhas náuticas, os dois motores diesel maiores permanecem desligados. A propulsão da embarcação é efetuada por meio de dois motores elétricos que estão conectados aos dois eixos. Esses motores recebem sua alimentação elétrica a partir da eletricidade gerada por quatro motores auxiliares, que desempenham o papel adicional de produzir energia para outros sistemas da embarcação. (De Martini,2018).

É importante destacar que em projetos contemporâneos, a utilização de motores elétricos alimentados por geradores a diesel pode proporcionar operações de baixo ruído em velocidades reduzidas, o que é particularmente relevante em contextos de guerra antissubmarino (De Martini,2018).

Por outro lado, para alcançar a velocidade de pico, em torno de 26 nós, os motores elétricos não entram em operação. Em vez disso, os dois motores diesel maiores, com 10MW de potência cada, são ativados e conectados à caixa de engrenagens, justificando a segunda letra "O" na sigla CODOE (De Martini,2018).

## **4.5 Perspectiva Futura**

### **4.5.1 Densidade Energética das bancadas de baterias**

Segundo Lino, as baterias estão passando por um notável progresso, caracterizado por avanços não apenas na escolha de materiais mais sustentáveis, mas também no aumento de seu tamanho e densidade energética (Lino ,2021).

Esse segmento tecnológico está evoluindo de maneira constante, melhorando tanto a quantidade de ciclos de carga quanto a capacidade de armazenamento de energia. Esse avanço tecnológico, combinado com a constante redução dos custos por unidade de energia, está

tornando viável o uso predominante de sistemas de armazenamento de energia em grandes navios, atendendo a diversas áreas de operação, ao mesmo tempo que mantém altas taxas de reciclagem, superiores a 90% (Bjorn-Johan et al, 2017).

A densidade energética de uma bancada de baterias, composta por íons de lítio, níquel, cobalto e alumínio (NCA), atualmente varia de 0,14 a 0,38 kg/kWh. Isso significa que uma bateria convencional com uma capacidade de 9 MWh pode pesar até 5,5 toneladas. No entanto, as projeções para os próximos 10 anos indicam que uma composição química de íons de níquel, manganês e cobalto (NMC) poderá atingir uma densidade de 0,09 kg/kWh, reduzindo o peso total para menos de 1 tonelada. Isso oferece vantagens significativas em termos de design (Lino, 2021).

#### **4.5.2 Tecnologia MVDC**

O setor marítimo é o pioneiro para a pesquisa e desenvolvimento dos sistemas de energia Média Tensão de Corrente Contínua (MVDC), utilizando grandes investimentos com o intuito de avançar nessa tecnologia. Atualmente, os navios, que utilizam propulsão elétrica, contam com um Sistema de Energia Integrado (IPS) baseado em distribuição de Média Tensão de Corrente Alternada (MVAC). Um avanço promissor para melhorar o desempenho do IPS é através da troca de sistemas de energia de MVAC para MVDC (Castellan et al, 2017).

Um sistema de energia a bordo concentra-se em alcançar alta densidade de potência, maior qualidade de serviço e configuração avançada. Ao projetar um navio com um sistema MVDC, é crucial considerar três aspectos fundamentais: propulsão elétrica, IPS e a implementação de geradores compactos e inovadores (Castellan et al, 2017).

Como visto na figura 30, os motores de propulsão do navio são acionados a partir do barramento de distribuição CC usando inversores de velocidade variável. Esses inversores têm a capacidade de operar em ambas as direções, permitindo que a energia regenerativa gerada durante as manobras do navio seja redirecionada para outras cargas no barramento de distribuição MVDC ou dissipada por meio de bancos de carga resistiva (IEEE Industry Applications Society, 2018).

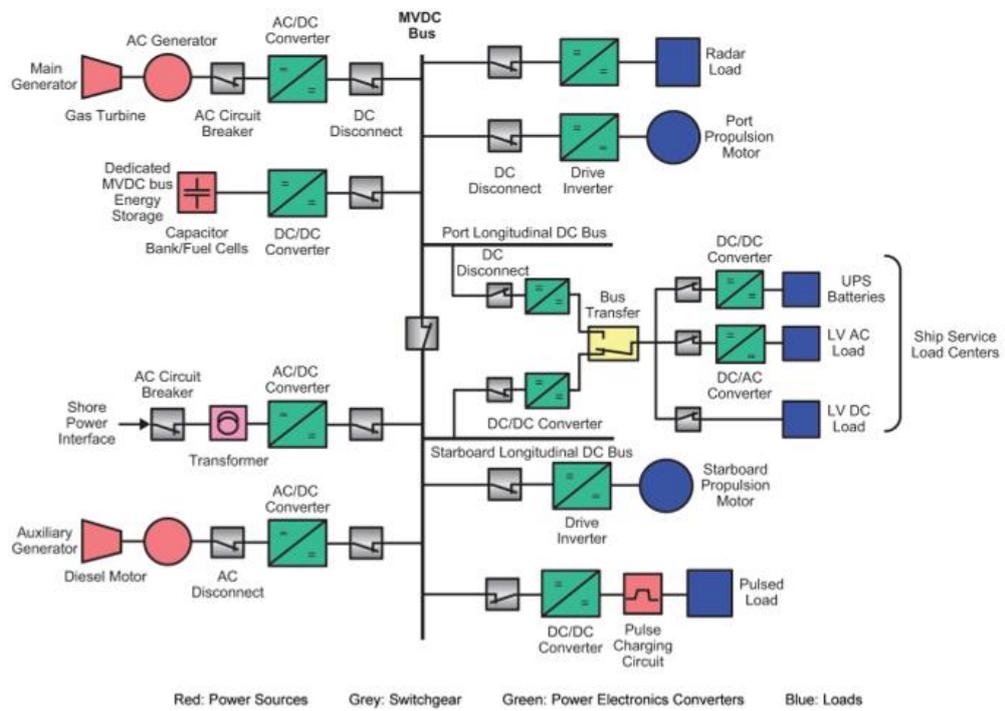


Figura 30: Diagrama em blocos de uma planta elétrica MVDC – (IEEE Industry Applications Society, 2018).

## 5 CONCLUSÃO

O sucesso na construção dos navios DGG 1000, contratorpedeiros Type 45 e porta-aviões Queen-Elizabeth é a prova que as marinhas mais desenvolvidas estão investindo nesta tecnologia para o reaparelhamento de sua frota. Não obstante, vale elucidar que a tecnologia MVDC está surgindo de forma a revolucionar os meios navais. A figura 31 mostra o futuro esperado pela USN.

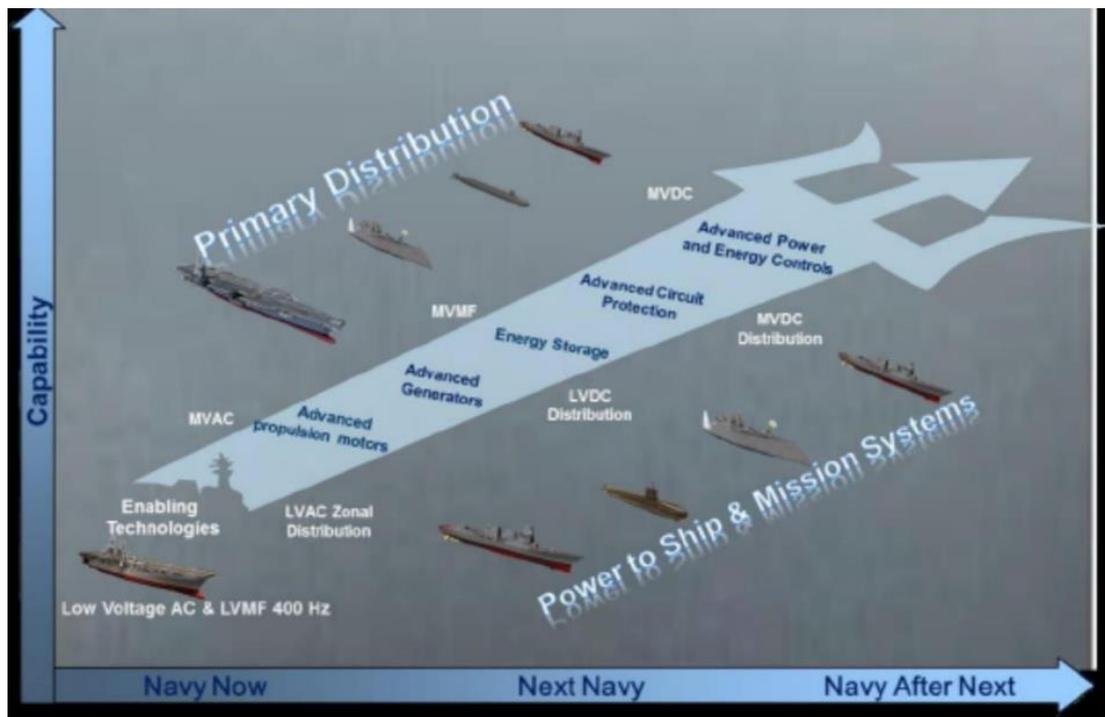


Figura 31 - Avanço tecnológico esperado pela USN- (Amy et al, 2019)

A incorporação de sistemas de propulsão elétrica em navios de guerra traz consigo várias mudanças. Quando essas mudanças são integradas em cenários específicos, elas proporcionam diversas vantagens em termos de desempenho da missão do navio. Além disso, também oferecem benefícios significativos em relação às restrições orçamentárias enfrentadas pelo País (Lino,2021).

Nesse contexto de restrições orçamentárias, a vantagem decorrente da diminuição da tripulação confronta a necessidade da MB. A Lei 13.954, aprovada em 16 de dezembro de 2019, determina que ao longo de um período de até 10 anos, a MB reduza 10% do efetivo militar. Em resumo, isso resulta em um contingente menor para conduzir operações navais, o

que levanta a necessidade urgente de garantir a manutenção da capacidade operacional dessas forças.

Outro benefício importante é a eficiência energética. Os sistemas de propulsão elétrica podem ser otimizados para minimizar o consumo de combustível, reduzindo os custos operacionais e estendendo a autonomia das embarcações. Além disso, a capacidade de regeneração de energia, presente em alguns sistemas elétricos, pode recuperar parte da energia durante a frenagem, contribuindo para uma operação mais eficiente.

A flexibilidade que ela proporciona em relação às fontes de energia. Isso permite que as embarcações da Marinha sejam alimentadas por uma variedade de fontes de energia, incluindo motores a diesel, motores a gás natural, turbinas a gás, energia nuclear, bem como sistemas de baterias. Essa versatilidade facilita a adaptação a diferentes missões e cenários, garantindo maior autonomia operacional.

A propulsão elétrica também oferece vantagens em termos de manutenção e confiabilidade. Os motores elétricos são geralmente mais simples, com menos peças móveis em comparação com motores a combustão interna, reduzindo a necessidade de manutenção. Além disso, o controle eletrônico permite maior precisão no gerenciamento do sistema de propulsão, o que resulta em uma operação mais confiável.

Por fim, do ponto de vista ambiental, a propulsão elétrica contribui para a redução das emissões de poluentes e do impacto ambiental. Isso é particularmente importante em um momento em que as questões de sustentabilidade e proteção do meio ambiente estão no centro das preocupações globais.

## **5.1 Considerações Finais**

A MB incluirá o NApAnt Almirante Saldanha em sua frota, até o ano de 2025, um avanço que proporcionará a muitos oficiais e praças da MB a oportunidade de se familiarizarem com essa tecnologia. Vale destacar que apenas um percentual menor que 50% dos oficiais maquinistas têm acesso a matérias de vital importância para operar esse tipo de propulsão durante o curso de aperfeiçoamento avançado em sistemas de controle e eletricidade.

A capacitação do pessoal para operar e manter sistemas complexos é o grande desafio. Adestramentos e aquisição de conhecimento especializado são necessários para garantir que a tecnologia seja aproveitada ao máximo, aumentando a eficácia das embarcações e garantindo sua prontidão em situações combatente.

Em suma, exige um planejamento cuidadoso, investimentos em treinamento e infraestrutura e um estudo profundo dos impactos estratégicos. A MB tem a oportunidade de se posicionar como uma força naval moderna, contudo para isso requererá um compromisso sério com a adaptação às novas tecnologias e às dificuldades que elas proporcionam.

## **5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos**

A propulsão elétrica tem sido uma parte integral dos meios navais, proporcionando eficiência, versatilidade e confiabilidade em suas embarcações. À medida que as tecnologias avançam e a busca por soluções mais sustentáveis se intensifica, novos trabalhos de monografia podem se concentrar em explorar a propulsão elétrica sob diferentes ângulos e prever o futuro desta tecnologia na MB. Segue algumas sugestões:

**Adaptação de Tecnologia:** Estudo de viabilidade da adaptação de tecnologias de propulsão elétrica existentes na MB, considerando as especificidades das águas nacionais e das missões navais. Isso pode incluir a análise de sistemas já implementados e a identificação de áreas de melhoria.

**Estudos de Viabilidade Técnica e Econômica:** Realização de estudos de viabilidade abrangentes que considerem fatores técnicos e econômicos para a implementação de sistemas de propulsão elétrica em diferentes classes de embarcações da MB.

**Desenvolvimento de Estratégias de Transição:** Propostas estratégicas para a transição gradual de sistemas de propulsão convencional para sistemas elétricos em meios de superfície da MB. Isso poderia incluir cronogramas, orçamentos e planos de treinamento para garantir uma transição eficaz.

## 6 REFERÊNCIAS

AHMED, A., 2000, Eletrônica de Potência, Prentice Hall, São Paulo, Brasil.

ALVES, R. N. Propulsão Elétrica de Navios [Rio de Janeiro] 2007 XXI, 180p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2007) Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

AMY, J. Jr. DOERRY, N. U.S. Navy IEEE Electric Ship Technology Symposium (ESTS 2019) Arlington, VA August 13, 2019.

ANDRADE, B. BIAZON, T. O transporte marítimo e o uso sustentável do oceano – jornal da USP. Disponível em: <https://jornal.usp.br/artigos/o-transporte-maritimo-e-o-uso-sustentavel-do-oceano/>. Acesso em 22/10/2023.

ARRIGTON, 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.

BASSHAM, B. A. 2003, An Evaluation of Electric Motors for Ship Propulsion, 91 Master of Science in Electrical Engineering, Naval Postgraduate School (NPS), Monterey, California, USA.

BJORN-JOHAN, V., SVERRE, E. OYSTEIN, A. (2017). Battery-Powered Ships.

CARVALHO, I. S. Comparação de Eficiência Entre Propulsão Azipod E Propulsão Diesel em Navios Mercantes. Monografia. Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro. 2013. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000005/00000554.pdf>. Acesso em 10/10/2023.

CASTELLAN, S. MENIS, R. TESSAROLO, A. LUISE, F. MAZZUCA, T. A review of Eletronics equipment for all-eletric ship MVDC power system- Elsevier 2017.

CUPPERTINO, A. F. Medium voltage industrial variable speed drives. Ano de 2020. Disponível em: <https://www.ee.co.za/article/medium-voltage-industrial-variable-speed-drives>. Acesso em: 15/10/2023.

CNO EXECUTIVE BOARD, 2001, Executive Summary Roadmap to an Electric Naval Force, Naval Research Advisory Committee.

DE MARTINI, F. N. Classe Tamandaré: mais detalhes da proposta da Damen, Saab e Wilson Sons – Poder Naval. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2018/07/11/classe-tamandare-mais-detalhes-da-proposta-da-damen-saab-wilson-sons/>. Acesso em 10/10/2023

DIAS, F. J. M., POLASEK, A., DE ANDRADE, R., RODRIGUEZ, E. COSTA, F. SOTELO, G.G. Synchronous-hysteresis superconducting machine with stacks of second generation tapes In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2018, pp. 1–5. DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395656. Maio de 2018.

DOERRY, N., AMY, J. KROLICK, C. (2015). History and the Status of Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends in the U.S. Navy. Proceedings of the IEEE.

ERICKSEN, T. HINGORANI, N. KHERSONSKY, Y., “Power Electronics and Future Marine Electrical Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, N° 1, pp. 155-163, Jan. / Feb. 2006.

FOTOS: Navio de Socorro Submarino ‘Guillobel’ em testes – Poder Naval. Disponível em: <https://www.naval.com.br/blog/2020/08/08/fotos-navio-de-socorro-submarino-guillobel-em-testes/>. Acesso em 09/10/2023.

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.

IEEE Industry Applications Society – Recommended practice for 1kV to 35 kV medium-voltage DC power system on ships – 2018.

INTERNACIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). Fourth IMO GHG Study: Executive Summary. IMO: London, 2020. Disponível em: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Fourth%20IMO%20GHG%20Study%202020%20Executive-Summary.pdf>. Acesso em: 10/08/2023.

FERREIRA, K.C. Propulsão Elétrica nos Navios de Socorro Submarino da Marinha do Brasil Revista SIMEP, João Pessoa, v2, n.1, p. 158-171 jun 2022.

KOUMENTAKOS, A. G. (2019). Developments in Electric and Green Marine Ships. Disponível em: [www.mdpi.com/journal/asi](http://www.mdpi.com/journal/asi). Acesso em 15/08/2023.

LINDSEY, R. DAHLMAN, L. (2021). Climate Change: Global Temperature. Disponível em: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>. Acesso em 09/08/2023.

LINO, D. F. S. M. B. Sistemas de Propulsão Elétrica - Estudo de Viabilidade. Dissertação (Mestrado em Ciências Militares Navais, especialidade de Marinha) - Escola Naval , Alfiinete, 2021.

McCOY, T., J., 2002, “Trends in Ship Electric Propulsion”, Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 343-346, IEEE.

NEWELL, J., M., YOUNG, S., S., 2000, “Beyond Electric Ship”, Transactions IMarE, Vol. 112.

PENHA, L.O.C KLECHA, D.A. BRASIL ANTÁRTICO: AS ATIVIDADES LOGÍSTICO-OPERACIONAIS DE HOJE E AS OPORTUNIDADES DE MELHORIAS PARA O FUTURO, EM FACE DAS POSSÍVEIS SITUAÇÕES DE ANORMALIDADES, Escola Superior de Defesa, Brasília, 2022.

PEREIRA, N. N. BRINATI, H. L. 2006, “Estudo do Impacto da Propulsão Diesel-Elétrica Na Emissão de Gases Poluentes”, 22º Congresso Nacional de Transporte Marítimos, Construção Naval e Offshore – EXPONAVAL 2006, Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA.

RASHID, M. H., 2001, Power Electronics Handbook, Academic Press, USA.

ROCHA, D. A. B. F. Formação e Monitoramento de Juristas leigos. A Experiência de uma ONG com a Educação Popular na Região Sisaleira da Bahia. Bahia. 2004

RODRIGUES, T.A., Niterói, 2018, Efeito da Inserção de Propulsão Elétrica na Qualidade de Energia Elétrica em Navios, tese de mestrado.

SANTOS, B. M. O. Simulação de Máquinas Supercondutoras de Fluxo Aprisionado com Fitas de Segunda Geração. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

SOUZA, R. Case Research in Operations Management. EDEN Doctoral Seminar on Research Methodology in Operations Management, Brussels, Belgium, 31st Jan.-4th Feb, 2005.

SULLIGOI, G. VICENZUTI, A. MENIS, R. All-Electric Ship Design: From Electrical Propulsion to Integrated Electrical and Electronic Power Systems. IEEE, 2016.

WALKER, T. R., ADEBAMBO, O., DEL AGUILA, M. C., ELHAIMER, E., HOSSAIN, T., EDWARDS, S. J., MORRISON, C. E., ROMO, J., SHARMA, N., TAYLOR, S. ZOMORODI, S. (2018). Environmental effects of marine transportation (Second Edi). Elsevier Ltd. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805052-1.00030-9>. Acesso em 05/09/2023.

WHITMAN, E. C. “The IPS Advantage. Electric Drive: A Propulsion System for Tomorrow’s Submarine Fleet?”, Sea power Magazine, Jul. 2001.

WILTGEN, G., Wartsila é selecionada para fornecer sistemas de propulsão do NApAnt-Defesa Aérea & Naval. Disponível em: <https://www.defesaaereanaval.com.br/naval/wartsila-e-selecionada-para-fornecer-sistemas-de-propulsao-do-napant>. Acesso em 10/10/2023.

WOLFF, J. TORMAM, D. S. SCHALLENBERGER, G. Medição de Harmônicas em Inversores de Frequência com Tecnologia Active Front End (AFE) e Inversores com Retificação a Diodo. Departamento de Engenharia, Electric Consultoria e Serviços, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

WU, P. BUCKNALL, R. (2016). Marine propulsion using battery power. Shipping in Changing Climates Conference 2016, 1–10.

ZHANG, B. EPSKAMP, T. DOPPEL, M. GREGOR, M. A Comparison of the Transverse, Axial and Radial Flux PM Synchronous Motors for Electric Vehicle, 2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)