

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

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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OS DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA MVDC
EM NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL



Primeiro-Tenente Frederico Cavadinha Salomão

Rio de Janeiro
2023

PRIMEIRO-TENENTE FREDERICO CAVADINHA SALOMÃO

OS DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA MVDC
EM NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL

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.

Orientadores:

D. Sc. Robson Francisco da Silva Dias

1º Ten (QC-CA) Rodrigo Scarabotto Godinho

PRIMEIRO-TENENTE FREDERICO CAVADINHA SALOMÃO

OS DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA MVDC
EM NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL

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:

Robson Francisco da Silva Dias, DSc – UFRJ _____

Rodrigo Scarabotto Godinho, 1ºTen (QC-CA) – CASOP _____

Dedico esse trabalho àqueles que se esforçam diariamente a bordo dos Navios da Marinha do Brasil para o bom funcionamento das máquinas: os maquinistas.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa, que me incentivou a todo momento e compreendeu a minha ausência enquanto eu me dedicava ao bom rendimento no curso e à realização deste trabalho.

Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram durante todo o período do curso e durante também o tempo dispensado a efetivação do trabalho.

A todos os professores, pelos ensinamentos, pela ajuda e, principalmente, pela paciência que me permitiram assimilar os conhecimentos transmitidos da melhor forma possível.

Às pessoas com quem convivi ao longo desse ano de curso no Centro de Instrução Almirante Alexandrino, que participaram, direta ou indiretamente do processo de aprendizado impactando sobremaneira na minha formação acadêmica.

“A única vitória que perdura é a que se conquista sobre a própria ignorância”

Jigoro Kano

OS DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA MVDC EM NAVIOS DA MARINHA DO BRASIL

Resumo

Um novo sistema de distribuição de energia a bordo está sendo desenvolvido graças aos avanços tecnológicos no âmbito da eletrônica de potência: o sistema MVDC. Este sistema oferece diversas vantagens quando comparado ao sistema de distribuição de energia convencional baseado em corrente alternada, como redução do volume e peso do sistema de geração, eliminação da necessidade de sincronização de ângulo de fase e melhora no controle do fluxo de energia. Porém, existem alguns desafios a serem enfrentados para a sua implementação, inclusive por parte da Marinha do Brasil. Os esquemas de proteção de rede elétrica com corrente contínua ainda estão em desenvolvimento e os componentes que estão disponíveis ainda têm custo muito elevado. Este artigo apresenta uma visão geral da pesquisa e desenvolvimento do conceito de *Shipboard Power System* baseado em tensão média de corrente contínua, comparado com os sistemas atuais baseados em corrente alternada e, depois, enumera as vantagens e desvantagens de cada sistema. Este trabalho procura identificar os desafios que a MB enfrentará até implementar esta tecnologia a bordo de seus navios, assim como sugere ações que devem ser tomadas desde já para facilitar essa transição. Além disso, espera-se incentivar o estudo do SPS baseado em MVDC no nosso país, pois é onde as grandes potências estão investindo no que se refere à evolução dos navios de guerra.

Palavras- chave: MVDC; corrente contínua; navio; rede elétrica; Marinha do Brasil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corrente Contínua x Corrente Alternada	13
Figura 2 – Exemplo de diagrama unifilar simplificado de um sistema de distribuição elétrica baseado em corrente alternada	15
Figura 3 – Outro exemplo de diagrama unifilar simplificado de um sistema de distribuição elétrica baseado em corrente alternada	16
Figura 4 – A evolução da propulsão e geração de energia dos navios	17
Figura 5 – Exemplo de sistema distribuição de energia MVDC	18
Figura 6 – Diagrama de blocos funcionais de um sistema MVDC	20
Figura 7 – Exemplo de design de um sistema MVDC	21
Figura 8 – Exemplo conceitual de design de um sistema MVDC de alto desempenho	22
Figura 9 – Composição do sistema integrado de energia	27
Figura 10 – Evolução dos sistemas de distribuição de energia dos navios	27
Figura 11 – Evolução das capacidades dos sistemas de energia dos navios	28
Figura 12 – Economia de combustível de um gerador a diesel com velocidade variável	33
Figura 13 – Armazenamento de Energia.....	34

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
HVDC	Alta tensão de corrente contínua (<i>high voltage direct current</i>)
IEEE	<i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IPS	Sistema integrado de energia (<i>integrated power system</i>)
LVDC	Baixa tensão de corrente contínua (<i>low voltage direct current</i>)
MB	Marinha do Brasil
MVAC	Média tensão corrente alternada (<i>medium voltage alternating current</i>)
MVDC	Média tensão de corrente contínua (<i>medium voltage direct current</i>)
NGIPS	Próxima geração de sistema integrado de energia (<i>next generation integrated power system</i>)
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
SPS	Sistema de energia embarcado (<i>shipboard power system</i>)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Apresentação do Problema	10
1.2 Justificativa e Relevância	11
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo Geral	11
1.3.2 Objetivos Específicos	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3 METODOLOGIA	24
3.1 Classificação da Pesquisa	24
3.1.1 Classificação Quanto aos Fins	24
3.1.2 Classificação Quanto aos Meios	25
3.2 Limitações do Método	25
4 ANÁLISE DO SISTEMA MVDC	26
4.1 Desvantagens	30
4.2 Vantagens	32
5 CONCLUSÃO	35
5.1 Considerações Finais	35
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	36
REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Problema

Shipboard Power System (SPS) é o sistema de geração, armazenamento e distribuição de energia elétrica a bordo de navios. Quando comparado com redes elétricas convencionais terrestres, SPS é uma rede em pequena escala e bastante limitada. Além dessas diferenças espaciais e de capacidade, as redes elétricas em navios de guerra diferem das terrestres por serem constantemente propensas a distúrbios externos imprevisíveis e sofrerem esporadicamente danos físicos inesperados.

Resumidamente, o SPS reúne grande quantidade de componentes mecânicos, como motores, disjuntores e chaves; elétricos, como geradores, quadros e cabos elétricos e transformadores; e eletrônicos, como diodos, transistores e circuitos integrados. Esses componentes estão fortemente acoplados e confinados em um espaço reduzido que nem sempre possui suporte externo de rede elétrica mais forte e robusta. Apenas possuem suporte externo quando atracado em base ou porto que dispõe de fornecimento de eletricidade. Além disso, está susceptível a diversas propriedades específicas, incluindo capacidades de geração limitadas, com seus componentes próximos fisicamente e eletricamente, sendo propensos a falhas e distúrbios externos.

Com base nisso, o projeto de um SPS necessita de muitos cuidados relativos às várias especificidades do sistema, restrições operacionais e requisitos de projeto em diferentes cenários operacionais e, também de perfis de missão para manter uma operação estável, confiável e economicamente eficiente. Atualmente, os sistemas de energia em navios concentram-se na geração e distribuição de tensão através da corrente alternada. Porém, com o desenvolvimento e aprimoramento da eletrônica de potência, tornou-se possível a implementação dos sistemas de distribuição de energia de média tensão de corrente contínua (MVDC, do inglês *Medium-Voltage Direct-Current*).

Nos dias de hoje, todos os navios da Marinha do Brasil (MB) possuem sua rede elétrica baseada em corrente alternada e com os avanços tecnológicos principalmente relativos à eletrônica de potência, faz-se necessário realizar estudos sobre a viabilidade de implementação do sistema MVDC nos meios que o Brasil venha adquirir ou desenvolver. Neste trabalho, são levantados os desafios a serem enfrentados para o desenvolvimento de um

meio naval que faça uso da tensão elétrica média de corrente contínua, bem como as possíveis vantagens e as desvantagens da adoção deste tipo de energia a bordo de nossos navios.

1.2 Justificativa e Relevância

Tendo em vista o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem mais eficiência e eficácia dos sistemas energéticos nos navios; e tendo sempre em mente que a MB precisa estar em constante evolução para acompanhar as outras potências navais, como Estados Unidos da América e China, é de suma importância termos conhecimento acerca do sistema MVDC em navios. Este novo sistema é uma tendência das grandes potências globais, visto que as mesmas vêm investindo bastante em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para viabilizar a utilização deste tipo de tecnologia em navios de guerra.

A adoção desse novo sistema de energia em navios em geral pode oferecer vantagens significativas, como eliminação da necessidade de sincronização de ângulo de fase, melhora no controle de fluxo de energia, redução do consumo de energia, redução do volume e peso do sistema de geração, entre outras que serão enumeradas ao longo deste trabalho. Entretanto, será necessário enfrentar e superar grandes desafios, principalmente aqueles relacionados à proteção do sistema, que também serão tratados neste trabalho. Ou seja, fazer uma análise sobre a implementação do sistema MVDC nos meios da MB trata-se de um assunto de significativa relevância.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é apresentar uma visão geral da pesquisa e desenvolvimento do conceito de *Shipboard Power System* baseado em tensão média de corrente contínua, comparando com os sistemas atuais baseados em corrente alternada para posteriormente enumerar as vantagens e desvantagens de cada sistema.

Pretende-se também analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental dessa inovação tecnológica para navios, destacando os benefícios, desafios e implicações para a eficiência energética e sustentabilidade na indústria naval.

1.3.2 Objetivos Específicos

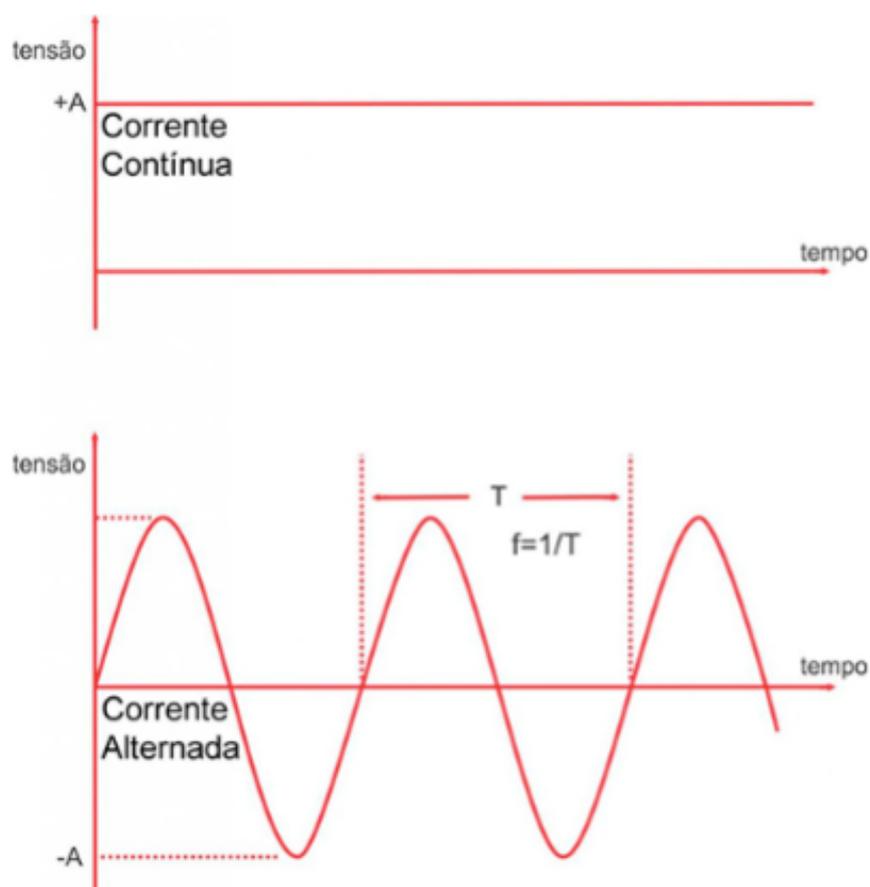
À medida que os objetivos gerais forem sendo alcançados, este trabalho tem como um de seus objetivos específicos tentar identificar os desafios que a MB enfrentará até implementar esta tecnologia a bordo de seus navios, bem como sugerir ações que devem ser tomadas desde já para facilitar essa transição. Além disso, espera-se incentivar o estudo do SPS baseado em MVDC no nosso país, pois é, como já citado, onde as grandes potências estão investindo no que se refere a evolução dos navios de guerra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As redes de tensão CC subdividem-se em Baixa Tensão de Corrente Contínua (LVDC) com níveis de tensão inferiores a 1.500 V; Média Tensão de Corrente Contínua (MVDC) com tensões variando entre 1.500 V e 30 kV; e Alta Tensão de Corrente Contínua (HVDC) com níveis de tensão superiores a 30 kV.

Mas antes de falar sobre o sistema MVDC, é necessário fazer uma breve análise sobre os dois tipos de correntes: a corrente alternada (CA) e a corrente contínua (CC).

Figura 1 – Corrente Contínua x Corrente Alternada



Fonte: Portal Solar, 2023

Quando se trata de linhas de transmissão e tomadas domésticas, a corrente alternada é o padrão e isso tem origem numa disputa histórica entre nomes importantíssimos da eletricidade: Thomas Edison e Nikola Tesla; e, mais tarde, George Westinghouse.

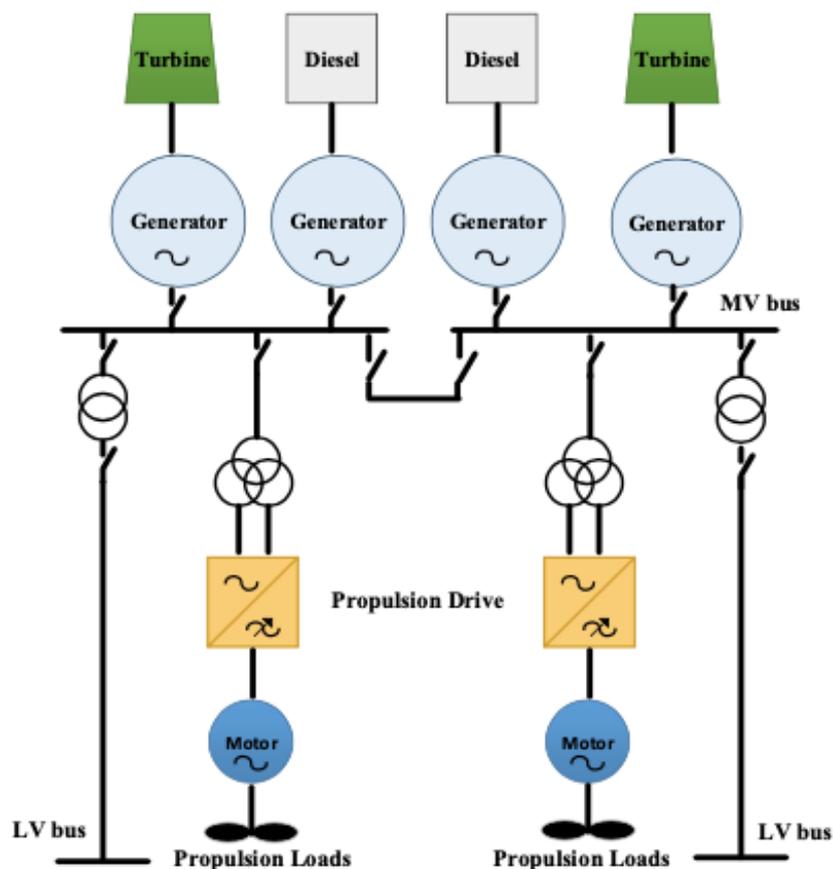
No final do século XIX, Thomas Edison defendia que a corrente contínua era a forma mais eficiente de distribuição de energia; já Nikola Tesla e George Westinghouse conseguiram provar que a CA era a forma mais viável economicamente para linhas de transmissão, principalmente quando se tratava de grandes distâncias, pois reduzia substancialmente a perda de energia por aquecimento, conhecido como efeito Joule.

Tanto a CA quanto a CC têm perdas de energia ao longo de linhas extensas devido à resistência dos fios. Porém, com a CA, a tensão é mais facilmente alterada através de transformadores. E para uma potência fixa, a tensão mais elevada resulta numa corrente mais baixa através da rede elétrica, e a corrente mais baixa significa menores perdas na linha elétrica. Sendo assim, trabalhando com a CA, pode-se operar com tensões elevadíssimas ao longo das linhas de transmissão e fornecer para o consumidor tensões adequadas às cargas apenas utilizando transformadores.

Com isso, a corrente alternada é amplamente conhecida e utilizada nos dias de hoje tanto nas redes elétricas terrestres como nos sistemas de energia de bordo como podemos observar nas figuras 2 e 3.

Na figura 2, podemos observar um exemplo de SPS convencional baseado em corrente alternada. Nesta configuração, existem dois geradores acionados a partir de um motor de combustão a diesel e de uma turbina que estão ligados a um barramento CA, que possui uma conexão a um barramento intermediário que fará a interconexão entre um outro barramento com a mesma configuração citada inicialmente. O conjunto desses quatro geradores fornece energia para todo o navio e essa energia gerada é distribuída através de transformadores de baixa frequência.

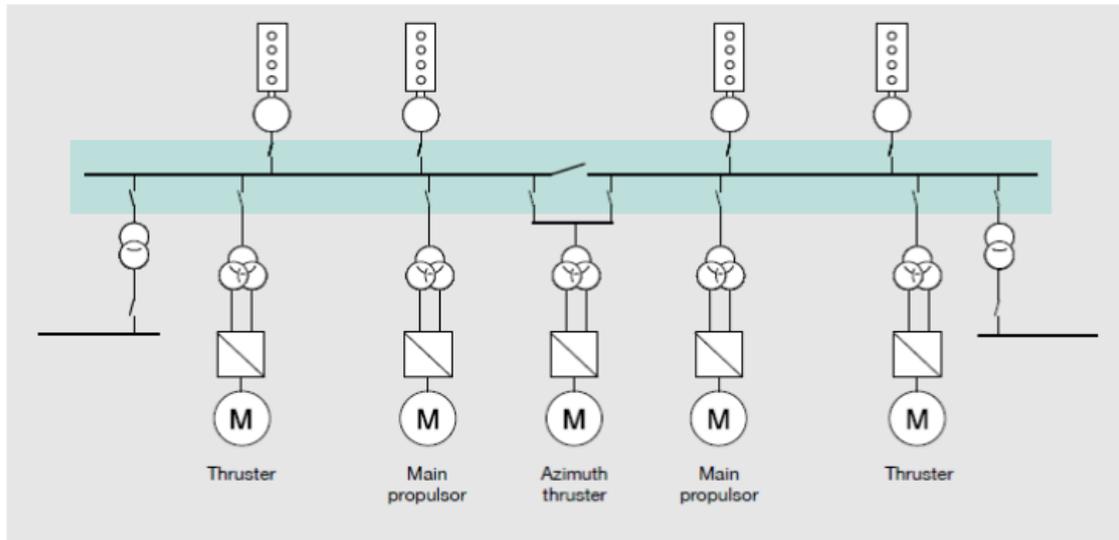
Figura 2 – Exemplo de diagrama unifilar simplificado de um sistema de distribuição elétrica baseado em corrente alternada



Fonte: THANTIRIGE; RATHORE; PANDA; JAYASIGNHE; ZAGRODNIK; GUPTA (2015)

Pode-se observar que na figura 3, o diagrama unifilar simplificado é bem parecido com o da figura 2, mas o que é mais importante observar a partir desses dois exemplos é que utilizam o mesmo tipo de propulsão: a propulsão elétrica. Este tipo de propulsão vem sendo amplamente utilizado em virtude principalmente da redução de emissão de poluentes. Porém, a utilização de motores elétricos na propulsão de navios propicia outras vantagens como custos de manutenção reduzidos, a eliminação de engrenagens reductoras, permitindo maior flexibilidade na localização dos equipamentos a bordo e menor consumo de combustíveis fósseis, pois apenas os motores e turbinas que acionam os geradores fazem uso desse tipo de combustível.

Figura 3 – Outro exemplo de diagrama unifilar simplificado de um sistema de distribuição elétrica baseado em corrente alternada



Fonte: DE SOUZA, 2013

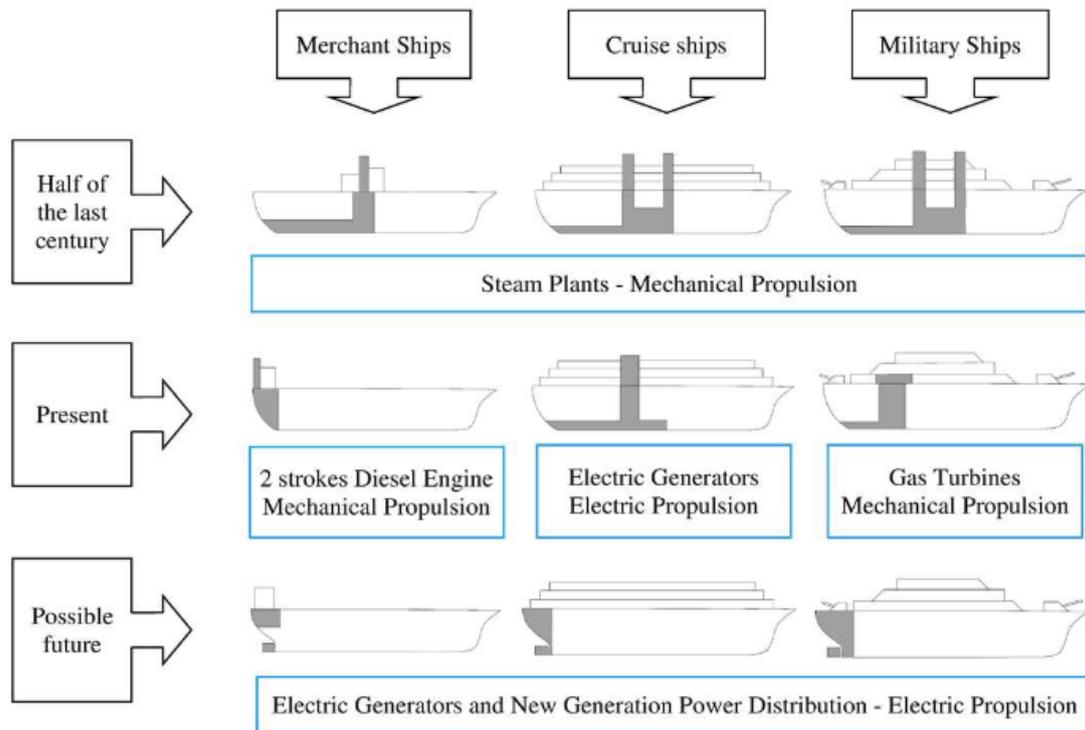
Essa alteração das formas de propulsão alinhadas à geração pode ser representada pela figura 4, onde também podemos observar a redução espaço interno dos navios dedicados a esses dois importantes sistemas de bordo. A propulsão mecânica continua sendo largamente utilizada tanto em navios mercantes quanto em navios militares, mas essa hegemonia pode acabar com a ascensão de novas tecnologias, principalmente àquelas relacionadas as novas formas de geração e distribuição de energia.

Com o avanço tecnológico no âmbito da eletrônica de potência, principalmente no que se refere à semicondutores, a ideia de utilizar a corrente contínua vem ganhando força em diversos setores. Segundo Castellan (2017), muitos centros de pesquisa públicos e unidades de P&D de grandes empresas privadas estão trabalhando nessa direção e um setor líder para o estudo e experimentação de sistemas de energia MVDC é o setor marítimo.

Alta densidade de potência, menores perdas e configuração avançada estão entre os principais focos de um sistema de energia a bordo. O objetivo de um projeto de um navio com sistema MVDC deve levar em consideração três questões principais: propulsão elétrica, sistema de energia integrado e geradores compactos e inovadores (Bosich, 2015)

A propulsão elétrica é um dos principais requisitos do projeto de um navio com sistema MVDC porque ele possibilita que o navio como um todo usufrua de todas as vantagens que este sistema oferece, principalmente no menor consumo de combustível e na redução de emissão de poluentes.

Figura 4 – A evolução da propulsão e geração de energia dos navios



Fonte: BOSICH; VICENZUTTI; PELASCHIAR; MENIS; SULLIGOI (2015)

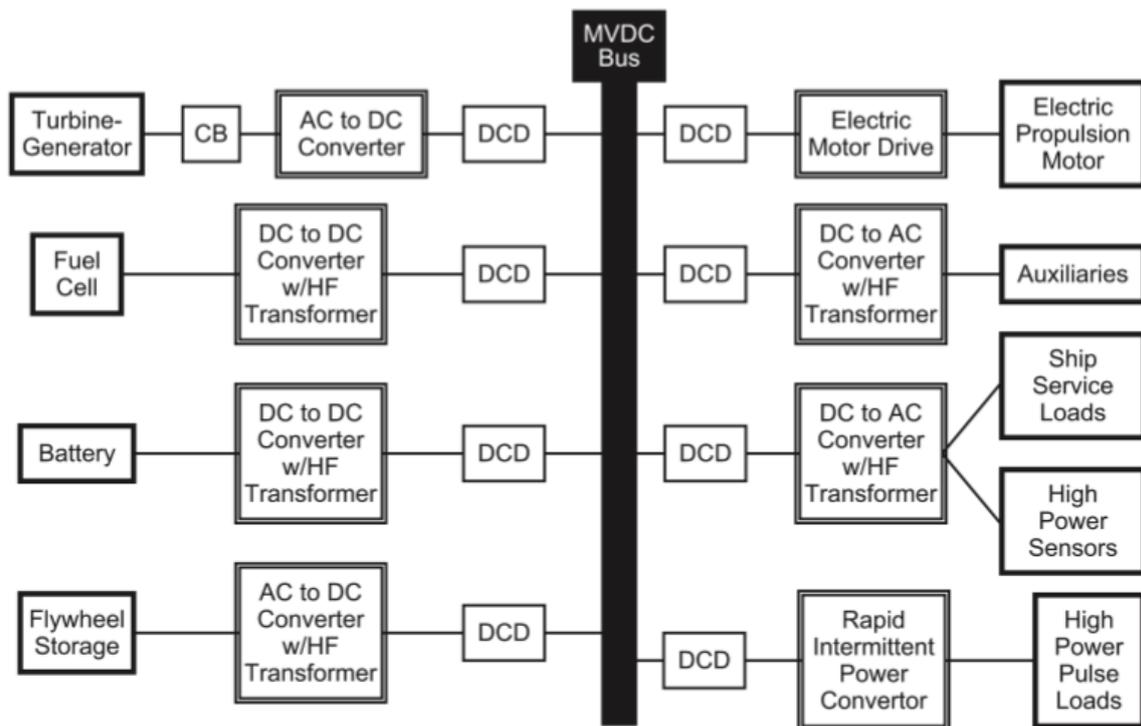
Como exemplo de um sistema de distribuição elétrica baseado em MVDC têm-se a figura 5 onde pode-se observar o barramento CC centralizado e os componentes de geração e as cargas ligadas ao barramento através de conversores CA/CC, CC/CC e CC/CA. Além disso, é notória a presença de dispositivos de proteção para corrente contínua, o que não ocorre para os dispositivos de proteção de corrente alternada que não foram representados.

Por mais que o sistema de distribuição MVDC concentre-se no fornecimento e distribuição de média tensão de corrente contínua, a geração e a utilização de energia por parte de algumas cargas é sob a forma de corrente alternada. É por este motivo que são necessários dois esquemas de proteção diferentes para um sistema MVDC, tanto para corrente contínua quanto para corrente alternada, mesmo que o foco seja na primeira.

Neste primeiro exemplo de sistema de distribuição de energia sob a forma de corrente contínua, já fica evidente a presença de dispositivos semicondutores e o importante papel desempenhado pela eletrônica de potência em todo o sistema. O IEEE (*The Institute of Electrical and Electronics Engineers*) publicou um documento intitulado “*IEEE Recommended Practice for 1kV to 35kV Medium-Voltage DC Power System on Ships (IEEE Std 1709-2018)*” aonde fornece recomendações que podem ser usadas por interessados nos

sistemas de energia CC de média tensão para aplicar tecnologias atuais para geração, conversão e distribuição de energia elétrica MVDC em todo o navio com confiabilidade e qualidade.

Figura 5 – Exemplo de sistema distribuição de energia MVDC



Fonte: IEEE Std 1709-2018

A IEEE Std 1709-2018 divide o SPS baseado em MVDC em blocos funcionais:

- Interface de energia de terra: adapta a energia elétrica da rede elétrica terrestre para o sistema MVDC. A corrente alternada trifásica de terra é fornecida ao navio, aumenta-se ou diminui-se a sua tensão até o nível desejado com um transformador e retifica-se o resultado com um conversor CA/CC fornecendo energia ao barramento CC do navio.
- Geração de energia: é a principal fonte de energia do sistema. Motores de combustão auxiliares ou turbinas a gás movem grupos geradores convertendo a energia dos combustíveis em energia elétrica para o sistema. Após os grupos-geradores devem existir retificadores para fazer a conversão de CA para CC antes do barramento CC.
- Armazenamento de energia: este é um bloco que funciona em dois sentidos, podendo ser uma fonte de energia ou uma carga. A finalidade deste bloco é fornecer energia ao

sistema quando necessário, mas também extrair energia do sistema para recarregar um banco de baterias ou de capacitores por meio de conversores CC/CC bidirecionais.

O tempo de resposta dos grupos geradores às flutuações de energia é inadequado para responder a algumas cargas, a demandas repentinas ou pela perda de um grupo gerador. Esse problema só é resolvido através do uso de dispositivos de armazenamento de energia de resposta rápida. Além disso, os dispositivos desse bloco podem ser usados para permitir a reinicialização dos sistemas a partir do navio apagado.

Além disso, com a capacidade da eletrônica de potência de controlar e interromper a corrente, a maioria dos disjuntores do lado da carga pode ser substituída por chaves simples. Em caso de falha no conversor entre o gerador e o barramento MVDC, ou falha dos conversores para limitar a corrente de falha, deve haver um dispositivo de proteção contra curto-circuito de *backup* entre cada gerador e seu esquema de proteção.

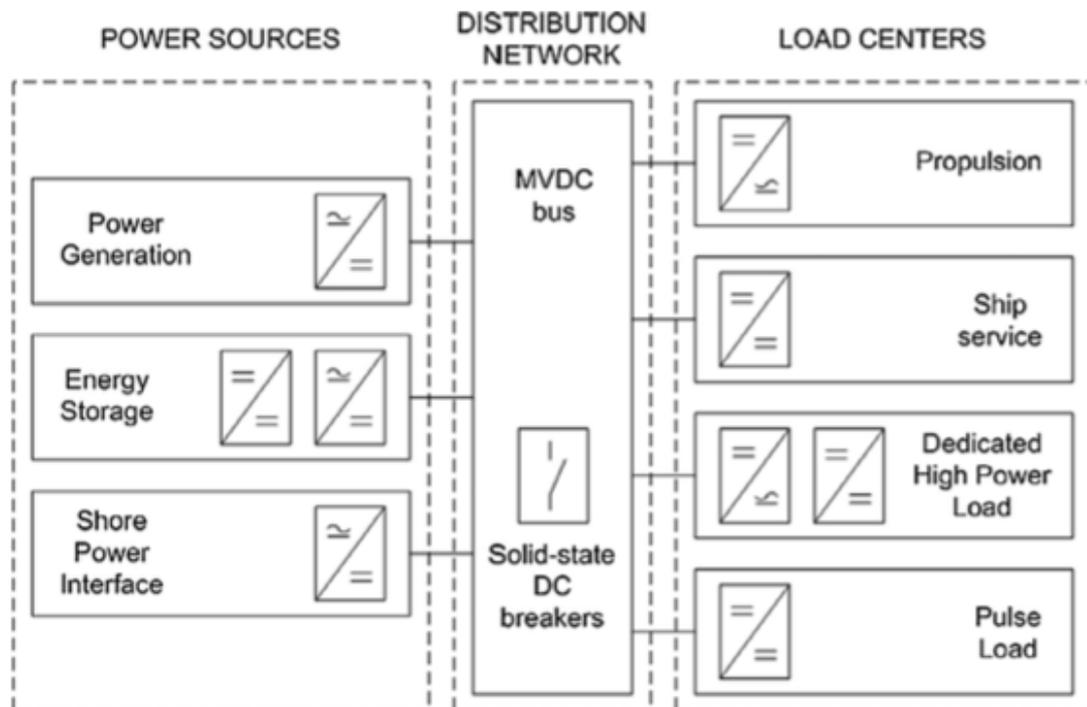
- Carga Pulsada: é um centro de carga independente que extrai pulsos intermitentes de energia do sistema. Para exemplificar, podemos citar o sistema eletromagnético de lançamento de aeronaves (EMALS), canhões, lasers, entre outros dispositivos que extrairiam grande quantidade de energia do barramento de distribuição MVDC por meio de conversores CC/CC.
- Propulsão: é o centro de carga dedicado a propulsão da embarcação. Entre os motores e o barramento de distribuição CC, estão os inversores de velocidade variável, que podem ser bidirecionais, permitindo que os motores também gerem energia, chamada de energia regenerativa, durante certas manobras (*crashback*, por exemplo, que é uma manobra de emergência para um navio evitar colisão e pará-lo na distância mais curta possível).
- Serviço de navio: é um bloco funcional que concentra as cargas de serviço do navio dentro das zonas. Por exemplo, zona de baixa tensão de corrente contínua (LVDC), que possui um conversor CC/CC entre as suas cargas e o barramento de distribuição CC; e a zona baixa tensão de corrente alternada (LVAC), que possui um inversor CC/CA, entre outras zonas interligadas ao barramento CC através de conversores ou inversores.

Em navios de guerra, onde o fornecimento de energia para cargas vitais é fundamental, o conceito de “regiões zonais ao longo do navio servidas por

barramentos MVDC alternativos” deve ser empregado. Para cargas CA, como motores de bombas e ventiladores menores e a maioria das cargas gerais, como iluminação e tomadas domésticas, os conversores CC/CA alteram a alimentação CC para CA de baixa tensão, monofásica ou trifásica.

- Carga dedicada de alta potência: é um centro de carga independente que consome muita potência (1 MW ou mais), por exemplo, conjunto de sensores de radar. As fontes de alimentação de cargas de alta potência são fornecidas diretamente do barramento de distribuição MVDC por meio de conversores CC/CC.
- Barramento CC: é o bloco que faz a interligação entre todos os blocos funcionais, através dele é possível isolar seções do sistema MVDC. Além disso, cada bloco funcional no sistema pode conectar-se, desconectar-se e isolar-se do sistema através de seus próprios dispositivos. É interessante observar que um mesmo dispositivo pode cumprir diferentes funções no sistema, um disjuntor, por exemplo, pode interromper, isolar e conectar unidades.

Figura 6 – Diagrama de blocos funcionais de um sistema MVDC

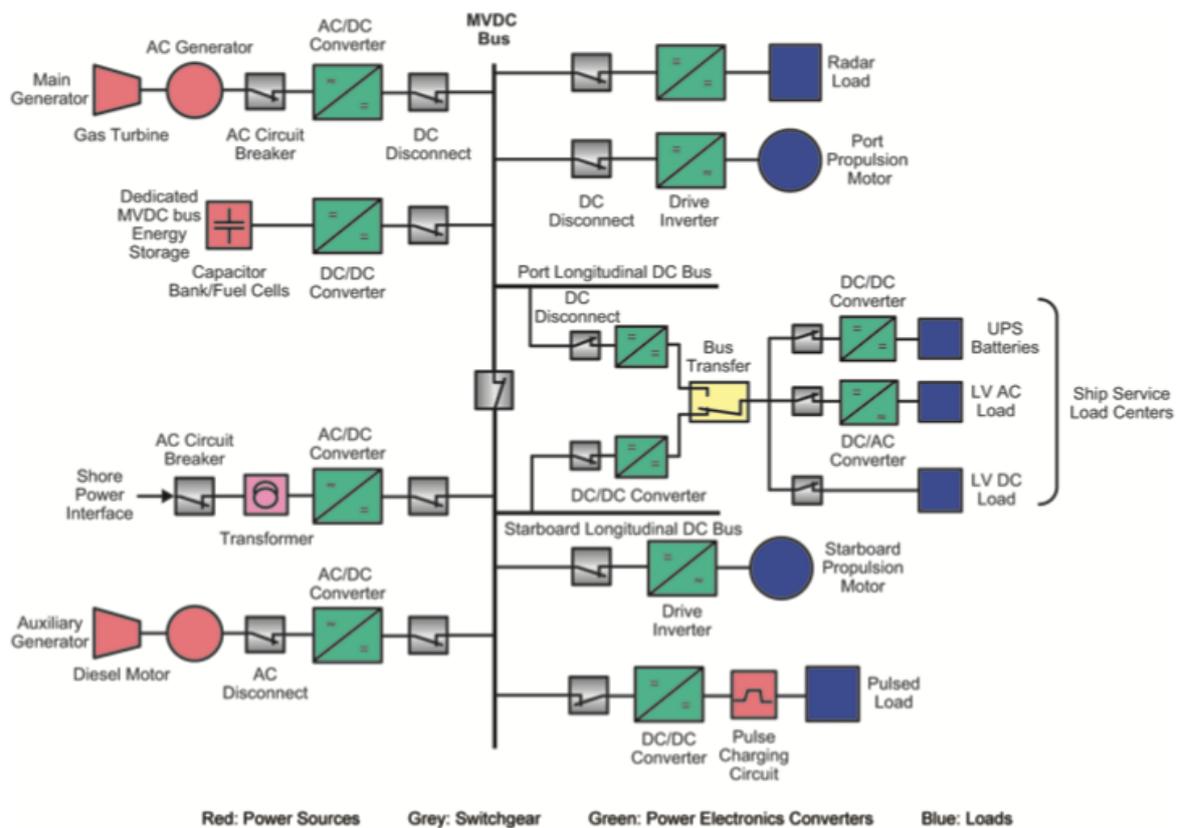


Fonte: CASTELLAN *et al.* (2017)

Um sistema de distribuição MVDC a bordo vai incluir uma série de conversores e inversores para estágios de conversão CC/CA, CC/CC e CA/CC e a Figura 6 mostra um

exemplo de diagrama de blocos de uma rede elétrica dividida em três blocos maiores: fontes de energia, rede de distribuição e centros de carga. Pode-se observar que todos esses subsistemas e seus blocos funcionais englobam diversos equipamentos eletrônicos de potência. É importante mencionar que um diagrama completo incluirá blocos de controle e blocos funcionais e o número de blocos funcionais dependerá das especificidades do navio e de sua missão.

Figura 7 – Exemplo de design de um sistema MVDC

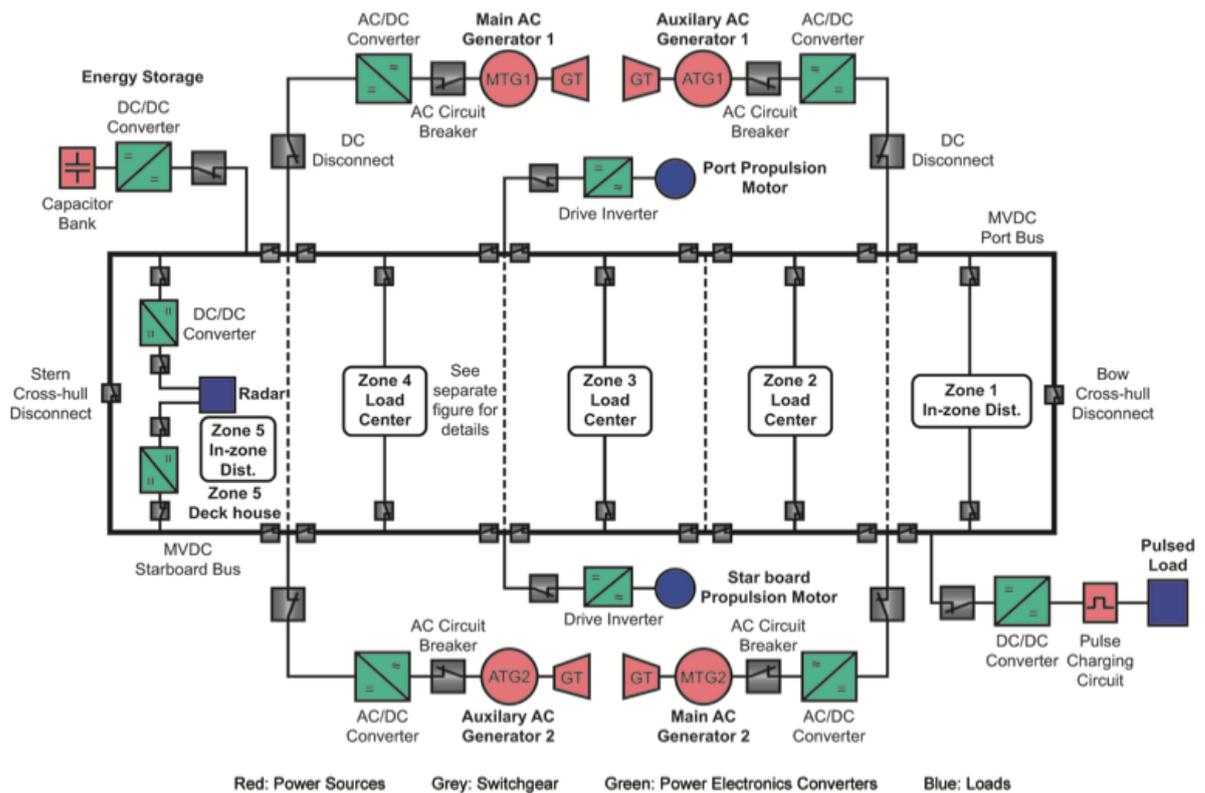


Fonte: IEEE Std 1709-2018

O sistema MVDC de distribuição radial é exemplificado pela Figura 7. Esse exemplo apresenta um barramento CC central, que pode ser dividido através de uma chave. Com esta chave aberta, tanto o gerador principal quanto o gerador auxiliar precisam fornecer energia constantemente ao sistema para que todas as cargas do navio possam receber alimentação. Já com essa chave fechada, o sistema pode ter sua alimentação através de um gerador apenas de acordo com a demanda.

É interessante observar também, que ao lado do gerador principal está o armazenamento de energia, enquanto que ao lado do gerador auxiliar está a interface de energia de terra. Mas para estes dois elementos cumprirem suas funções no sistema MVDC, é essencial que a chave esteja fechada e eles estejam conectados a todas as cargas do navio. Para Bosich (2015), a distribuição radial é uma opção pela simplicidade, que limita os custos.

Figura 8 – Exemplo conceitual de design de um sistema MVDC de alto desempenho



Fonte: IEEE Std 1709-2018

Na Figura 8, o IEEE Std 1709-2018 exemplifica um sistema MVDC de navio de alto desempenho. Esta complexa arquitetura otimiza a capacidade operacional mesmo em ambientes hostis. O navio distribui suas cargas de serviço em quatro regiões – zonas 1, 2, 3 e 4 –, estendendo-se de proa a popa, e são alimentadas através dos barramentos CC localizados em ambos os lados, que se estendem longitudinalmente pelo navio.

A zona 5 abriga as áreas dos convés superiores e seu principal equipamento elétrico, que nesse caso é um radar de elevada potência. Existem conexões transversais entre os barramentos dos dois lados para permitir a formação de um circuito em anel, que interliga os sistemas de geração de energia e as cargas. Cada barramento longitudinal tem uma turbina a gás principal e uma auxiliar conectadas. Assim, o design frontal amplifica a capacidade de

sobrevivência do sistema energético, e as chaves de interconexão possibilitam uma configuração de "planta dividida".

Cargas vitais, como o radar do sistema principal, são alimentadas ininterruptamente pelos barramentos laterais através de chaves automáticos. Parte da tensão média de corrente contínua destes barramentos é convertida para LVDC (800 V, por exemplo), através de conversores CC/CC, e fornecida para cargas que requerem este tipo de alimentação. Já as cargas que necessitam de alimentação sob a forma de corrente alternada obtêm a alimentação CA trifásica de baixa voltagem (440 V, por exemplo) a partir de um conversor CA ligado a essa ramificação LVDC do sistema.

Ainda nesta mesma figura, um mecanismo de armazenamento energético baseado em baterias ou capacitores opera a partir do barramento MVDC a bombordo pela popa. Com a capacidade bidirecional dos conversores CC/CC e CC/CA, é viável aproveitar a energia armazenada de sistemas de armazenamento distribuídos pelo navio. Bosich (2015) define que o foco da arquitetura exemplificada pela Figura 8 é a continuidade do serviço.

Fazendo uma análise comparativa entre as figuras 7 e 8, percebe-se que esta última é a mais adequada para representar o sistema de distribuição de energia de um navio de guerra em virtude, principalmente, das suas capacidades de segregação. Na figura 8, o sistema MVDC é dividido em zonas e o barramento CC forma um anel que pode ser seccionado, segmentando as fontes de energia (geradores principais e auxiliares e o armazenamento de energia) e as cargas que encontram-se distribuídas pelo navio segundo as zonas, já mencionadas.

Este tipo de arranjo exemplificado na Figura 8 é bastante encontrado em navios militares, pois estes são frequentemente submetidos a riscos que outras embarcações não sofrem em virtude de suas especificidades. O esquema representado pela Figura 8 aumenta significativamente a capacidade de sobrevivência de um navio de guerra em um ambiente adverso, principalmente pelas razões citadas no parágrafo anterior.

3 METODOLOGIA

Metodologia significa estudo dos métodos e consiste em descrever do modo detalhado todo o processo metodológico utilizado para realizar uma pesquisa e obter conhecimento sobre determinado assunto. Por este trabalho tratar de um sistema ainda em desenvolvimento, realizou-se diferentes tipos de pesquisa, pode-se citar as pesquisas exploratória, descritiva, bibliográfica e documental com o intuito de construir conhecimento técnico a partir de diferentes métodos, meios e fins.

3.1 Classificação da Pesquisa

Quanto à utilização dos resultados, classifica-se este trabalho como uma pesquisa pura, por ser de natureza teórica em sua totalidade, cujo tipo de abordagem é baseada em um estudo qualitativo-quantitativo. Por mais que pesquisas científicas possam ser caracterizadas em duas abordagens: pesquisa qualitativa ou quantitativa; o conjunto de dados qualitativos e quantitativos não se opõe. Logo, é possível classificar uma pesquisa como qualitativa-quantitativa e esta envolve dados coletados pelas duas técnicas, que se complementam e não geram dicotomia.

A metodologia de pesquisa qualitativa nada mais é do que um compilado de informações baseadas na observação de comportamentos naturais, discursos, respostas abertas para uma posterior interpretação de significados de modo científico.

Essencialmente, pode-se enquadrar esta pesquisa como qualitativa por focar-se em textos e interpretações. Porém, muitas vezes, as interpretações são frutos de dados numéricos evidenciados por outras pesquisas. Sendo assim, cabe classificá-la como uma pesquisa qualitativa-quantitativa.

3.1.1 Quanto aos fins

Levando em consideração que existem várias definições quanto aos tipos de pesquisa no âmbito da metodologia de pesquisa, Lakatos e Marconi (2001) dividem as pesquisas em três tipos: pesquisa exploratória, experimental e descritiva. Este trabalho utilizou as técnicas de pesquisas exploratória e descritiva para alcançar seus objetivos definidos anteriormente.

A pesquisa classifica-se como exploratória, pois visa identificar os desafios que a MB pode enfrentar ao iniciar a implementação de sistemas MVDC em seus navios e não foram encontrados outros trabalhos sobre este mesmo tema. Além disso, buscou-se apresentar uma visão geral sobre o sistema em ascensão e proporcionar maior familiaridade com o assunto.

Em complemento, pode-se também classificar a pesquisa como descritiva, pois descreve-se o sistema MVDC, caracterizando-o a partir de conhecimentos prévios sobre diversos assuntos relacionados. Buscou-se também evidenciar suas vantagens, desvantagens e singularidades.

3.1.2 Quanto aos meios

Quanto aos procedimentos técnicos, foram realizadas pesquisas bibliográficas, que, segundo Gil (1999) e Severino (2007), são aquelas desenvolvidas a partir de materiais já elaborados e disponíveis, constituídos principalmente de documentos impressos em livros, artigos científicos, dissertações e teses. Também foi realizada uma pesquisa documental que de acordo com Gil (1999) envolve materiais que ainda não receberam um tratamento analítico ou podem ser reelaborados de acordo com os objetivos de determinada pesquisa.

As técnicas de coleta de dados utilizadas foram as pesquisas bibliográficas ou teóricas utilizando principalmente artigos publicados; e documentais em que utilizou-se o *IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships (IEEE Std 1709-2018)*. Ou seja, podemos classificar como uma pesquisa por triangulação, pois foram utilizados vários instrumentos de análise, comparando os dados encontrados, que convergiram para uma conclusão comum.

3.2 Limitações do Método

A principal limitação da pesquisa se deve ao fato de que o sistema de distribuição baseado em tensão média de corrente contínua o qual é tratado ao longo de todo o trabalho ainda não foi efetivamente implementado em meios navais, logo ainda é um assunto puramente teórico.

4 ANÁLISE DO SISTEMA MVDC

O *Shipboard Power System* baseado em MVDC é um sistema ainda em desenvolvimento. Ao fazer uma comparação com o SPS baseado em corrente alternada, a principal diferença está na presença maciça de componentes eletrônicos de potência no sistema baseado em CC. A presença desses componentes possibilitam ao sistema algumas facilidades, dentre elas está a eliminação da necessidade de sincronização de ângulo de fase entre as diferentes fontes de energia ao utilizar a corrente contínua.

A análise do sistema MVDC só pode ser feita comparando com os atuais sistemas de energia embarcado que utilizam a corrente alternada, porque essa comparação mostra as especificidades do sistema MVDC, bem como suas vantagens e desvantagens. Vale ressaltar que grande parte das desvantagens que podem ser atribuídas à utilização da corrente contínua advém da escassez de dispositivos no mercado que contribuem para os seus custos mais elevados. Acredita-se que com o passar dos anos, surjam novas tecnologias que baratearão os valores desses dispositivos, tornando o sistema MVDC ainda mais vantajoso.

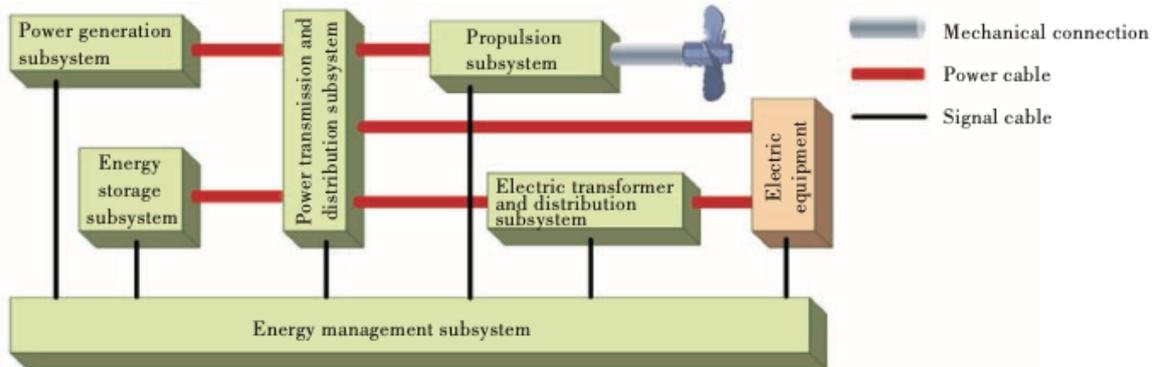
Segundo Zohrabi (2018) para assegurar a operação adequada do sistema, é de suma importância levar em consideração os múltiplos aspectos de projeto e os requisitos do sistema de forma simultânea, além de realizar a manutenção criteriosamente em todas as situações, visando otimizar sua estabilidade, sobrevivência, segurança e eficiência econômica.

A Figura 9 apresenta a composição do sistema integrado de energia (IPS do inglês, *Integrated Powers System*), é uma outra denominação para um sistema de geração, armazenamento, distribuição e utilização de energia elétrica a bordo de um navio em que todos os componentes são integrados através de uma única rede elétrica. Enquanto SPS é um termo mais geral que abrange qualquer sistema de energia a bordo, IPS se refere a um sistema altamente integrado.

Um dos principais benefícios de um IPS é a otimização da energia desde a sua geração até a sua utilização, o que permite mais flexibilidade. Em situações em que a carga da propulsão diminui ou não é mais necessária, a energia pode ser redirecionada para outras cargas ou então, subsistema de armazenamento de energia pode ser carregado.

A utilização do IPS melhora a eficiência geral do sistema, reduzindo os custos de operação e manutenção e proporcionando redundância, pois todas as fontes de geração estão integradas e podem alimentar todas as cargas através da rede.

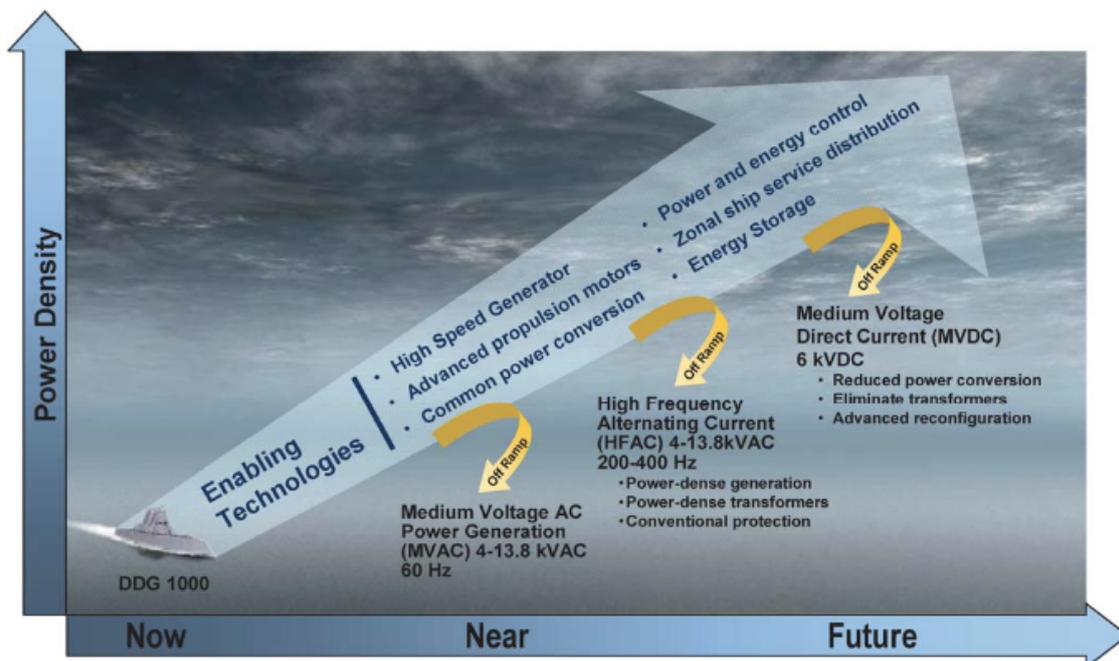
Figura 9 – Composição do sistema integrado de energia



Fonte: FU *et al.* (2016)

Com o advento da eletrônica de potência e a integração cada vez maior da computação nos sistemas de distribuição de energia, o IPS vem se tornando cada vez mais sofisticados. As figuras 10 e 11 retratam a evolução do IPS sob duas óticas: a primeira sob a ótica da densidade de potência; já a segunda sob o ponto de vista das capacidades. Todavia, as duas culminam no sistema MVDC altamente integrado e controlado.

Figura 10 – Evolução dos sistemas de distribuição de energia dos navios

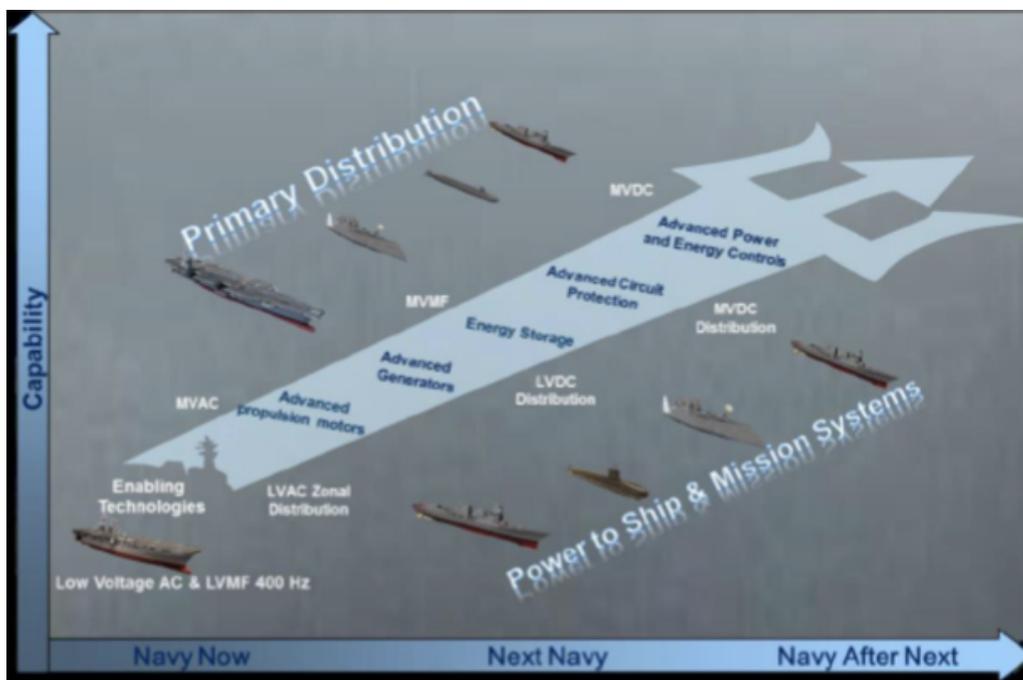


Fonte: BOSICH *et al.* (2015)

Bosich (2015) fala em sistema integrado de energia da próxima geração (NGIPS do inglês, *Next Generation Integrated Powers System*) para discriminar a evolução do sistema de distribuição MVDC altamente integrado a bordo de navios. Ele cita que em 2007, o *U.S. Naval Sea Systems Command* (NAVSEA) propôs o Roteiro de Desenvolvimento de Tecnologia do NGIPS (*Next Generation Integrated Power System (NGIPS) Technology Development Roadmap*). Esse documento tenta prever a futura aplicação do MVDC não só em navios de superfície, mas também em submarinos.

O termo “próxima geração” pode ser interpretado como uma versão mais avançada e sofisticada do IPS atual. Ela pode incorporar uma série de melhorias, como integração de fontes de energia renovável (solar, por exemplo); sistema de armazenamento avançados; maior eficiência até na utilização de energia; e um possível alinhamento entre automação e inteligência artificial, otimizando a distribuição e o uso de energia. A automação permite o controle e monitoramento da distribuição de energia em tempo real, otimizando a eficiência e reagindo rapidamente a falhas ou mudanças nas demandas de carga.

Figura 11 – Evolução das capacidades dos sistemas de energia dos navios



Fonte: AMY JR.; DOERRY (2019)

Estes sistemas representam uma mudança em relação aos sistemas de distribuição de energia tradicionais. Eles integram geração, distribuição e consumo de energia em uma rede elétrica coesa a bordo do navio. Conforme já foi dito, esses sistemas têm características únicas devido ao ambiente operacional dos navios e eles evoluíram para redes elétricas complexas e integradas. Esta evolução proporciona maior eficiência, flexibilidade e segurança nas operações navais.

A eficiência do sistema de distribuição de energia depende da missão do navio e das condições de serviço. Espera-se que a eficiência dos sistemas de energia MVDC sejam suficientes para superar suas demandas econômicas, portanto, é imprescindível alcançar alta eficiência sob uma série de condições operacionais previstas. Nos cálculos de eficiência do sistema devem ser incluídos: motores, geradores, conversores, transformadores, dispositivos de armazenamento e os cabos elétricos.

Sabe-se que as perdas no conversor são críticas relacionadas às perdas globais. Logo, deve-se ter especial atenção à redução das perdas do projeto. A seleção da tensão do sistema também é importante e deve ser considerada, principalmente para determinar o tamanho dos cabos elétricos, que também é um fator decisivo para o custo do sistema. De acordo com Cooke (2022), o tamanho dos cabos em um sistema MVDC varia de acordo com três grandezas: a tensão nominal do sistema, o diâmetro do condutor e o tempo esperado de eliminação da falta à terra, que geralmente é expresso como um nível percentual de isolamento.

Nos navios, a estrutura do sistema de energia é extremamente afetada por sua estrutura e organização interna, tornando necessária uma comparação entre projetos para avaliar efetivamente as vantagens e melhorias do novo e revolucionário sistema MVDC em relação ao projeto clássico de CA.

Além de todo avanço tecnológico que o país tem que acompanhar até que a Marinha do Brasil seja capaz de gerir um navio com sistema MVDC, a determinação da arquitetura do sistema de geração, armazenamento, distribuição e consumo de energia necessita de profundas análises e cuidadosos estudos. Todos os aspectos referentes ao sistema MVDC apontam que este sistema é o ideal para ser adotado em navios que demandem alto consumo de energia e dependam da densidade de potência e estabilidade para fornecer energia elétrica suficiente para seus utilizadores.

A implementação do MVDC a bordo deve ser acompanhada pela evolução do poder combatente dos navios, pois para a energia que o sistema MVDC pode fornecer, deve existir

demanda. E essa demanda de energia surge nos radares de última geração, nos canhões eletromagnéticos (*railguns*) e nas armas de energia controlada, por exemplo.

4.1 Desvantagens

Devido aos recursos limitados em um espaço também limitado, os objetivos de controle do sistema de energia a bordo em termos de proteção, restauração, confiabilidade e capacidade de sobrevivência são mais críticos e para Saedifard (2010), as questões de controle, proteção e operação das redes CC são bem diferentes daquelas das redes CA e essas questões podem ser consideradas desvantagens levando em consideração que, principalmente, a proteção das redes CC não são bem desenvolvidas ou são mais restritas e com custos elevados. Para facilitar a aplicação prática e a investigação das redes CC, os benefícios e os desafios técnicos precisam de ser identificados e abordados de forma sistemática.

Uma das principais limitações das redes CC é a escassez de disjuntores CC. Em uma rede elétrica com corrente contínua, durante uma falta, os diodos antiparalelos dos conversores conduzem e alimentam a falta. Essa falha pode ser eliminada por disjuntores convencionais no lado da corrente alternada ou por disjuntores CC no lado da corrente contínua. Como na corrente contínua não tem cruzamento de zero natural, a tecnologia atual de disjuntores capaz de interromper grandes correntes CC é o disjuntor de estado sólido (SSCB, do inglês *Solid State Circuit Breaker*).

Embora esses dispositivos ofereçam muitas vantagens, eles também têm grandes desafios para superar, como custos iniciais muito altos e a necessidade de sistemas de resfriamento eficazes para os seus componentes semicondutores. No entanto, à medida que a tecnologia evolui e os preços caem, é provável que possam ser utilizados em larga escala.

Atualmente, existem muitas propostas de disjuntores MVDC na comunidade científica e protótipos inovadores que estão sendo testados e verificados. No entanto, a penetração efetiva da tecnologia MVDC nos sistemas de energia a bordo está principalmente subordinada à implementação industrial de disjuntores CC e à sua disponibilidade no mercado.

Conversores de energia eficientes também são necessários como interfaces de rede CC para integração de unidades e cargas da rede, ou seja, conversores de energia de última geração e disjuntores SSCB mais acessíveis são os componentes-chave para o desenvolvimento de SPS baseado em MVDC.

A proteção de todo o sistema é baseada na coordenação entre os conversores eletrônicos de potência e os dispositivos de proteção. Numa rede MVDC de bordo, existem cargas críticas que estão diretamente ligadas ao barramento CC através de conversores de potência. A perda do barramento seria uma falha grave, pois essas cargas críticas não podem deixar de ser alimentadas. A interrupção e o isolamento de qualquer falta não devem isolar a área não defeituosa, particularmente as cargas críticas.

Bosich (2015) diz que é fundamental aprofundar os estudos sobre: localização de falhas, para garantir a devida seletividade; disjuntores de estado sólido, para interromper adequadamente as correntes de falta CC; e técnicas de controle de tensão, para garantir a estabilidade da tensão na presença de cargas de energia constante.

Nos geradores de sistema de distribuição MVDC em navios, as cargas e os dispositivos de armazenamento de energia são conectados ao barramento CC através de uma série de conversores e inversores para estágios de conversão CC/CA, CC/CC e CA/CC. Para a transformação da tensão CC em diferentes níveis de tensão, existe o transformador de estado sólido (SST, do inglês *Solid State Transformer*), que é um tipo de transformador que usa semicondutores e eletrônica de potência ao invés dos tradicionais enrolamentos e núcleos ferromagnéticos encontrados nos transformadores convencionais.

Poder-se-ia enquadrar o SST nas vantagens do sistema MVDC em virtude de algumas características ao compararmos com os transformadores CA: redução de tamanho e peso, maior eficiência, controle avançado, redução de perdas de energia, resposta rápida e capacidade de integração com redes elétricas inteligentes. Porém, como se trata de um dispositivo ainda em desenvolvimento, que possui elevado custo e alguns desafios técnicos a superar, o SST ainda é uma desvantagem, ou melhor, um desafio do SPS baseado em MVDC.

O Transformador de Estado Sólido (SST) também serve para garantir o isolamento galvânico (tanto para segurança das pessoas quanto para proteção do sistema). E além do SST, ao utilizar um conversor CC/CA (inversor), um transformador de alta frequência e um conversor CA/CC (retificador) em sequência também é possível obter um conversor CC/CC com isolamento galvânico. A grande vantagem de utilizar uma arquitetura mais numerosa e um pouco mais complexa é a significativa redução de peso e volume ao comparar com um isolamento galvânico obtido através de um transformador de baixa frequência convencional de 50 ou 60 Hz (Bosich, 2015).

Geralmente, as cargas que requerem um aterramento independente são conectadas ao barramento MVDC através de conversores contendo transformadores de alta frequência para

fornecer o isolamento galvânico necessário. Sendo assim, por mais que hoje a proteção do sistema MVDC possa ser classificada como uma desvantagem, acredita-se que com o desenvolvimento tecnológico principalmente de disjuntores e transformadores de estado sólido, esta desvantagem passe a ser uma possibilidade, ou melhor, uma vantagem.

4.2 Vantagens

Como já foi dito, a topologia de distribuição de média tensão CC apresenta um barramento CC e é baseado no uso abrangente de equipamentos de eletrônica de potência, tanto no lado do gerador quanto no lado das cargas. Os importantes benefícios desta nova distribuição são expressos no IEEE Std. 1709 e pode-se citar alguns:

- Eliminação da necessidade de sincronização do ângulo de fase e simplificando o procedimento de conexão entre os geradores e o barramento;
- Eliminação de grandes e pesados transformadores de baixa frequência, ou seja, os transformadores convencionais de corrente alternada;
- Redução do volume e peso do sistema de geração de energia através do uso de geradores de alta velocidade;
- Melhoria do controle de fluxo de energia, especialmente em condições transitórias e de emergência;
- Redução do consumo de combustível, permitindo a operação do motor de combustão auxiliar em nível de consumo ótimo;
- Melhoria da eficiência e da disponibilidade de energia com armazenamento de energia.
- Simplificação da ligação e desconexão de diferentes tipos e classificações de dispositivos de geração e de armazenamento de energia elétrica; e
- Eliminação da queda de tensão reativa.

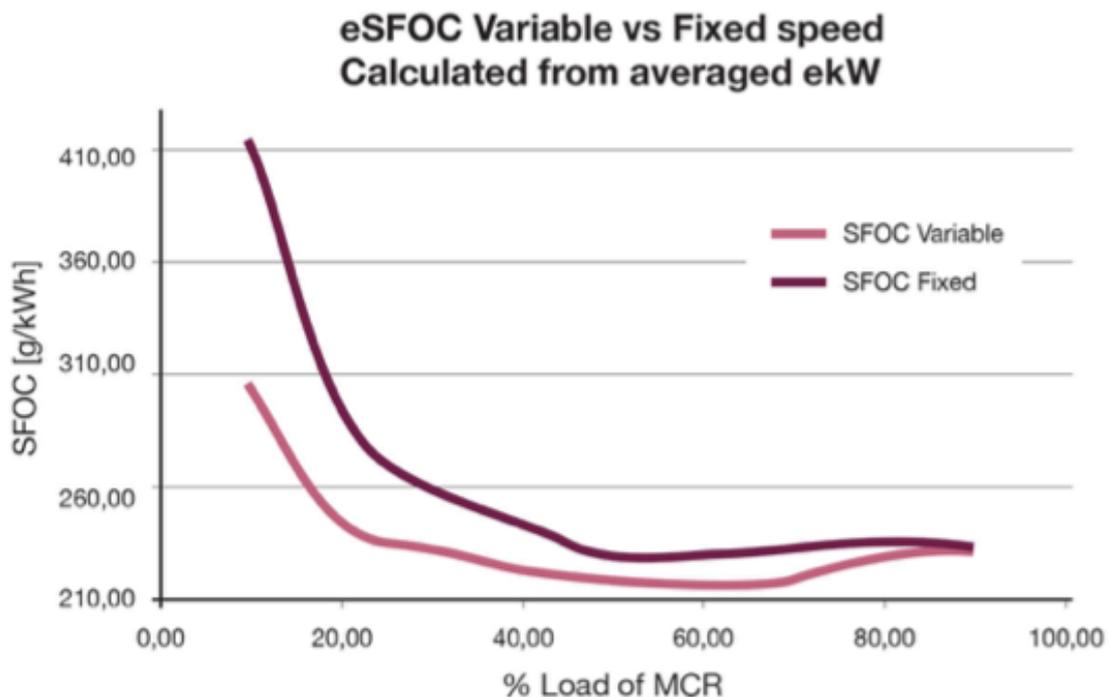
Ao considerar que os geradores são conectados ao barramento CC através de conversores, os motores de combustão interna que acionam os geradores podem ser operados em velocidade variável, visando a máxima eficiência e o gasto mínimo de combustível. Quando comparado com um rede elétrica CA convencional, o gerador precisa funcionar em velocidade constante para fornecer energia elétrica sob forma de corrente alternada com a frequência determinada pela rede.

A possibilidade do gerador funcionar com velocidade variável proporciona algumas das vantagens citadas anteriormente, como redução do volume e peso do sistema de geração e redução do consumo de combustível. Os grupos geradores passam a ser menores e mais leves, porque pode-se dimensionar seus motores de combustão interna para fornecer altas velocidades ao invés de grandes torques.

Na Figura 12, pode-se observar a economia de combustível de um motor com velocidade variável comparado ao motor de velocidade fixa. Ela indica que, ao funcionar com velocidade variável, o motor diesel consome consideravelmente menos combustível, em cargas leves (inferiores a 20% da carga total), se comparado a operação contínua em sua velocidade nominal.

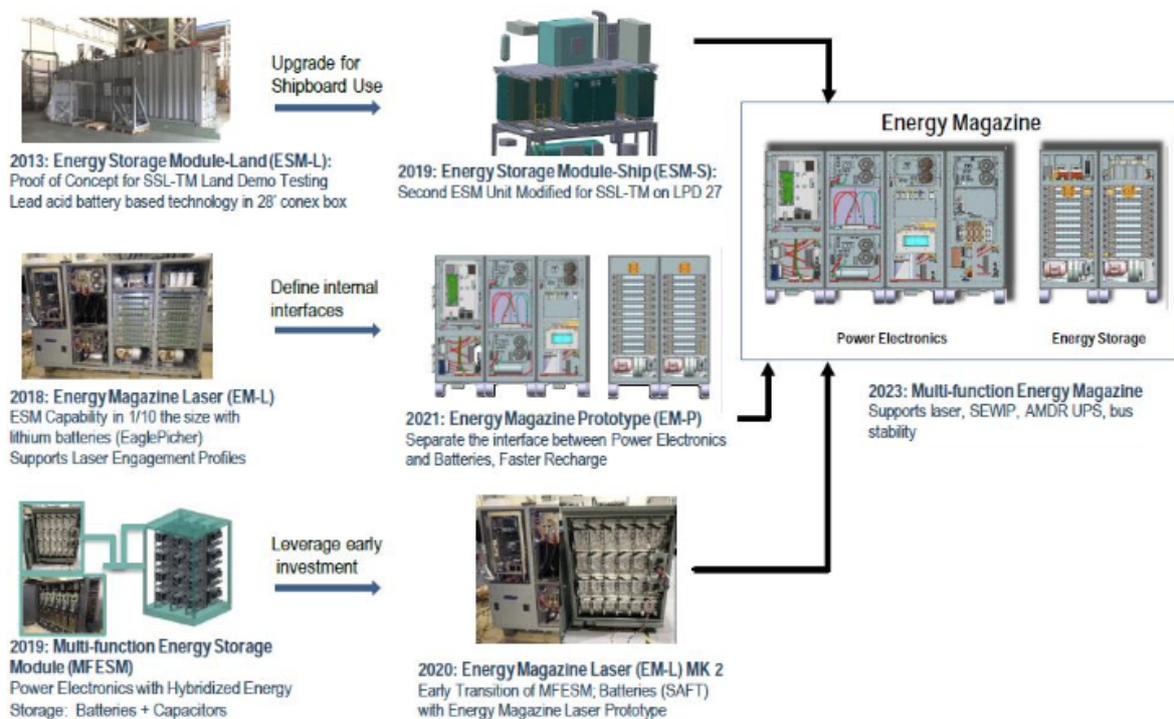
Poder projetar o gerador com maior velocidade de rotação oferece benefícios significativos, já que a mesma potência de saída pode ser alcançada com torque reduzidos, resultando em uma diminuição da velocidade, dimensões e peso do grupo gerador. Contudo, para aproveitar ao máximo as vantagens de um projeto de alta velocidade, é necessário revisar profundamente a tecnologia de geração de energia a bordo, incluindo as inovações tecnológicas de motores (como turbinas a gás de alto desempenho e velocidades variáveis) e em novas categorias de geradores elétricos (Tessarolo, 2013)

Figura 12 – Economia de combustível de um gerador a diesel com velocidade variável



A Figura 13 ilustra a evolução da aparelhagem utilizada para realizar o armazenamento de energia em navios de guerra norte-americanos. Pode-se verificar que a tecnologia mais recente (*Multi-function Energy Magazine*) faz uso maciço da eletrônica de potência. De acordo com Saedifard (2010), utilizar o sistema MVDC ao invés da rede elétrica CA convencional, facilita a integração de sistemas de armazenamento de energia o que resulta em maior eficiência e disponibilidade de energia.

Figura 13 – Armazenamento de energia



Fonte: AMY JR.; DOERRY (2019)

Graças às vantagens mencionadas, a inovadora distribuição MVDC pode ser considerada não apenas uma tecnologia facilitadora para os grandes navios mercantes, mas também representa uma boa oportunidade para aplicações militares. A possibilidade de reduzir o consumo de combustível e de reduzir o volume e peso do sistema de energia são os principais fatores que atraem investimentos de ambos os lados.

CONCLUSÃO

Ao falar sobre o uso da corrente contínua, a eletrônica de potência desempenha um papel fundamental. Hoje em dia, os avanços tecnológicos relacionados a dispositivos semicondutores vem tornando possível a alteração dos sistemas baseados em corrente alternada para os sistemas de energia MVDC.

De acordo com Castellan (2017), os custos para implementação dos sistema MVDC ainda são maiores do que os custos relacionado a um sistema MVAC, mas os benefícios previstos são tão atrativos que chamam a atenção dos grandes construtores navais que desejam estar preparados para equipar suas embarcações com esse inovador sistema quando a tecnologia estiver suficientemente avançada e sua produção em larga escala tornasse mais acessível.

Os sistemas de energia a bordo estão passando por problemas fundamentais para fornecimento de energia confiável e abundante para o futuro geral de frotas totalmente elétricas. Com o barramento de distribuição CC e a conversão de energia no centro dessa transição para obter maior densidade e eficiência de energia, o MVDC é considerado a escolha óbvia para a geração e distribuição de energia a bordo.

Tendo em vista a escassez de documentação de apoio para a transição, este trabalho visa resumir o sistema MVDC enumerando suas vantagens, requisitos e especificações para incentivar novos estudos para sua implementação a bordo de navios, especialmente os Navios da Marinha do Brasil. Espera-se que as informações apresentadas contribuam para facilitar o projeto e o desenvolvimento do SPS MVDC, ou então, pelo menos auxiliie na melhoria dos sistemas de energia a bordo.

5.1 Considerações Finais

Diante da missão da MB de preparar e empregar o Poder Naval para defender a Pátria em um país de dimensões continentais como o Brasil com sua tão vasta costa se faz presente a necessidade de acompanhar os avanços tecnológicos, principalmente aqueles relativos aos meios navais. O sistema de distribuição MVDC é uma dessas evoluções que vai aumentar significativamente a eficiência dos nossos sistemas energéticos de bordo, possibilitando uma maior autonomia que é tão importante para a constante presença dos nossos meios em todos os mais de 3 milhões de quilômetros quadrados da Amazônia Azul.

A substituição do sistema MVAC pelo MVDC é um grande desafio não só para o Brasil mas também para as grandes potências mundiais. Logo, é de suma importância investirmos em P&D nessa área. A atualização dos militares das áreas de eletricidade e eletrônica também é fundamental para posteriormente capacitá-los a operar e manter esses sistemas elétricos e eletrônicos mais avançados.

O trabalho buscou apresentar uma visão geral desta inovação tecnológica propiciada pelo avanço da eletrônica de potência, destacando as significativas vantagens, mas não deixando de citar suas desvantagens e desafios a serem enfrentados. O SPS baseado em MVDC surge como uma evolução aos atuais sistemas elétricos a bordo dos navios. No entanto, há muito trabalho de pesquisa e desenvolvimento a ser realizado para efetivamente ser implementado e se tornar realidade nos navios de guerra.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Sugere-se a realização de um estudo não só da implementação física do sistema MVDC, mas também uma atualização de currículo dos militares responsáveis pelo monitoramento e manutenção dos equipamentos elétricos e eletrônicos de bordo. Os militares do Corpo de Praças da Armada (CPA) da área de eletroeletrônica com especialidade em eletricidade (EL), eletrônica (ET) e comunicações interiores (CI) precisam acompanhar os avanços da eletrônica de potência para no futuro serem capazes de operar o SPS baseado em MVDC.

E os Oficiais do Corpo da Armada com Habilitação em Mecânica (CA-HM) também necessitam aprender sobre essa evolução tecnológica. Nos dias de hoje, apenas os Oficiais que se formaram no Curso de Aperfeiçoamento Avançado sobre Sistema de Controle e Eletricidade de Navios (CAp-A-SCELN) possuem conhecimento acerca do sistema MVDC. Espera-se que este trabalho incentive a procura pelo conhecimento no que diz respeito ao sistema de distribuição de energia de bordo baseado em corrente contínua.

REFERÊNCIAS

- AMY JR., J.; DOERRY, N. *Electric Ship: Historical Perspective*. *IEEE Electric Ship Technology Symposium (ESTS 2019)*. Estados Unidos da América, 13 ago. 2019.
- ARCIDIACONO, V.; MONTI, A.; SULLIGOI, G. *An innovative generation control system for improving design and stability of shipboard medium-voltage DC Integrated Power System*, *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, Estados Unidos da América, p. 152-156, 2009.
- BASH, M. *et al.* *A Medium Voltage DC Testbed for ship power system research*, *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, Estados Unidos da América, p. 560-567, 2009.
- BOSICH, D. *et al.* *High-Performance Megawatt-Scale MVDC Zonal Electrical Distribution System Based on Power Electronics Open System Interfaces*, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, v. 9, n. 3, p. 4541-4551, 2023.
- BOSICH, D. *et al.* *Toward the future: The MVDC large ship research program*, *2015 AEIT International Annual Conference (AEIT)*, Itália, p. 1-6, 2015.
- CASTELLAN, S. *et al.* *Power electronics for all-electric ships with MVDC power distribution system: An overview*, *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Mônaco, p. 1-7, 2014.
- COFFEY, S. *et al.* *Review of MVDC Applications, Technologies, and Future Prospects*. *Energies*, v. 14, n. 24, p. 8294, 9 dez. 2021.
- COOKE, C. M.; MALONE, J.; CHRYSOSTOMIDIS, C. *Impact of MV Standards on Shipboard DC Cable System Size*, *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, v. 9, p. 319-327, 2022.
- Corrente elétrica contínua e alternada: o que são e diferenças.** Portal Solar: a marca líder em energia solar. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/corrente-eletrica-continua-cc-alternada-ca>. Acesso em: 22 out. 2023.
- CUZNER, R. M.; ESMAILI, D. A. *Fault tolerant shipboard MVDC architectures*, *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, Alemanha, p. 1-6, 2015.
- DE SOUZA, Felipe A. C. **Avaliação de Sistemas Diesel Elétrico, Mecânico e Híbrido para embarcações de Apoio a Plataformas.** Projeto final de graduação. Escola Politécnica Engenharia Naval e Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.
- DENG, Q. *et al.* *Primary and backup protection for fault current limited MVDC shipboard power systems*, *2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, Estados Unidos da América, p. 40-47, 2015.
- DOERRY, Norbert. *NGIPS and Product Lines in Transitioning Technology to Naval Ships*. Naval Sea Systems Command.

DONNELLY, T.; RASHKIN, L.; COOK, M. **Performance Evaluation of a Dual Wound Generator for Naval Power System Applications**, 2023 *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Estados Unidos da América, p. 1-7, 2023.

DUJIC, Drazen; JAVAID, Uzair. **MVDC Power Distribution Networks and Technologies for Marine Applications**, *Power Electronics Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne*, Suíça, 18 abr. 2018.

DWORAKOWSKI, Piotr. *et al.* **Protection of radial MVDC electric network based on DC circuit breaker and DC fuses**, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 153, 30 jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109398>. Acesso em: 9 out. 2023.

FAZLAGIC, I.; HANSEN, J.-F.; ÅDNANES, A.K. **Onboard DC Grid – one year in operation**. ABB, 2010. Disponível em: <https://new.abb.com/marine/generations/technology/onboard-dc-grid---one-year-in-operation>. Acesso em: 22 out. 2023.

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

FU, Lijun *et al.* **The research progress of the medium voltage DC integrated power system in China**, *Chinese Journal of Ship Research, Science and Technology on Ship Integrated Power System Technology Laboratory, Naval University of Engineering*, China, v. 11(1), p. 72-79, 2016.

FERNANDES, F. G. **O canhão eletromagnético e as armas de energia direcionada**. *Revista Passadiço*. Rio de Janeiro. Edição 38. Ano XXXI, p. 6-9, Disponível em: https://www.marinha.mil.br/caaml/sites/www.marinha.mil.br.caaml/files/flipping_book/passadico_2018/mobile/index.html. Acesso em: 9 out. 2023.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de Pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

IEEE Recommended Practice for 1 kV to 35 kV Medium-Voltage DC Power Systems on Ships, *IEEE Std 1709-2018 (Revision of IEEE Std 1709-2010)*, p. 1-54, 7 dez. 2018.

JAVAID, U.; DUJIC, D.; VAN DER MERWE, W. **MVDC marine electrical distribution: Are we ready?**, *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Japão, p. 823-828, 2015.

JIN, Z. *et al.* **Next-Generation Shipboard DC Power System: Introduction Smart Grid and dc Microgrid Technologies into Maritime Electrical Networks**, *IEEE Electrification Magazine*, v. 4, n. 2, p. 45-57, Jun. 2016.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Metodologia Científica**. São Paulo: Atlas, 1986.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos metodologia científica**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2001.

LI, B. *et al.* ***Bidirectional Modular Multilevel Resonant DC Converter for MVDC and LVDC Application***, 2023 IEEE 14th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), China, p. 341-346, 2023.

LONG, W. *et al.* ***A Modular Multilevel Converter with Integrated Composite Energy Storage for Ship MVDC Electric Propulsion System***, 2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), China, p. 824-829, 2020.

MARKLE, Steve. ***Sea, Air, and Space. Electric Ships Office*** (PEO Ships/PMS 320). 2016.

MARTINS, J. A. ***Manual para elaboração de monografias e dissertações***. 2 ed. São Paulo: Atlas, 1994.

MENSAH, Paul. ***Understanding the Impact of Electrical Faults on High-Temperature Superconducting Power Cables for MVDC Power Systems of All-Electric Ships***. Marshall Plan Foundation. FAMU-FSU College of Engineering. jan. 2023.

OVERLIN, M. *et al.* ***Hybrid Physics and Machine Learning Models of Desktop-scale Naval Power Systems***, 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Estados Unidos da América, p. 1802-1807, 2023.

SAEEDIFARD, M.; GRAOVAC, M.; DIAS, R. F.; IRAVANI, R. ***DC power systems: Challenges and opportunities***, IEEE PES General Meeting, Estados Unidos da América, p. 1-7, 2010.

SEVERINO, A. J., ***Metodologia do trabalho científico***. 23. ed. rev. e atual. São Paulo: Cortez, 2007.

SPICHARTZ, M.; STAUDT, V.; STEIMEL, A. ***Modular Multilevel Converter for propulsion system of electric ships***, 2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), Estados Unidos da América, p. 237-242, 2013.

SU, C. -L.; LIN, K. -L.; CHEN, C. -J. ***Power Flow and Generator-Converter Schemes Studies in Ship MVDC Distribution Systems***, IEEE Transactions on Industry Applications, v. 52, n. 1, p. 50-59, Jan.-Fev. 2016.

SULLIGOI, G.; TESSAROLO, A.; BENUCCI, V.; TRAPANI, A. M.; BARET, M.; LUISE, F. ***Shipboard Power Generation: Design and Development of a Medium-Voltage dc Generation System***, IEEE Industry Applications Magazine, v. 19, n. 4, p. 47-55, Jul-Ago. 2013.

SULLIGOI, G.; VICENZUTTI, A.; MENIS, R. ***All-Electric Ship Design: From Electrical Propulsion to Integrated Electrical and Electronic Power Systems***, IEEE Transactions on Transportation Electrification, v. 2, n. 4, p. 507-521, Dez. 2016.

TESSAROLO, A.; CASTELLAN, S.; MENIS, R.; SULLIGOI, G. ***Electric generation technologies for all-electric ships with Medium-Voltage DC power distribution***

systems, 2013 *IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, Estados Unidos da América, p. 275-281, 2013.

THANTIRIGE, K.; RATHORE, A. K.; PANDA, S. K.; JAYASIGNHE, G.; ZAGRODNIK, M. A.; GUPTA, A. K. *Medium voltage multilevel converters for ship electric propulsion drives*, 2015 *International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, Alemanha, p. 1-7, 2015.

VU, T. V.; GONSOULIN, D.; PERKINS, D.; PAPARI, B.; VAHEDI, H.; EDRINGTON, C. S. *Distributed control implementation for zonal MVDC ship power systems*, 2017 *IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, Estados Unidos da América, p. 539-543, 2017.

WENG, H.; JIANG, Y.; CHEN, M.; XU, D. *Adjusting the Number of In-use Cells for Higher Efficiency of A DC Solid State Transformer*, 2023 *11th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2023 - ECCE Asia)*, Coreia do Sul, p. 1497-1503, 2023.

YIN, H. *et al. A Comprehensive Review of Shipboard Power Systems with New Energy Sources*, *Energies*, v. 16, n. 5, p. 2307, 27 fev. 2023.

ZOHRABI, N.; SHI, J.; ABDELWAHED, S. *An overview of design specifications and requirements for the MVDC shipboard power system*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 104, p. 680-693, 2019.