



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDA COSTA DE LIMA

**TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO ELÉTRICA AQUAVIÁRIA: PROJETO
CONCEITUAL DE EMBARCAÇÃO HÍBRIDA COM FOCO EM ATENDIMENTO AS
PRÁTICAS AMBIENTAIS, SOCIAIS E DE GOVERNANÇA (ESG)**

BELÉM

2023

FERNANDA COSTA DE LIMA

**TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO ELÉTRICA AQUAVIÁRIA: PROJETO
CONCEITUAL DE EMBARCAÇÃO HÍBRIDA COM FOCO EM ATENDIMENTO
AS PRÁTICAS AMBIENTAIS, SOCIAIS E DE GOVERNANÇA (ESG)**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

Conceito: _____
Belém, 14 de setembro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca
Orientador – PPGEE / UFPA

**Prof^a. Dr^a. Maria Emília de Lima
Tostes**
Avaliadora Interno – PPGEE / UFPA

Dr. Carlos Eduardo Rodrigues
Avaliador Externo – PPGEE / UFPA

**Prof^a. Dr^a. Ana Rosa Carriço de Lima
Montenegro Duarte**
Avaliadora Externa – ICEN/UFPA

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo
com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos
pelo(a) autor(a)**

C837t Costa de Lima, Fernanda.
TECNOLOGIAS DE PROPULSÃO ELÉTRICA AQUAVIÁRIA:
PROJETO CONCEITUAL DE EMBARCAÇÃO HÍBRIDA COM
FOCO EM ATENDIMENTO AS PRÁTICAS AMBIENTAIS, SOCIAIS
E DE GOVERNANÇA (ESG) /
Fernanda Costa de Lima. — 2023.
155 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Wellington da Silva Fonseca Dissertação
(Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2023.

1. Mobilidade elétrica naval; Propulsão Elétrica; Baterias de íon
de lítio; Gestão ESG; Reciclagem; Sustentabilidade. . I. Título.

CDD 621.307209811

in memoriam de Isolina Lima, que nos deixou um vazio, mas também nos deu o presente eterno de seu amor e criação. Aqui está uma parte importante de tudo que nos ensinou. Com amor e saudades.

in memoriam de Rhana R. C. Dias, o ser humano mais forte e perseverante que tive a oportunidade de conhecer.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua infinita bondade e por me manter resiliente em momentos difíceis.

Agradeço ao meu irmão Luciano C. de Lima pelo seu suporte ao longo dos meus estudos. Agradeço a Raquel Corrêa pelos seus cuidados, alegria e sempre estar presente.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao meu orientador, Dr. Wellington da Silva Fonseca, pelas correções e ensinamentos que me permitiram aprimorar meu desempenho ao longo do meu percurso na pós-graduação. Sua orientação foi inestimável para o meu desenvolvimento profissional durante todo o curso. A ele, minha eterna gratidão pela valiosa oportunidade proporcionada.

A minha sincera gratidão ao M.Sc. Áthila Santos, pelo suporte, tempo e paciência durante o período de desenvolvimento deste projeto.

A toda a equipe da ValeVerde, por permitir que eu realizasse a pesquisa de campo e ceder os dados da embarcação e por me receberem imensamente bem, contribuírem com a minha pesquisa de bom grado para realização deste estudo.

Agradeço ao engenheiro naval Gabriel C. Santos pelo seu tempo e ajudar esclarecendo minhas dúvidas.

À instituição de ensino do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, que foi essencial no meu processo de formação profissional e pela dedicação dos professores. Por fim, gostaria de expressar minha gratidão à instituição CAPES de ensino pela infraestrutura e recursos.

Desejo expressar minha sincera gratidão a todos os colegas colaboradores do Laboratório de Concepção e Análise de Dispositivos Elétricos (LCADE) por proporcionarem sempre um ambiente alegre e inspirador. Um agradecimento especial ao engenheiro e amigo M.Sc. Luciano Pompeu. E aos demais colegas, incluindo o professor M.Sc. Roniel Rodrigues, o Engenheiro M.Sc. Iago Moraes, a Engenheira Priscila Lobato e a Química Íris Rodrigues, por estarem constantemente disponíveis para esclarecer dúvidas e nos apoiar da melhor maneira possível. A todos vocês, minha gratidão eterna. Suas contribuições jamais serão esquecidas!

Expresso minha gratidão aos amigos Josivan Reis e Jonathan Munõz pela ajuda nos trabalhos acadêmicos ao longo das disciplinas. Ademais aos colegas de pós-graduação Jéssica Sousa, Sanalto Santos e Jorge Andrey Macêdo pelas ideias compartilhadas ao longo das aulas.

A toda a família “ufraniana” que, mesmo longe, sempre foram as melhores inspirações de vida e acadêmica, os professores Dr. Otávio Chase, Dr. Ricardo Pereira e Professora e mentora Dra. Cyntia Meireles. A estes toda a gratidão. Os demais “ufranianos”, o engenheiro Francisco Noronha e Engenheira Allyne Maciel, por sempre estarem perto nos diversos momentos da minha vida e fornecerem ajuda acadêmica sempre.

Por fim, deixo a minha gratidão a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, enriquecendo o meu processo de aprendizado.

RESUMO

A pesquisa sobre o sistema de mobilidade elétrica naval contribuí significativamente para a transição energética hidroviária. Dados estes mostrados, a partir dessa pesquisa que investiga as tecnologias de propulsão elétrica como uma solução para a mobilidade hidroviária sustentável. A proposta envolve a modificação do sistema de propulsão convencional a combustão para um sistema elétrico, equipado com módulos fotovoltaicos para torná-lo mais eficiente. O propósito do barco é fazer viagens curtas, transportando turistas ao longo da costa do Rio Guajará, localizado na região da Amazônia Oriental de Belém/Pará. A partir da descrição do Projeto conceitual, analisou as previsões e os impactos dos barcos elétricos na indústria marítima, considerando especificamente a dependência de Elementos de Terras Raras para produção da alta tecnologia naval elétrica. A proposta de eletrificação ilustra as principais tecnologias do setor marítimo, que inclui: banco de baterias de íons de lítio, motores elétricos e módulos fotovoltaicos. A metodologia foi composta por meio de visitas técnicas usando um questionário semiestruturado para obter informações sobre o modal e levantamento da irradiação local. A partir do dimensionamento do sistema, mostrou os benefícios da propulsão elétrica em termos de eficiência energética, viabilidade econômica e redução de emissões de GEE do projeto. Mediante o contexto, o sistema apresentou resultados satisfatórios, mas com vários limitações e desafios a superar, incluindo a energia sistema de armazenamento, ou seja, a necessidade de mais energia aumenta a bateria consumo, criando um ciclo de aumento contínuo de peso, demanda energética e alto custo. Por fim, propõem as recomendações apresentadas para a implementação efetiva do projeto no futuro. Para o direcionamento dos equipamentos em depreciação do sistema propulsivo elétrico, em torno da recuperação dos Elementos de Terras Raras com foco a necessidade em abastecer a cadeia de suprimento e visando um planejamento futuro. No entanto, um dos grandes desafios, estão em torno da viabilidade metodológica e preservar as propriedades magnéticas, para assim retornar a cadeia produtiva. É importante ressaltar que, a análise ESG é fundamental para identificar riscos potenciais ambientais e sociais associados às críticas minerais aplicadas em VEs marítimos. Além disso, permite o desenvolvimento de estratégias de mitigação, incentiva a inovação em processos produtivos sustentáveis e promove a adoção de melhores práticas na indústria. A consideração desses aspectos contribui para a construção de uma cadeia de suprimentos responsável e justa. Embora existam desafios de viabilidade econômica e estratégias das *stakeholders*, na qual a recuperação desses materiais poderia ser uma fonte de abastecimento significativa por um determinado período para acelerar o processo de transição energética justa.

Palavras-chave: Mobilidade elétrica naval; Propulsão Elétrica; Baterias de íon de lítio; Gestão ESG; Reciclagem; Sustentabilidade.

ABSTRACT

Research into the naval electric mobility system has made a significant contribution to the waterway energy transition. This research investigates electric propulsion technologies as a solution for sustainable waterway mobility. The proposal involves modifying the conventional combustion propulsion system to an electric system, equipped with photovoltaic modules to make it more efficient. The purpose of the boat is to make short journeys, transporting tourists along the coast of the Guajará River, located in the Eastern Amazon region of Belém/Pará. Based on the description of the conceptual project, the forecasts and impacts of electric boats on the maritime industry were analysed, specifically considering the dependence on Rare Earth Elements to produce high-tech naval electrics. The electrification proposal illustrates the main technologies of the maritime sector, which include: lithium-ion battery banks, electric motors, and photovoltaic modules. The methodology consisted of technical visits using a semi-structured questionnaire to obtain information about the modal and a survey of local irradiation. Based on the sizing of the system, it showed the benefits of electric propulsion in terms of energy efficiency, economic viability, and reduction of the project's GHG emissions. However, one of the major challenges is methodological feasibility and preserving the magnetic properties to return to the production chain. It is important to emphasise that ESG analysis is fundamental for identifying potential environmental and social risks associated with mineral criticism applied to marine EVs. It also allows for the development of mitigation strategies, encourages innovation in sustainable production processes and promotes the adoption of best practices in the industry. Taking these aspects into account contributes to building a responsible and fair supply chain. Although there are challenges of economic viability and stakeholder strategies, the recovery of these materials could be a significant source of supply for a certain period to accelerate the process of just energy transition.

Keywords: Electric mobility ship; Electric Propulsion; Lithium-ion batteries; *ESG* management; Recycling; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Pesse Canoe.....	25
Figura 2- Um dos primeiros barcos elétricos projetados	26
Figura 3- Balsa elétrica	31
Figura 4- Barco elétrico solar ECOBOAT	32
Figura 5- Barco elétrico solar	32
Figura 6- Veleiro Elétrico	33
Figura 7- Catamarã Elétrico.....	33
Figura 8- Barco elétrico	34
Figura 9- Protótipo tamanho real	34
Figura 10- Navio E-Ship 1	35
Figura 11- Países contribuintes de peças	36
Figura 12- Canoa elétrico solar.....	37
Figura 13- Barco solar na Amazônia-P&D.....	37
Figura 14- Barcos equipados com SFV	38
Figura 15- Protótipo solar aquático	39
Figura 16- Categorias dos diferentes tipos de Veículos Elétricos.	41
Figura 17- Modelos de carregadores de VEs.....	43
Figura 18- Estação de carregamento no cais	44
Figura 19- Esquema de um sistema de propulsão naval.....	46
Figura 20- Diagrama em blocos de um Sistema de Propulsão Elétrica.....	47
Figura 21- Cronologia dos tipos de propulsão elétrica de embarcação.	48
Figura 22- Sistema de propulsão híbrido FV- diesel de embarcação	50
Figura 23- Diagrama de configuração do sistema elétrico marítimo.....	50
Figura 24- Sistema propulsivo puro elétrico	52
Figura 25- Configuração do sistema de propulsão híbrido em série.	54
Figura 26- Configuração do sistema de propulsão híbrido paralelo.....	54
Figura 27- Número total de navios com baterias	56
Figura 28- Representação de um navio com baterias	56
Figura 29- Motor movido à energia nuclear de um submarino no Brasil.....	57
Figura 30-Tabela periódica química delineando os 17 elementos REE	60
Figura 31- Elementos importante para a evolução das tecnologias.....	62
Figura 32- Tecnologias de armazenamento de energia elétrica.....	66

Figura 33- Principais partes de uma bateria de chumbo ácido	67
Figura 34- Bateria de NiCd para VEs	68
Figura 35- Bateria de íon de lítio e composição das células.....	69
Figura 36- Relação entre energia específica e densidade	70
Figura 37- Principais componentes de uma <i>Fuel Cells</i> unitária e genérica.....	72
Figura 38- Células de combustível para propulsão de navios	73
Figura 39- Combinação de painéis em um arranjo fotovoltaico.....	75
Figura 40- Tipos de células fotovoltaicas	75
Figura 41- Célula fotovoltaica monocristalina	76
Figura 42- Pequenos cristais na célula policristalina.....	77
Figura 43- Microestrutura de células finas e flexíveis.....	78
Figura 44- Módulo PV de terceira geração.....	79
Figura 45- Etiquetagem do módulo FV	81
Figura 46- Tipos de posicionamento dos ímãs no rotor.....	83
Figura 47- Motor de indução são usados por navios	84
Figura 48- Sistema elétrico com uso do motor de popa elétrico	85
Figura 49- Fluxograma de metodologia pós projeto.....	89
Figura 50- Planta do barco a combustão.....	90
Figura 51- Componentes do sistema propulsão de barcos.....	92
Figura 52- Mapa de localização da rota da embarcação	93
Figura 53- Curva extrapolada da Potência x Velocidade em nós	95
Figura 54- Inversor Controlador de Potência	97
Figura 55- Processo do carregamento do banco de baterias.....	103
Figura 56- Radiação solar local	106
Figura 57- Organização dos módulos FV no toldo da embarcação	111
Figura 58- Carregador rápido	112
Figura 59- Diagrama de Propulsão Proposto	113
Figura 602- Fluxo de caixa	116
Figura 61- Estimativa da evitação de carbono do barco com propulsão elétrica	118
Figura 62-Relação do uso sistema Híbrido com fator diesel	119
Figura 63- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Principais estudos científicos para embasamento da pesquisa	29
Tabela 2- Dados técnicos do Navio de propulsão elétrica <i>E-Ship 1</i>	36
Tabela 3- Diferentes tecnologias aplicadas aos VEs marítimos	41
Tabela 4- Tipos de eletropostos por velocidade de recarga.....	43
Tabela 5- Medidas para melhorar a eficiência no transporte marítimo até 2050.	45
Tabela 6- Principais componentes de configuração do sistema elétrico (Figura 23)	51
Tabela 7- Reservas Mundiais de Minas de terras raras	61
Tabela 8- Materiais estratégicos aplicados em barcos elétricos	63
Tabela 9- Comparação do desempenho das diferentes baterias de aplicação marítimas.....	71
Tabela 10- Comparação das tecnologias SFV	80
Tabela 11- Análise comparativa dos motores elétricos	86
Tabela 12- Especificações técnicas do barco a combustão.....	91
Tabela 13- Custo de manutenção com o barco a combustão	91
Tabela 14- Dados da embarcação elétrica híbrida	93
Tabela 15- Dados de entrada embarcação Holtrop Resistência ao avanço.....	94
Tabela 16- Especificações técnicas do motor marítimo	96
Tabela 17- Especificações técnicas da bateria	100
Tabela 18- Análise do potencial dos Módulos FV	104
Tabela 19- Especificações técnicas dos módulos FV	105
Tabela 20- Especificações do sistema fotovoltaico	109
Tabela 21- Energia AC do sistema fotovoltaico mensal.....	109
Tabela 22- Indicadores do cenário base.....	114
Tabela 23- Itens que contribuem para o custo do investimento inicial	115

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Evolução do preço dos elementos REE	122
Gráfico 2- Evolução do preço dos elementos REE	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ONU	Organização Internacional das Nações Unidas
CEAMAZON	Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia
CBMM	Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração
CO ₂	Dióxido de Carbono
ESG	<i>Environmental Social and Governance</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
IEA	<i>International Energy Agency</i>
REE	Elementos de Terras Raras (<i>earth element, em inglês</i>)
Eu	Európio
FeB	Ferro boro
FeDy	Ferro disprósio
ITR	Ímãs de Terras Raras
Nd	Neodímio
NdFeB	Neodímio ferro boro
PMSM	Permanent Magnet Synchronous (Imã permanente síncrono)
VEs	Veículos Elétricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Contextualização do tema.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	19
1.3	Delimitação do Tema	22
1.4	Objetivos	22
1.4.2	Objetivo Geral	22
1.4.3	Objetivos Específicos	22
1.5	Estrutura da monografia	23
2	ESTADO DA ARTE	25
2.1	Contexto histórico das Embarcações Elétricas.....	25
2.2	Barcos elétricos equipados com módulos Fotovoltaico.....	27
2.3	Embasamento teórico.....	28
2.3.1	Barcos elétricos pelo mundo	31
2.3.2	Navios.....	35
2.3.3	Barcos elétricos no Brasil.....	36
2.3.4	Barcos elétrico solar desenvolvido para Torneios.....	38
2.3.5	Desenvolvido para pesquisa	38
2.3.6	Conclusão deste capítulo	39
3	MOBILIDADE ELÉTRICA NAVAL	40
3.1.1	Avanço da mobilidade elétrica	40
3.1.2	Estratégia de carregamento dos VEs marítimos.....	42
3.1.3	Programas de incentivo à mobilidade elétrica.....	44
3.1.4	Evolução dos Sistemas Propulsivos Elétricos Navais.....	46
3.2	<i>Powertrain</i> Elétrico Marítimo	49
3.2.1	Sistema elétrico híbrido naval	49
3.2.2	Sistema Elétrico Puro Naval	52
3.2.3	Resultados de combinação sistema propulsão elétrica Naval	52
3.2.4	Sistema híbrido em série	53
3.2.5	Sistema híbrido em paralelo	54
3.2.6	<i>PowerTrain</i> dos Navios.....	54
3.2.7	Propulsão Nuclear	56
3.2.8	Conclusão deste Capítulo	57

4	TENDÊNCIAS DE TECNOLOGIA PARA VES MARÍTIMO	58
4.1	Minerais estratégicos aplicados na cadeia produtiva de VEs marítima	58
4.1.1	Ímãs Permanentes.....	63
4.2	Sistemas de Armazenamento de Energia	65
4.2.1	Baterias de Chumbo-Ácido (Pb-Ac)	67
4.2.2	Baterias de Níquel Cádmio (Ni-Cd).....	67
4.2.3	Baterias de Íon-Lítio (Li ⁺).....	68
4.2.4	Avaliação Comparativa das Baterias.....	69
4.3	Sistema de Armazenamento com Célula de Combustível	71
4.4	Módulos Fotovoltaicos	74
4.4.1	Células Monocristalina.....	75
4.4.2	Célula Policristalino	76
4.4.3	Células de Filme Fino	77
4.4.4	Células de Perovskitas.....	78
4.4.5	Avaliação comparativa dos módulos Fotovoltaicos.....	79
4.5	Motores Elétricos.....	81
4.5.1	Avaliação comparativa dos Motores Elétricos.....	83
4.6	Conclusão deste capítulo.....	86
5	PROJETO CONCEITUAL DE EMBARCAÇÃO ELÉTRICA.....	88
5.1	Introdução.....	88
5.2	Metodologia.....	88
5.3	Características embarcação a combustão	90
5.4	Dimensionamentos do Sistema Propulsivo Elétrico do Barco	91
5.4.1	Definição do percurso	92
5.4.2	Análise de Resistência ao Avanço	94
5.4.3	Dimensionamentos do Sistema Propulsivo	95
5.4.4	Seleção do Drive de Controle.....	97
5.5	Definição do Banco de Baterias.....	98
5.5.1	Profundidade de descarga (<i>Depth of discharge – DoD</i>)	98
5.5.2	Profundidade de carga/descarga (<i>C-rate</i>).....	99
5.5.3	Dimensionamento dos bancos de baterias.....	99
5.6	Estratégia de carregamento das baterias	102
5.6.1	Planejamento de carregamento.....	103
5.6.2	Especificações técnicas dos Painéis Fotovoltaicos	104

5.7	Procedimento de recarga sistema autônomo	111
5.7.1	Diagrama do Conjunto de Propulsão Elétrica	112
5.8	Análise de custos.....	113
5.8.1	<i>Payback</i> (Retorno de Investimento).....	113
5.8.2	Cenário I: <i>Payback</i> com Base no Tempo de Vida dos Equipamentos	114
5.8.3	Cenário II: <i>Payback</i> Considerando a Compensação de Carbono.....	116
5.8.4	Análise Ambiental da mitigação de GEE.....	117
5.9	SÍNTESE DOS RESULTADOS.....	119
5.9.1	Análise ambiental por meio da abordagem ESG dos minerais críticos aplicados VEs 120	
5.9.2	Preço das <i>Commodities</i> Minerais de REE	121
5.9.3	Mobilidade elétrica Naval e sua contrição com a ODS por meio da ESG.....	125
5.10	Conclusão deste capítulo.....	128
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICOS.....	135

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório é apresentada a contextualização do tema de pesquisa, os objetivos do estudo, delimitação, justificativa pela escolha do tema e a estrutura da dissertação.

1.1 Contextualização do tema

Como diz a canção “Esse Rio é minha rua”, composição de Paulo André e Ruy Barata (1990), retrata a grande diversidade de cursos hídricos e das bacias hidrográficas da região da Amazônia, que são interligadas por afluentes que captam e descolocam volumes de água para o seu rio principal, sendo proximamente 6. 992,06 quilômetros de rios navegáveis que são de suma importância para integração social, econômica e ambiental (OLIVEIRA, 2014).

Dado o contexto, a canção destaca a importância da integração entre rios e embarcações que são formas importantes de conexão e transporte em muitas regiões da Amazônia. Em suma, os rios têm desempenhado um papel significativo na história da humanidade, servindo como vias navegáveis naturais para o comércio, transporte de pessoas e intercâmbio cultural.

Nesse contexto, durante os anos 2020 e 2021, na região Norte do Brasil, mais especificamente no estado do Pará, havia aproximadamente 22.773 embarcações que estavam sob a jurisdição da Capitania dos Portos da Amazônia (CPAOR, 2021). Além disso, na cidade de Belém, havia o registro de cerca de 30 mil embarcações destinadas ao transporte de passageiros, desempenhando um papel crucial no fomento do turismo local (CPAOR, 2021).

Apesar da sua significativa importância para diversas regiões, o setor de transporte de embarcações marítimas desempenha um papel substancial como contribuinte de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), pois operam consumindo diesel, derivado de combustíveis fósseis (KHOBAN *et al.*, 2020; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2022).

Projeta-se que as emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes da indústria marítima possam representar entre 12% e 18% do total de emissões até 2050, segundo dados do Relatório de Estudo de Efeito Estufa da Organização Marítima Internacional (OMI, 2022).

Como parte dos esforços para diminuir as emissões provenientes de veículos (tanto local quanto global) e garantir a segurança no abastecimento energético, diversos países têm implementado estratégias visando promover uma economia de baixo teor de carbono. Isso tem sido alcançado por meio da substituição de veículos de combustão interna através da adoção de uma matriz mobilidade proveniente elétrica (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE,

2018; LIMA *et al.*, 2022). A mobilidade elétrica, uma tecnologia eficiente em desenvolvimento, que busca substituir veículos com motores de combustão interna por opções elétricas.

A mobilidade elétrica emerge como uma tecnologia altamente eficaz, em constante desenvolvimento, com o propósito de substituir os veículos equipados com motores a combustão interna por alternativas elétricas. Essa abordagem abarca uma ampla gama de veículos, incluindo embarcações, que podem ser configuradas com sistemas de propulsão elétrica puros ou híbridos. Estes últimos utilizam sistemas de armazenamento de energia para alimentar os motores elétricos (DUTTA *et al.*, 2020; DAMIAN *et al.*, 2022).

Conforme mencionado anteriormente, as embarcações desempenham um papel economicamente crucial, e várias pesquisas destacam a imperativa inclusão desses Veículos Elétricos (VEs) aquáticos no mercado. Isso se apresenta como uma oportunidade excepcional para promover a transição da matriz energética aquaviária em ambientes naval, sendo uma excelente oportunidade desenvolvida para alcance das metas de redução de emissões de CO₂ em até 50% (BLANCAS *et al.*, 2018; KHOBAN *et al.*, 2020).

Além de possuírem baixa emissão de carbono, alta eficiência, custo de manutenção baixo, diminuição de emissão gases tóxicos, ausência de ruídos e diminuição da poluição das águas, se colocam em um novo ciclo tecnológico e de mercado, bem como criam e/ou ampliam cadeias de fornecedores de bens e serviços associados (EPE, 2018; SPAGNOLO *et al.*, 2012; NORA *et al.*, 2020; DUTTA *et al.*, 2020; DP HUNG *et al.*, 2022).

Apesar da importância crucial da transição para a mobilidade elétrica, esse processo pode acarretar incertezas na cadeia de produção, especialmente em relação à demanda por elementos críticos indispensáveis na implementação dos Veículos Elétricos (VEs) na indústria naval.

O cerne da questão está relacionado à demanda substancial por esses elementos, os quais são essenciais para sustentar a cadeia de fornecimento na indústria tecnológica dos Veículos Elétricos (VEs). Isso amplifica as crescentes preocupações de que o mundo possa deparar-se com um potencial escassez de Elementos de Terras Raras (REE, em inglês), especialmente para a fabricação de ímãs permanentes compostos por esses elementos, essenciais para aplicação em motores elétricos com alta eficiência (SANTOS, 2014; U.S. GEOLOGICAL SURVEY- USGS, 2021; BOFANTE, 2021).

Dado o contexto, a restrição dos REE está em torno dos elementos considerados pesados, pois são menos abundantes e usados em mais aplicações tecnológicas, sendo capaz de ocasionar a sua restrição no mercado e por consequência aumento do preço U.S. DEPARTMENT OFF ENERGY - CRITICAL MATERIALS STRATEGY, 2010; SANTOS,

2014; U.S. GEOLOGICAL SURVEY- USGS, 2021). Além disso, a restrição dos REE pode acarretar conflitos geopolíticos, já que não possuem concentração mineral bem estabelecidas dos REE e necessitam para supri a indústria da alta tecnologia (U.S. DEPARTMENT OFF ENERGY - CRITICAL MATERIALS STRATEGY, 2010).

Além disso, as cadeias de exploração mineral contribuem para altas emissões, resíduos e poluição da água pela extração e processamento mineral, aumentando a probabilidade desses impactos em vantagens dos EVs (BLOOMBERG, 2023).

Portanto, a necessidade por uma economia de baixo carbono, requer fundos específicos para que as montadoras de VEs possam priorizar produções sustentáveis, indo de encontro com o modelo de gestão ambiental da ESG, que englobam os seguintes pilares: ambiental, social e governança (ESG, sigla em inglês, que significa *environmental, social and Governance*), sendo a reciclagem dos elementos críticos uma proposta, reforçando a necessidade de segurança do produto em relação o quociente de sustentabilidade (BLOOMBERG, 2023).

Além disso, espera-se que as empresas que atuam nos setores de Veículos Elétricos (VEs) e mineração possam adotar abordagens e iniciativas que estejam em conformidade com os princípios de ESG e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pelas Nações Unidas. Essa adoção possibilitaria uma transição que esteja alinhada com o desenvolvimento sustentável e que contribua para a redução dos impactos ambientais, como destacado em um relatório recente da BLOOMBERG (2023) e IEA (2022).

Diante do exposto, o trabalho divide-se em duas análises: a primeira, consiste na criação de um Projeto Conceitual, que propõe a substituição da propulsão convencional, que utiliza motor de combustão interna, por uma tecnologia elétrica híbrida, equipada com painéis fotovoltaicos como fonte de energia renovável, para a região da Amazônia Oriental.

Enquanto a segunda análise, baseia-se no modelo de gestão ambiental da ESG, tendo a reciclagem como proposta para ciclo final dos equipamentos da embarcação, componentes estes que contém Elementos de Terras Raras, sendo grandes aliados para o processo de transição energética veicular marítima.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este estudo traz uma abordagem da necessidade e importância de inserir veículos marítimo elétricos no processo de transição energética justa para a região da Amazônia Oriental. A transição energética justa é um processo que visa beneficiar a sociedade como um todo, indo

além de simplesmente reduzir as desigualdades sociais, o consumo de energia e as emissões per capita (COUTINHO, 2023). Essa transição busca promover a equidade social e ambiental, garantindo que todos os membros da sociedade tenham acesso a oportunidades igualitárias, sustentáveis e não sejam prejudicadas pelo processo de transição energética.

Outro aspecto sensível sob o ponto de vista socioambiental está direcionado a mineração e a metalurgia que são atividades fundamentais para desenvolvimento da alta tecnologia, servindo como alicerces econômicos para muitos países, particularmente aqueles que detêm reservas de Elementos de Terras Raras (REE, sigla em inglês), pois estes impulsionam o progresso na mobilidade elétrica aquaviária, pois são essenciais para alta eficiência em equipamentos como motores elétricos e baterias. Contudo, são atividades que causam diversos impactos socioambientais, em alguns casos irreversíveis.

No mercado global de REE, os minerais críticos são considerados altamente vulneráveis devido ao monopólio da cadeia de suprimentos, que impulsiona a transição de uma matriz energética convencional limpa (QUAN LI *et al.*, 2022). Além disso, a mineração, o processamento e o refino envolvem diversos riscos ambientais, incluindo degradação do ecossistema, poluição química e perigos relacionados à exposição a produtos químicos e particulados que são altamente contaminantes (QUAN LI *et al.*, 2022).

Diante dos aspectos citados, as empresas estão focadas em mitigar seus impactos socioambientais, através das práticas contidas no modelo ESG. A sigla ESG vem sendo utilizada nos últimos anos em prol de fomentar as práticas sustentáveis no ambiente corporativo, concentrado principalmente em empresas dos setores industriais e de mineração (NAÇÕES UNIDAS, 2017; PA LONTSIKH, 2022; IBRAM, 2023).

Mediante a isso, para que as empresas globais possam desenvolver estratégias de negócios com base nos princípios ESG, precisam atender os critérios de decisões de investimento, no qual, poderá gerar impactos significativos na indústria e sociedade (I. MOISEIENKO, 2020; PA LONTSIKH, 2022). Para definir as metas de negócio com aplicação do ESG, as empresas devem atender os seguintes critérios (PA LONTSIKH, 2022).

a) **Ambiental-E:** - Política de mudanças climáticas; - Poluição do ar e da água; - Desmatamento; - Gestão de Resíduos e Materiais Perigosos; - Escassez de água; - Utilização de energias renováveis; - Reciclagem dos minerais essenciais para a cadeia produtiva; - Gestão ambiental.

b) **Social-S**:- Relações com as comunidades locais; - Direitos humanos; - Condições de trabalho; - Segurança do produto; - Privacidade do cliente; - Diversidade e Inclusão; - Aprovisionamento ético.

c) **Governança-G**:- Estrutura de gestão; -Recompensa; -Conselho Administrativo; - Integridade empresarial; - Transparência; - Corrupção; -Pressão; - Relacionamento com acionistas; - Esquemas de denúncia (PA LONTSIKH, 2022).

Em resumo, a indústria de mineração e metalurgia sustenta o desenvolvimento da alta tecnologia, enquanto os REE desempenham um papel fundamental no avanço da mobilidade elétrica. A pesquisa em si buscar contribuir na ampliação de estudos voltados para a Matriz de Mobilidade Elétrica Aquaviária e relevância da cadeia de suplemento REE direcionado para reciclagem ou reaproveitamento para suprir uma possível escassez no futuro.

Ressalta-se que no Brasil as atividades são submetidas ao rito de licenciamento ambiental que estabelece medidas de mitigação, prevenção e compensação para minimizar dos efeitos dos impactos socioambientais em níveis aceitáveis, para equilibrar as atividades em função da transição energética justa (EPE, 2019).

Para as indústrias de produção da alta tecnologia, todos os três pilares da ESG são essenciais para mitigar as emissões GEE e cadeia de suprimentos sustentáveis (TR TEOR, 2022). Por fim, tais fatores evidenciam a necessidade de maior exploração científica, assim como, o desenvolvimento de metodologias para recuperação dos minerais considerados críticos, aplicados na cadeia de suprimentos da mobilidade elétrica como um todo.

Diante do exposto o trabalho propõe a modificação do sistema elétrica tradicional em elétrica, com analisando suas implicações na sustentabilidade e sua contribuição para a redução das emissões de GEE para a região da Amazônia. O estudo envolverá uma revisão aprofundada da literatura científica e técnica sobre a indústria de barcos elétricos, abordando aspectos como desempenho, eficiência energética, custos operacionais e impactos ambientais. Será dada atenção especial à análise da dependência de terras raras na produção e uso dessas embarcações.

Além disso, serão examinados os desafios e oportunidades associados à disponibilidade, remoção, produção e reciclagem desses elementos, direcionado para os aspectos econômicos, geopolíticos e ambientais, a fim de compreender o processo de mineração para suprir a cadeia ao longo prazo dos barcos elétricos em relação à quantidade desses recursos.

A pesquisa também abordou possíveis alternativas às terras raras na tecnologia dos barcos elétricos, como o desenvolvimento de materiais substitutos e a otimização dos sistemas

de propulsão. Serão comprovadas as implicações dessas alternativas em termos de desempenho, custo e impacto ambiental.

1.3 Delimitação do Tema

O presente projeto consiste no estudo do sistema de propulsão solar elétrico do barco para a realização do trajeto turístico no Rio Guajará. Pretende-se mostrar se uma possível modificação no sistema propulsivo da embarcação, analisando a viabilidade, transformando-o em um barco elétrico Híbrido. Além de analisar a importância dos elementos críticos para viabilizar uma matriz de mobilidade elétrica, com abordagem no veículo marítimo. Em nenhum momento a realização prática do projeto é considerada.

1.4 Objetivos

O objetivo geral e específico são descritos nos tópicos em seguida.

1.4.2 Objetivo Geral

Diante do exposto, o trabalho divide-se em duas análises: a primeira consiste na criação de um Projeto Conceitual, no qual será apresentado o projeto reformulado do sistema de propulsão a combustão em elétrica híbrida. A partir disso, serão detalhadas as especificações dos componentes selecionados, a configuração do sistema, os cálculos de potência e a análise de eficiência energética. Serão também discutidos os benefícios esperados em termos de redução de emissões e sustentabilidade.

Enquanto a segunda análise, baseia-se, em avaliar a viabilidade da reciclagem: onde abrange o ciclo final dos componentes da embarcação, considerando suas propriedades físicas, composição química e potencial de reciclagem. A partir dessa análise, determinou-se se o produto pode ser reciclado de forma eficiente e econômica, considerando os elementos terras raras para produção de ímãs permanentes.

1.4.3 Objetivos Específicos

I. Propor um sistema de Propulsão Elétrica Híbrida equipado com módulos fotovoltaicos.

- II. Analisar os componentes e conexões da embarcação, além dos seus desafios tecnológicos e eficiência energética.
- III. Análise comparativa em relação a redução das emissões produzidas por veículos a combustão em comparação com os veículos elétricos híbridos.
- IV. Análise de custo e retorno de investimento.
- V. Análise da importância da reciclagem dos minerais críticos essenciais para aplicação na cadeia produtiva dos VEs aquaviário, através dos benefícios gerados por meio da aplicação da ESG.

1.5 Estrutura da monografia

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos, além das referências bibliográficas. No **Capítulo 1** foi apresentado a introdução que contém a contextualização do tema, objetivos e justificativas da pesquisa.

Capítulo 2 apresentado o levantamento do “Estado da Arte” das embarcações elétricas, baseado primeiramente no registro histórico das embarcações, por meio das análises de fontes secundárias para subsídio da pesquisa, consultas em livros, dados estatísticos, orientações técnicas disponibilizadas por órgãos, como o Marinha do Brasil, que estabelecem normas das especificações técnicas elétricas para embarcações e entre outros documentos. Além disso, buscou mostrar o estado atual das tecnologias de propulsão elétrica em embarcações, incluindo navios, balsas, barcas, entre outros.

Em seguida, no **Capítulo 3**, traz-se o contexto histórico da eletrificação dos veículos no Século XIX. Como também uma abordagem da configuração da propulsão utilizada no modal em questão. Serão identificados os componentes, a potência necessária e os possíveis problemas ou limitações do sistema atual dos tipos de *PowerTrain* naval, tendências e estimativa de avanço dos modais elétricos marítimos.

No **Capítulo 4** é feita uma abordagem da aplicação dos elementos de terras raras na mobilidade elétrica aquaviária, onde será discutido o papel desses minerais na eficiência e no desempenho dessas tecnologias, bem como as implicações socioambientais associadas à sua extração e processamento. Além disso, neste capítulo, são exploradas as opções de propulsão elétrica disponíveis para atender aos requisitos de velocidade e potência do modal e serão discutidos diferentes tipos de motores elétricos, sistemas de armazenamento de energia e a integração de painéis fotovoltaicos para fornecer energia renovável. Com base nessas

informações foram selecionadas a tecnologia para compor o sistema propulsivo elétrico para a embarcação.

Para que no **Capítulo 5** seja descrito o Projeto Conceitual e seus resultados, foi realizada uma análise da configuração de propulsão atualmente utilizada no modal em questão. A partir disso, identificou-se os componentes, a potência necessária e os possíveis problemas ou limitações do sistema atual. Além disso, buscou detalhar as especificações dos componentes selecionados, a configuração do sistema, os cálculos de potência, a análise de eficiência energética e a viabilidade econômica.

Por fim, a última análise foi realizada por meio da gestão do enquadramento da mobilidade elétrica aquaviária dentro dos princípios ESG, riscos associados à dependência de terras raras na indústria aquaviária. Mediante a isso, foram discutidas abordagens de sustentabilidade, incluindo a reciclagem de materiais, a diversificação da cadeia de suprimentos e o desenvolvimento de alternativas tecnológicas, com intuito propor reciclagem ou destinação correta, no ciclo final dos equipamentos que compõem os sistemas propulsivos da embarcação, com ênfase naqueles que possuem REE e ímãs permanentes na sua composição.

E por fim, no **Capítulo 6** são feitas as considerações finais e sugestão de trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

A partir do levantamento do estado da arte das embarcações elétricas com sistemas híbridos, este capítulo abrange o seu contexto histórico, até os estudos e projetos mais recentes, desenvolvidos em diferentes locais e aplicações.

2.1 Contexto histórico das Embarcações Elétricas

As embarcações, já eram utilizadas pelas primeiras civilizações para fins de locomoção, pesca e caça. Do ponto de vista arqueológico, o *Pesse Canoe* é considerado o primeiro barco do mundo, tendo três metros de comprimento e 44 centímetros de largura, esculpido a machado de um tronco de Pinheiro escocês, construído durante o período Mesolítico, mostrado na Figura 1 (DRENTSMUSEUM, 2022).

Figura 1-Pesse Canoe



Fonte: Drentsmuseum (2022). Disponível em: <https://drentsmuseum.nl/en/in-the-spotlight-top-exhibits/pesse-canoe>. Acesso em: 26 de junho de 2023.

Paralelo a isso, os barcos têm sido uma forma vital de transporte e comércio ao longo da história, desde a sua invenção até ao desenvolvimento dos barcos elétricos. Dessa forma, o contexto histórico da mobilidade elétrica vai muito além dos carros, pois no período de 1975, surgiram as primeiras embarcações elétricas na Inglaterra (OLIVEIRA *et al.* 2017). A aplicação da Propulsão Elétrica no setor naval deu início no Século XIX, com a construção e operação de uma pequena embarcação movida a baterias na Rússia, o barco transportava 14 passageiros, no

qual foram usadas baterias de zinco contendo 320 pares de placas de 180 kg (REVISTA TODAY'S ENGINEER, 2013). Embora o protótipo de barco conseguisse viajar a uma velocidade de aproximadamente 2,5 km por hora, o seu banco de baterias consumia muita energia para a realização da viagem, tornando-a inviável a Figura 2 apresenta um dos primeiros barcos desenvolvido no século XIX (REVISTA TODAY'S ENGINEER, 2013).

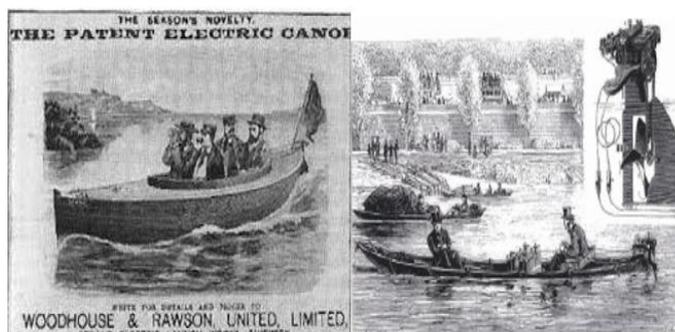
Figura 2-Um dos primeiros barcos elétricos projetados



Fonte: Today's Engineer (2013). Disponível em: https://ethw.org/Main_Page. Acesso: 26 de junho de 2023.

Mais adiante, no fim do Século XIX, surgiu uma diversidade de barcos elétricos, que com o estabelecimento de uma empresa passaram a ser comercializados no ano de 1892, como observado o anúncio da Figura 4 (HAWTHORNE, 1998).

Figura 4- Anúncio de barcos elétricos na década de 1890.



Fonte: Hawthorne (1998).

Sendo que, o primeiro barco elétrico possuía baterias de chumbo-ácido e foi projetado em 1881, pelo engenheiro químico francês Gustave Trouvé, no qual iniciou a história do *Eboat* (GUELLARD *et al.*, 2013). Já o percurso histórico dos Barcos elétricos com sistema fotovoltaico é muito curto, só foram encontrados dados de embarcações solares em 1984, e a partir de então, começaram a aparecer outros modelos de veículos fluviais equipado com sistema FV (OLIVEIRA *et al.*, 2017). No entanto, a limitação tecnológica do Sistema de Armazenamento de Energia (SAE), impediu o avanço dos VEs, pois quando comparados com motor movidos à combustão, o barco com motor elétrico tinha problema de armazenamento de energia, e assim os VEs entraram em declínio (KABIR *et al.*, 2016).

Entretanto com a crise do petróleo na década de 70, a crescente preocupação com as mudanças climática e o incentivo a fontes renováveis de energias, retomou-se novas possibilidades de desenvolver modelos de veículos elétricos que dependessem menos de combustíveis fósseis (GUELLARD *et al.*, 2013).

Desde então, o primeiro barco movido a energia solar documentado foi o “*Solar Craft 1*” na década de 1975, projetado por Alan T. Freeman (GUELLARD *et al.*, 2013; DESMOND, 2017). Com isso, novas fontes de energia foram surgindo, inclusive o primeiro a introduzir células de combustível como fonte de energia a bordo de uma embarcação foi o Sir Grove (GUELLARD *et al.*, 2013).

Durante as décadas de 1980 a 1990 do Século XX, os avanços tecnológicos, na área de Eletrônica de Potência, tornaram a transmissão elétrica de energia mais eficiente e compacta, e desta forma, possibilitou o emprego da propulsão elétrica em diversas classes de embarcações (DIAS, 2012a).

2.2 Barcos elétricos equipados com módulos Fotovoltaico

A primeira menção de módulos fotovoltaicos em um barco foi publicada na revista *Science* em 16 de março de 1985. O projeto foi idealizado pelo engenheiro Alan Freeman, da *Rugby England*, que montou o primeiro barco movido a energia solar no mundo (DESMOND, 2017; WALSH, 1965 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 2018). A Figura 5 sumariza o primeiro barco com sistema fotovoltaico idealizado por Alan T. Freeman em 1985.

Figura 5- Primeiro barco equipado com módulos fotovoltaicos



Fonte: Desmond (2017, pág. 19). Disponível em: <https://www.amazon.com/Electric-Boats-Ships-Kevin-Desmond/dp/147666515X>. Acesso em: 26 de junho de 2023.

Diante desse contexto, os sistemas dos barcos elétricos não se limitam apenas aos módulos fotovoltaicos, mas também ao desenvolvimento de sistemas híbridos como: Eólico em

navio ou cruzeiros, banco de baterias, células de combustível movido a hidrogênio etc. (CHEN, 2015).

2.3 Embasamento teórico

Com base na revisão da literatura, grande parte das pesquisas apontam a importância, da substituição dos barcos a combustão por barcos elétricos, ressaltando os diversos impactos ambientais em decorrência do uso de combustível fósseis (SCHILLER *et al.*, 2017; SHOKOOHYAR *et al.*, 2022).

Anteriormente, o processo para viabilizar a transição de barcos a combustão para embarcações elétricas era pouco pautado, devido aos fatores econômicos em volta do transporte marítimo (FGV ENERGIA, 2022). No entanto, para fomentar a transição, houve como proposta a eletrificação de barcos para trajetos próximos à costa, onde precisaria de fontes de energia armazenada e sistemas de eletropostos em terra para melhorar a eficiência de carregamento (FGV ENERGIA, 2022).

Esses fatores, criam incentivo para o turismo sustentável e o ecoturismo aquaviário, onde estão recebendo grande atenção nos últimos anos, tanto do governo como do setor privado, isso em virtude da baixa pegada de carbono, sendo umas das principais soluções para diversos locais costeiros e ribeirinhos (D. P. Hung *et al.*, 2022).

Por outro lado, os navios de carga não são frequentemente discutidos no contexto da mobilidade elétrica devido aos seus longos trajetos, no entanto já utilizam motores elétricos há décadas abastecido pelo combustível diesel, e recentemente adotaram sistemas híbrido, com uso de bancos de baterias como sistema de energia auxiliar, resultando em eficiência energética e climática, segundo dados do Relatório *European Maritime Safety Agency* (EMSA, 2022).

Ademais o Relatório *'Electric Leisure & Sea-going Boats and Ships 2021-2040'*, elaborado pela IDTechEX (2022), apresenta previsões de que o número de embarcações elétricas aumente até 2040, logo atingirá a sua maior demanda por bateria (MWh) e aumento do valor de mercado (US\$ bilhões) discriminados por eletricidade pura e *powertrain* híbrido.

Sendo que, diversos estudos sobre eletromobilidade aquática estão explorando as diversas tecnologias que estão disponíveis no mercado, desde baterias lítio até as Células de combustível (sigla em inglês, FC) movidas a hidrogênio (GHENAI *et al.*, 2019; GEAR, 2022).

Em suma, diversas tecnologias citadas, ainda se encontram no processo de amadurecimento tecnológico, o que enfatiza a importância de investir em pesquisas (GEAR, 2022).

Com base nesses argumentos, o estudo em si investigou as principais tecnologias subjacentes na indústria elétrica naval, com diversos conteúdos científicos para embasamento da pesquisa. A Tabela 1 sumariza diversos autores que possuem suas pesquisas voltada para o desenvolvimento dos barcos elétricos e híbridos, ambos mostram as tecnologias a favor da mobilidade elétrica aquaviária, estão expostas as características do foco e origem de cada estudo, incluindo Pesquisa & Desenvolvimento.

Tabela 1- Principais estudos científicos para embasamento da pesquisa

Autores	Publicados entre os anos 2016-2022	Tecnologias sendo utilizadas nos últimos anos	citações
GS Spagnolo et al., 2011.	<i>10th International Conference on Environment and Electrical Engineering</i> , Rome, Italy	Uma balsa com sistema propulsivo elétrico, alimentada por baterias de íon-lítio que podem ser carregadas em qualquer visita do navio ao porto.	
Nora et al., 2016.	<i>IEEE, International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)</i> , Malásia.	Barco solar elétrico com sistema propulsivo elétricos, cacos de alumínio e banco de baterias.	3
Leung C.P., 2017.	IEEE Explore, China.	Pesquisa & Desenvolvimento- aplicação das tecnologias motoras elétricos indução, baterias de lítio FerroFosfato e módulos FV.	13
Oliveira et al., 2017	Revista ciências e tecnologia, Brasil	Levantamento bibliográficos das embarcações equipadas com módulos FV.	2
Dewangta et al., 2018	IEEE Xplore, Índia.	Barco solar elétrico foi projetado, desenvolvido, testado e praticamente demonstrado ao público, com uso de tecnologia módulos FV, motores elétricos de indução.	
Dutta et al., 2018	IEEE11th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), Bangladesh.	Barco elétrico: estação de carregamento com painéis FV. Evitando o uso em barcos, usando banco de baterias de lítio.	2
Obaid et al., 2018	IEEE, Electronics Systems and Applications (PESA), United Aráb. Emirates.	Um projeto com uso sistemas propulsivos elétrico e célula de combustível do tipo Polímero	4
		Membrana eletrolítica (PEM, sigla em inglês). Com eletrólise da água para produção de hidrogênio para a operação da célula de combustível e o uso do gerador a diesel para operação da embarcação.	8
Obaid et al., 2022	IEEE Explore, United Aráb. Emirates	Barco elétrico, equipado com sistemas eólico e SF, acionado por um gerador de indução e motores síncronos de ímã permanente.	4
Porru et al., 2020	IEEE, Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)	Este artigo apresenta o estado da arte comercial.	10

			Continuação
Autores	Publicados entre os anos 2016-2022	Tecnologias sendo utilizadas nos últimos anos	citações
Bonilla et al., 2021	Elsevier (Energy for Sustainable Development). German.	O desenvolvimento barcos elétricos para traslado das ribeirinhas para escola. A proposta foi um barco equipado com módulos FV, casco de alumínio e equipados com baterias lítio de ferro fosfato.	5
Tercan et al., 2021	Elsevier (Journal Pre-proof).	Transporte sustentável e um projeto de usina de energia na rede usando painéis fotovoltaicos (PV), foram analisados quanto à sua viabilidade como uma alternativa aos barcos turísticos movidos a diesel.	9
Spagnolo et al., 2021.	Elsevier, <i>Jornal de Tecnologias de Transporte.</i>	Barco elétrico solar, definir as diretrizes do projeto para a realização de um barco de impacto zero voltado para turismo local.	58
Plan et al., 2021.	Livro- Solar Electric Boats (Índia)	Solar <i>Electric Boats</i> , estudo com base em um caso real, a partir de criação de uma balsa elétrica na Índia, premiada como um dos melhores barcos. Equipada com tecnologias como: motores elétricos de ímãs permanentes, módulos FV, carregamento com células de combustível e banco de baterias de lítio.	
Reidj G et al., 2021.	IEEE, 13th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM), Manila, Philippines, 2021	Representação digital de energia do barco elétrico e sistema elétrico para ter uma visão de a operação do barco usando os componentes elétricos.	1
Kabir et al., 2022.	IEEE E, International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEES), Bangladesh	Balsa elétrica híbrida: o barco foi adaptado com 48V, motor elétrico 500W BLDC, painel solar de 1kW com bateria de 9600 VAh. O barco é 6,5 metros de comprimento e 2 metros de boca, capaz de transportar 1200 kg carregado por 8 horas.	17
Lima et al., 2022.	Clagtee, XIV Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission	The high use of fossil fuels in the Amazon region, both by ships and by the use of generators for electricity generation, contributes to the emission of carbon dioxide (CO ₂) into the atmosphere.	

Fonte: autora

A partir dessa análise, foi realizado um levantamento das embarcações elétricas ou híbridas equipadas com módulos FV e turbina eólica, nos projetos que existem no mundo e pelo Brasil, podem ser observados nos tópicos em seguida.

2.3.1 Barcos elétricos pelo mundo

Neste tópico, os diversos modelos de barcos elétricos ou híbridos, foram desenvolvidos com objetivo de analisar sua eficiência, para assim, ampliar o seu desenvolvimento no mercado. Sendo eles: barcos elétricos de lazer, embarcações comerciais de curta distância e embarcações comerciais de alto mar.

A. Balsa elétrica: Construída pelo estaleiro norueguês *Fjellstrand*, a balsa é operada pela *Norled* e navega na rota de 6 km na Noruega. A balsa pode acomodar 360 passageiros e 120 veículos e faz 34 travessias por dia, com cada viagem levando cerca de 20 minutos. Com 80 m de comprimento, é alimentada por dois motores elétricos com uma potência de 450 kW e um sistema de propulsão elétrica *BlueDrive Plus* da *Siemens*. Isso inclui uma bateria de íons de lítio e sistema de direção, controle do propulsor para as hélices com um sistema de gerenciamento de energia, mostrado na Figura 3 (CRUISE & FERRY, 2015). As baterias a bordo são recarregadas diretamente da rede nacional à noite, quando a embarcação está ancorada (*Cruise & Ferry*, 2015). As balsas são apontadas como as embarcações elétricas mais comuns, pois navegam em baixa velocidade e viajam em rotas mais curtas e consistentes (GEAR *et al.*, 2022).

Figura 3- Balsa elétrica



Fonte: *Cruise & Ferry* (2015). Disponível em: <https://www.cruiseandferry.net/articles/worlds-first-battery-powered-ferry-starts-service-in-norway>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

B. ECOBOAT: uma balsa elétrica solar que foi lançada por uma empresa espanhola, possui 120 painéis fotovoltaicos. O sistema de propulsão consiste em dois motores elétricos de 50 kW, para um total de 100 kW, acionados por oito baterias de íons de lítio de 30,5 kWh. O barco possui capacidade para 120 passageiros operando com 100% no sistema de

bateria, sem motor auxiliar de combustão interna. O alcance de cruzeiro da embarcação é de 8 horas em baterias sem luz solar Figura 4.

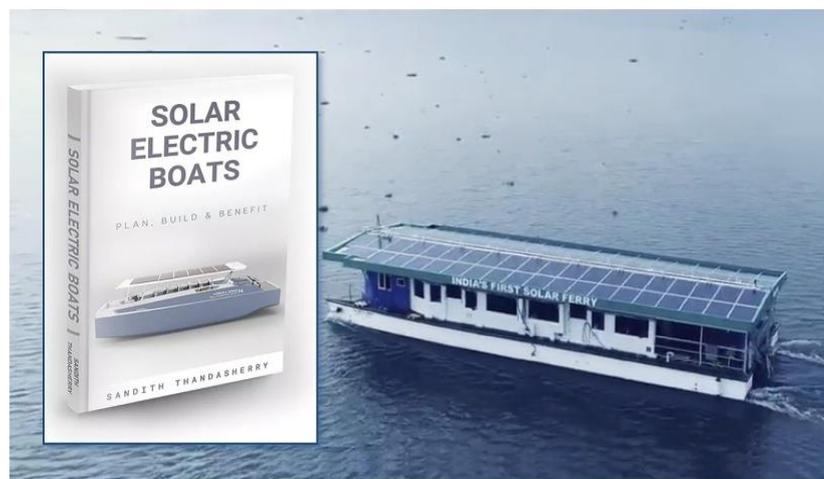
Figura 4- Barco elétrico solar ECOBOAT



Fonte: Nauticexpo.com (2018). Disponível em: <https://www.nauticexpo.com/pt/prod/metaltec-naval/product-69631-530089.html>. Acesso em: 01 de maio de 2023.

C. Solar Electric Boats: *Aditya* é uma balsa movida a energia solar que opera entre *Vaikkom* e *Thavanakkadavu* no estado indiano de Kerala. Em 2021 a balsa solar ganhou diversos prêmios, entre eles, o Prêmio de *Gustave Tripé*, considerada a melhor balsa elétrica do mundo, foi escolhido como uma grande demonstração de um projeto de energia renovável e economicamente viável. A balsa possui sistema de carregamento com uso de células de combustível, baterias de lítio, motores elétricos e equipadas com módulos FV, sendo o primeiro barco elétrico na Índia e com grandes resultados positivos Figura 5.

Figura 5- Barco elétrico solar



Fonte: Build et al. (2020). Disponível em: <https://plugboats.com/this-solar-ferry-in-india-runs-on-2-60-a-day/> Acesso em: 19 de junho de 2023.

D. Avvento: O estaleiro britânico *Spirit Yacht* entregou seu iate à vela 44CR, totalmente elétrico com 13,4 metros chamado Avvento. É o primeiro veleiro totalmente elétrico, demonstrado na Figura 6.

Figura 6- Veleiro Elétrico



Fonte: Fonte: Spirit Yachts, 2015. Disponível em: << <https://spirityachts.com/> >>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

E. Solar Yachts: A empresa holandesa *Soel Yachts* lançou na Nova Zelândia seu catamarã elétrico solar, Figura 7. Entre as suas características, o Catamarã possui capacidade para transportar 16 passageiros, com 12 metros de comprimento. Já a parte elétrica possui um inversor portátil de 15 kVA, além de dois motores elétricos de 30 kW de potência e duas baterias de íons de lítio com 120 kWh que permitem navegar por cerca de 6 horas.

Figura 7- Catamarã Elétrico



Fonte: SOLARIMPULSE, 2020. Disponível em: <https://solarimpulse.com/solutions-explorer/solar-electric-boats>. Acesso em: 19 set. 2022.

F. X Shore: é uma empresa sueca de tecnologia que está por trás do desenvolvimento de uma nova linha de barcos totalmente elétricos, que começaram a ser comercializada em janeiro de 2020. Os barcos possuem as seguintes características elétricas propulsivas: um motor de 170 kW e um banco de bateria com capacidade de 126 kWh, para

atender uma velocidade de cruzeiro de 20 nós. As baterias são as de lítios FerroFosfato, motores ímãs permanentes, painéis solares flexíveis monocristalinos e a produção de cascos que foi testado e cuidadosamente selecionado para permitir a eliminação de estireno e produzir o mínimo de resíduos, além de estar equipado com tecnologia inteligente, Figura 8.

Figura 8- Barco elétrico



Fonte: X Shore (2020). Disponível em: <https://xshore.com/eelex-8000>. Acesso em: 17 de março de 2023.

G. Candela C-POD: barco equipado com um motor de alta eficiência e durabilidade. Como as seguintes características: dois motores de ímã permanente, com 70 kW para uma velocidade de até 23 nós, equipado com baterias de íon de lítio NMC de 40 kWh (BMW i30). Em sequência, pode ser visto na Figura 11, o protótipo Candela em tamanho real e na Figura 9, o motor de ímã permanente Candela.

Figura 9- Protótipo tamanho real



Fonte: Candela (2020). Disponível em: <https://candela.com/technology/>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.

2.3.2 Navios

Esses tipos de embarcações já utilizam o sistema propulsivo elétrico há muito tempo, no entanto, para uma embarcação torna-se elétrica existem diversos fatores limitantes, como sua elevada dependência em baterias para suprir as longas distâncias em seus trajetos, o que torna a eletrificação dos navios ainda inviável e aplicação dos sistemas inteligentes ainda são escassos.

H. E-Ship: É um navio elétrico híbrido, equipado com energia eólica, para reduzir os custos de combustível, entre as suas características elétricas, o mesmo (Figura 10), é equipado com quatro motores de vela de metal (com 25 metros altura cada e 4 metros de diâmetros) giratórias e verticais, que estão posicionadas dois à frente e dois à ré para aproveitar a energia eólica e os geradores Caterpillar geram uma potência total de 6,3 MW. Navegando a uma velocidade de cruzeiro registrada (Máx./Média): 20,7 nós/11,9 nós. A embarcação continua ativa atualmente, realizando as rotas no Canal do Panamá, conforme relatado pelo Sistema de Identificação Automática Terrestre *MarineTraffic* em 14/03/2023. Na Tabela 2 é possível observar os dados do navio (ENERCON, 2013).

Figura 10- Navio E-Ship 1



Fonte: Enercon WindCompany (2013). Disponível em: https://www.stg-online.org/onTEAM/shipefficiency/programm/06-STG_Ship_Efficiency_2013_100913_Paper.pdf. Acesso em: 27 de junho de 2023.

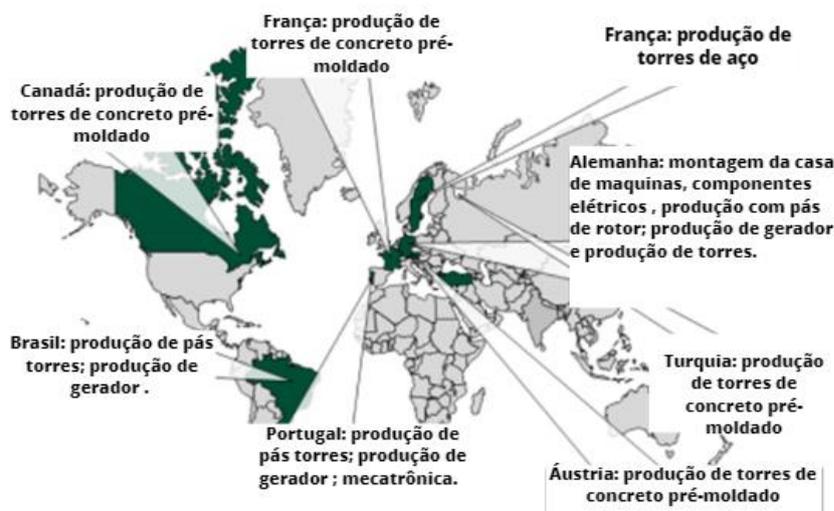
Tabela 2-- Dados técnicos do Navio de propulsão elétrica *E-Ship 1*

Dados Técnicos do <i>E-Ship 1</i>	
Comprimento	130 metros
Largura	22,5 metros
Calado	6-9 metros
Tonelagem	10.500 tdw / 9.700 tdw
Velocidade	17,5 nós
Potência do motor	2 x 3.500 kW
Capacidade	20.580 m ³

Fonte: Enercon Wind Company (2013). Disponível em: https://www.stg-online.org/onTEAM/shipefficiency/programm/06-STG_Ship_Efficiency_2013_100913_Paper.pdf. Acesso em: 27 de junho de 2023.

A embarcação foi projetada por uma companhia alemã, chamada *Enercon GmbH*, fabricante de turbinas eólicas, além disso, diversos países contribuíram com sua fabricação exportando materiais, a Figura 11 mostra o mapeamento dos principais países que contribuíram com a “construção” do navio (ENERCON, 2013).

Figura 11-Países contribuintes de peças



Fonte: adaptado de Enercon Wind Company (2013). Disponível em: https://www.stg-online.org/onTEAM/shipefficiency/programm/06-STG_Ship_Efficiency_2013_100913_Paper.pdf. Acesso em: 27 de junho de 2023.

2.3.3 Barcos elétricos no Brasil

Grande parte das embarcações elétricas no Brasil, são de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), aqui será mostrado alguns projetos e o objetivo de cada um.

I. Canoa solar fotovoltaica: Observada na Figura 12, a canoa chama-se “Tapiatpia” em homenagem a um lendário peixe-elétrico da região amazônica, além disso, o fluvial FV foi projetado com a intenção de transportar alunos da comunidade indígenas,

localizado no Rio *Pastaza* região da Amazônia Equatorial, que foram idealizados pelo projeto *KARA Solar*.

Figura 12-Canoa elétrica solar



Fonte: Santiago (2017). Disponível em: <https://atlasofthefuture.org/project/kara-solar/>. Acesso em: 26 de junho de 2023.

J. Barco solar: O barco solar foi desenvolvido por meio de P&D no Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Energias Renováveis e Eficiência Energética da Amazônia (INCT-EREEA) em 2015. Sendo uma ação conjunta entre o grupo Fotovoltaica, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e o Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), da Universidade Federal do Pará (UFPA). Com o objetivo de ser incorporado no transporte escolar em uma comunidade ribeirinha no município de Barcarena. O barco Figura 13 possui capacidade para acomodar 22 pessoas, equipado com 2 motores elétricos e inversores produzidos pela WEG, que são responsáveis pelo sistema de propulsão com refrigeração a água. Além disso, ela possuía banco de baterias de chumbo ácido, com autonomia para cinco horas de navegação, o barco encontra-se desativado (WEG, 2015).

Figura 13- Barco solar na Amazônia-P&D



Fonte: WEG, 2015. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/barco-utilizado-para-o-transporte-escolar-de-comunidade-ribeirinha-conta-com-tecnologia-weg>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

2.3.4 Barcos elétrico solar desenvolvido para Torneios

O projeto visa fomentar o desenvolvimento de pesquisa com uso de tecnologias aquáticas com uso fontes FV.

K. Desafio solar Brasil: desenvolvidos para incentivar a inovação tecnológica nas universidades com uso de fontes renováveis, sumarizado na Figura 14.

Figura 14- Barcos equipados com SFV



Fonte: correio da Amazônia. Disponível em: <https://correiodaamazonia.com/pa-alunos-da-ufpa-criam-barco-com-energia-solar/>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

2.3.5 Desenvolvido para pesquisa

L. Protótipo solar elétrico: desenvolvido no Brasil, o projeto é capaz de navegar de forma autônoma, sem piloto a bordo (SILVEIRA, 2017). O protótipo é pilotado por controle remoto e possui baterias para armazenar energia provenientes dos módulos FV, com o intuito de monitorar dados de encontro com a vida aquática, Figura 17 (SILVEIRA, 2017).

Figura 15- Protótipo solar aquático



Fonte: SILVEIRA, 2017.

2.3.6 Conclusão deste capítulo

A transição para a mobilidade elétrica está passando por enormes avanços, que englobam diversas modalidades de veículos, além disso, pode-se considerar relevante o progresso para mitigar as emissões de gases tóxicos para a atmosfera. Diante do levantamento bibliográfico, é notório que a massificação de tecnologias que precisarão de insumos para fabricar produtos importantes nesse processo de transição. Entretanto, os barcos ainda são novidades no mercado, isso porque os componentes necessários para a fabricação deste tipo de transporte ainda estão em amadurecimento tecnológico, mas ainda há expectativas para a entrada desses veículos no mercado, o que gera uma preocupação em virtude da exploração mineral para sustentar essa cadeia de desenvolvimento tecnológico. No próximo capítulo traz um levantamento da mobilidade elétrica marítima.

3 MOBILIDADE ELÉTRICA NAVAL

Neste Capítulo, traz o contexto histórico da eletrificação dos veículos no Século XIX, além disso, é apresentada uma breve introdução sobre o conceito de mobilidade elétrica, tendências e estimativa de avanço dos modais elétricos, terrestres e marítimos.

3.1.1 Avanço da mobilidade elétrica

Com base nos dados da Agência Internacional de Energia (AIE, 2022), é evidente que vários países estão atualmente a passar por uma fase de transição energética. Esta transição envolve a busca por alternativas de geração de energia que tenham uma pegada de carbono significativamente reduzida. Essa mudança está ocorrendo em diversos setores modais, abrangendo uma ampla gama de atividades econômicas. Esse segmento de mobilidade veicular tem avançado indicando um cenário em transição nas próximas décadas, devido aos benefícios ambientais e energéticos que oferece.

De acordo, com o Relatório Anual Perspectiva Global de Veículo Elétricos da IEA (2021), conceitua Veículos Elétricos (VEs ou EVs, da sigla em inglês *Electric Vehicles*), em dois tipos principais: os veículos totalmente elétricos (VEs) e os veículos híbridos plug-in (PHEVs). Os VEs dependem exclusivamente da eletricidade para operar, enquanto os PHEVs têm um motor elétrico e um motor a combustão interna que pode funcionar como um gerador ou para complementar a tração elétrica IEA (2021).

Diante desse contexto, a transição elétrica veicular engloba uma diversidade de veículos que são movidos por geração elétrica, o que gera a demanda por infraestrutura de recarga para abastecê-lo (IEA, 2022). Conforme o Relatório Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica (PNME, 2020), o universo de eletrificação de VEs diferem em modelos e categorias, classificados como: em Leves (como carros e *pick-ups*), Pesados (ônibus, navios) e levíssimos (bicicletas, *scooters* etc.). Na Figura 20 observa-se nessas categorias.

Figura 16-Categorias dos diferentes tipos de Veículos Elétricos.



Fonte: Adaptado PNME, 2020; NORMAM 2 – MARINHA DO BRASIL (2012).

Mediante a isso, os veículos elétricos são ofertados em duas modalidades, que são: os híbridos e puramente elétricos (IEA, 2022). Entre essas diversidades de VEs, ambos estão associados a quatro principais categorias que são classificadas por arranjos tecnológicos que envolvem diferentes interfaces do *Powertrain* elétricos que estão em destaque na Tabela 3 (PNME, 2020).

Tabela 3- Diferentes tecnologias aplicadas aos VEs marítimos

TECNOLOGIAS APLICADAS	CARACTERÍSTICAS
Veículo Elétrico a Bateria (BEV, sigla em inglês)	Apresentam propulsão elétrica provém da eletricidade, no qual a energia elétrica que alimenta o motor é armazenada em bateria que resulta de uma fonte externa ao veículo (ex.: rede elétrica).
Veículo Elétrico Híbrido (HEV, sigla em inglês)	Veículos que apresentam arquitetura em que coexistem um motor elétrico, cuja energia é suprida por uma bateria, e um motor à combustão convencional, abastecido com combustíveis líquidos (fósseis ou renováveis).
Veículo Elétrico Híbrido Plug-in (PHEV, sigla em inglês)	Veículos que combinam elementos do híbrido e do elétrico puro.
Veículo Elétrico a Célula de Combustível (FCEV, sigla em inglês)	Apresenta propulsão elétrica dedicada, cuja fonte energética provém de células a combustível, principalmente do hidrogênio.

Fonte: Adaptado de PNME (2020).

Considerando as diversas tecnologias de mobilidade elétrica em ambientes aquáticos, no Tópico 3.1.2, são resumidos os desafios relacionados à obtenção de autonomia e tempos de

recarga. É evidenciado que a distância que essas embarcações conseguem percorrer ainda é limitada, enfatizando a restrição imposta pela capacidade de carga armazenada nas baterias e a disponibilidade de eletropostos para recarregamento. Este último aspecto é apontado como um dos principais fatores impactantes (FVGE ENERGIA, 2022).

3.1.2 Estratégia de carregamento dos VEs marítimos

Como citado anteriormente, o tempo de abastecimento e os eletropostos disponíveis para cargas dos VEs ainda são condições que entram em discussão, pois oscilam conforme o modelo de adaptadores disponíveis em cada país.

Cabe ressaltar, que o Brasil possuía até 2019, 850 eletropostos disponíveis por distintas regiões que atendem as demandas de VEs terrestres, que em sua maioria, são de projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), programas de estímulo a eletromobilidade, fomentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), número este que tem crescido nos últimos anos GRASSI; RECH, 2019).

Entretanto, os barcos possuem sistemas de carregamento a bordo, projetados para permitir que as baterias das aeronaves sejam recarregadas enquanto o barco está em movimento ou ancorado (MAJUNGU *et al.*, 2022). Esses sistemas são essenciais para a operação contínua de barras elétricas, fornecendo energia para as baterias e garantindo que elas estejam prontas para uso. Existem diferentes tipos de sistemas de carregamento a bordo, e a escolha depende do tipo de barco, da capacidade das baterias e das necessidades específicas do usuário, que podem ser distribuídos em carregadores externo e interno:

Carregador externo (*Off-board Charger*): este modelo de carregador é uma unidade externa, em vez de um componente do VE. Além disso, um carregador externo produz um alto DC tensão. O BMS interno deve ser capaz de carregar a bateria usando tensão alta (GLANZER *et al.*, 2011).

Carregador externo (*On-board Charger*): Nesse caso o carregador é um componente do VE, este modelo pode ser carregado usando um monofásico e trifásico abastecimento, estes são usados amplamente por VEs marítimos (GLANZER *et al.*, 2011).

Mediante a isso, a Resolução Normativa Nº 819/2018, foram projetadas para permitir a recarga de VEz quando estão atracadas em portos, marinas ou áreas de estacionamento específicas, e incentiva a concessionária dos procedimentos e condições para comercialização de energia elétrica por meio de estações de recargas (ANEEL, 2018).

A partir disso, no processo de recarga de um barco elétrico, é estabelecida uma conexão entre o plugue do carregador e a entrada de carga do veículo. Através desse plugue, uma corrente elétrica é injetada na bateria do veículo, e a potência da carga determinará a velocidade em que a recarga foi efetuada (MAJUNGU *et al.*, 2022). Existem diferentes níveis de potência de carregamento, que se traduzem em diferentes velocidades de recarga: lenta, semirrápida, rápida ou ultrarrápida (PROMOB-e, 2020). A Tabela 4 sumariza os tipos de recargas disponíveis pelos eletropostos, tempo de carregamento e custo de investimento.

Tabela 4- Tipos de eletropostos por velocidade de recarga.

Tipo de eletroposto	Tensão Máxima	Tempo de carregamento	Investimento médio
Recarga lenta	230 V	100% da bateria entre 4 h e 10 h	R\$ 1,5 mil a R\$ 3 mil
Recarga semirrápida	360 V	100% da bateria em 2h	R\$ 7 mil a R\$ 50 mil
Recarga rápida	480 V	80% da bateria em 30 min	R\$ 90 mil a R\$ 150 mil

Fonte: adaptado de PROMOB-e (2020).

Ademais, o mercado dispõe de carregadores portáteis que são denominados *Wemob Wall* para uso interno ou externo. Os *Wemob Parking* são desenvolvidos exclusivamente para uso compartilhado em estacionamentos públicos/privados e os *Wemob Station* são tecnologias mais completas que possuem três opções de padrões para recarga rápida em até 150 kW (WEG, 2022). A Figura 22 sintetiza os três principais modelos de carregadores disponíveis pela empresa WEG.

Figura 17-Modelos de carregadores de VEs.



Fonte: WEG (2022).

A expansão dos eletropostos garantem segurança para os consumidores e que poderão transitar por maiores distância com seus veículos elétricos. Na Figura 21 é possível observar os eletropostos para barcos elétricos no cais, localizado na Noruega.

Figura 18- Estação de carregamento no cais



Fonte: *boat international* (2017). Disponível em: <https://www.boatshopping.com.br/boat/boat-shopping/adaptadores-de-tomada-de-cais-o-especialista-responde/>. Acesso: 05 de abril de 2023.

3.1.3 Programas de incentivo à mobilidade elétrica

Na busca por uma economia de baixo carbono e eficiência energética, a transição elétrica veicular é pauta de diversos programas como:

a. Campanha Drive to Zero: políticas, programas e ações que possam apoiar a rápida fabricação e implantação de veículos comerciais de emissão zero.

b. Programa Global sobre eletromobilidade: financiado pelo Fundo para o Meio Ambiente Global (sigla em inglês, GEF), objetivo ajudar os países de baixa e média renda a mudarem para a eletromobilidade.

c. Programa *EVI Global EV Piloto City*: Em diversos países os VEs são produzidos em massa, as estruturas de carregamentos viáveis e custo acessíveis, principalmente em países de primeiro mundo, onde os programas citados de incentivo à mobilidade, se alinham com a meta de cada país.

À vista disso, conforme os dados do Relatório *Bloomberg New Energy Finance - Electric Vehicle Outlook* (BNEF, 2022), demonstram que, em 2020 foram vendidos 3,1 milhões de VEs em escala global, entretanto em 2021 representaram 9% do mercado global, ou seja, apesar dos reverses econômicos decorrentes da pandemia houve aumento significativo de consumo dos VEs.

Conforme mencionado pelo IEA (2021b), a projeção de aumento na demanda mineral para tecnologias limpas, deverá aumentar os custos no cenário de entrada de VEs e energias renováveis no mercado, comprometendo a adoção da mobilidade elétrica em países em desenvolvimento, esses fatores desaceleram o consumo dos VEs.

O processo para viabilização da transição para embarcações elétricas não entrava em discussão, devido aos fatores econômicos em volta do transporte marítimo (FGV ENERGIA, 2022). No entanto, surgiram proposta que teria a vantagem da alta eficiência energética naval, mas precisaria de um alto investimento inicial para a conversão da infraestrutura aquaviária e adaptação da hidrodinâmica das embarcações, além da geração de um crédito de carbono¹. Em suma, uma série de medidas são propostas para incentivar e aderir os veículos marítimos no processo transição energética, de acordo com a Tabela 5 (FGV ENERGIA, 2022).

Tabela 5- Medidas para melhorar a eficiência no transporte marítimo até 2050.

Medidas tecnológicas para aumentar a eficiência de navios	Uso de combustíveis alternativos de baixo carbono como fonte de energia
Uso de materiais leves	Baterias / motores elétricos
Design heterodinamicamente favorável	Células de hidrogênio
Ferramentas de aperfeiçoamento da propulsão	Hidrogênio e motores elétricos
Arcos bulbos	Células de amônia
Revestimento avançado do casco	Diesel sintético
Medidas de eficiência energética	Metano Sintético
Projeto do sistema de água de lastro	Biocombustíveis avançados
Aperfeiçoamento do motor e sistemas auxiliares	Assistência eólica/ solar

Fonte: adaptado de FGV ENERGIA (2022).

Em síntese, a transição para VEs assimila oportunidades e desenvolvem modelos de negócio, com o aprimoramento de tecnologias que irão mitigar emissão de CO₂, e atuar na redução de ruídos e poluição das águas por resíduos de graxas/óleo diesel (DUTTA *et al.*, 2020). Ademais, ressalta-se que o custo de investimento dos veículos elétricos no Brasil ainda não é atrativo, apesar das grandes reduções já alcançadas, o valor para a sua aquisição chega a ser 4 vezes a mais que um veículo movido a combustão (FGV ENERGIA, 2022).

Em vista disso, a mobilidade elétrica é uma tecnologia emergente, já implementada em diversos países, que possuem o intuito de fomentar a transição energética por fontes mais limpas de tecnologias e menor dependência de combustível fóssil (DUTTA *et al.*, 2020). A

¹ Crédito de carbono: representam um mercado de créditos gerados com base na não emissão de gases de efeito estufa à atmosfera, podendo ser comercializados entre países.

seguir são mostradas as informações consideradas relevantes acerca do sistema propulsivo elétrico, informados nos itens 2.6 até 3.3 que são provenientes deste estudo.

3.1.4 Evolução dos Sistemas Propulsivos Elétricos Navais

As embarcações elétricas possuem um contexto histórico, como citado anteriormente, desde então, o sistema de propulsão elétrica naval teve seu desenvolvimento iniciado no começo do Século XIX, a partir da necessidade militar (DIAS, 2012b; D. PAUL *et al.*, 2020). Sendo um dos sistemas mais importantes a bordo de uma embarcação é o sistema de propulsão.

Mediante isso, a Propulsão Elétrica Naval é qualquer meio de produção de energia elétrica, que quando transformada em energia mecânica, permite o acionamento das hélices e permite o deslocamento das embarcações (WOUD *et al.*, 2003). Ademais, sua principal função é produzir energia suficiente para superar as forças de resistência que atuam na embarcação, de modo a permitir o seu avanço na velocidade de serviço requerida (NORATO, 2013).

Enquanto o Sistema de Propulsão Elétrico Naval, é qualquer meio de transformação de energia, nos quais usam alguma forma elétrica como fonte primária de potência, empregada para o deslocamento da embarcação, na Figura 19 observa-se um esquema do principal sistema propulsor (BASTOS, 2019).

Figura 19-Esquema de um sistema de propulsão naval.



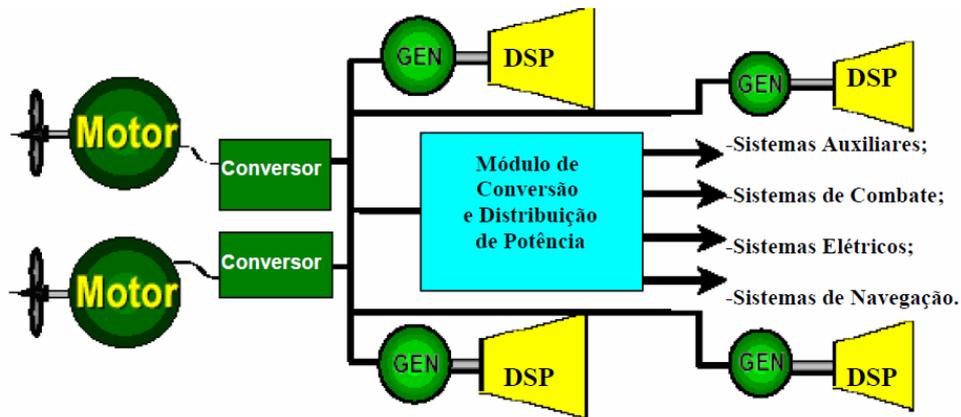
Fonte: adaptado WOUD *et al.* (2003).

A função essencial do sistema de propulsão é gerar força de tração, viabilizando o deslocamento da embarcação na velocidade desejada. Esse sistema é constituído por diversos elementos interligados, que operam de maneira sinérgica para disponibilizar a energia elétrica requerida a fim de impulsionar a embarcação (WOUD *et al.*, 2003).

Para um melhor entendimento, a Figura 20, é possível observar o sistema de Propulsão Elétrica na qual pode ser descrita a transmissão elétrica de potência entre o dispositivo de acionamento principal e a carga representada pelos propulsores de uma embarcação (ALVES, 2007).

Figura 20-Diagrama em blocos de um Sistema de Propulsão Elétrica.

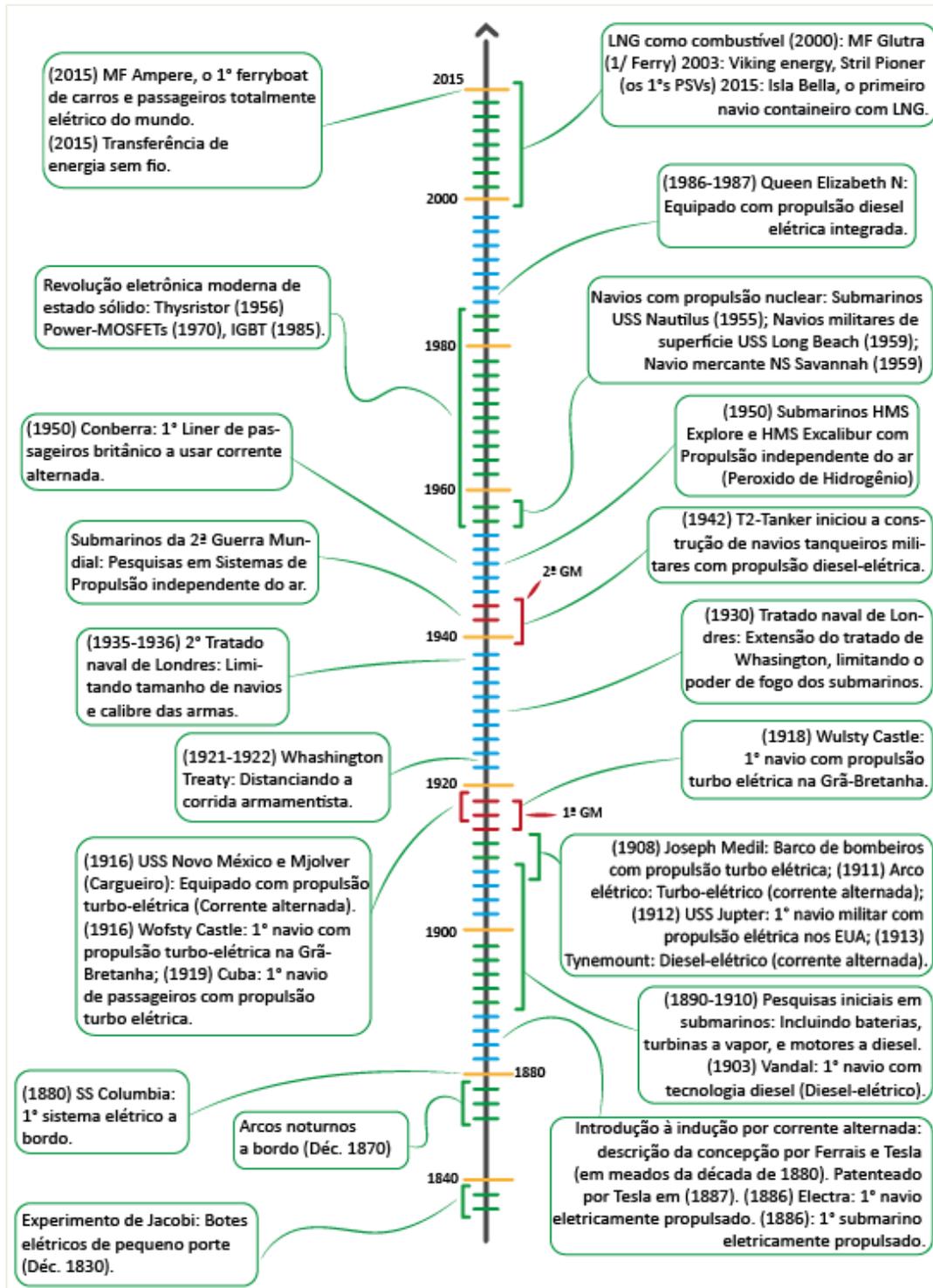
DSP = Dispositivo de Acionamento Principal



Fonte: ALVES (2007).

À vista disso, a aplicação sistemas de propulsão elétrica em transporte (terrestre e marítimo) se tornará mais difundida no futuro. Nesse cenário de introdução à mobilidade elétrica, a busca por tecnologias alternativas e eficientes que serão consideradas complementares (híbridos). A partir disso, a Figura 21 faz um levantamento cronológico dos modelos de propulsão elétrica de embarcações desde 1840 até meados de 2015.

Figura 21- Cronologia dos tipos de propulsão elétrica de embarcação.



Fonte: Adaptado de Paul; Brusso (2010).

No subsequente tópico, 3.2, será apresentada uma análise abrangente sobre o *PowerTrain* na indústria marítima.

3.2 *Powertrain* Elétrico Marítimo

Este tópico tem por finalidade apresentar o *PowerTrain* elétrico de uma embarcação, de modo a conhecer o funcionamento da arquitetura da embarcação elétrica e descrever esse processo.

3.2.1 Sistema elétrico híbrido naval

Conforme discutido posteriormente, as embarcações equipadas com sistemas de propulsão elétrica exibem configurações de *PowerTrain* elétrico semelhantes. No entanto, esses sistemas apresentam características singulares que não são encontrados nas embarcações convencionais movidas a diesel (OBAID et al., 2018)..

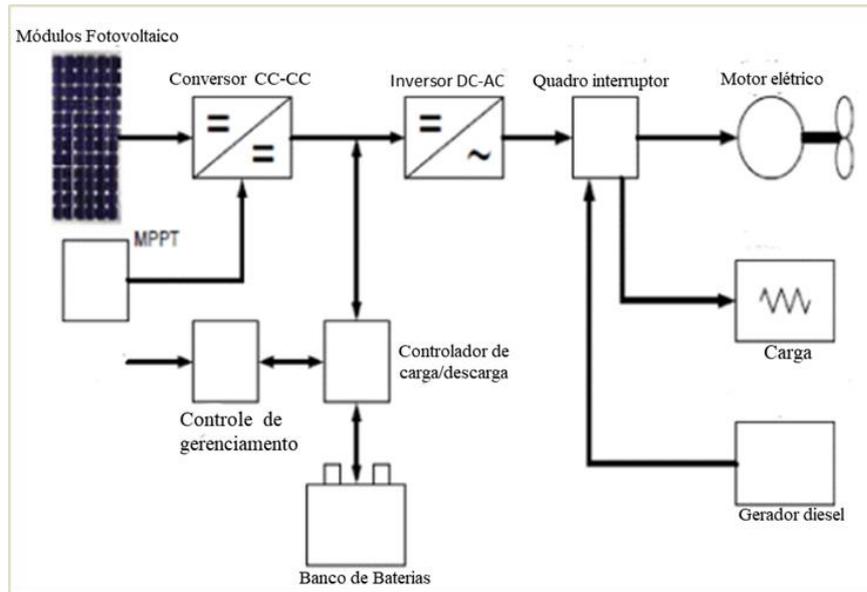
Em vista disso, o *powertrain* elétrico dos barcos envolve diferentes componentes elétricos de potência, que vão desde o sistema propulsivos até o armazenamento, que estão ligados pelo sistema de controle e circuitos de Técnicas de Rastreamento de Máxima Potência (MPPT sigla em inglês) (OBAID et al., 2018).

Sendo que, existem dois principais tipos de propulsão elétrica para sistema de embarcação que são: Propulsão Puramente Elétrica e Propulsão Elétrica Híbrida (OBADOWSHI, 2020).

O Sistema Propulsão Elétrica híbrido, combina com dois ou mais tipos de fonte de alimentação de um sistema de propulsão elétrica e de um sistema de propulsão convencional (geralmente a combustão interna) para fornecer energia elétrica e assim gerar a propulsão (GEERTSMA et al., 2017). Tal combinação pode variar com diversas fontes de energia entre elas: fonte de alimentação de combustão, de motores a diesel, turbina a gás ou turbinas a vapor; fonte de alimentação eletroquímica a partir de células de combustível; ou fonte de alimentação de sistemas de armazenamento de energia em baterias, volantes ou supercapacitores (OBAID et al., 2018; GEERTSMA et al., 2017).

Descrevendo o sistema *powertrain* elétrico híbrido, a hélice é conectada no motor elétrico, enquanto o motor é alimentado por um conversor de Corrente Contínua/Corrente Alternada (CC/CA), que por sua vez, é alimentado por um sistema de bateria. Paralelo a isso, as baterias possuem um Sistema Gerenciamento de Bateria (BMS, sigla em inglês), para garantir que o sistema de bateria de propulsão opere dentro de sua área de operação segura (PORRU et al., 2020). Deste modo, a Figura 22 sumariza um sistema de energia de um barco híbrido, que tem potencial de envolver diferentes componentes de energia renovável, além do gerador a diesel e um motor elétrico para movimentar a embarcação (OBAID et al., 2018).

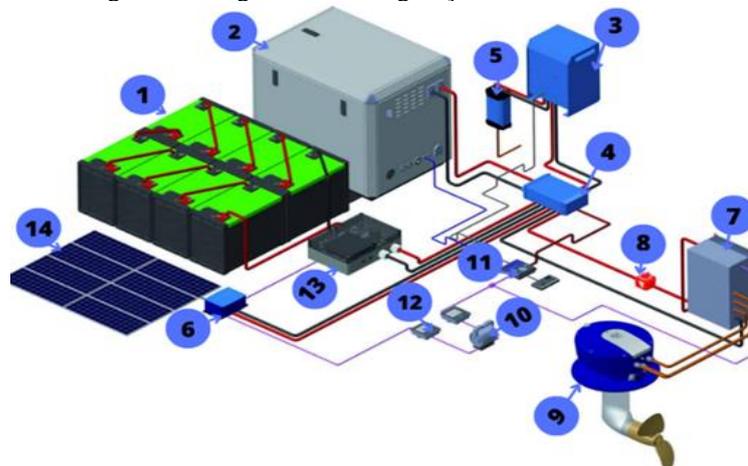
Figura 22-Sistema de propulsão híbrido FV- diesel de embarcação



Fonte: adaptado de OBAID *et al.* (2018).

Como a propulsão híbrida é um sistema de propulsão que utiliza duas ou mais fontes de energia diferentes que podem se alternar ou funcionar em conjunto, para assim tornar o modal mais eficiente e econômico (GEERTSMA *et al.*, 2017). A partir da Figura 23, observa-se um esquema de propulsão híbrido marítimo de um navio, logo, a perceber a composição de vários grupos geradores a diesel (1) que alimentam um barramento elétrico de frequência fixa (2). Este barramento alimenta o acionamento do motor elétrico de propulsão (5) e a carga do hotel (6), na maioria dos casos através de um transformador (3). O acionamento do motor de propulsão elétrica consiste em um conversor eletrônico de potência (4) usados para controlar a velocidade da embarcação (GEERTSMA *et al.*, 2017).

Figura 23-Diagrama de configuração do sistema elétrico marítimo



Fonte: adaptado de OCEANVOLT (2021). Disponível em: <https://oceanvolt.com/#homePage>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

A Tabela 6 descreve os componentes da Figura anterior.

Tabela 6- Principais componentes de configuração do sistema elétrico marítimo (Figura 23)

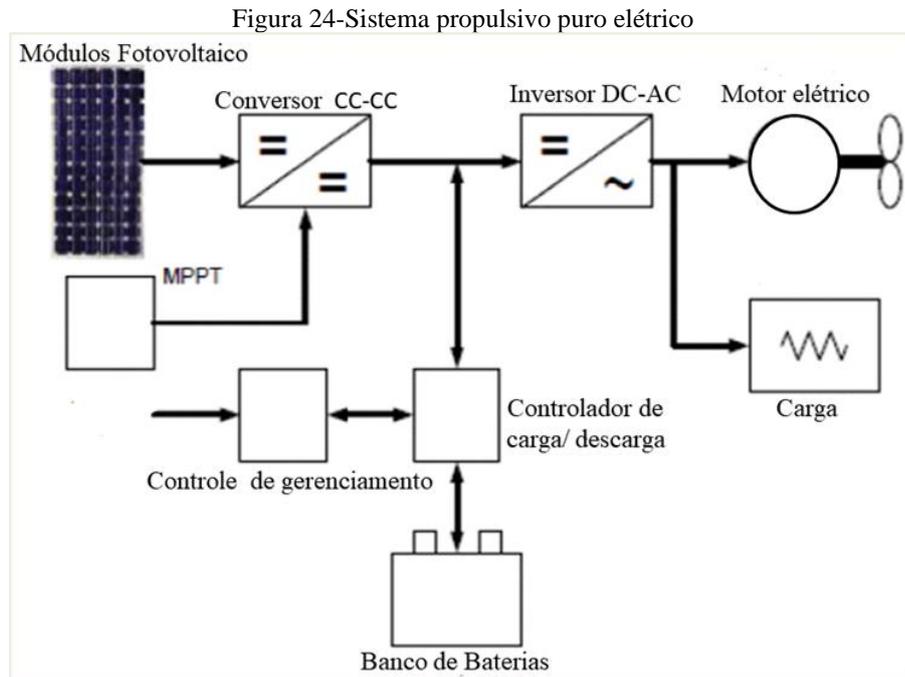
Número	Componente	Descrição
1	Banco de Bateria	Pack de bateria de propulsão
2	Gerador AC/DC	Geradores AC ou DC podem ser usados como fonte de energia de backup. Os geradores DC podem ser perfeitamente integrados ao sistema para carregamento automático quando a carga da bateria cai abaixo dos níveis críticos.
3	Carregador/Inversor	Detecta a voltagem das baterias e dá uma ordem de carga ou descarga dependendo se a voltagem é baixa ou alta, respectivamente.
4	Conversor DC-DC	Converte 48 V DC para 12/24V DC e alimenta a House Battery com energia.
5	DC bus bar	Usada para conectar baterias e outros componentes ao sistema de distribuição de corrente contínua.
6	House Battery	Armazenamento de energia
7	Controle de motor	Controla a operação do motor, inverter DC para corrente trifásica
8	Interruptor principal	Controla a energia total do sistema on/off.
9	Motor elétrico	Transformar a energia elétrica em mecânica dentro da embarcação
10	Dual Control Lever	Em uma configuração de motor duplo, permite controlar os motores de forma independente.
11	CCGX	CCGX reúne continuamente dados de todos os componentes do sistema que respondem aos comandos do usuário, determina quais indicações exibir, registra os principais dados de desempenho para carregar em um servidor pela Internet e armazena os dados em um servidor.
12	Display	Fácil gerenciamento do sistema, mesmo em condições exigentes; nível de bateria, uso de energia, RPMs e tempo de operação restante.
13	Sistema de gerenciamento de bateria (BMS)	Protege as baterias, gerenciando o nível de carga; impede a bateria de sobrecarregar ou de descarga excessiva. As células da bateria também são monitoradas quanto ao excesso de temperatura. O BMS desconectará todas as fontes de carregamento e cargas das baterias se ocorrer uma condição anômala.
14	Painéis solares	Painéis solares personalizados para fornecer

Fonte: adaptado de OCEANVOLT (2021). Disponível em: <https://oceanvolt.com/#homePage>. Acesso em: 10 de outubro de 2022.

3.2.2 Sistema Elétrico Puro Naval

O Sistema Propulsão Puramente Elétrica, é baseado em unir componentes chaves, onde a energia necessária para operar esses veículos é fornecida por dispositivos de armazenamento de energia, máquinas elétricas, eletrônica de potência fornece energia para um motor elétrico (HERRMANN *et al.*, 2015; BASTOS, 2019; OBADOWSHI, 2020). Como as baterias são as principais fontes de armazenamento, elas podem ser carregadas na rede de energia elétrica quando a embarcação estiver no porto ou através de uma fonte de energia alternativa localizada em terra ou a bordo da embarcação, como painéis solares ou turbinas eólicas (BASTOS, 2019).

Quanto ao sistema elétrico da embarcação, o banco de baterias armazena a energia obtida da energia solar dos painéis, o inversor de energia converte a tensão Corrente Direta (DC), que é armazenada nas baterias internas em Corrente Contínua (CC), para operação do motor elétrico (OBAID *et al.*, 2018; OBADOWSHI, 2020). Um sistema elétrico puro é descrito na Figura 24.



Fonte: adaptado Obaid *et al.* (2018).

3.2.3 Resultados de combinação sistema propulsão elétrica Naval

Entre as premissas descritas acima, diversos estudos comparam os benefícios econômicos e ambientais da aplicação dos sistemas propulsão híbrida. Ambos os sistemas de propulsão elétrica têm demonstrados resultados eficientes na indústria naval, isso se deve

principalmente à robustez da eficiência dos motores elétricos, uso auxiliar de fontes renováveis (solar, eólica) e o SAE (TOPALOGLOU *et al.*, 2016; GEERTSMA *et al.*, 2017).

Posto isto, o estudo de Barcellos (2013), ressalta a importância da complementaridade de sistemas híbridos, inclusive (diesel e motor elétrico), que podem alcançar economias de combustível de até 10%. Enquanto, Topaloglou *et al.*, (2016), evidenciou em seu estudo, as reduções de emissões de gases tóxicos como: clorofluorcarbonetos (CFC), dióxido de carbono (CO₂) e dióxido de enxofre (NO₂), uma vez que, o armazenamento de energia pode ser recarregado enquanto motor elétrico trabalha.

Por fim, Völker *et al.* (2013) e Breijs *et al.* (2016), ressaltam que apesar da aplicação das baterias marítimas serem recentes, suas tecnologias estão sendo desenvolvidas rapidamente, logo poderão ser grandes aliadas, para redução de combustível fósseis e mitigação das emissões de gases tóxicos para a atmosférica.

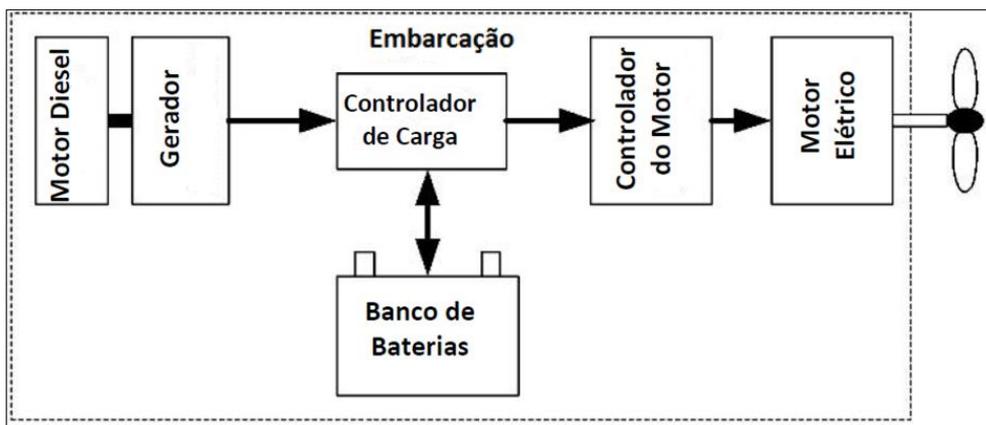
Enquanto, os barcos totalmente elétricos estão surgindo de forma gradual e as principais modalidades ainda dependem de sistema híbrido a diesel com motor elétrico. Alguns estudos retratam as adaptações de pequenos veleiros e embarcações para propulsão elétrica, no qual utilizam motores de popa ou motores de centro (PORRU *et al.*, 2020). Esses ajustes podem ser complexos em virtude da carência Tecnológica marítima, e requerem um sistema de propulsão potente, além de um sistema de armazenamento de energia de alta capacidade, ou seja, busca-se tecnologias apropriada para se adequar ao sistema elétrico da embarcação (CAPRARA, 2020).

Existem diferentes configurações possíveis para sistemas de propulsão elétrica híbridos, incluindo: Sistema híbrido em Série e Sistema Híbrido em Paralelo.

3.2.4 Sistema híbrido em série

Em uma configuração híbrida em série, o motor elétrico é o único meio de fornecer energia ao propulsor, onde o motor elétrico é responsável por gerar propulsão enquanto o motor a combustão será alimentado apenas pelas baterias (BASTOS, 2019). A Figura 25 demonstra a configuração desse sistema.

Figura 25-Configuração do sistema de propulsão híbrido em série.

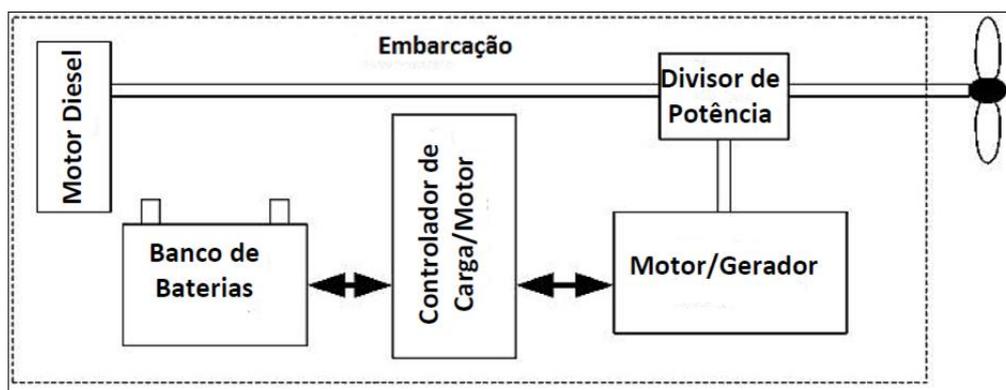


Fonte: NSBA (2015).

3.2.5 Sistema híbrido em paralelo

Nesse sistema, tanto o motor elétrico quanto o Motor de combustão interna (MCI), podem fornecer potência a hélice, onde são mantidas as conexões mecânicas entre o MCI e o eixo propulsor de forma independente. Eles podem trabalhar juntos em situações de alta demanda de energia ou podem operar separadamente, com o motor elétrico sendo usado em condições de baixa carga ou em velocidades mais baixas, enquanto o motor convencional é acionado em situações de alta carga ou em velocidades mais altas, na Figura 26 é apresentado sistema híbrido paralelo (BASTOS, 2019).

Figura 26-Configuração do sistema de propulsão híbrido paralelo.



Fonte: NSBA (2015).

3.2.6 PowerTrain dos Navios

Os navios são um dos sistemas propulsivos mais antigos, com início no 1800, embora sejam resultados de uma grande evolução tecnológica, uma vez que, nos primórdios da navegação, usavam-se o remo e a vela, e posteriormente recorreu-se ao vapor com uso auxiliar das velas (LIMA, 2013; D. PAUL, 2020). A partir do avanço da tecnologia dos motores e

baterias, passou-se a combinar a propulsão elétrica com a mecânica, gerando excelentes resultados (LIMA, 2013, D. PAUL, 2020).

A propulsão elétrica e os sistemas integrados de energia elétrica, são de grande interesse para a indústria naval, pois a busca de inovação tecnológicas para tornar as operações mais limpas e menos custosas, incluindo o uso do diesel (D. PAUL, 2020).

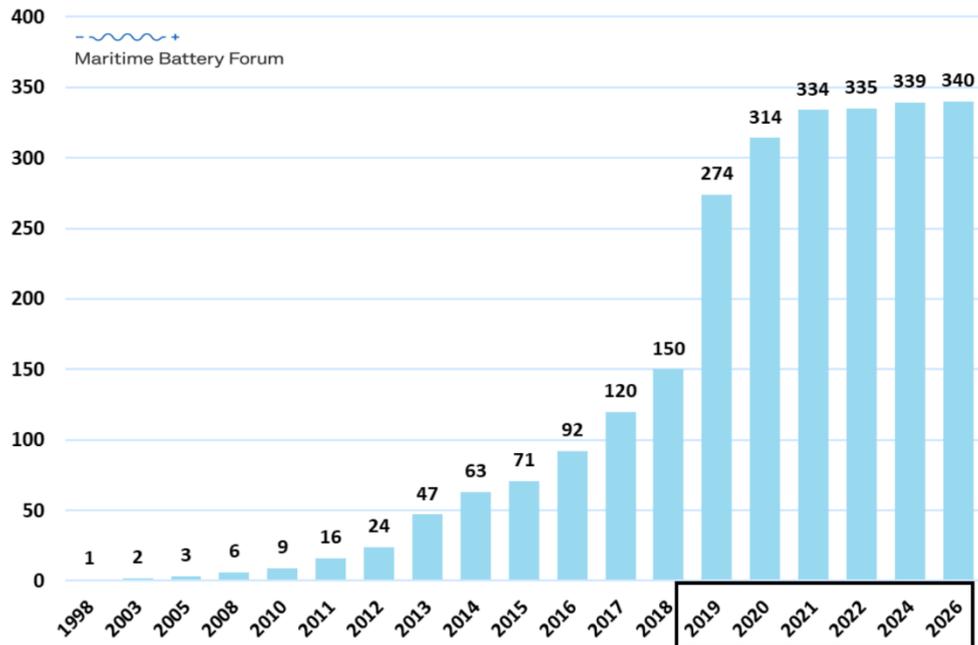
Diversas pesquisas concentram-se em desenvolver combinações viáveis e econômicas como sistemas auxiliares, como: sistemas solares e células de combustível, usando combustível GNL e incorporando sistemas de armazenamento de energia de bateria e seus aparelhos de carregamento em projetos de navios (OBAID *et al.*, 2018; D. PAUL, 2020).

A arquitetura com fornecimento em energia híbrida, permite a operação em grupos de geradores a diesel com velocidades variáveis. Enquanto, os navios com propulsão mecânica tradicional, o motor não pode operar na faixa de rendimento ótimo, já que a velocidade é definida pela rotação da hélice (ALVES, 2007).

Diante disso, a Marinha Americana estimou a eficiência energética em torno dos 17% por meio do uso de motores elétricos em relação à propulsão convencional mecânica (WHITMAN, 2001; NEWELL, 2000; ALVES, 2007). Além do uso do Azipod®, um sistema propulsivo manobrável sem engrenagem, onde o motor elétrico fica localizado em uma cápsula submersa fora do casco do navio (GUPTA e KUMAR, 2016). Quando o sistema de manobrabilidade é utilizado, os navios podem navegar e estivar direto em qualquer direção com precisão, economia de tempo e combustível (GUPTA e KUMAR, 2016).

O conjunto de banco de baterias é projetado para atender as cargas vitais a bordo, no entanto, com os longos períodos de viagens, o sistema de armazenamento não atende à demanda (FURTADO, 2019). Apesar desses fatores, dados do *Maritime Battery Fórum* (2019), mantém um banco de dados sobre embarcações com baterias, essas estatísticas mostram que mais de 300 embarcações possuem baterias instaladas a bordo ou está encomendando, a Figura 27 sintetiza esses dados estatísticos com crescimento previsto até o ano de 2026 (EUROPEAN MARITIME SAFETY AGENCY- EMSA, 2020).

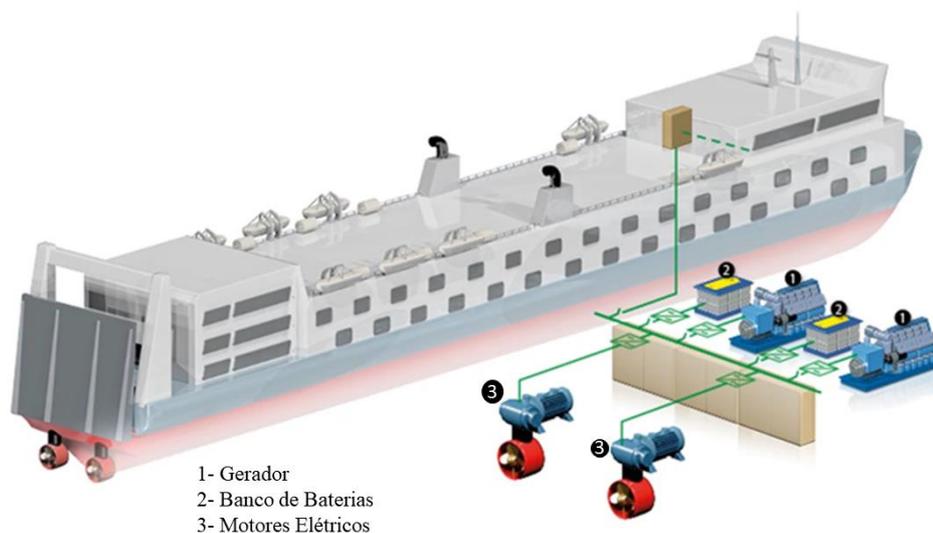
Figura 27-Número total de navios com baterias



Fonte: adaptado de EMSA (2020).

A Figura 28 demonstra os sistemas elétricos-híbridos com uso de bateria em um navio.

Figura 28-Representação de um navio com baterias



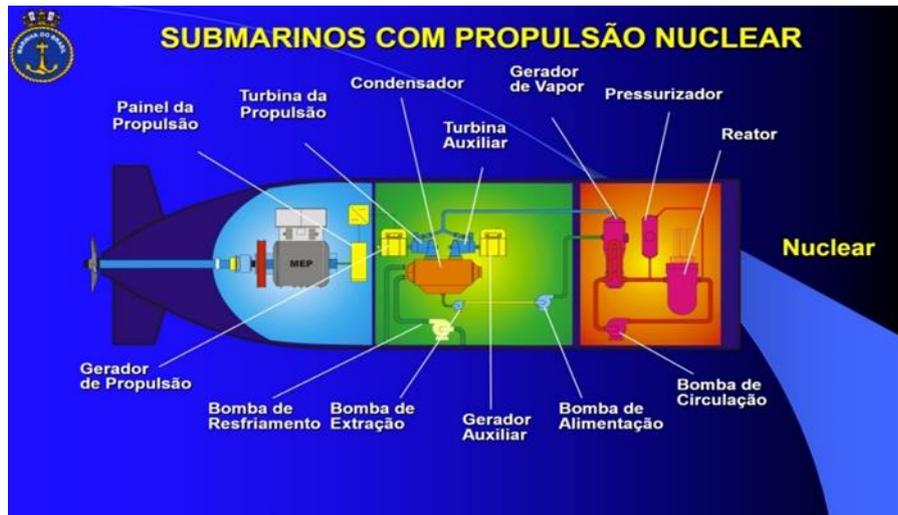
Fonte: adaptado de DEIF (2021). Disponível em: < <https://www.deif.com.br/sobre/>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2022.

3.2.7 Propulsão Nuclear

Ocorre através do aquecimento de água ou vapor por meio da energia liberada por reações nucleares, estas podem ser enquadradas em três modelos: propulsão por fissão nuclear, propulsão por decaimento de isótopos radioativos e propulsão por fusão nuclear (INPE, 2015; LEITE, 2016). A maior vantagem desse tipo de propulsão é por fornecer uma quantidade de

energia suficiente, mesmo que possua um pequeno reator, além de operar por mais tempo e sem a necessidade de abastecimentos (OLIVEIRA, 2018). Contudo há desvantagem por ser um sistema perigoso e complexo. Ainda assim, observa-se Figura 29 na um sistema híbrido com a combinação do Sistema propulsivo Elétrico-Nuclear.

Figura 29-Motor movido à energia nuclear de um submarino no Brasil.



Fonte: Marinha do Brasil (2021).

3.2.8 Conclusão deste Capítulo

Ao final deste capítulo, conclui-se que: o cenário de transição energética alinhado com a mobilidade elétrica requer demanda de gestão, através de entidades públicas (federal, estadual e municipal), parcerias entre empresas privadas/públicas, infraestrutura de recarga e regulamentações. Em suma, os projetos pilotos com a integração da rede elétrica tem incentivado a indústria nacional de VEs, abrindo espaço para inovação tecnológica, tal qual, o Brasil, que possui maiores potencialidades de recursos quando comparado a outros países, por possuir sua matriz elétrica derivada de fontes renováveis, que influencia no fortalecimento da entrada dos VEs no mercado.

4 TENDÊNCIAS DE TECNOLOGIA PARA VES MARÍTIMO

Neste capítulo é apresentado uma breve descrição dos principais minerais estratégicos/críticos, essenciais para a cadeia de suprimentos de materiais para a transição da mobilidade elétrica aquaviária. Em seguida, serão apresentados em quatro tópicos, a aplicabilidade desses elementos: (a) os variados tipos de baterias para armazenar energia elétrica são descritos— além dos portadores de segunda energia, como hidrogênio, (b) as diversidades dos módulos fotovoltaico, (c) inversores e (d) motores elétricos. Por fim, a análise comparativa desses componentes para aplicação marítima.

4.1 Minerais estratégicos aplicados na cadeia produtiva de VEs marítima

Diversos materiais extraídos da Terra são necessários para aperfeiçoar as tecnologias que vão de encontro para melhorar padrão de vida em sociedade. Logo, compreender todo o sistema de fluxo de materiais, desde a origem até a disposição final, pode ajudar a gerenciar o melhor uso desses recursos naturais e assim promover sua disponibilidade através da implementação Economia Circular², ou seja, através de práticas da sustentabilidade, contido no modelo, onde possam englobar os aspectos da *ESG - Environmental, Social and Corporate Governance* (Meio Ambiente, Social e Governança) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (US GEOLOGICAL SURVEY- USGS, 2021).

A sigla *ESG* nos últimos anos vem sendo disseminada no ambiente corporativo, com objetivo de desenvolver ações em prol da sustentabilidade, no qual envolve os âmbitos social, ambiental e econômico. Contudo, ressalta-se que os critérios envolvendo a *ESG* não contemplam ações econômicas, embora exista uma tendência para acrescentar o parâmetro econômico (BONFANTE, 2021). Estes conjuntos de práticas no setor mineral requerem um forte desenvolvimento dos *stakeholders*, para definir as tomadas de decisões na cadeia de exploração mineral de elementos considerados críticos e estratégicos no Brasil, porém ainda não são aplicados (BONFANTE, 2021).

O termo sustentabilidade na mineração é bastante complexo, uma vez que, o processo de exploração mineral é um grande causador de degradação ambiental, aumento de conflitos geopolíticos, aumento de problemas na saúde, deslocamento de populacional, além de agravar

² A economia circular é um modelo econômico que busca maximizar o uso de recursos, minimizar resíduos e promover a sustentabilidade. Ao contrário do modelo linear tradicional de "extrair, produzir, descartar", a economia circular se baseia nos princípios de reduzir, reutilizar, reciclar e regenerar.

desigualdade socioeconômica (UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME UNDP, 2016; BONFANTE, 2021).

Mediante a isso, a exploração e aplicações dos REE, aumentaram acentuadamente nas últimas três décadas, e sem dúvida continuará em elevação, dadas as progressivas preocupações com o aquecimento global e o processo de transição energética e sua aplicação em produtos de alta tecnologia, sendo os REE denominados “portadores do futuro” (PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO-PNM, 2010; IEA, 2021; US GEOLOGICAL SURVEY- USGS, 2021; BONFANTE, 2021).

Os REE fazem parte da cadeia de materiais críticos e estratégicos juntos com outros elementos, para uma ampla variedade de tecnologias existentes e emergentes. Os minerais críticos são aqueles que possuem relevância estratégica para a economia global e estão sujeitos a riscos de fornecimento, além de desafios ambientais e sociais associados à sua extração (USGS, 2021).

A demanda por REE está prevista para aumentar devido à transição energética, com projeções indicando que o consumo de ímãs permanentes deverá crescer entre 10% a 16% anualmente nas décadas subsequentes (LIMA, 2012; BANCO MUNDIAL, 2020; USGS, 2021).

Sendo assim, denomina-se REE, o conjunto de dezessete elementos químicos da tabela periódica formada por quinze Lantanídeos, além do o Escândio e o Ítrio, que também são consideradas REE por exibirem propriedades químicas similares. De acordo com o Relatório *Critical Material Strategy*, (2022), desenvolvido pelo U.S *Department of Energy*, cinco dos REE são considerados críticos, sendo eles o disprósio (Dy), o neodímio (Nd), o ítrio (Y), o európio (Eu) e o térbio (Tb), demonstrada em parte na Figura 30.

Figura 30- Tabela periódica química delineando os 17 elementos REE



Fonte: E-TECH RESOURCES (2021). Disponível em: <https://etech-resources.com/what-are-rare-earth-elements-ree-where-are-they-found-and-how-are-they-mined/>. Acesso em: 22 de junho de 2023.

Os elementos de terras raras não são literalmente “raros”, pois não são compreendidos pela sua escassez, mas devido à dificuldade de acesso e ao custo de sua extração, além disso, se distribuem de forma desigual quando comparados com os demais minerais (LEITE, 2016; USGS, 2021).

Mesmo que haja uma distribuição de reservas pelo mundo, o custo da extração e o processo de purificação para transformar a matéria-prima em produto, requer altos investimentos, consumo de energia elevada, alta demanda de tecnologia, o que não é viável para muitas nações (SANTOS, 2014). Sendo também, uma atividade propulsora de impactos socioambientais em decorrência da exploração mineral, em alguns casos com prática de exploração ilegal (USGS, 2021).

Quando comparadas as concentrações de REE com outros metais ou elementos, temos Túlio e Lutécio como os menos abundantes, no entanto são 200 vezes mais comuns que o ouro. Logo, é justificado que as REE dispõem menor tendência a se concentrar em depósitos de minérios exploráveis (USGS, 2021). Além disso, os REE não existem na natureza em estado puro, eles são encontrados em minerais como a bastnasita, a monazita, a loparita, e as argilas de adsorção iônica, concentrações consideradas viáveis para exploração mineral (RIDDLE *et al.*, 2015; BALARAM, 2019).

Consequentemente³, a maior parte da oferta mundial de terras raras vem de apenas um “punhado” de fontes, provenientes principalmente da China que domina os mercados mundiais

³ De acordo com o site da USGS (*The United States Geological Survey*), esta foi criada nos EUA em 1879 e serve à Nação, fornecendo informação científica confiável para descrever e compreender a Terra;

de REE de produto (USGS, 2021). O “boom” da transição energética pode elevar o preço desses minerais e fortalecer a limitação de exploração, pois as embarcações elétricas se diferem profundamente de um barco movido a combustão (IEA, 2021). Dessa forma, um veículo elétrico requer equipamentos altamente eficientes, ou seja, maior quantidade de minerais para serem construídos, especificamente, seis vezes a mais insumos minerais que um barco ou carro convencional (IEA, 2021). À medida que novas tecnologias surgem, os investimentos são ampliados, e podem totalizar US\$13 trilhões acumulados nas próximas duas décadas para suprir a demanda global de VEs (BANCO MUNDIAL, 2020; IEA, 2021). Na Tabela 7 é possível observar a produção de mineral de REE estimada entre o ano de 2020 e 2021 por países (destaque para as principais reservas).

Tabela 7- Reservas Mundiais de Minas de terras raras

	Produção Mineral		Reserva ⁴
	2020 ³	2021e ⁵	
China	10140	10168	44.000.000
Estados Unidos	39	43	1.800,00
Austrália	21	22	94.000.000
Vietnam	700	400	22.000.000
Brasil	600	500	21.000.000
Burma	31	26	NA ⁶
Burundi	300	100	NA
Canadá	—	—	830
Tailândia	3.6	8	NA
Groenlândia	—	—	1.500.000
Índia	2.9	2.9	6.900.000
Madagascar	2.8	3.2	NA
Rússia	2.7	2.7	21.000.000
South África	—	—	790
Tanzânia	—	—	890
Outros países	100	300	280

Fonte: adaptado de U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2022

A demanda por esses elementos se explica pela aplicação na indústria e por possuírem propriedades químicas magnéticas e fluorescentes únicas (MELO, 2017). Ademais, as

minimizar a perda de vidas e bens em caso de catástrofes naturais, gestão da água, biológicos, energia e recursos minerais, e melhorar e proteger a nossa qualidade de vida.

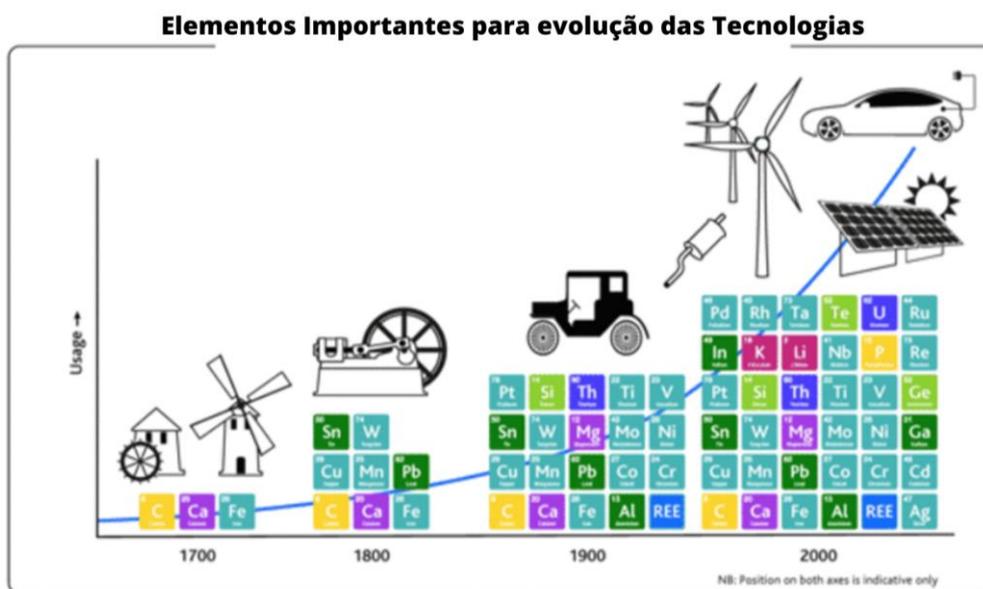
⁴ Reservas minerais referem-se a depósitos de minério conhecido e quantificado, que pode ser minerada com sucesso usando métodos tradicionais de escolha. As reservas minerais são determinadas com base em parâmetros, incluindo teor mineralógico, tamanho do reservatório, viabilidade econômica, tecnologia disponível, aspectos legais e regulatórios, bem como considerações ambientais.

⁵e: equivalente

⁶ Dados não disponibilizados

tecnologias de ponta, como as baterias de lítio, dependem fortemente dos elementos de REE, pois o prolongamento do tempo de vida útil e a propriedade de torná-las menores e mais leves estão diretamente relacionadas a esses elementos, esses parâmetros são essenciais para aplicação em VEs (MELO, 2017). A Figura 31 demonstra a evolução das tecnologias em virtude dos elementos minerais REE combinados com outros minérios, inclusive o salto para melhor desempenho e eficiência dos equipamentos.

Figura 31- Elementos importante para a evolução das tecnologias



Fonte: E-TECH RESOURCES (2021). Disponível em: <https://etech-resources.com/what-are-rare-earth-elements-rees-where-are-they-found-and-how-are-they-mined/>. Acesso em: 22 de junho de 2023.

Mediante a isso, as *Commodities* Mineraias não possuem um preço fixo, ou seja, oscilam de acordo com demanda e oferta do mercado de cada país (IEA, 2021). Em síntese, a Tabela 8 sumariza as *Commodities* Mineraias, em destaque para os cinco metais: cobre, níquel, cobalto, lítio e terras raras – para uma análise de aplicabilidade especificamente a barcos elétricos. Os metais em destaque na Tabela 8, são considerados importantes para cadeia produtiva e altamente impactados pela transição energética, pois o cobre, o níquel e REE são metais bem estabelecidos no mercado, já o cobalto e o lítio, são metais menos requisitados, mas em ascensão pois são usadas em baterias para VEs (BANCO MUNDIAL, 2020; IEA, 2021; BOER *et al.*, 2021).

Tabela 8- Materiais estratégicos aplicados em barcos elétricos

Matéria-prima	Componente/Aplicação
Lítio	Baterias de Íons -Li
Cobalto	Baterias de Íons -Li
Níquel	Baterias de Íons -Li
Grafite	Baterias de Íons -Li
Magnésio	Vários componentes das embarcações
Terras raras	Ímãs permanentes (motor elétrico)
Cobre	Motores elétricos
Nióbio	Micro condensadores
Índio	Ecrã de visualização (LCD)
Germânio	Microchips
Gálio	Iluminação (LEDs)
Prata	Condensadores e outros componentes
Platina (PGMs)	Catalisadores/ células de combustível
Silício	Módulos FV
Tântalo	Condensadores

Fonte: adaptado de USGS (2021); Gil (2019).

Como citado anteriormente, a China é a grande produtora do mundo de REE e produção de Ímãs Permanentes (IP), devido a sua competitividade de custos operacionais (MANCHERI *et al.*, 2019). Em contrapartida, poucas regulamentações ambientais, isenção de imposto, mão de obra barata e por dominar o mercado de tecnologia com custo baixo, fatores estes que influenciam a exploração no país (BARAKOS; MISCHO; GUTZMER, 2016).

Enquanto o Brasil, possui apenas 16,7% das reservas de REE quando comparado com outros países, porém essas reservas de monazita apresentam apenas 4% de REE e não são exploradas, pois não possuem viabilidade econômica (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS- CGEE, 2013; ESTUDOS PARA O PLANO NACIONAL DE MINERAÇÃO 2050 -PNM, 2022).

Como forma de assegurar avaliação da estrutura, comportamento e tendências das cadeias de transformação mineral, direcionadas aos minerais para a transição energética, no ano de 2010 foi criada o Grupo de Trabalho Interministerial sobre Minerais Estratégicos, envolvendo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e o Ministério das Minas e Energia (MME), com o objetivo de direcionar políticas públicas voltadas para as cadeias produtivas de aplicações de REE, incluindo gestão por meio da ESG (BOFANTE, 2021).

4.1.1 Ímãs Permanentes

Os ímãs permanentes (IP) com base no composto tetragonal Neodímio–Ferro–Boro (NdFeB), tiveram sua descoberta na década de 1980, anunciada tanto pela Corporação

Sumitomo, no Japão, quanto pela General Motors, nos Estados Unidos (HARRIS; JEWELL, 2012; SAGAWA *et al.*, 1984; BOFANTE, 2021).

Em vista disso, os IP são elementos magnéticos de origem de misturas minerais— incluindo os REE, as suas características apresentam uma indução magnética, mesmo após que algum fator provoque a sua desmagnetização (ALVES *et al.*, 2015; BOFANTE, 2021).

Mediante a isso, sua descoberta foi uma grande evolução, no qual as pesquisas se intensificaram devido a sua aplicação em componentes de veículos elétricos, geradores eólicos de alta eficiência e motores elétricos de alto rendimento, componentes estes que requerem propriedades magnéticas otimizadas como elevado produto-energia máximo, coercividade e remanência (DUTTA *et al.*, 2016; BOFANTE, 2021).

A maior parte dos ímãs aplicados em motores elétricos baseiam-se na composição NdFeB em certos casos com misturas de disprósio (JÚNIOR *et al.*, 2015). A utilização desses ímãs são adequadas e requerem miniaturização— processo de produção de objetos de consumo de tamanho cada vez menores— e os motores elétricos de ímãs permanentes necessitam desses elementos para melhorar sua eficiência (JÚNIOR *et al.*, 2015). A produção dos ímãs NdFeB é realizado pela técnica metalúrgica do pó, tal qual as propriedades magnéticas são dependentes de um rigoroso controle microestrutura e sua produção ocorre em diversas etapas, ou seja, desde a produção das matérias primas, insumos até o processo de produção dos ímãs, na qual se distribuem na aplicação de montagem dos equipamentos, distribuição, uso e descarte (BOFANTE, 2021).

(...) os ímãs são divididos em três etapas: exploração mineral, passando pelos processos de separação até a obtenção dos óxidos (*upstream*); e da redução dos óxidos, passando pela fabricação da liga, sinterização, tratamento térmico, usinagem, revestimento e magnetização (*midstream*) e a etapa final de aplicação do ímã em diversos equipamentos (*downstream*) (Bonfanti, 2021, pág.32).

Como citado anteriormente a China é líder em produção de REE, assim como também, na produção de ímãs NdFeB, dominando 80% da produção mundial, outra parte é dominada pelo Japão (BOFANTE, 2021).

É importante ressaltar, que os Ímãs Permanentes samário-cobalto (SmCo) e Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB), possuem característica distintas, pois os ímãs NdFeB são considerados metais extremamente fortes (LIMA, 2012). Enquanto, os ímãs SmCo retêm sua resistência magnética em elevadas temperaturas (LIMA, 2012). Apesar de muitas previsões indicarem a possibilidade de escassez desses elementos, percebe-se que as características desses elementos são essenciais para a aplicabilidade da alta tecnologia, por serem relevantes para cadeia de

suprimentos como: óxido de neodímio e de európio, disprósio e térbio (LIMA, 2012; USGS, 2021).

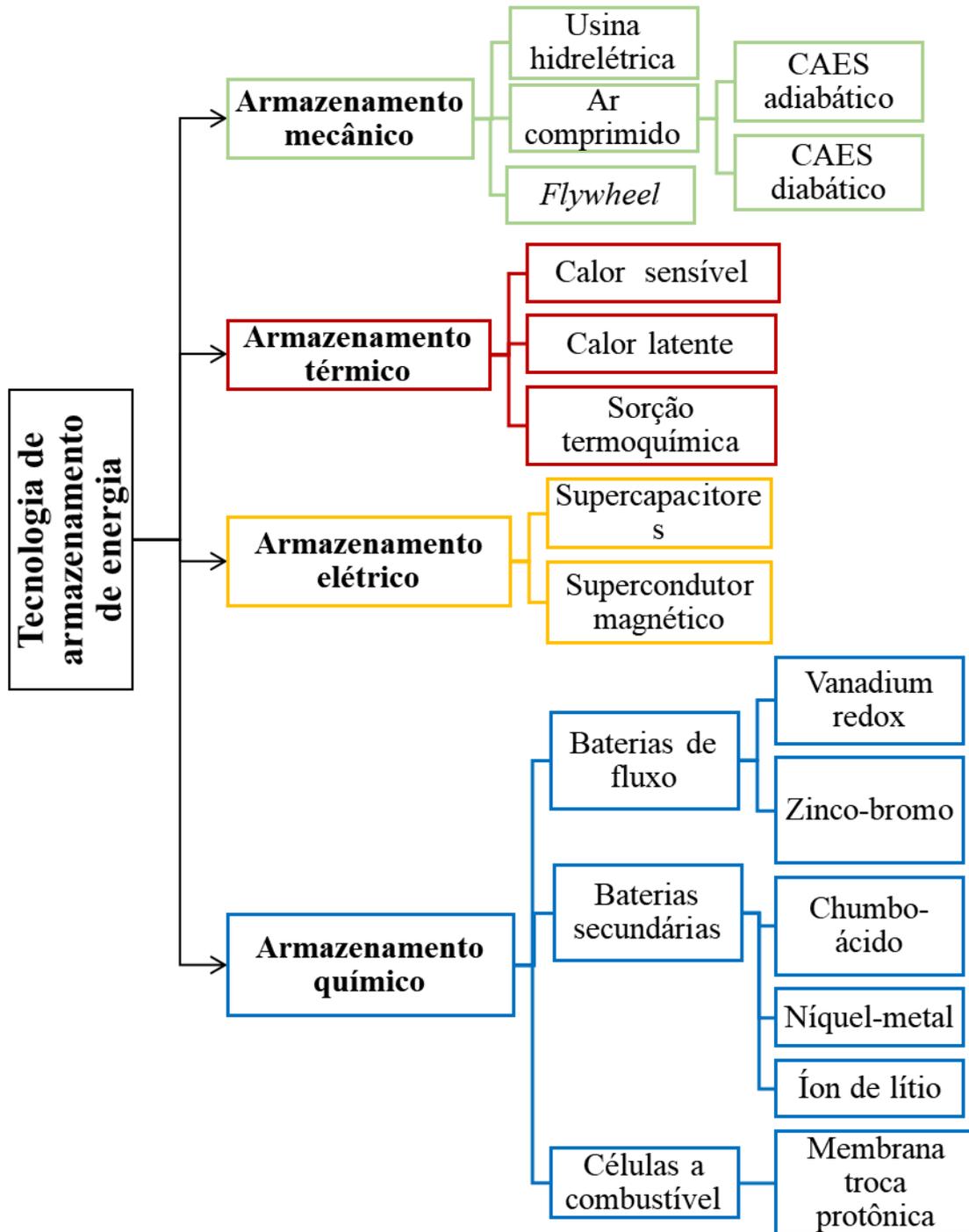
Na etapa subsequente, será conduzida uma análise das tecnologias voltadas para aplicações marítimas, revelando a utilização desses elementos considerados críticos e estratégicos para a avançada tecnologia na indústria naval.

4.2 Sistemas de Armazenamento de Energia

Os sistemas de armazenamento de energia (ESS, sigla em inglês de *Energy Storage System*) são tecnologias usadas para armazenar energia elétrica através de baterias de estado sólido, baterias de fluxo, rodas inerciais, ar comprimido, bombeamento de água e armazenamento térmico, armazenamento de energia. A bateria é um sistema eletroquímico que envolve reações de transportes de íons e elétrons, seu desempenho como carga/descarga ou mecanismo de degradação pode ser afetado pela temperatura ambiente.

Se tratando de mobilidade elétrica, a indústria de baterias está preocupada em garantir o abastecimento dos VEs que estão em desenvolvimento, para isso os ingredientes chave são: cobalto e lítio (GIL, 2019). Esse fator ocorre, em virtude da dependência mineral para esse tipo de tecnologia, logo precisa-se ampliar as buscas pelos depósitos dos principais minerais estratégicos que integram o desenvolvimento da cadeia produtiva dos VEs (GIL, 2019). Embora exista uma diversidade de baterias de diferentes composições e tecnologias, as baterias de lítio são grandes aliadas para o desenvolvimento dos sistemas de veículos elétricos, inclusive os marítimos. Na Figura 32 são demonstrados os diversos tipos de tecnologias (DENG *et al.*, 2020).

Figura 32-Tecnologias de armazenamento de energia elétrica



Fonte: adaptado Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro – COPEL, 2020.

A partir do exposto, serão apresentadas as principais alternativas tecnológicas ESS.

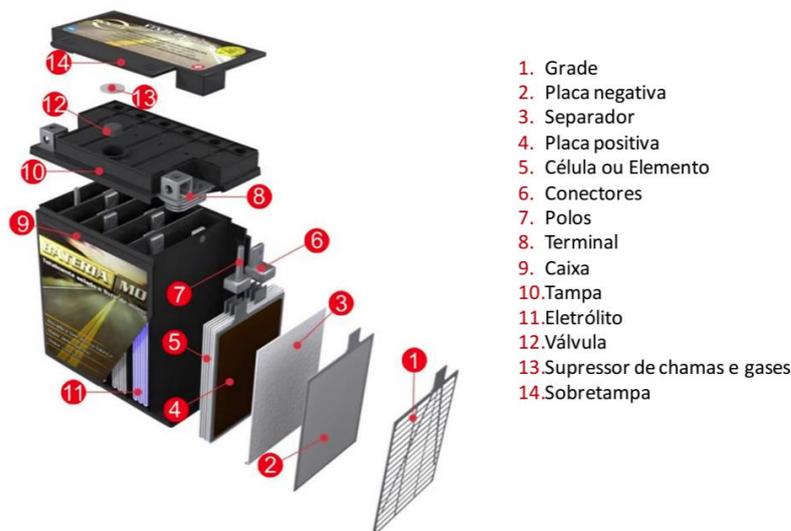
4.2.1 Baterias de Chumbo-Ácido (Pb-Ac)

As baterias Pb-Ac foram inventadas por volta de 1859, por meio do uso de condutores de chumbo e dióxido de chumbo, que são separados por um isolante submerso em uma solução de ácido sulfúrico, possuindo a finalidade de converter energia química em energia elétrica. Estes tipos de baterias são recarregáveis, e apresentam como vantagens o baixo custo, facilidade de fabricação, cinética rápida da reação eletroquímica e vida útil razoável (LEAD ACID BATTERIES, 2019). Existem três tipos de baterias de chumbo- ácido que são:

- a. baterias inundadas,
- b. baterias de vidro absorvido (AGM) e,
- c. baterias de gel.

Contudo, estes armazenadores de energia apresentam como desvantagens o uso intensivo de materiais tóxicos e perigosos para o meio ambiente. E sua baixa densidade de energia e de potência, problemas de manutenção e vida útil limitada podem variar com a aplicação, a taxa e os ciclos de descarga. A partir da Figura 33 é possível observar as principais partes de uma bateria de chumbo ácido.

Figura 33- Principais partes de uma bateria de chumbo ácido



Fonte: Carneiro *et al.*, 2017.

4.2.2 Baterias de Níquel Cádmio (Ni-Cd)

As baterias de níquel-cádmio, possuem em uma das suas partes um eletrodo com metal níquel e outro eletrodo possivelmente constituído por cádmio, zinco, hidrogênio, ferro ou haletos - submersos em solução aquosa de hidróxido de potássio. Estas baterias possuem uma

tecnologia madura, embora tenham um custo maior quando comparadas com as de chumbo-ácido, pois são aproveitadas quando seu processo de carga é realizado de forma rápida (REVANKAR, 2019).

Os armazenadores de níquel-cádmio possuem como algumas vantagens a carga rápida e simples; altos ciclos de carga e descarga; bom desempenho de carga, permitindo recargas em baixas temperaturas, robustez e confiabilidade. E como desvantagens as baterias de níquel-cádmio apresentam baixa densidade de energia, toxidez decorrente da presença do cádmio em sua constituição, eficiência na faixa de 60 a 70% é tendência em apresentar perdas de cargas elevadas (KA VISHNUMURTHY *et al.*, 2021). Na Figura 34 é possível observar uma bateria de Níquel-Cádmio para VEs.

Figura 34- Bateria de NiCd para VEs



Fonte: NEOCHARGE (2018). Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico>. Acesso em: 21 de novembro de 2022.

4.2.3 Baterias de Íon-Lítio (Li^+)

As baterias de lítio apresentam diferentes composições, como o fosfato de ferro e lítio, óxido de cobalto e lítio, óxido de manganês e lítio, entre outras. Por ser uma tecnologia recente, apresenta um grande potencial para desenvolvimento e redução de custos.

Estes tipos de baterias recarregáveis são amplamente aplicáveis em equipamentos eletrônicos, opção preferencial para veículos híbridos e veículos elétricos e no uso para o armazenamento de energia em sistemas fotovoltaicos isolados da rede (REVANKAR, 2019; KA VISHNUMURTHY *et al.*, 2021).

As baterias de íon-lítio recarregáveis apresentam como principais vantagens a elevada densidade de energia, autodescarga relativamente baixa, baixa manutenção e menores danos ao meio ambiente quando descartadas (KA VISHNUMURTHY *et al.*, 2021).

Em relação às desvantagens do uso de baterias de lítio, deve ser mencionada a vida útil (ciclos) e a profundidade dos ciclos de descarga, não sendo recomendado a utilização da

descarga completa, por causa da possibilidade de ocorrer instabilidade térmica quando há carregamento excessivo ou descarga profunda. Além disso, são tecnologia recente, ainda em maturação; reativa e inflamável se não a manusear corretamente; necessita de programas de reciclagem e segurança; efeitos de envelhecimento; riscos Químicos e Físicos (CANTANE *et al.*, 2020; EUROPEAN MARITIME SAFETY AGENCY, 2020).

Portanto, é necessário um circuito de proteção limitando a tensão e a corrente – em comparação às demais tecnologias que detêm um custo superior.

Dessa forma, para garantir uma utilização eficaz da bateria e assim uma vida mais longa, os Sistemas de Gerenciamento de Bateria (BMS) são empregados para assegurar que o sistema opere somente dentro de condições seguras. A Figura 38 mostra a combinação de várias células de uma bateria de lítio.

Figura 35-Bateria de íon de lítio e composição das células



Fonte: NEOCHARGE, 2018. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico>. Acesso em: 21 de novembro de 2022.

4.2.4 Avaliação Comparativa das Baterias

A comparação da eficiência energética (por ciclo) dos sistemas de armazenamento de baterias, envolve a eficiência e a expectativa de vida das baterias. Desse modo, os requisitos e desafios de implementação das baterias estão alinhadas com a densidade (a quantidade de energia armazenada por unidade de volume ou peso) (DENG *et al.*, 2020).

Enquanto a sua aplicação para barcos, deve-se considerar vários parâmetros, entre eles: segurança, desempenho, vida útil, potência específica, energia específica e custo-benefício. Para aplicação em veículos marinhos, a segurança e desempenho são parâmetros essenciais, assim como os aspectos ambientais (umidade e salinidade), além do mais, os barcos são mais sensíveis ao peso das baterias (PLAN *et al.*, 2017; EMSA, 2020).

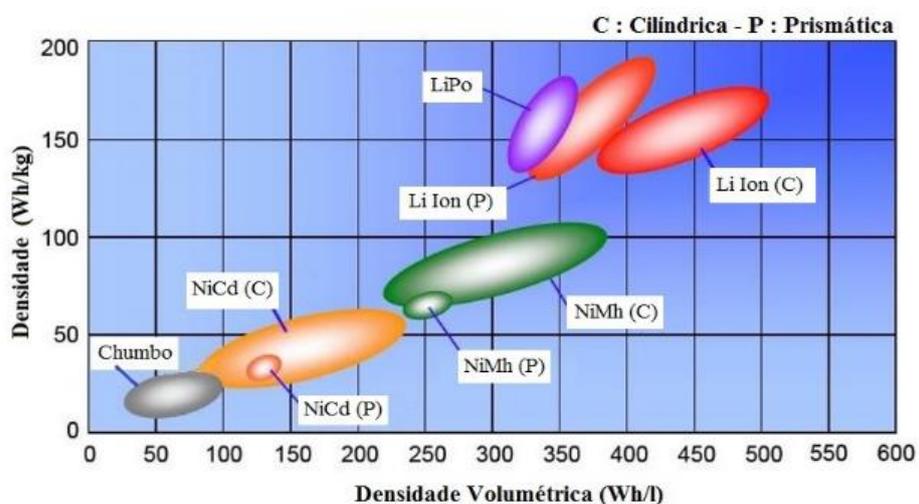
Uma vez comparadas, as baterias de chumbo ácido possuem capacidade de suportar altas temperaturas de operação (máxima de 60°C), baixo custo, suportam eventuais descargas profundas, não exigindo manutenção especializada ou sistemas eletrônicos complexos de monitoramento e controle, além de possuírem uma indústria de reciclagem, embora tenham essas vantagens, ainda assim, não são a opção mais viável para gerenciamento de energia, devido à sua baixa durabilidade (DENG *et al.*, 2020).

Em contrapartida, as baterias Íon- Li e sua composição química, estão dominando o mercado, pois são consideradas tecnologias que apresentam parâmetros como: eficiência vantajosas, altas densidades energéticas e de potência, vida longa útil, longos ciclos de carga e descarga, alta tensão nominal, baixa taxa de autodescarga e boa estabilidade, parâmetros estes, essenciais para aplicação marítima (ZIVANCEV *et al.*, 2018; ZHANG E YU, 2019; EUROPEAN MARITIME SAFETY AGENCY-EMSA, 2020; SCHILLER *et al.*, 2017; NAÇÕES UNIDAS, 2017).

Essa desvantagem, todavia, não se remete às características das baterias de chumbo ácido, o que as torna bastante atrativas, como dito no parágrafo anterior. Por outro lado, a busca de ESS com características mais compactas e leves são encontradas nas tecnologias de lítio – razão pela qual, estão dominando o mercado ESS (IBRAHIM *et al.*, 2020)

Em suma, a relação entre energia específica (Wh/kg) e a densidade de energia (Wh/L) entre as distintas tecnologias de baterias, já se observa a desvantagem com relação à massa do volume das baterias de chumbo ácido quando comparadas com as baterias de lítio, conforme ilustrado na Figura 36 (PLAN *et al.*, 2017).

Figura 36-Relação entre energia específica e densidade de energia dos tipos de baterias



Fonte: adaptado de National Aeronautics and Space Administration-NASA, 2021. Disponível em: <https://www.nasa.gov/aeroresearch/nasa-solid-state-battery-research-exceeds-initial-goals-draws-interest>. Acesso em: 03 de maio de 2023

Na Tabela 9 é feita uma sintetização para comparação dos três tipos de tecnologia de armazenamento que se mais se adequa para uso marítimo.

Tabela 9- Comparação do desempenho das diferentes baterias de aplicação marítimas

Características	Chumbo-ácido	Níquel	íon de lítio		
			cobalto	manganês	fosfato
Densidade energética (wh / kg)	30 - 40	40 - 120	150-190	100-135	90-120
Densidade de potência (w / kg)	180	300 - 1.000		1.000 - 5.000	
Ciclo de vida	500 - 800	500 - 1.000		1.000-15.000	
Eficiência de carga e descarga	70 - 92%	65 - 80%		95 - 99%	
Taxa de descarga própria	3 - 20% / mês	~30% / mês		1 - 5% / mês	
Tolerância à sobrecarga	Alta	Baixa		Baixa	
Manutenção	3 - 6 meses	60 - 90 dias		não requerido	
Tempo de carga rápida	8 - 16 horas	2 - 4 horas		1 h	
Custo	Baixo	Alto		Alto	
Toxicidade	Muito alto	Muito alto		baixo	

Fonte: adaptado EMSA, 2020. Disponível em: < <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/3895-study-on-electrical-energy-storage-for-ships.html> >. Acesso em: 21 de novembro de 2022.

A parti dessa análise, as baterias de íon-lítio ferro-fosfato (LiFePO₄) são amplamente utilizadas em sistemas de propulsão elétrica naval, devido a várias características que as tornam vantajosas para essa aplicação específica: incluindo segurança e durabilidade.

Essas características as tornam atraentes, inclusive tratando de segurança, pois são mais seguras em comparação com outras tecnologias de íon-lítio, devido à estrutura do fosfato de ferro que é menos propensa a superaquecimento e incêndio, devido à sua estabilidade térmica e resistência a situações extremas, como sobrecarga e curto-circuito. (EMSA, 2020). Parâmetro importante em ambientes marítimos, onde a segurança é uma prioridade.

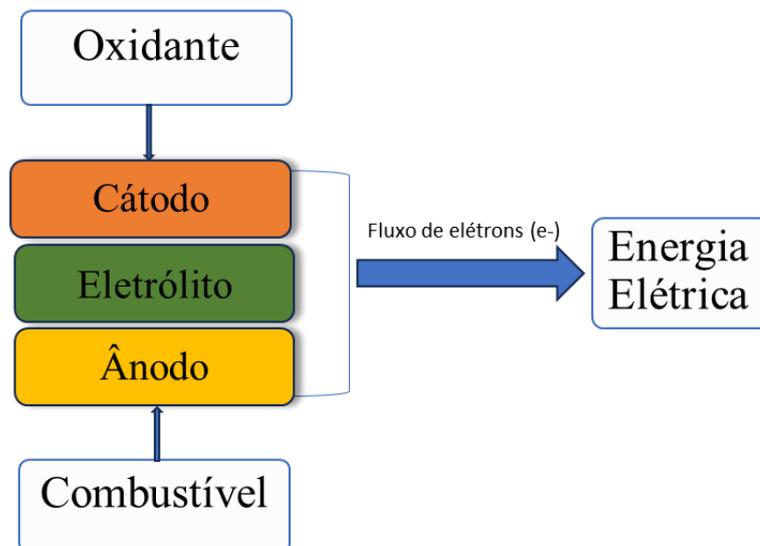
4.3 Sistema de Armazenamento com Célula de Combustível

É conceituado como um dispositivo eletroquímico que converte diretamente a energia química fornecida por um combustível e um oxidante em energia elétrica e vapor de água (DARGAHI *et al.*, 2008; BALSAMO *et al.*, 2023)

Assim, a célula a combustível (*Fuel Cells*= FC'S, sigla em inglês) é semelhante a uma bateria, que transforma a energia armazenada em ligações químicas em eletricidade, através de reações redox separadas em catalisadores dispersos em carbono a granel ou modificados com metais, por meio da combinação de metais com outros elementos (EISA *et al.*, 2023). A maior parte desses metais fazem parte do grupo da platina e são considerados caros, também apresentam excelente atividade eletrocatalítica por usar o hidrogênio como principal combustível (EISA *et al.*, 2023).

Existem vários tipos FC'S em desenvolvimento, cada uma com seus benefícios, limitações e aplicações (ENERGY.GOV, 2020). Com isso, as células de combustível são classificadas principalmente pelo tipo de eletrólito que empregam. À vista disso, as FC'S estão disponíveis em três componentes básicos: o eletrólito, o eletrodo catódico (cátodo) e o eletrodo anódico (ânodo) (VARGAS *et al.*, 2006; EISA *et al.*, 2023). Na Figura 37 são apresentados os principais componentes de uma FC'S.

Figura 37-Principais componentes de uma *Fuel Cells* unitária e genérica.



Fonte: VARGAS *et al.*, 2006.

Como citado anteriormente, as FC'S usam como principal fonte de energia o combustível proveniente do Hidrogênio Verde Eletrolítico (H2V), como fonte de energia para VEs.

Sendo este tipo de tecnologia, soluções a serem consideradas para a indústria naval auxiliar na redução de GEE e economia de combustível fósseis, pois a Organização Marítima Internacional (IMO, 2022), estabeleceu um roteiro para mitigar as emissões totais de GEE em pelo menos 50% até 2050 e instituiu regulamentos mais rigorosos (ALTOSOLE *et al.*, 2016; BALSAMO *et al.*, 2023).

Os navios já utilizam sistema auxiliares para armazenamento de energia, sendo as baterias com densidade de energia mais elevada podem conduzir veículos a uma distância maior, no entanto necessitam de uma quantidade elevada de baterias para atingir uma determinada autonomia – considera-se que quanto mais pesada for a embarcação mais energia a mesma irá consumir (DENG *et al.*, 2020; EMSA, 2020).

A partir dessas informações, a empresa *Torqueedo*, trabalha no desenvolvimento de um sistema que combina alta tecnologia de propulsão elétrica a bateria, chamada *Deep Blue* da *Torqueedo* com as células de combustível e uso H2V como o principal combustível, na Figura 38 é possível visualizar o sistema que está em desenvolvimento.

Figura 38- Células de combustível para propulsão de navios



Fonte: Torqueedo, 2022. Disponível em: <https://www.h2-mobile.fr/actus/bateau-hydrogene-torqueedo-utiliser-piles-combustible-proton/amp/>. Acesso em: 14 de junho de 2023.

Embora seja uma fonte de energia sustentável e aliada no processo de transição energética, as *Fuel Cells* possuem os desafios técnicos por meio de pesquisas e projetos de desenvolvimento, simultaneamente lidam com obstáculos para que sua implementação e a infraestrutura de hidrogênio sejam bem-sucedidas, já que as integrações de ambos se complementam (ENERGY.GOV, 2020).

Essa validação e regularização da tecnologia aborda os seguintes desafios como: custos para veículos com *Fuel Cells* são muito altos para avaliar e validar o desenvolvimento ideal de componentes. Enquanto o hidrogênio, não oferece custo e volume razoáveis, o alto custo da produção de hidrogênio, a baixa disponibilidade dos sistemas de produção de hidrogênio, além do desafio de fornecer sistemas seguros de produção e entrega são as primeiras barreiras à penetração segundo os dados do Relatório Panorama do Hidrogênio no Brasil, elaborado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA (2022).

4.4 Módulos Fotovoltaicos

Os módulos fotovoltaicos, ou célula fotovoltaica (PV, sigla em inglês), é o aparato elétrico responsável por converter a energia da luz do sol direto em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico – um fenômeno que converte luz (fótons) em eletricidade (MOHAMMED *et al.*, 2017).

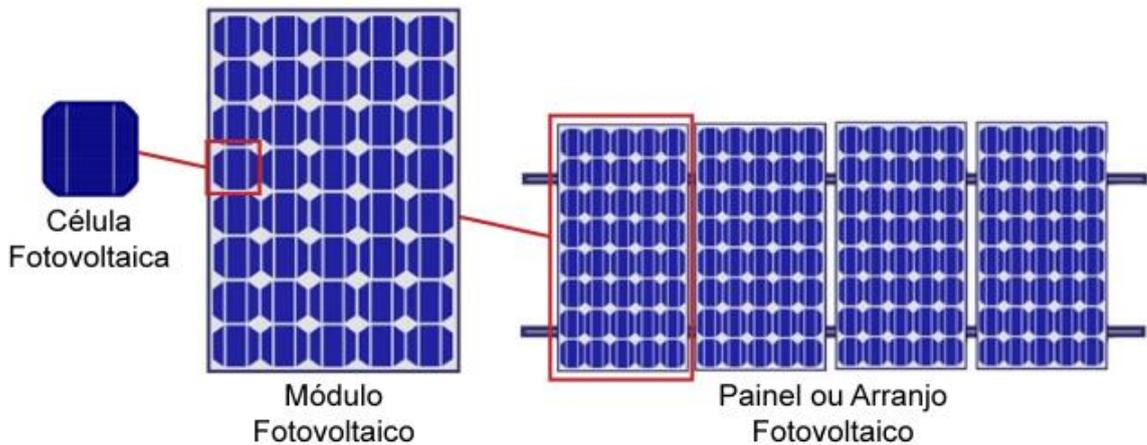
As principais tecnologias de PV para uso comercial são diferenciadas pelo material semicondutor e tecnologia de processamento utilizados em sua fabricação (RAPHAEL *et al.*, 2018). No decorrer dos anos as tecnologias aplicadas aos módulos PV vão se inovando, porém a eficiência dos módulos depende dos materiais aplicados. Grande parte das células fotovoltaicas são feitas principalmente de silício, um elemento químico com propriedades semicondutoras, que constituem os principais tipos de células fotovoltaicas que estão disponíveis no mercado, como exemplo as Monocristalina e policristalino (PINHO E GALDINO, 2014; MOHAMMED *et al.*, 2017; RAPHAEL *et al.*, 2018).

Em síntese, as PV são classificadas como primeira geração, conhecidas também como células de *Wafer*, na qual apresentam uma pureza de silício cristalino para que alcancem uma eficiência entre 15-20%, que incluem os painéis de Silício Monocristalino (mono-Si) e Silício Policristalino (poli-Si) (PINHO E GALDINO, 2014; RAPHAEL *et al.*, 2018). Enquanto as de segunda geração ou filmes finos, apresentam eficiência inferiores quando correlacionadas com as de primeira geração, que podem ser divididas em três cadeias produtivas: Silício Amorfo (a-Si), Disseleneto de Cobre e Índio (CIS), Índio e Gálio (CIGS) e Telureto de Cádmio (CdTe) (PINHO E GALDINO, 2014).

Enquanto, os módulos de terceira geração ou filmes finos emergentes, são tecnologias mais atuais sendo desenvolvidas no meio científico. Utilizam Materiais Orgânicos, Pontos Quânticos (PQs) e Perovskitas, e estão associadas à elevada eficiência e baixo custo/watt, além de utilizar materiais abundantes (ELY *et al.*, 2014; RAPHAEL *et al.*, 2018 e ALMUTAIRI, 2021).

Sendo o conjunto de células fotovoltaicas encapsuladas, quando agrupadas formam um arranjo de módulos fotovoltaicos, que são manufaturados a partir de materiais semicondutores. A Figura 39, mostra um arranjo de painéis fotovoltaicos.

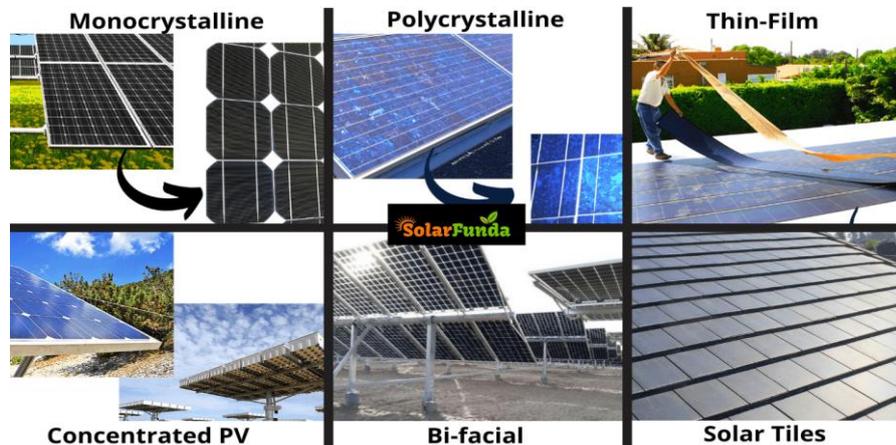
Figura 39- Combinação de painéis em um arranjo fotovoltaico



Fonte: Moraes, 2020. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/célula-fotovoltaica/>. Acesso: 01 de maio de 2023.

Mediante a isso, as células de terceira geração permitem uma utilização mais eficiente da luz solar, em relação às células baseadas em um único band-gap (em inglês band gap = intervalo de banda) eletrônico, ou seja, a quantidade de energia necessária para que o elétron efetue essa transição (ELY *et al.*, 2014). A Figura 40 sumariza os três tipos de tecnologia de PV.

Figura 40-Tipos de células fotovoltaicas



Fonte: Bhatnagar, 2022. Disponível em: <https://solarfunda.com/author/keertibhatnagar/>. Acesso em: 23 de maio de 2023.

4.4.1 Células Monocristalina

A maioria das tecnologias fotovoltaicas implantadas em nível comercial foram produzidas usando silício cristalino (c-Si) baseado em *wafer* (MOHAMMED *et at.*, 2017). Sendo este material os mais utilizados, em virtude da sua eficiência e esses tipos de módulos que possuem maior grau de pureza do silício, logo a eficiência dessas células atinge valores

próximos a 18% maior eficiência, com potências médias na faixa de 360 Wp, tornando-se uma tecnologia confiável, com desempenho razoável a preços competitivos. Além do silício ser o segundo mineral mais abundante na crosta da terra, utilizado como material semicondutor pelas indústrias de placas fotovoltaicas (PINHO *et al.*, 2008; MOHAMMED *et al.*, 2017).

O processo de fabricação está dividido em quatro fases: Obtenção e purificação do material semicondutor, crescimento do vidro, corte do material em *wafers* e montagem da célula. O silício é obtido a partir de minerais formados principalmente por dióxido de silício (SiO₂) (OLIVEIRA, 2019). No primeiro processo, o mineral passa por uma técnica de purificação de 99% suficiente para uso como semicondutor, deve subsequentemente passar por processos químicos que reduzem os níveis de impurezas a valores aceitáveis, da ordem de 10 ppm (OLIVEIRA, 2019). Na Figura 41 observa-se a estrutura de uma célula monocristalina.

Figura 41- Célula fotovoltaica monocristalina

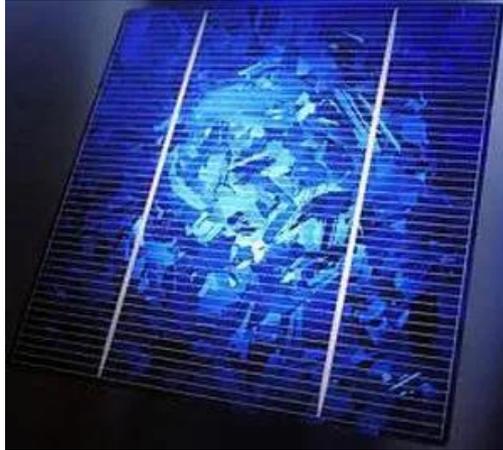


Fonte: Ogbomo *et al.*, 2017

4.4.2 Célula Policristalino

As células policristalinas são constituídas por silício, que em sua composição possuem vários fragmentos de cristais em contato entre si, por meio de uma organização irregular. Esse procedimento de irregularidade visa reduzir custos de fabricação, que podem causar perda de eficiência no módulo solar (PINHO *et al.*, 2008). Os pequenos cristais dão uma aparência de floco de metal para a placa, e podem ser observados na Figura 42 na microestrutura de célula policristalina (OGBOMO *et al.*, 2017).

Figura 42-Pequenos cristais na célula policristalina



Fonte: Directindustry. Disponível em: <https://www.directindustry.es/prod/maharishi-solar-technology/product-54437-358101.html>. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

4.4.3 Células de Filme Fino

As células de filme fino são superfinais, e por isso reflexíveis, originadas de materiais variados (incluindo os minerais e elementos com liga semicondutora, sendo eles: cobre-índio-gálio-(disseleneto em sua estrutura) e são capazes de serem aplicadas diretamente nas superfícies, até mesmo em embarcações, fachada de prédio etc. Esse modelo de células possuem uma particularidade em termos de interligação monolítica, ou seja, elas são separadas pela eletrificação e interligadas em etapas estruturais, assim criando finas ranhuras entre células individuais.

Por sua vez, a flexibilidade é pelo uso de tecnologia de fotovoltaico orgânico (OPV, sigla em inglês), com suas células fotovoltaicas sendo impressas sobre um filme plástico Figura 46. Essas células possuem na sua composição uma tinta à base de carbono, onde capta a luz solar e transforma em energia, na Figura 43 observa-se essa célula (LACROIX, 2013).

Figura 43- microestrutura de células finas e flexíveis



Fonte: Directindustry. Disponível em: <https://www.directindustry.es/prod/maharishi-solar-technology/product-54437-358101.html>. Acesso em: 31 de janeiro de 2023.

4.4.4 Células de Perovskitas

As células Perovskitas (PSCs, sigla em inglês) são baseadas em haletos orgânico-inorgânicos, com isso os diversos testes já realizados em laboratório comprovaram uma eficiência superior a 20% (PARK *et al.*, 2013; SNAITH, 2013; KIM *et al.*, 2014 e RAPHAEL *et al.*, 2018). Outros benefícios são a utilização de materiais e técnicas de baixo custo, tornando-as importantes tecnologias a serem comercializadas (SUM *et al.*, 2014; PARK, 2015 e RAPHAEL *et al.*, 2018).

Embora essa tecnologia tenha seus benefícios, as medidas de toxicidade devem receber atenção, pois à presença de sais de chumbo solúveis na produção de PSCs, são consideradas uma fonte de alta toxicidade e potencial gerador de impactos socioambientais (MOHAMMED *et al.*, 2017). Dessa forma, os Haletos de chumbo (II) - uns constituintes dos PSCs, provocam preocupações ambientais por causa das ameaças toxicológicas que a implantação extensiva da célula solar pode representar. Tornando-se um grande desafio o seu estudo para a superação das críticas socioambientais (CHEN *et al.*, 2014; ESPINOSA *et al.*, 2015 e MOHAMMED *et al.*, 2017). A partir disso, a Figura 44 sintetiza a estrutura fotovoltaica de 3° geração.

Figura 44- Módulo PV de terceira geração



Fonte: adaptado de SOLAR POWER EUROPE (2018).

4.4.5 Avaliação comparativa dos módulos Fotovoltaicos

Ao analisar a eficiência das células fotovoltaicas, existe uma faixa de 30-40% de comprovação de eficiência em laboratório, no entanto os painéis fotovoltaicos comercializados (tanto os monocristalina como os policristalinos) tem uma eficiência em média de 20%, considerando o ciclo de vida operacional de 30 anos (PLAN *et al.*, 2017).

Isso significa que a cada 1000 W de energia solar que cai sobre os módulos fotovoltaicos, é gerado apenas 200 W de eletricidade, algo em torno de 1 m² (AOUN *et al.*, 2019). Diante disso, a energia calculada por unidade de área é denominada irradiância e pode ser afetada devido a vários parâmetros como: temperaturas, poeiras e sombreamento (AOUN *et al.*, 2019).

Quando comparadas as tecnologias fotovoltaicas, são considerados os tipos de materiais de PV, sendo as Monocristalina possuem vantagens e alta eficiência quântica sob luz do sol, por meio da geração real de energia absorvida pelos módulos (JIANG, 2020). Além disso, para que se obtenha alta eficiência, as células de silício precisam de um grau de pureza elevado, fazendo com que aumente o custo e consumo de energia no processo de fabricação (VASCONVELOS, 2017; JIANG, 2020).

As Células de Filmes Finos são excelentes para os projetos, por terem características flexíveis, porém possuem baixa eficiência. Enquanto as células de PSCs ainda são tecnologias teóricas, pois estão em fase de P&D - testes e produção em pequena escala (BRINKMANN *et al.*, 2022).

Mediante a isso, a indústria fotovoltaica é considerada um setor estratégico, devido às contribuições que são propostas pela sua trajetória de aumento de eficiência tecnológica e queda de custos de implantação nos últimos anos, o que conseqüentemente torna o mercado cada vez mais competitivo (CARVALHO, 2014). O silício é o segundo elemento mais abundante na

superfície terrestre, superado apenas pelo oxigênio, logo o uso do silício como matéria prima não apresenta possibilidade de esgotamento na cadeia produtiva de módulos FV.

A partir da análise da Tabela 10, pode-se inferir a comparação dos diferentes tipos de tecnologias e materiais utilizados na produção de células fotovoltaicas, além dos custos e benefícios de cada Sistema fotovoltaico (SFV).

Tabela 10- Comparação das tecnologias SFV

Módulo FV	Material	Eficiência	Custo	Benefícios
Monocristalina	Cristal de silício simples puro	Alto (18%-20%)	Alto	Eficiência alta. Vida útil de 30 anos. Custo alto Alto desempenho em baixa Irradiação
Policristalino	Fragmentos de silício	Média (15-17%)	Alto	Vida útil de 30 anos. Custo baixo Alto desempenho em baixa Irradiação
Filmes Finos	a-Si CIGS CdTe	Baixo (entre 11% e 15%)	Baixo	Efeito flexível, o que abre um leque de aplicações muito grande.
Perovskita	⁷ CaTiO ₃ Pb (II) ou Sn (II) I ⁻ , Br ⁻ , Cl	Alto ³ (20%)	Baixo	Baixas perdas de recombinação Baixo custo de material Longos comprimentos de difusão de portadores de carga e a possibilidade de substituição de cátions e ânions.

Fonte: adaptado de Mohammed *et al.* (2017); Kim *et al.* (2014) e Brinkmann *et al.* (2022).

As técnicas de produção em massa dos módulos FV são projetadas para durar 20-30 anos, nas quais passam por programas de testes acelerados que simulam os efeitos do calor, umidade, temperatura de ciclo, radiação ultravioleta (UV) e entre outros parâmetros (IEA-PVPS, 2014). Diante disso, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), através do Programa Brasileiro de Etiquetagem, definiu classes de eficiência energética para módulos fotovoltaicos, conforme a Figura 45.

⁷Titanato de cálcio (CaTiO₃)

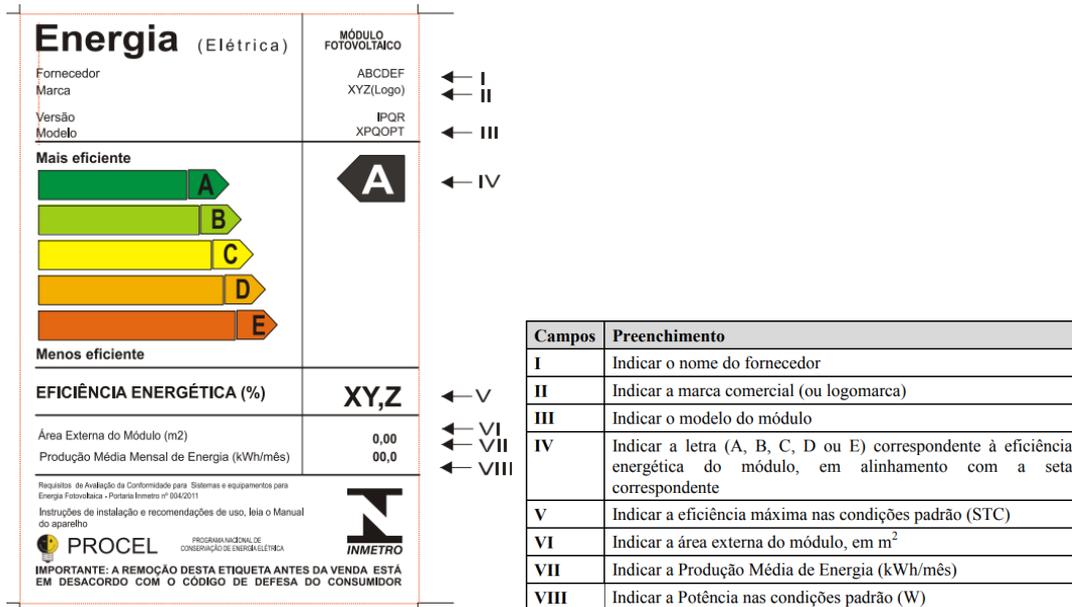
Estanho- Sn

Chumbo-Pb

Cloreto- Cl; Brometo- Br; Iodeto- I. Novos materiais aplicados na cadeia produtiva dos módulos PV.

^Aaproximado, pois está em fase de P&D, testes e produção em pequena escala (University of Cologne, 2021, pág. 19).

Figura 45-Etiquetagem do módulo FV



Fonte: INMETRO (2020).

4.5 Motores Elétricos

Com a entrada de Veículos Elétricos (VEs) no mercado, é crucial o desenvolvimento de motores elétricos de próxima geração que utilizem materiais magnéticos permanentes superiores, sustentáveis e economicamente viáveis (E. CASTLE *et al.*, 2015).

Os motores elétricos são responsáveis por transformar a energia elétrica em mecânica para gerar propulsão na embarcação, sendo os principais consumidores de energia nos barcos (SOUZA *et al.*, 2019). Embora sejam grandes consumidores de energia, os motores elétricos são candidatos promissores para serem utilizados no transporte aquaviário elétrico, pois oferecem melhor desempenho em relação ao motor a combustão (VENUGOPAL *et al.*, 2018).

Esses componentes, por sua vez, são confeccionados a partir de diversos materiais, sendo os mais comuns: Ferro Fundido branco, Alumínio, Cobre e Ímãs de Terras Raras (ITR). O Ferro Fundido branco (com teor de carbono entre [2,11% - 6,77%]) destaca-se por sua usinabilidade fácil e custo reduzido, além de apresentar uma condutividade térmica essencial para motores encapsulados (KRAMER *et al.*, 2012; VIANA, 2014). Enquanto isso, o alumínio, caracterizado por sua leveza, maleabilidade e resistência, também é notável por sua ductilidade.

Os ímãs permanentes são materiais de alto nível de fluxo de temperaturas elevadas e são resistentes aos campos magnéticos reversos e as atmosferas corrosivas (E. CASTLE *et al.*, 2015). Por sua vez, os ITR são ímãs superpotentes, feitos de uma combinação de componentes

como: Neodímio, Ferro e Boro Neodímio (Nd), Disprósio (Dy)-considerado o elemento mais caro e mais raro dos ímãs permanentes de REE, além da combinação de pequenas quantidades de praseodímio (Pr) e de Térbio (Tb) (KRAMER *et al.*, 2012; GIL, 2019; ZS DU E TA LIPO, 2020; M. MURATALIYEV *et al.*, 2022).

A combinação de diferentes tipos de ímãs na sua composição contribui para chegar a alta eficiência e a alta carga magnética, pois possuem excelente remanência e força coercitiva (KRAMER *et al.*, 2012; GIL, 2019; ZS DU E TA LIPO, 2020; M. MURATALIYEV *et al.*, 2022).

Sendo os motores elétricos de IP NdFeB, são o tipo mais comum para aplicação de alto desempenho devido às suas propriedades magnéticas superiores (M. MURATALIYEV *et al.*, 2022). Paralelo a isso, a aplicação dessas tecnologias nos motores, aumentaram a velocidade de superfície de mais de 120 m/s com velocidades de rotação acima de 17.000 rpm (ZS DU E TA LIPO, 2020).

Esse progresso ocorreu devido às possíveis melhorias nos materiais das chapas de laminação e nos mancais (KRINGS *et al.*, 2020). Sendo assim, para aumentar a resistência mecânica em chapas de laminação, os diversos fabricantes ofereceram uma série de produtos adaptados para aplicação nos veículos elétricos (KRINGS *et al.*, 2020).

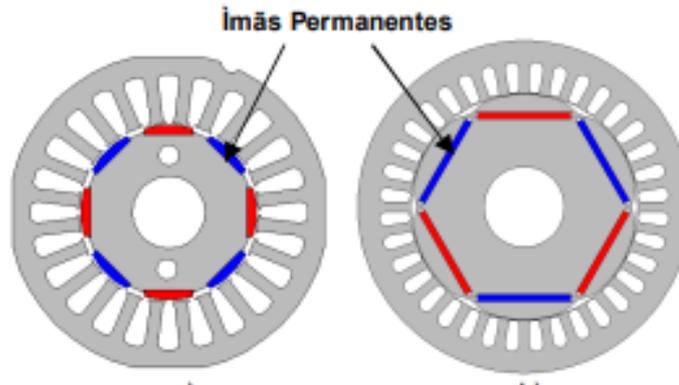
Em contrapartida, os motores de ímã permanente são as tecnologias mais eficientes das últimas décadas, no qual estão vinculados alta densidade de potência e alto fator de potência (E. CASTLE *et al.*, 2015; E. CASTAGNARO E N. BIANCHI, 2020). Porém, os Ímãs Pesado de Terras Raras são os componentes mais caros em máquinas ímã permanentes (IP), devido à sua limitada disponibilidade, o que conseqüentemente eleva o custo total das máquinas IP, optando as empresas investigar novas soluções de materiais ou formas de recuperação dos ímãs (E. CASTLE *et al.*, 2015; ZS DU E TA LIPO, 2020; E. CASTAGNARO E N. BIANCHI, 2020).

Mediante isso, os motores elétricos são os mais utilizados nas últimas décadas, uma vez que, combinam diversas aptidões agregadas, entre baixo custo, leveza, rendimentos, livres de poluição sonora e outros, além de contribuírem com menores consumos de energia, essa eficiência em virtude principalmente aplicação dos IP (PATEL, 2012; AT DE ALMEIDA *et al.*, 2014; MARTINS 2017).

Toda essa evolução da eficiência energética dos motores elétricos permitiu a aplicação de tecnologias e investimentos sobre as mesmas, para a obtenção de novas soluções sustentáveis, e como resultado, os motores elétricos atingiram uma eficiência de 95,1%

(RIBEIRO *et al.*, 2015; KRINGS *et al.*, 2016). Na Figura 46 observa-se o posicionamento dos ímãs no rotor.

Figura 46- Tipos de posicionamento dos ímãs no rotor



Fonte: WEG (2015). Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hce/h39/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em: 06 de novembro de 2022.

4.5.1 Avaliação comparativa dos Motores Elétricos

Como citado anteriormente, existem variados modelos de motores elétricos disponíveis no mercado náutico, e para os diferentes sistemas de propulsão de VE naval, a escolha propulsiva e seus componentes são uma parte importante do projeto. De tal forma que, o motor elétrico deve satisfazer o desempenho da embarcação, levando em consideração as principais características como: alta potência instantânea e alta densidade de potência (VENUGOPAL *et al.*, 2018).

A máquina de Relutância Síncrona assistido por Ímã Permanentes (PMSynRM, sigla em inglês), é uma das candidatas mais promissoras que podem atender os requisitos com alta eficiência e baixo custo (M. MURATALIYEV *et al.*, 2022). Mediante a isso, as máquinas elétricas do tipo PMSynRM, são baseadas em elementos como (Nd) e (Dy; Sm), são preferíveis devidos aos fatores peso, tamanho e eficiência para aplicação VE (KRAMER *et al.*, 2012; E. CASTAGNARO AND N. BIANCHI, 2020; DAVIS E BOUNDY, 2022).

Do ponto de vista do mercado, a maioria dos fabricantes e fornecedores de VE escolhe máquinas de ímã permanente para os motores elétricos de tração, seja como um motor de ímã permanente interno (IPM, sigla em inglês) ou um motor PMSynRM, isso em virtude das características citadas anteriormente (KRINGS *et al.*, 2020).

Em virtude da crescente procura por motores elétricos (inclusive de aplicação marítima), no Brasil a empresa brasileira WEG, já consolidada no mercado mundial como produtora de motores e equipamentos elétricos, há pouco tempo introduziu no mercado naval

uma série de motores elétricos com aplicações marítimas, chamada *Water jacket Cooled* (WGM Motors).

Estes apresentam soluções tecnológicas e eficiência para o mercado naval, uma vez que, os motores de ímã permanentes dispõem de redução no seu tamanho, redução do peso e sem perda da potência, pois foram projetados para ambientes agressivos e de alta umidade como zonas portuárias, costa marítima, indústria pesqueira e navios em geral (WEG, 2022)

Enquanto, as embarcações de maior porte necessitam de motores elétricos que garantam eficiência energética e confiabilidade operacional, os motores elétricos de indução e os de ímã permanente são os mais usados por navios, pois se apresentam como soluções mais indicadas para embarcações, pois atenderem a principal exigência: alta eficiência (OLIVEIRA *et al.*, 2017). Ambos os motores citados, apresentam valores que chegam em torno dos 90% de eficiência, mantendo a potência de 50% do seu valor máximo (OLIVEIRA *et al.*, 2017). A Figura 47 sumariza um Motor de indução da linha WEG Marítima.

Figura 47-Motor de indução são usados por navios



Fonte: WEG (2019). Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/solutions/marine>. Acesso em: 21 de

Enquanto, para pequenas e médias embarcações, os motores elétricos estão divididos em 4 categorias como: motor de popa; motor centro; motor hidrojato e motores de indução. Entre esses modelos citados, os motores popa elétricos são usados em larga escala, a Figura 48 apresenta as variedades de modelos de motores elétricos de popa.

Figura 48- Sistema elétrico com uso do motor de popa elétrico



Fonte: Yamaha (2022). Disponível em: <https://global.yamaha-motor.com/about/business/marine-engines/>. Acesso em: 20 de junho de 2023.

No processo de conversão de energia elétrica em mecânica, nas embarcações, há perdas de energia em forma de calor, com ou sem vibrações (BATISTA *et al.*, 2015). Diante disso, os desafios da tecnologia, especificamente dos motores, é mitigar essas perdas indesejadas e unir eficiência energética alinhada à entrada e saída útil de energia (BATISTA *et al.*, 2015).

A nova topologia de motores de ímãs permanentes que possuem ímãs alojadas na carcaça, reduzem os riscos de superaquecimento, logo aumentam a eficiência pela não necessidade de magnetização dos eletroímãs (MEN'SHENIN; GRIGOR'EV, 2018). Enquanto isso, os motores elétricos de indução e os de ímãs permanentes CA ou CC se apresentam como soluções mais adequadas para as embarcações (inclusive os solares), uma vez que, apresentam alta eficiência (HASHEMNIA E ASAEI, 2008; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Devido à baixa eficiência, a velocidade limitada o motor DC tornou-se menos adequado para um trem de força de VE (MEN'SHENIN; GRIGOR'EV, 2018). Além disso, a construção volumosa do motor DC é um desafio significativo a ser levado em consideração. Tendo em vista essas restrições mencionadas, o motor de indução continua sendo o *powertrain* com uma tecnologia madura encontrada em diversas aplicações (RIMPAS *et al.*, 2023).

No entanto, o motor ímã permanente (PMSM, sigla em inglês) e motor síncrono de relutância (SynRm, sigla em inglês) possuem diversas vantagens, pois são classificados por possuírem alto torque, alta eficiência, velocidade e relação potência-peso, devidos a essas características, os motores PMSM podem ser encontrados em diversos VEs (PLESSIS *et al.*, 2023; RIMPAS *et al.*, 2023).

Nesse contexto, os motores elétricos destacam-se por serem mais leves em comparação com os motores de combustão interna. Contudo, para impulsionar a embarcação, esses motores requerem baterias que, por sua vez, possuem um peso considerável. Um aspecto adicional que deve ser considerado é a eficiência dos motores a combustão interna, que normalmente varia entre 26% e 30%, enquanto os motores elétricos apresentam uma eficiência superior a 96% (VENUGOPAL *et al.*, 2018).

Mediante a isso, na Tabela 11 é apresentada uma análise comparativa entre os motores elétricos mais difundidos, no qual é possível observar: eficiência, confiabilidade, densidade de potência, maturidade da tecnologia e custos. Sendo 1 a 2 apontam para as tecnologias mais eficientes e o número 3 para tecnologias com características inferiores aos demais motores (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Tabela 11- Análise comparativa dos motores elétricos

Parâmetros	Motor DC	Motor ímã Perm.	Motor de indução	Chaveados
Eficiência	3	1	2	2
Confiabilidade	3	2	1	1
Densidade de Potência	3	1	2	2
Maturidade da Tecnologia	1	2	1	2
Custos	2	3	1	3

Fonte: OLIVEIRA *et al.*, (2017).

4.6 Conclusão deste capítulo

Diante do exposto neste capítulo, o processo eletrificação dos barcos elétricos, requer uma alta demanda de matéria prima mineral para aperfeiçoar as tecnologias estratégicas, nos quais, coincidem com os desafios da exploração mineral e segurança energética dos elementos críticos e que estão associados em particular com ímãs permanentes: Pr, Nd, Tb e Dy. Mediante a isso, as oportunidades estão em torno da recuperação desses materiais através da reciclagem e analisar a viabilidade, de modo a preservar as propriedades magnéticas para assim retornar a cadeia produtiva. Embora existam desafios de viabilidade econômica e estratégias das

stakeholder, na qual a recuperação desses materiais poderia ser uma fonte de abastecimento significativa por um determinado período.

Ademais, é ressaltado que a ESG é fundamental para identificar potenciais riscos ambientais e sociais, associados aos minerais críticos aplicados em VEs marítimos. Além disso, permite o desenvolvimento de estratégias de mitigação, incentiva a inovação em processos produtivos mais sustentáveis e promove a adoção de melhores práticas na indústria. A consideração desses aspectos contribui para a construção de uma cadeia de suprimentos mais responsável. No próximo capítulo será realizado o estudo do projeto conceitual.

5 PROJETO CONCEITUAL DE EMBARCAÇÃO ELÉTRICA

Neste capítulo, se apresenta o desenvolvimento efetivo do projeto conceitual de um Barco Elétrico Híbrido para a região da Amazônia Oriental. O principal objetivo é selecionar as principais tecnologias para o sistema propulsivo elétrico da embarcação. Além disso, demonstra-se o levantamento estimado dos custos relacionados à avaliação econômica do produto (barco), considerando os custos operacionais, de investimento e o retorno esperado. Com base no Projeto Conceitual, será realizada uma análise aplicando a perspectiva ESG (ambiental, social e governança) em torno dos minerais considerados críticos, que são essenciais na composição da cadeia de suprimentos de veículos elétricos marítimos. Isso ocorre porque a transição para a propulsão elétrica destaca o aumento da demanda, principalmente pelos Elementos de Terras Raras (REE, sigla em inglês), usados na produção de Ímãs Permanentes.

5.1 Introdução

Conforme mencionado, a proposta do projeto conceitual, é a substituição da propulsão convencional utilizando motor de combustão interna, por uma tecnologia elétrica, equipado com painéis fotovoltaicos como fonte de energia renovável, o que irá reduzir consideravelmente a utilização de combustível fóssil como principal fonte motora. Além disso, o estudo limita-se na escolha de tecnologias, especificando (custo, qualidade, eficiência tecnológica, inovação, estimativa de durabilidade e análise de impacto ambiental), esses parâmetros são essenciais para adequar o projeto para que possa atender de forma ótima as necessidades estabelecidas pela indústria naval.

Por meio da escolha das tecnologias aplicadas na embarcação, foi realizado uma análise do ciclo final de vida desses equipamentos e avaliado por meio da ESG se, o processo de reciclagem ajudaria a mitigar os impactos de uma possível falta desses minerais, ditos elementos de REE.

5.2 Metodologia

A metodologia é composta por duas análises, a partir da construção do projeto conceitual. Mediante a isso, o projeto conceitual é uma estratégia de investigação com uma abordagem em um assunto específico e descrevendo o processo para alcançar o objetivo principal (NOGUEIRA, 2022). Para a descrição do projeto, foi necessária fazer um amplo

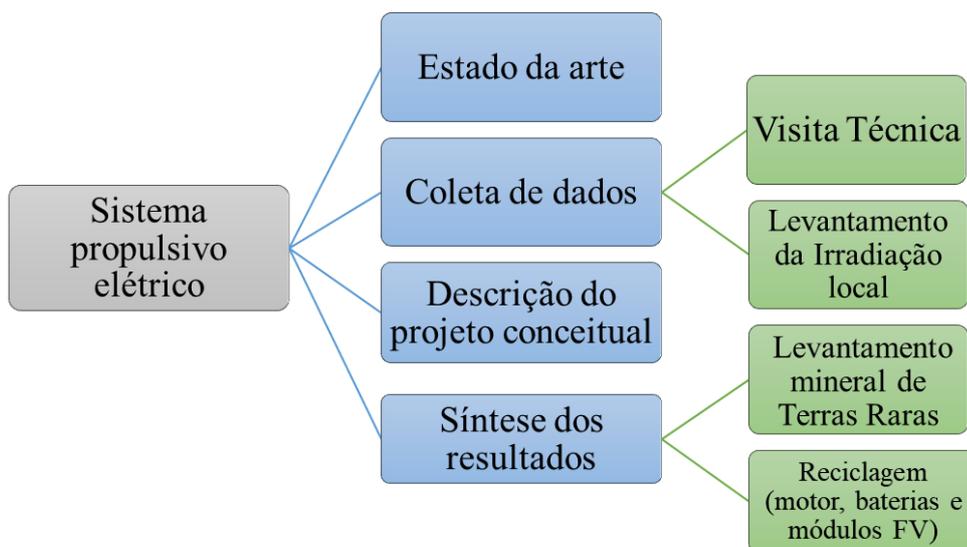
levantamento bibliográfico para compor o referencial projetual e foram considerados os estudos que enfatizam a importância de barcos elétricos solar como forma mitigar os impactos ambientais causados pelos barcos à combustão.

Posteriormente, para a obtenção de resultados mais efetivos para o estudo, foi necessário realizar uma pesquisa de campo, através de uma visita técnica na empresa de turismo náutico da Cidade de Belém. Os dados foram coletados através da aplicação de um questionário semiestruturado com a equipe técnica responsável pela embarcação.

Após a coleta de dados, foi possível criar uma proposta de projeto para a substituição do barco à combustão por um elétrico híbrido, analisando os principais componentes para essa embarcação. Sendo necessário considerar as características geográficas da região Amazônica, já que o barco, foi realizado levantamento de dados de irradiação solar do local, por meio de ferramentas digitais, visto que, o barco será equipado com módulos fotovoltaicos.

A parti disso, realizou-se o levantamento dos REE no período de 2000 a 2019, dados estes, disponibilizados na plataforma online da Agência Científica do governo dos Estados Unidos-US *Geological Survey* (USGS), com objetivo descrever preços e à demanda desses elementos de REE para desenvolvimento dos equipamentos dos VEs marítimos e assim analisar sua importância na cadeia de reciclagem, como formar recuperar ou reciclar para supri a demanda do mercado. Essa análise foi realizada por meio da ESG e sua contribuição para sugerir uma melhor destinação dos equipamentos da embarcação no ciclo final de vida. Na Figura 49 é possível observar um fluxograma dos passos para eletrificação da embarcação.

Figura 49- Fluxograma de metodologia pós projeto



Fonte: autora

Tabela 12- Especificações técnicas do barco a combustão

Parâmetros do Barco elétrico	Valores	Uni.
Velocidade máxima	8	nós
Velocidade requerida	3,77	nós
Autonomia do barco	4	horas
Comprimento total	28,7	m
Largura	6,30	m
Calado a plena carga	1,69	m
Capacidade	280	passageiros
Material do casco	Madeira	-
Motor a combustão	1	kW
Motor elétrico	1	kW
Gerador a diesel	1	kW
Potência nominal	300	kW
Rotação min.	1600	-
Deslocamento	49,58	Ton.

Fonte: Manual da embarcação (2015)

O barco a combustão tem custo de manutenção em torno de R\$145.000,00 anual, além do custo fixo com o diesel, que oscila de preços ao longo do ano. A Tabela 13 apresenta o custo total com manutenção e diesel, dados estes importantes para análise de *payback*.

Tabela 13- Custo de manutenção com o barco a combustão

Custo de Manutenção do barco R\$	
Custo com diesel anual	90.729,00
Custo de manutenção anual	100.000,00
Manutenção motores a combustão mensal	45.000,00
Total	235.729,00

Fonte: autora

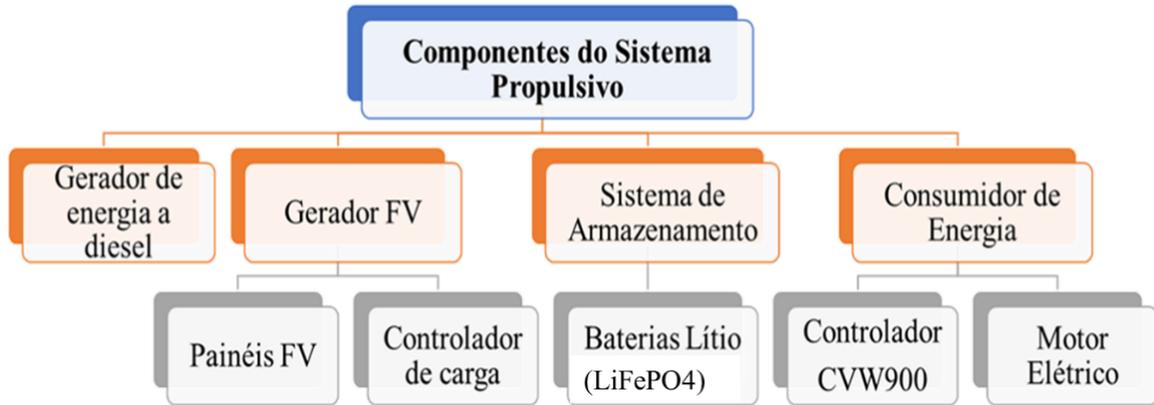
5.4 Dimensionamentos do Sistema Propulsivo Elétrico do Barco

No processo de dimensionamento do sistema de propulsão elétrico da embarcação, foi fundamental considerar a otimização dos dados para compensar o peso e reduzir o consumo de energia. Essa abordagem é fundamental, uma vez que, o peso da embarcação está diretamente ligado à resistência enfrentada durante o deslocamento do barco. Quando a embarcação tem um calado mais profundo, o aumento do peso resulta em maior demanda energética para superar a resistência ao avanço (CUNHA, 2013).

Diante desse contexto, foram importantes abordar os seguintes aspectos: redução da capacidade de passageiros, definição da velocidade de serviço ideal em nós, retirar o mastro para colocação das baterias e por fim atendendo o tempo de viagem realizada e mantendo o preço de tarifa. No entanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre a redução de peso e a manutenção da integridade estrutural e segurança da embarcação.

A partir dessas informações, o Projeto Conceitual terá destaque para os componentes essenciais para construir um sistema de propulsão elétrica, que foram direcionados para: o sistema propulsor, os geradores de energia, consumidores de energia e armazenamento de energia, visualizados na Figura 511.

Figura 51-Componentes do sistema propulsão de barcos



Fonte: adaptado de Reidj G *et al.* (2021).

A partir dessas definições, foram desenhados os novos parâmetros da embarcação e manteve o trajeto realizado pelo barco, por ser um veículo elétrico com dependência do banco de baterias, alguns parâmetros precisam estar definidos para averiguação dos cálculos futuros.

5.4.1 Definição do percurso

O barco manterá a rota pela orla de Belém, no qual, todas as tardes reúne dezenas de turistas para apreciar o pôr do sol ao ritmo do Carimbó e conectando os principais pontos turísticos, com intuito apreciar a paisagem ao longo da Baía do Guajará.

Apesar da embarcação possuir velocidade máxima de 8 nós, a mesma navegará com uma velocidade de serviço ideal de 3,77 nós, com um trajeto de 14 km no tempo de 2 horas. A Equação 1 representa a relação de velocidade média de cruzeiro da embarcação (WOUD *et al.* 2003).

$$V = \frac{d}{t} = \frac{14km}{2h} = 7km/h = 3,77 \quad (1)$$

Sendo:

V: Velocidade [km/h]

D: distância [m/s]

T: tempo [h]

Nó: unidade de medida de velocidade equivalente a uma milha náutica por hora (1 nó = 1,852 km/h)

Com essa velocidade, a embarcação consegue economizar energia do sistema de armazenamento, e de forma simultânea ter menos desgasto energético do motor, ou seja, será capaz de suprir a demanda requerida pelo barco. Os dados técnicos alterados para dimensionamento do sistema propulsivo da embarcação podem ser visualizados na Tabela 14.

Tabela 14- Dados da embarcação elétrica híbrida

Parâmetros do Barco elétrico	Valores	Uni.
Velocidade máxima	8	nós
Velocidade requerida	3,77	nós
Autonomia do barco	28,7	horas
Comprimento total	6,30	m
Largura	1,69	m
Calado a plena carga	80	m
Capacidade	Madeira	passageiros
Material do casco	2	-
Motor	2	Hp
Potência nominal	300	kW
Rotação min.	1600	-
Deslocamento	49,58	Ton.
Banco de baterias	12	Ah
Módulos FV	32	W

Fonte: autora

A Figura 52 demonstra o trajeto percorrido pelo barco na costa do Rio Guajará, com o percurso de 14 km, para esta estimativa não foram considerados fatores como: correntes marítimas ou ventos, que podem afetar a velocidade real do barco e, conseqüentemente, a distância percorrida.

Figura 52- mapa de localização da rota da embarcação



Fonte: autora

5.4.2 Análise de Resistência ao Avanço

O primeiro passo para o dimensionamento do sistema propulsivo de uma embarcação é realizar a estimativa da resistência ao avanço requerida pelo barco. Sendo necessária para determinar a velocidade requisitada em função da potência do motor. Desta forma, a resistência ao avanço representa a força que a água exerce sobre a área molhada do casco na velocidade que o veículo se movimenta (MOLLAND *et al.*, 2017; COSTA *et al.*, 2020).

Existem diferentes fatores que motivam a resistência ao avanço de um barco e quanto maior a área do casco em contato com a água e a rugosidade da superfície, maior será a resistência ao atrito (COSTA *et al.*, 2020). Em posse desse contexto, obtém-se a potência efetiva, em Watt, necessária para o movimento da embarcação na velocidade desejada, por meio da Equação 2 (REIS, 2019; ELKAFAS *et al.*, 2019).

$$\text{Potência efetiva} = R_t \times V_s \quad (2)$$

Sendo:

R_t: resistência da embarcação [kN]

V_s: velocidade requerida pela embarcação [nó]

Para estimar a resistência ao avanço desse modal, usou a Metodologia de Estimativa de Potência Propulsiva, desenvolvida por J. Holtrop, no qual propôs uma série de formulações matemáticas que foram obtidas através de regressões baseadas em técnicas numéricas para se determinar a resistência ao avanço, dados estes extraído a partir da modelação do casco semelhante nos *softwares FreeShip e Maxsurf* (HOLTROP, 1965; MONTFORT, 2017). Na Tabela 15 são sintetizados os dados de entrada da embarcação no software.

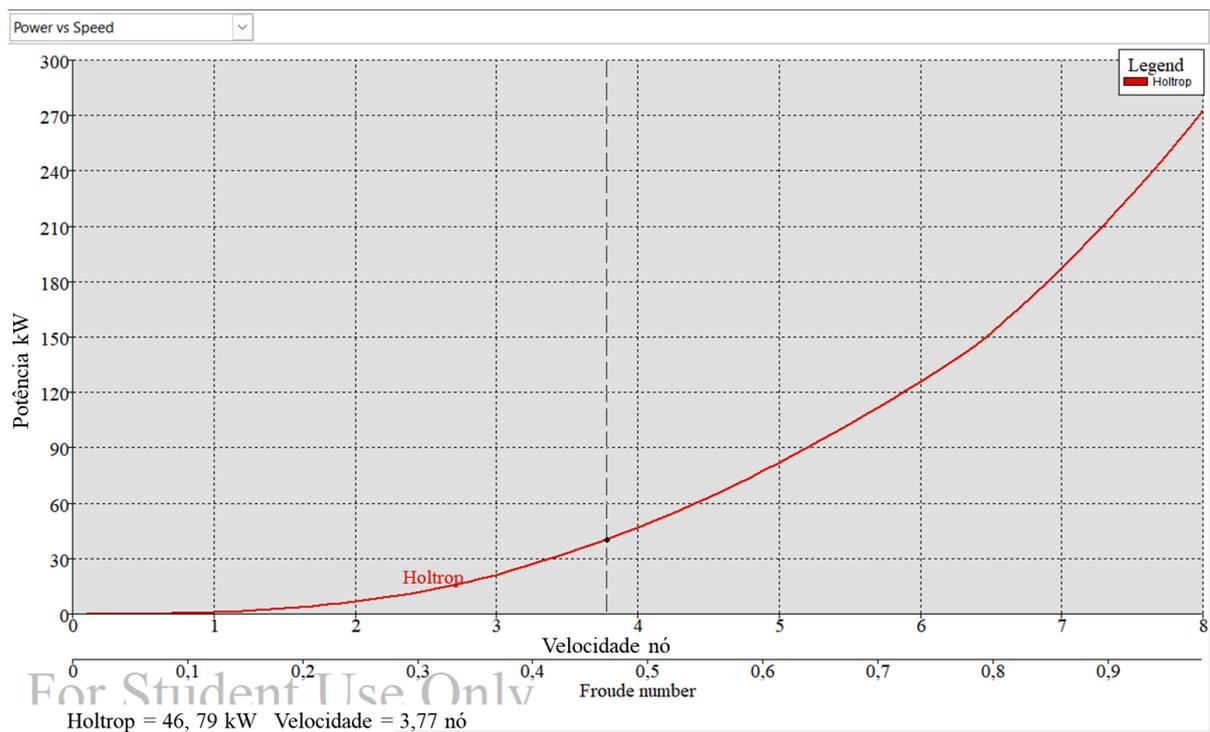
Tabela 15- Dados de entrada embarcação Holtrop Resistência ao avanço

Dados de entrada	Parâmetros	Unidades
Velocidade de operação	3,77	nós
Comprimento na Linha d'Água	31,2	m
Comprimento entre Perpendiculares	27,45	m
Boca Moldada	6,30	m
Calado Moldado na PR	1,92	m
Calado Moldado na PV	1,7	m
Pontal Moldado	2,65	m
Volume Deslocado Moldado	40,11	m ³
LCB (em relação à PR)	-	m
Superfície Molhada	-	m ²
Velocidade máxima	8	nós
Área Transm. Submersa	-	m ²
Ângulo de Entrada da Linha d'Água	-	°

Fonte: adaptado Monfort (2017).

Com base nisso, os dados foram introduzidos nos programa *Maxsurf*, após a conclusão da modelagem do casco da embarcação, foram derivadas informações sobre a velocidade e a resistência em relação à potência da embarcação. Sabendo que, a o sistema foi dimensionado para navegar a máxima velocidade de cruzeiro, no entanto se limitará a velocidade requerida de 3,77 nós, podendo alcançar velocidade máxima. Os resultados da análise estão ilustrados na Figura 53.

Figura 53- Curva extrapolada da Potência x Velocidade em nós



Fonte: autora

5.4.3 Dimensionamentos do Sistema Propulsivo

A partir da definição da extrapolação de potências da resistência ao avanço, vista na seção 5.4.2, é possível estabelecer a potência requerida pelo sistema propulsivo, pois a potência é consumida na velocidade do motor (DUTTA, 2020).

Para a seleção do motor é importante levar em consideração os parâmetros citados no capítulo 4, no qual mostram que os motores elétricos de aplicação marítimos, nos quais apresentam volumes e pesos reduzidos, quando confrontados com os motores a combustão. Os motores elétricos de indução e os de ímãs permanentes apresentam como soluções eficientes e possíveis para embarcação elétrica, pois atendem a principal exigência que é: alta eficiência e

a mantém mesmo com potências de 50% do seu valor máximo (DUTTA, 2020; LIMA *et al.*, 2022).

Note-se que a potência desejada desse meio de transporte aumenta de forma exponencial com a velocidade de cruzeiro. Desse modo, como parâmetros chave para o projeto, foram consideradas a velocidade mínima de cruzeiro de 3,77 nós e máxima de 8 nós, representando uma demanda de potência de 46,7 kW e 300 kW, respectivamente. Com objetivo de desenvolver uma configuração de propulsão para atender a esses requisitos, levando em consideração a velocidade ideal do modal e sua eficiência operacional propulsiva.

Para cada quilowatt-hora economizado em uma determinada atividade ou na produção significa mais eficiência. Nesse caso foi adotado a utilização de dois motores elétricos trifásicos de 150 kW cada, com 300 kW no total, alimentado por 320 Vca (tensão alternada). Com a utilização do motor será possível substituir a propulsão da embarcação e manter a velocidade em valores toleráveis, já que o propósito da embarcação é destinado ao turismo em baixa velocidade de traslado. Na Tabela 16 podem ser visualizados os parâmetros técnicos do motor selecionado.

Tabela 16- Especificações técnicas do motor marítimo

Dados técnicos modelo W22 IR3 Premium 200 hp 4P 315S/M 3F		
	Potência	150 kW (200 HP)
	Potência de entrada	158,22 kW
	Eficiência	94,8%
	Tensão(V)	320 V
	Massa	1.760 kg (total).
	Corrente Nominal (A)	279 A
	Corrente de partida	2177 A
	RPM	2985

Fonte: Datasheet WEG (2021). Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Usos-Gerais/W22/W22-/W22-IR3-Premium-200-cv-4P-315S-M-3F-220-380-440-V-60-Hz-IC411---TFVE---B3D/p/11277496>. Acesso: 3 de junho de 2023.

A partir das informações da Tabela 16, é possível calcular a potência elétrica necessária para operação da embarcação, considerando a potência de 45 kW do motor, com eficiência de 94,8%, considerando a velocidade de cruzeiro requerida de 3,77 nós para realização dos cálculos, demonstrando pela Equação 3 (WOUD *et al.* 2003).

$$P_{ele.} = \frac{P_{mec.}}{\eta} = \frac{45 \text{ kW}}{94,8 \%} = 47,46 \text{ kW} \quad (3)$$

Para o traslado de 2 horas requer uma demanda de energia de 94, 93 kWh/dia no banco de baterias para fornecer energia para o sistema propulsivo, sabendo que a autonomia está

diretamente ligada com a quantidade do banco de baterias, logo demonstrado pela Equação 4 (WOUD *et al.* 2003).

$$E_{\text{operação}} = P_{\text{ele.}} \times t = 47,46 \times 2 = 94,93 \text{ kWh} \quad (4)$$

Logo:

η : Eficiência do motor [%];

$P_{\text{mec.}}$: Potência do motor [kW];

$P_{\text{ele.}}$: Potência elétrica [kW];

$E_{\text{operação}}$: energia necessária para operação do barco [kWh];

t : tempo de operação da embarcação [h];

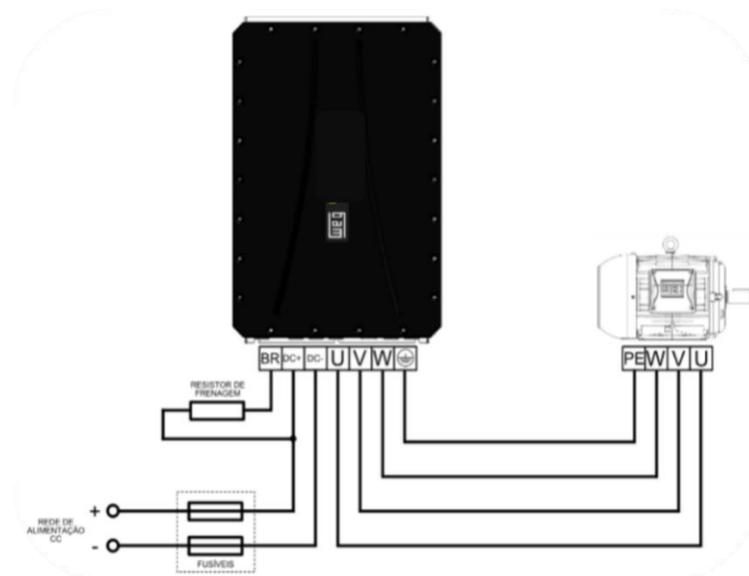
Potência:[kW].

Em seguida será selecionado os demais equipamentos que fazem parte do sistema propulsivo.

5.4.4 Seleção do Drive de Controle

O drive de controle é destinado ao acionamento e controle do motor e do inversor de frequência CVW800, no qual é um produto de alta performance que permite o controle de velocidade e torque de motores de indução trifásicos e motores de ímãs permanentes aplicados em veículos elétricos, passa esse caso aplicado na embarcação. Na Figura 54 é possível observar a construção física do equipamento.

Figura 54- Inversor Controlador de Potência



Fonte: WEG (2021). Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h2e/hde/WEG-inversor-para-tracao-eletrica-CVW800-50093126-pt.pdf>. Acesso em: 14 de junho de 2023.

Uma de suas principais vantagens é o fato de receber alimentação DC diretamente de um link ou barramento em 320 V, ou seja, ele pode extrair energia diretamente das baterias reduzindo a necessidade da utilização de conversores e reguladores. Esse equipamento possui

múltiplas entradas e saídas para seu controle e acionamento de sistemas auxiliares, proteções elétricas, sistema de troca de calor por fluxo de água interna, além de operar na tensão de alimentação do motor em 440 V, sendo fundamental para controle preciso do motor elétrico, os parâmetros elétricos estão disponíveis na Tabela 17.

Tabela 17- Especificações técnicas do drive de controle

Parâmetros elétricos	
Tensão de operação	250 - 750 Vcc
Limites da tensão entrada	800 Vcc
Corrente nominal	450 Arms
Corrente máxima de saída	900 Arms
Peso	Até 26 kg

Fonte: adaptado do *datasheet* WEG (2021).

5.5 Definição do Banco de Baterias

Selecionado os motores para o modal, é possível definir o banco de baterias que se combinam para armazenar a energia da embarcação. Sendo os sistemas de armazenamento tem por objetivo fornecer o suprimento de energia para o grupo propulsor da embarcação. Segue-se um breve resumo de como a energia da embarcação é gerenciada, a fim de determinar a capacidade dos acumuladores de energia e o tipo de tecnologia que será usada neste modal, para assim descrever a memória de cálculo.

5.5.1 Profundidade de descarga (*Depth of discharge* – DoD)

A profundidade de descarga (DoD) indica, em termos percentuais, quanto da capacidade nominal da bateria foi retirado, a partir do estado de plena carga e ainda, sendo o valor complementar do estado de carga (*state of charge* – SoC) (SANTOS, 2019). Para o cálculo de profundidade de descarga, pode ser observado pelas Equações 5 e 6 (SANTOS, 2019).

$$DoD (\%) = 100 - 100 \times \frac{\text{capacidade remanescente da bateria (Ah)}}{\text{capacidade nominal da bateria (Ah)}} \quad (5)$$

$$DoD (\%) = 100 - SoC (\%) \quad (6)$$

5.5.2 Profundidade de carga/descarga (*C-rate*)

Enquanto taxa de recarga ($C - rate$), determina a velocidade que um sistema de armazenamento pode ser carregado ou descarregado (SANTOS, 2019; BUCHMANN, 2021). Essa taxa é normalizada em relação à capacidade nominal da bateria (SANTOS, 2019).

Para uma melhor compreensão usa-se a Tabela 18 para exemplificar as várias taxas C e o tempo de carga e descarga, logo pode variar de $1 C$, também é conhecida como descarga de uma hora: $0,5 C$ ou $C/2$ é uma descarga de duas horas e $0,2 C$ ou $C/5$ é uma descarga de 5 horas e assim por diante (BUCHMANN, 2021). Sendo que, as baterias de alto desempenho pode ser carregadas e descarregadas acima de $1C$ com estresse moderado (BUCHMANN, 2021). Toda essa análise será necessária para dimensionar o banco de baterias para a embarcação.

Tabela 18- Tempos típicos em várias taxas de recarga

Taxa C	Tempo
5C	12 minutos
2C	30 minutos
1C	1h
0,5C ou C/2	2h
0,2C ou C/5	5h
0,1C ou C/10	10h
0,05C ou C/20	20h

Fonte: BUCHMANN (2021).

5.5.3 Dimensionamento dos bancos de baterias

Para esse sistema é necessário que esteja alinhado com a geração FV e o sistema propulsivo da embarcação. Com o motor selecionado para o barco, é possível definir o banco de baterias que serão necessárias para armazenar energia da embarcação. Deve-se ressaltar que a bateria é a principal fonte energética do barco, sendo os painéis FV apenas sistemas auxiliares.

Portanto, o dimensionamento do banco de baterias teria que satisfazer a viagem completa em uma velocidade 3,77 nós com uma autonomia de 2h.

As baterias selecionadas foram as Íon-Lítio Ferro-Fosfato ($LiFePO_4$), devido as suas principais características como: alta densidade energética, longa vida útil, alta resistência e segurança, sendo já adaptadas para aplicações marítimas.

São o amplamente utilizadas em sistemas de propulsão elétrica naval, como barcos elétricos, devido a várias características citadas que as tornam vantajosas para essa aplicação específica. Essas tecnologias estão sendo amplamente usadas no mercado, pois são conhecidas por serem mais seguras em comparação as demais tecnologias de íon-lítio, devido à estrutura

do fosfato de ferro que é menos propensa a superaquecimento, à sua estabilidade térmica, resistência a situações extremas, como sobrecarga, curto-circuito, perdas e incêndio, parâmetros estes essenciais onde segurança é uma prioridade (TORQUEEDO, 2023; BUCHMANN, 2021).

Para a seleção das baterias, optou-se pela por uma distribuidora do setor naval, pois possui uma linha indicada para uso náutico, com recomendação do fabricante para o uso como *backup* de energia solar e valores de capacidade de 12,8 Ah até 450 Ah. Buscando a maior capacidade, selecionou-se a bateria de 450 Ah. As baterias da já vêm acompanhadas do sistema BMS do inglês *Battery Management System* (sistema de gerenciamento de bateria), que se encarrega de que não haja sobrecarga nas baterias. Na Tabela 17 são especificadas as características da bateria selecionada para o modal.

Tabela 17- Especificações técnicas da bateria

Características gerais	
Capacidade nominal	450 Ah
Voltagem nominal	12,8 V
Capacidade	>5760Wh
Taxa máxima de descarga	4500A
Taxa máxima de descarga	57,6 kW
Peso	38,10 kg
Química da bateria	Fosfato de ferro-lítio (LiFePO4)
Número de células	Prismático
Densidade de potência de energia	145 Wh / kg
Ciclo de vida	>4000 ciclos profundidade de descarga de 100 % a 25°C
Perda média anual de capacidade	≈ 4% a 25°C de temperatura ambiente

Fonte: Datasheet lithiumion-batteries (2020). Disponível em: <https://www.lithiumion-batteries.com/products/12-volt-lithium-batteries/12v-400ah-lithium-ion-battery-19762>. Acesso em: 04 de junho de 2023.

Sabe-se que o motor selecionado trabalha em tensão de 320 Vac (corrente alternada), o restante do sistema, no entanto, trabalha em corrente contínua. Para tanto, necessita-se multiplicar a tensão 320Vca pela raiz de 2, para obter a tensão mínima de trabalho em corrente contínua, demonstrado pela Equação 7 (REIS, 2019; DUTTA, 2020).

$$V_{cc} = V_{ca} \times \sqrt{2} \quad (7)$$

$$V_{cc} = 320 \times \sqrt{2} = 452,5 V$$

A bateria selecionada possui uma voltagem de 12,8 Vcc e para alcançar a tensão necessária no sistema de corrente contínua, é necessário conectá-las em série. Nessa configuração, as baterias são conectadas em sequência para aumentar a tensão total do sistema e atingir a tensão de trabalho em corrente contínua requerida pelo motor, que no caso é uma tensão nominal de 452,5 V. A partir disso, calculou a quantidade de baterias necessárias para compor o banco de baterias para alcançar a tensão requerida, demonstrada pela Equação 8 (REIS, 2019).

$$N_{bateriasCC} = V_{CC} / V_{baterias} = 452,5 / 12,8 = 35,35 \text{ baterias} \quad (8)$$

$$\approx 36 \text{ baterias em série}$$

Mediante a isso, a Equação 9, calcula a energia necessária do banco de baterias para atender à carga diária considerando a profundidade de descarga e a perda de eficiência, dessa forma pode-se obter a capacidade do banco de baterias para atender a carga a uma taxa de descarga, o tempo suficiente para um ciclo diário (ESSENGER; ABTAHI, 2010; CHASE, 2018).

$$Energia_{abb} = \frac{L}{DoD} = \frac{94,92 \text{ kWh}}{80\%} = 118,66 \text{ kWh} \quad (9)$$

A partir disso, a Equação 10 calcula a reserva de energia desejada pela embarcação para a rota diária (SANTOS *et al.*, 2011).

$$Energia_{ban.} = (1 + R) \times Energia_{bat.} = (1 + 0,2) \times 118,66 = 142,39 \text{ kWh} \quad (10)$$

Logo:

Energia_{abb} [kWh] – energia do banco de baterias;

L [kWh]: é o consumo diário necessário;

DoD [Ah] – *depth of discharge* (profundidade de descarga);

R [%]: reserva de energia do banco de baterias.

A partir da Equação 11, calculou a tensão do conjunto das baterias.

$$V_{CC} = V_{bat} \times N_{bateriasCC} \quad (11)$$

$$12,8 \times 36 = 460,8 \text{ V total do banco de baterias}$$

Com base na Equação 12, foi possível calcular a quantidade de energia fornecida pelo banco, que totalizou 207,36 kWh, energia suficiente requerida para operação da rota da embarcação (ESSENGER; ABTAHI, 2010).

$$Energia_{banco} = V_{cc} \times capacidade = 460,8 V \times 450 Ah = 207,36 kWh \quad (12)$$

Logo:

Energiabb [kWh] – energia do banco de baterias;

L [kWh]: é o consumo diário necessário;

DoD [Ah] – *depth of discharge* (profundidade de descarga);

R [%]: reserva de energia do banco de baterias.

O sistema de armazenamento de energia, considerou apenas o consumo do sistema propulsivo do barco. Considerando que o nível de tensão no barramento do motor CC (Corrente Contínua) é de aproximadamente 452,5 V, assim a distribuição das baterias no banco é formada por um único arranjo composto por 36 baterias, ou seja, 1 arranjo em série para elevar o nível tensão de (12,8 volts x 36 baterias) = 460,8 Vcc. Esse banco seria instalado no casco da embarcação para contribuir com a estabilidade, as baterias ficaram agrupadas conforme a Equação 13 (SANTOS, 2019).

$$N_B = \frac{E_{bb}}{E_{banco}} = \frac{142,39}{207,36} = 0,68 \text{ Banco} \approx 01 \text{ banco (cada banco tem 36 baterias em série)} \quad (13)$$

Sendo:

N_B : Número de baterias;

Ebb [kWh]: Energia demandada pelas cargas;

Eb [watts-horas]: Energia de um banco.

Um dos grandes problemas dos acumuladores é o peso, entretanto esse peso pode ser contrabalanceado com a retirada do óleo diesel utilizado propulsão direta. Para o processo de recarregamento do banco de baterias, terá três formas, que será apresentado no tópico 5.5.

5.6 Estratégia de carregamento das baterias

Visa-se neste tópico demonstrar a estratégia de carregamento do barco elétrico, a qual o recarregamento do banco de baterias pode ser realizado de três formas: sendo a primeira pelo sistema fotovoltaico instalado no toldo, a segunda gerador a bordo, que podem ser usados para gerar eletricidade e recarregar as baterias enquanto o barco está em movimento ou ancorado. Esses geradores podem ser alimentados por combustíveis fósseis, como diesel principalmente. E a terceira, é possível realizar o carregamento do sistema de bateria, quando o barco estiver ancorado no cais pela rede de distribuição da concessionária local, quando o sistema renovável não entregar a potência necessária para as operações de navegação.

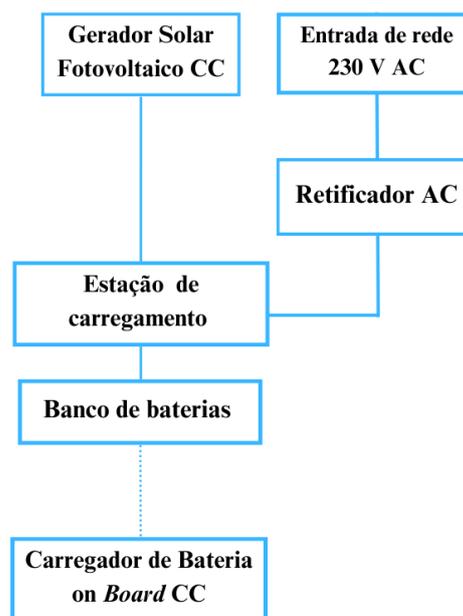
5.6.1 Planejamento de carregamento

Os sistemas de carregamento a bordo para barcos, são projetados para permitir que as baterias das embarcações sejam recarregadas enquanto o barco está em movimento ou ancorado. Esses sistemas são essenciais para a operação contínua do barco elétrico, fornecendo energia para as baterias e garantindo que elas estejam prontas para uso.

O barco terá três opções para recarregar o banco de baterias, no entanto o barco possui um espaço limitado para compor uma matriz com SFV, logo foi necessário estimar o SFV de acordo com o espaço disponível da embarcação. Em posse dessas informações, tem-se a energia fornecida pelos painéis FV, a energia disponível armazenada pelas baterias e posteriormente será consumida pelos motores.

O gerador será ativado exclusivamente para fornecer energia de emergência, caso as baterias do banco não possuam carga suficiente. Mediante a isso, este veículo terá um carregador *on board* para recargas autônomas, já que o mesmo estará equipado com uma matriz com módulos FV, que será convertida por controlador em CA, e que deve ser compatível com a geração da rede em terra, podendo reduzir consideravelmente o excesso dos módulos para carregar as baterias. É válido ressaltar que o barco possui um tempo de recarga de 5 horas, onde o mesmo ficará ancorado e assim deverá aproveitar o maior pico de irradiação solar para maior ganho de energia do SFV (DUTTA *et al*, 2020). A parti disso, o fluxograma apresentado na Figura 55, evidencia o processo de carregamento do banco de baterias.

Figura 55- Processo do carregamento do banco de baterias



Fonte: adaptado de Ganzenmüller, 2020.

A partir disso, será realizado o dimensionamento do SFV da embarcação, demonstrada no tópico 5.5.2.

5.6.2 Especificações técnicas dos Painéis Fotovoltaicos

Como visto no Capítulo 4.3, as células de primeira geração são as mais utilizadas pois proporcionam maior eficiência, onde utilizam como elemento principal o silício. Por conseguinte, a escolha da tecnologia deve estar respaldada pela análise de algumas características do sistema escolhido, neste caso os Módulo Fotovoltaico de Silício Monocristalina Flexíveis se encaixam no projeto devido as seguintes propriedades (COELHO *et al.*, 2020).

- a) Maior eficiência na captação por metro quadrado estando em torno de 20%;
- b) Durabilidade do sistema;
- c) Apresentam peso reduzido essencial para um barco;
- d) Materiais que possuem propriedades de flexibilidade e maleabilidade;
- e) Corrente e Tensão elevadas, estas particularidades são essenciais para aplicação de um Projeto de Barco Elétrico, logo o custo e benefício estão alinhados do ponto de vista econômico (COELHO *et al.*, 2020).

Tendo em vista que, o barco precisar de equipamentos com alta eficiência e os módulos flexíveis conseguem maior captação de energia por área, logo, os módulos flexíveis são os mais indicados devido à redução de peso, pois possuem em composição materiais na sua composição tornando os leves e flexíveis, proporcionando maior ocupação de área, essenciais para um projeto de embarcação, que peso e espaço são parâmetros considerados relevantes, essa análise é exposta na Tabela 18.

Tabela 18- Análise do potencial dos Módulos FV

Módulo FV	Largura mm	Altura mm	Potên. W	Peso kg	Área m ²	Area ² /Peso	Watts/Area ²
Rígido	2384	1303	400	37,9	3,1063	12,20	258,82
Flexível	1460	700	330	3,5	1,022	3,42	322,90

Fonte: autora

Mediante a isso, o fator peso na instalação é determinante, pois o aumento do peso colabora para maior calado e maior resistência ao avanço da embarcação, sendo necessário materiais com peso reduzido (DUTTA, 2020).

A seleção dos módulos flexíveis é possível obter o índice elevado de captação de energia solar por metro quadrado de irradiação solar e maior e eles podem ser moldados e instalados em superfícies curvas ou irregulares, o que os torna ideais para barcos, que muitas

vezes têm superfícies não planas, como convés ou toldo. Além disso contribuem para a redução do peso, já que são mais do que seus equivalentes rígidos que ocupariam menos espaço, são pesados e a eficiência por m² seria menor. Na Tabela 19 são exibidas as especificações técnicas elétricas do módulo selecionado.

Tabela 19- Especificações técnicas dos módulos FV

Módulos flexíveis	Especificações técnica	
	Potência Max. (Pmax.)	330 W
	Tensão de funcionamento (vmp)	38,7 V
	Corrente de funcionamento (Imp)	11,08 A
	Tensão de Circuito Aberto (Voc)	46,1 V
	Corrente de curto-circuito (Isc)	12,34 A
	Eficiência do módulo	21,8%
	Temperatura de operação	-40°C~+85°C
	Max. Voltagem do sistema	-0,370%/°C
	Max. Classificação do fusível da série	20A
	Classificação de aplicação	Classe II
	Tolerância de Potência	0~+5W
	Peso	2,3 kg
	Corrente de energia (Imp)	5,21 A

Fonte: adaptado de GreenAkku^R. Disponível em: <https://greenakku.de/Solarmodule/Flexible-Solarmodule/GreenAkku-Sphere-Hoch-Flexibles-Solarmodul-ETFE-70Wp::3533.html>. Acesso em: 16 de junho de 2023.

5.6.2.1 Levantamento da radiação solar local

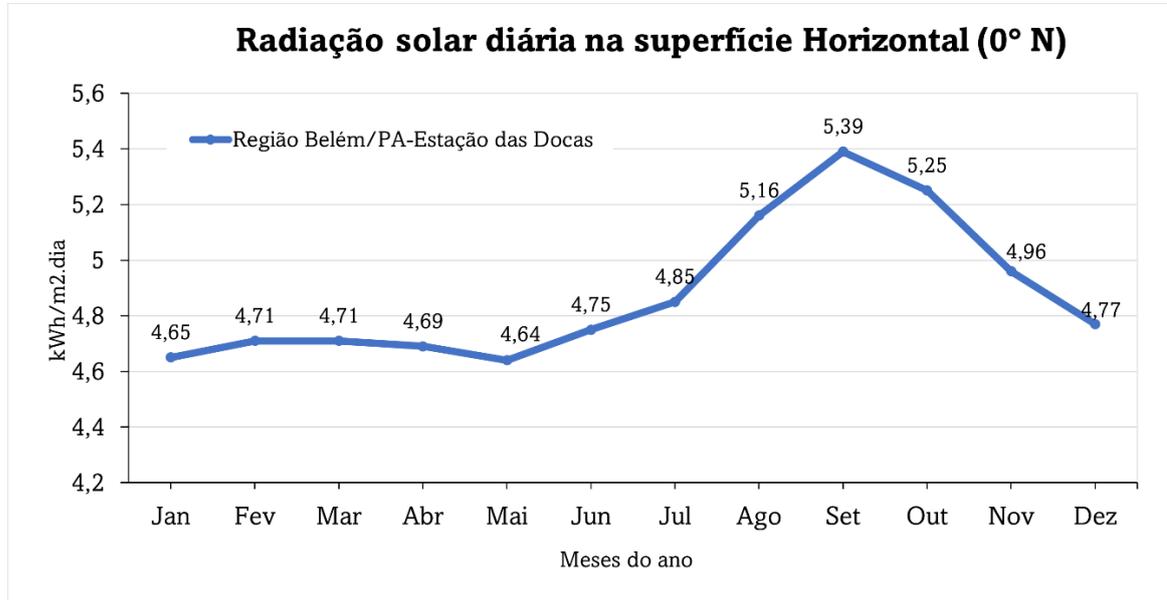
Para analisar a irradiação solar do local onde o barco fará a trajetória, considerou-se as coordenadas geográficas 1°26'6" S e 48°30'4" O (Estação das Docas). A região da Amazônia oriental é conhecida por dois períodos de Bioclima estações que são: inverno e verão amazônico, além disso, ocorre um decréscimo natural da incidência de radiação solar por conta da nebulosidade na região, influenciando na produção diária de energia solar (CAMPOS *et al.*, 2016).

A partir dessas informações foi realizado o levantamento de radiação solar diária, no local onde o barco navegava. Esta análise foi realizada pelo site *National Laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy* (NREL), no qual disponibiliza uma plataforma para cálculo radiação solar diária em uma superfície horizontal, importante para instalação dos módulos FV.

Após o levantamento da irradiação média diária, considerou-se fazer um sistema mais autônomo possível, utilizado como auxiliar para carregar as baterias da embarcação. Para o dimensionamento deste sistema, considerou-se as condições desfavoráveis possíveis para o sistema, ou seja, a pior média diária de irradiação (maio). Na Figura 56 é apresentada o

levantamento da radiação solar local considerando o período de operação do barco ao longo do ano, com valores que variam de 4 a 5 kWh/m²/dia.

Figura 56- Radiação solar local



Fonte: CalculadoraPVWatts®, 2022. Disponível em: <https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>. Acesso em: 10 de dezembro de 2022.

A partir dessa análise, será realizado os cálculos para dimensionamento do SFV, demonstrado nos tópicos abaixo.

5.6.2.2 Demonstração do cálculo para instalação dos módulos FV

Para a análise do cálculo do SFV, é importante estimar a quantidade de energia gerada pelos módulos para o barco, uma vez que, os SFV são considerados sistemas auxiliares e serão responsáveis em fornecer energia para as baterias da embarcação (LIMA *et al.*, 2022). Em suma, os módulos precisam de tensão de saída alta, devido às características das baterias (DUTTA *et al.*, 2020).

Mediante a isso, é importante estimar o número de Horas de Sol Pleno (HSP), sendo este uma grandeza que reflete o número de horas em que a irradiância solar deve permanecer igual a 1 kW/m², de modo que a energia acumulada ao longo do dia, ou seja, equivalente à disponibilizada pelo Sol naquele determinado local, calculada a partir da Equação 14 (PINHO; GALDINO, 2014).

$$HSPMA = \frac{\text{Irradiância do Local [kWh/m}^2\text{]}}{1 \text{ [kW/m}^2\text{] [h]}} \text{ [h]} \quad (14)$$

Logo:
HSPMA (h) - Média diária anual de incidente no plano do painel FV;

Considerando uma irradiância média anual de 4,64 kWh/m² para o município de Belém, a partir da Figura 61, têm-se que o número de horas em sol pleno na cidade, ou seja, aproximadamente igual a 4 horas e 64 minutos de energia acumulada, conforme indica a Equação 15 (PINHO; GALDINO, 2014).

$$HSP = 4,4 / 1 = 4,4 [h] \quad (15)$$

Antes de dimensionar o SFV, é importante considerar que o barco possui um alto consumo de energia e/ou não tem espaço suficiente para instalar um número adequado de painéis solares, logo o SFV não atende uma porcentagem ideal para recarregar do banco de baterias. Neste caso, será necessário utilizar fontes de energia, como gerador a combustível e os sistemas de recarga da distribuidora quando o barco estiver ancorado para recargar as baterias.

Para dimensionar o SFV na embarcação, primeiramente, deve-se apurar o consumo diário (kWh/dia), para assim compor a potência dos painéis. Esse valor pode ser obtido através do consumo requerido da potência do motor, sabendo que a demanda energética diária do motor é de 94,93 kWh. Mediante a esse parâmetro, a embarcação não possui espaço suficiente para projetar um gerador FV que seja capaz de atender essa demanda energética diária do motor.

Após obter o consumo diário e área, pode-se calcular a energia gerada pela quantidade de módulos, que é igual a 37,17 kWh/dia, conforme mencionado Equação 16. Além disso, é necessário determinar a potência de pico dos painéis fotovoltaicos, medida em quilowatt-pico (kWp), de acordo com as Equação 17 (PINHO; GALDINO, 2014).

$$\begin{aligned} E &= PotMod \times HSP(1 - Perda \%) \\ E &= 330 \times 4,4 \times (1 - 0,20) \times 32 = 37,17 \text{ kW/dia} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} PFV (Wp) &= Qun.módulos . Pmódulo \\ PFV (Wp) &= 32 \times 330 = 10,56 \text{ kWp} \end{aligned} \quad (17)$$

sendo:

F [%]: fator de perda na geração

C[W]: consumo de energia da embarcação;

P_{FV} [Wp] - Potência de pico do painel FV;

E [Wh/dia] - Consumo diário médio anual;

HSP [h] - Média diária anual de incidente no plano do painel FV;

TD (adimensional) - Taxa de desempenho.

P_{módulo}- potência do módulo

Conforme Equação 18, será calculada a quantidade de módulos FV (PINHO; GALDINO, 2014).

$$N^{\circ}módulos = PFV/Pm = 330/10,56 = 31 \text{ módulos} \quad (18)$$

Logo:

P_{FV} [W] - Potência de pico do painel FV;

P_m [Wp]- Consumo diário médio anual;

Desse modo, é possível determinar a área útil ocupada pelos módulos para uma área de 60 m², considerando a suas dimensões de 1.580 mm × 798 mm sendo calculada pela Equação 19 (PINHO; GALDINO, 2014).

$$A_{\text{útil}} = \text{Área painel}(C * L) * n^{\circ} \text{ de placas} = 1,260 * 31 = 40 \text{ m}^2 \quad (19)$$

Os módulos FV para aplicação marítima terão perdas em virtudes das condicionantes ambientais e técnicas da embarcação. Por ser um veículo marítimo, a instalação dos módulos FV serão inseridos sem inclinação, devido à natureza de operação da embarcação e as mudanças constantes da posição em relação ao sol (MATOS, 2016).

Sendo assim, o barco comporta 32 módulos distribuído no convés da embarcação, cuja tensão de circuito aberto 46,1 V_{cc}, com potência pico unitária de 330 Wp de cada placa com uma geração de 10,55 kWp, e uma geração mensal de 36,74 kWh/dia, ainda assim os Sistema não irá conseguir suprir a demanda para recarregar as baterias, fornecendo 26% de energia. Ademais, a instalação dos módulos será disposta com inclinação 0° (grau) na área superior da embarcação, estabelecendo uma perda energética de 20% em decorrência de fatores técnicos e ambientais (ALDO SOLAR, 2019). A Tabela 20 sumariza o (tipo de módulo, matriz, inclinação, azimute etc.).

Tabela 20- Especificações do sistema fotovoltaico

Especificações do sistema fotovoltaico	
Tamanho do sistema DC	10, 55 Wp
Tipo de módulo	Flexíveis
Tipo de matriz	Fixado no teto
Inclinação	0°
Matriz Azimutal	0°
Cálculos de perdas	20%
Eficiência do módulo	21,8%
Eficiência do controlador	-

Fonte: Calculadora PWatts® -, 2022. Disponível em: <https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>. Acesso em: 10 de dezembro de 2022.

As especificações técnicas para instalação dos módulos devem considerar os parâmetros de acordo com a Tabela 21 que sumariza a energia (kWh) que os módulos podem fornecer em cada mês do ano.

Tabela 21- Energia AC do sistema fotovoltaico mensal

Mês	AC Energy
	(kWh)
Janeiro	360
Fevereiro	326
Março	401
abril	433
Maiο	508
Junho	540
julho	566
agosto	575
setembro	499
Outubro	452
novembro	409
dezembro	364
Anual	5,433

Fonte: CalculadoraPWatts®-, 2022. Disponível em: <https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>. Acesso em: 10 de dezembro de 2022.

a) Dimensionamento do controlador de carga *off grid*: Para extrair a energia produzida pelos módulos FV, para este sistema optou pela utilização de controladores de carga em tecnologia MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*, ou Rastreamento do Ponto de Máxima Potência em português), disponível no mercado e pela necessidade de uma maior eficiência na conversão CC-CC, assim retirando a energia dos painéis e carregar o banco de baterias de forma eficiente (SANTOS *et al.*, 2021). Dessa forma, o controlador regula o

processo de carga das baterias e do sistema solar *Off Grid* ou híbrido, com a finalidade de evitar a sobrecarga das baterias e otimizar o rendimento do sistema fotovoltaico.

No entanto, para este projeto não foi encontrado um controlador de carga comercial para a aplicação necessária. Sendo primordial contratar uma empresa especialista para fabricação do equipamento conforme as especificações do sistema propulsivo da embarcação.

Com base nos parâmetros dos módulos fotovoltaicos e estimando os dados controlador de carga, foi possível calcular o número máximo de módulos suportados por *String*. Agora divide-se a Tensão Máxima de entrada do controlador pela tensão máxima dos módulos e o resultado arredondado para baixo. Este será o número máximo de módulos suportados por *String*, demonstrado nas Equações 20 e 21 (PINHO; GALDINO, 2014).

$$MódString = \frac{T_{max. \text{entra. controlador}} (V)}{T_{máxMod}(V)} = 600/38,7 \quad (20)$$

$$MódString = 15,50 = 15 \text{ módulos por strings} \quad (21)$$

Sendo:

Tensão máxima de entrada do inversor [V]: $T_{máx.Inversor}$.

Tensão máxima dos módulos FV [V]: $T_{máx Mod}$

Portanto, o sistema que será dimensionado suporta no máximo, máximo *String* or MPPT e cada *string* no máximo 15 módulos em série. Para a quantidade de módulos por inversor, é necessário considerar as potências máximas do inversor e do módulo, demonstrado pela Equação 22:

$$QtdModTotal = \frac{P_{max. \text{controlador}} (W)}{P_{max. \text{módulos}} (Wp)} = \frac{6000}{330} \quad (22)$$

$$QtdModTotal = 18 \text{ módulos}$$

Sendo:

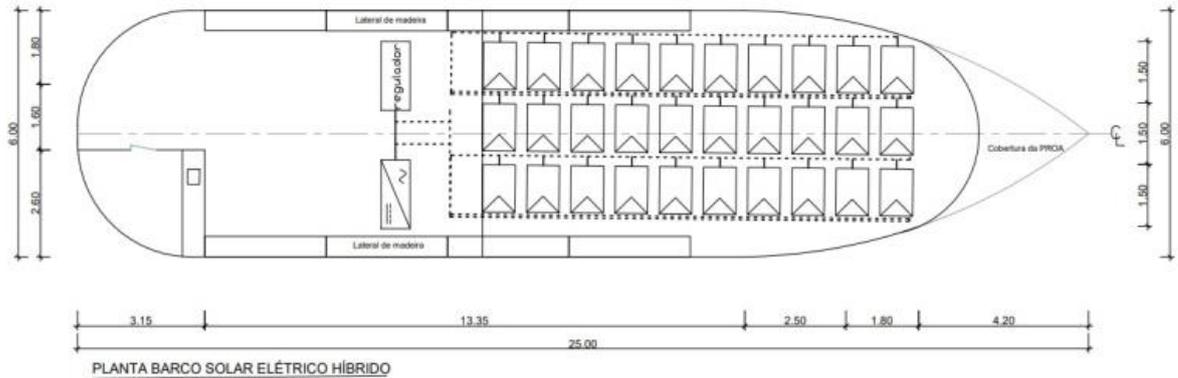
$P_{max.Inversor}[W]$: Potência máxima do inversor

$P_{max. Módulos}[W]$: Potência máxima dos módulos

MPPT: rastreamento do ponto de máxima potência (sigla em inglês, *maximum power point tracking*)

Portanto, os módulos Fotovoltaicos serão agrupados em 3 *string* composta por 13 painéis cada, totalizando uma tensão de 507 Vcc, na Figura 57 pode-se observar a composição da conexão das *strings* no toldo da embarcação..

Figura 57- Organização dos módulos FV no toldo da embarcação



Fonte: autora

Para calcular ambas as tensões, bem como a corrente de curto-circuito através das Equações 23 e 24:

$$V(T) = V(STC) \cdot (1 + \varepsilon(T - 25)) \quad (23)$$

$$Isc(T) = Isc(STC) \cdot (1 + \varepsilon(T - 25)) \quad (24)$$

Sendo:

T [°C]: é a temperatura em que se encontram as células fotovoltaicas;

V(T) [V]: é a tensão que se deseja encontrar dada uma temperatura T (°C);

ISC(T) [A]: é a corrente de curto-circuito que se deseja encontrar dada uma temperatura T (°C);

V(STC) [V]: é a tensão nas condições padrão de teste, apresentadas no datasheet;

ISC(STC) [A]: é a corrente de curto-circuito nas condições padrão de teste, apresentadas no datasheet;

ε [%/°C]: é a variação percentual informada no datasheet a cada grau Celsius, devendo ser substituída por β , γ ou λ , de acordo com a grandeza que está sendo calculada.

5.7 Procedimento de recarga sistema autônomo

O dimensionamento do tempo de recarga do banco de baterias é um aspecto crucial no projeto de que dependam de baterias, para a embarcação o tempo de recarga é parâmetro importante, além disso é importante estabelecer um limite máximo de carga. O limite de carga máximo/mínima tem como objetivo evitar sobrecargas no sistema de armazenamento e prolongar a vida útil do sistema, além de evitar possível explosão (CHASE, 2018). Dito isso, é fundamental seguir as especificações e recomendações do fabricante das baterias para garantir um carregamento seguro e eficiente (PINTO, 2016).

A integração de carregadores a bordo pode contribuir para aumentar a autonomia e reduzir a dependência de fontes de energia externas. No entanto, a eficácia real dessa tecnologia

dependerá de vários fatores, como: a área disponível para instalação dos painéis solares, a eficiência dos painéis próprios e a quantidade de energia necessária para armazenar no banco de baterias. A Figura 58 é possível observar um carregador *on board*, já equipado com Rastreador do Ponto de Máxima Potência (MPPT, do inglês *maximum power point tracking*), rápido e semirrápido, com uma eficiência de conversão superior e compatível com o nível de tensão do banco de baterias projetado para o barco.

Figura 58- Carregador rápido



Fonte: Torqeedo (2023). Disponível em: <https://www.torqeedo.com/en/products/accessories/charging-equipment/fast-charger-1700-w---power-24-3500--power-26-104-/2210-00.html>. Acesso em: 23 de junho de 2023.

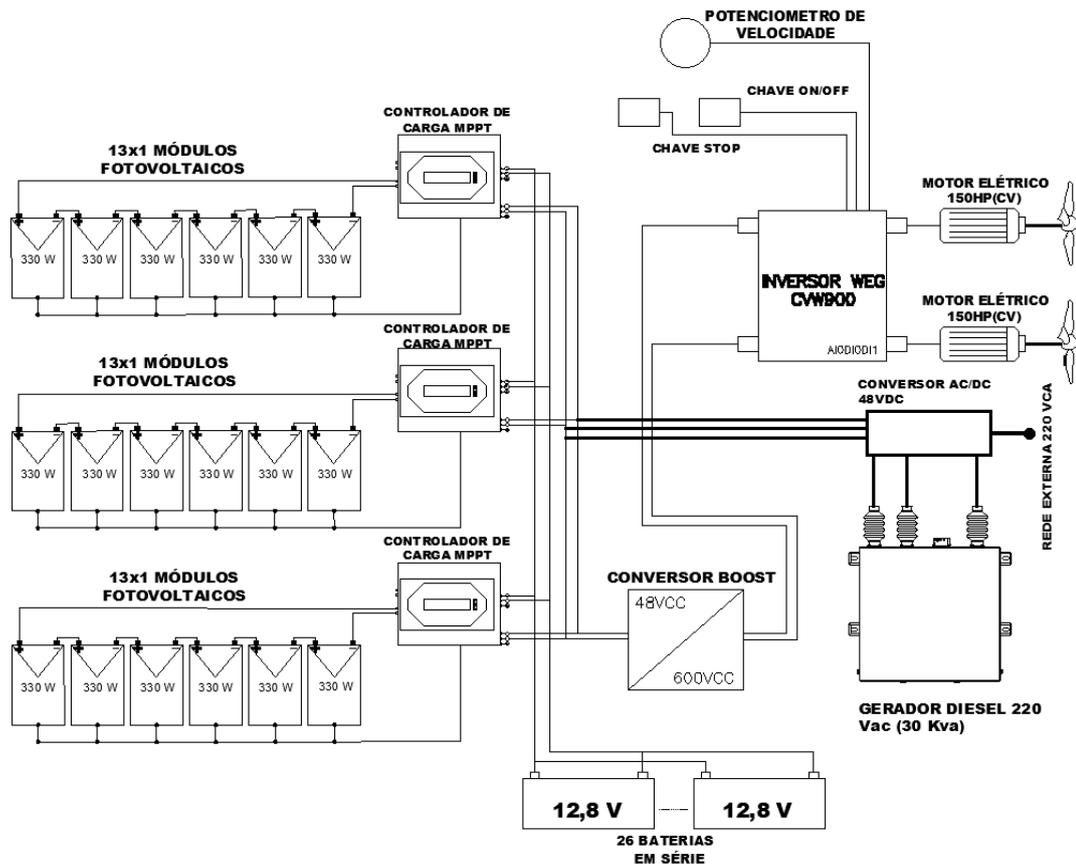
5.7.1 Diagrama do Conjunto de Propulsão Elétrica

Como citado anteriormente, para este projeto não foi encontrado um controlador de carga comercial para a aplicação necessária que atenda o sistema propulsivo. No entanto, uma segunda opção é utilizar controlador para cada bateria ou um conversor *boost* (conversor amplificador), uma vez que, conversor CC/CC aumenta a tensão (enquanto diminui a corrente) da entrada (alimentação) para sua saída (carga) (FARIAS *et al.*, 2010; BARROZO *et al.*, 2010).

Mediante a essa análise, o arranjo dos painéis fotovoltaicos será de três *strigs* de 13 módulos, com tensão de circuito aberto, resultando em 348,9 Vcc. Portanto, os controladores de carga da tração elétrica necessitam de uma entrada de tensão variável entre 507 Vcc e tensão de regime de 425,7 Vcc com corrente de entrada 11,8 A (circuito aberto).

A estrutura de operação controle e funcionamento do sistema, pode ser visualizado na Figura 59, nesse diagrama todos os principais componentes do sistema de propulsão da embarcação estão apresentados, desde a geração fotovoltaica, bancos de baterias, entradas auxiliares, controladores e o motor responsável direto pela propulsão do barco.

Figura 59- Diagrama de Propulsão Proposto



Fonte: autora

5.8 Análise de custos

O estudo de custos do projeto limita-se somente aos principais elementos constituintes da tração elétrica da embarcação, pois são esses elementos que representam um diferencial em relação às embarcações convencionais de mesmo porte e demais variedades. Para este estudo será considerado dois cenários de análise de *payback*.

5.8.1 *Payback* (Retorno de Investimento)

O *payback* representa o tempo de retorno dos recursos investidos, qual, o cálculo de *payback* deve considerar o investimento total (LEISMANN, 2009). Dessa forma, todo investimento, é importante o tempo de retorno investido e, a fim de verificar sua atratividade (SOUZA, 2018).

Sendo os Índices como *Payback* (simples ou descontado), Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) são amplamente utilizados nas mais diversas análises

econômicas, devido à sua característica de comparação e quantização para investimento (SOUZA, 2018). Dentro da análise de *Payback*, pode utilizar tanto o simples quanto o descontado, embora o descontado tenha uma análise mais profunda, ou seja, com todos os parâmetros necessários para uma análise de investimento e tempo que demora para que o investimento retorne para investidor (SOUZA, 2018).

5.8.2 Cenário I: Payback com Base no Tempo de Vida dos Equipamentos

Neste cenário, considerou o *payback* com base no tempo de vida útil estimado dos equipamentos do barco elétrico. Para o cálculo do tempo de retorno é importante compreender parâmetros técnicos que farão parte da composição das equações que são: a geração mensal do sistema (kWh) dos módulos FV-consumo mensal (Cm), o valor do investimento total com equipamentos e o valor da tarifa de energia da concessionária para o município de Belém, uma vez que, as baterias serão recarregadas pela rede de energia da região (R\$) (DIAS *et al.*, 2021).

Para este projeto, levou em consideração o levantamento do IPCA – Índice Nacional de Preços ao Consumidor, que possibilita analisar com mais precisão esse retorno do investimento. Mediante a isso a Tabela 22 sumariza os dados de análise financeira para um *payback* descontado.

Tabela 22- Indicadores do cenário base

Componentes	Custos (R\$)
Investimento total	R\$ 1.014.884,54
Duração da dívida	6
Taxa de juros	2,8%
Taxa reinvestimento	9%
Vida útil do projeto	20 anos
Inflação anual	3,26 % a.a.
Taxa de desconto	2%
Preço da passagem	R\$ 80,00
Duas viagens diárias	R\$ 8.000,00
Quan. Passageiros	80
Economia diesel x manutenção anual	R\$ 4.000.000,00

Fonte: autora

No entanto, é importante ressaltar que a cotação dos equipamentos foi realizada em dólar e posteriormente feita a transformação em real. Dessa forma, a listagem dos equipamentos está disponível na Tabela 23.

Tabela 23- Itens que contribuem para o custo do investimento inicial

Item	Descrição	Custo Unitário (USD)	Tempo de vida (anos)	Qtd .	Cotação dólar	Cotação real	Custo (R\$)
1	Painel Fotovoltaicos	\$330,00	20	54	\$17.820,00	4.80	R\$ 92.842,20
2	Controlador de carga	\$00	15	3	\$00	4.80	0
3	Cabo solar elétrico	\$60,00	20	1	\$60,00	4.80	R\$ 312,60
4	Outros	\$200,00		1	\$200,00	4.80	0
5	Combiner box	\$145,98		2	\$291,96	4.80	R\$ 1.521,11
6	Quadro Elétrico CA	\$50,00	20	1	\$50,00	4.80	R\$ 260,50
7	Condutores Motor 95 mm2	\$18,32	10	16	\$293,12	4.80	R\$ 1.527,16
8	Condutores Entrada 16 mm2	\$3,06		15	\$45,90	4.80	R\$ 239,14
9	Conectores MC4	\$13,50		2	\$27,00	4.80	R\$ 140,67
10	Chave 250 A Motor	\$0,00		1	\$0,00	4.80	R\$ 0,00
11	Barramento de CC	\$0,00		2	\$0,00	4.80	R\$ 0,00
12	Barramentos CA de Neutro	\$12,50		1	\$12,50	4.80	R\$ 65,13
13	Outros	\$200,00		1	\$200,00	4.80	R\$ 1.042,00
14	Motor elétrico	\$18.266,39	5	2	\$36.532,70	4.80	R\$ 190.335,37
15	Baterias	\$3.999,99	8	36	\$143.999,64	4.80	R\$ 691.198,27
16	Drive de Controle	15.000,00	10	2	\$30.000,00	4.80	144000
17	Booster	\$ 8.640,8848	10	1	\$ 8.640,8848	4.80	R\$ 45.000,00
						Total	R\$ 1.168.484,15

Fonte: autora

A partir, desse levantamento encontramos o valor do *payback* descontado, conforme a Equação 25, considerando o valor total do sistema propulsivo em relação ao fluxo de caixa (LEISMANN, 2009).

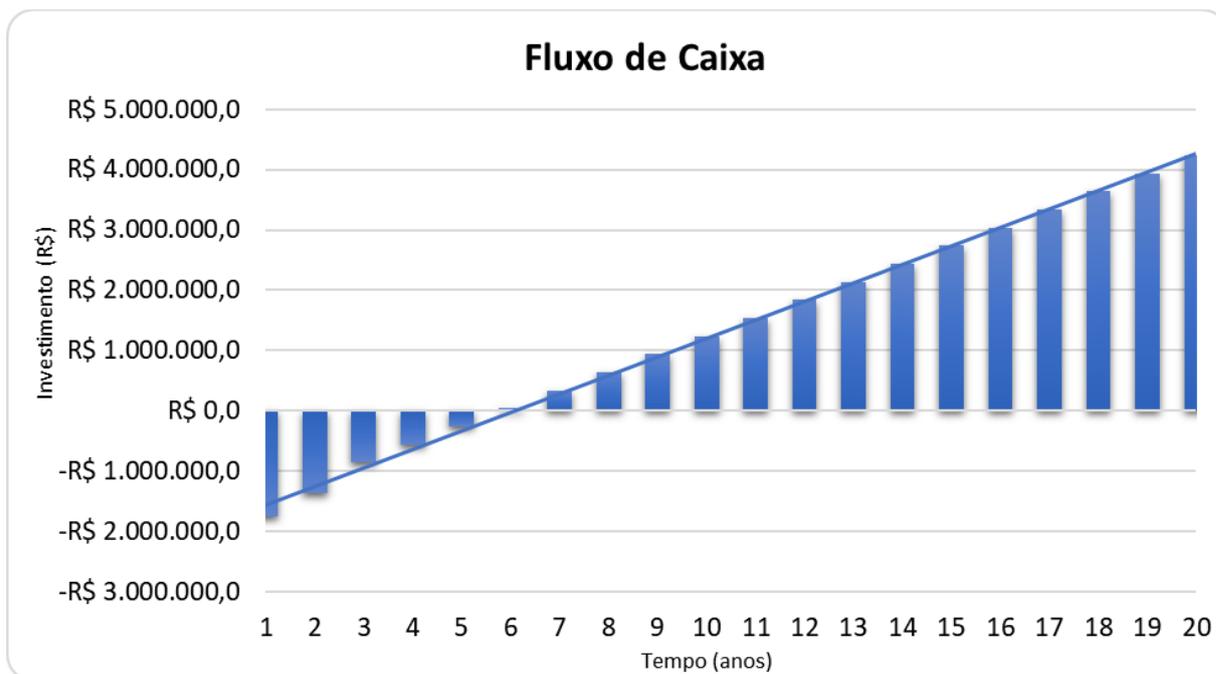
$$Payback (anual) = \frac{investimento(R\$)}{Ganho no Período}$$

$$Payback (anual) = \frac{R\$ 1.014.884,54}{R\$ 200.000,00} \quad (25)$$

$$Payback (anual) = 5 \text{ anos}$$

É de salientar que o fluxo de caixa é um instrumento que visa auxiliar no controle de investimento, ou seja, a movimentação de entrada e saída de dinheiro investido ou não (SEBRAE, 2011). A partir da análise do fluxo de caixa, o retorno já seria positivo a partir do ano de 2026, a qual comprovou-se que a parti do sexto ano o investimento já teria um fluxo de caixa positivo conforme a Figura 62.

Figura 602- Fluxo de caixa



Fonte: autora

5.8.3 Cenário II: *Payback* Considerando a Compensação de Carbono

Neste cenário, levou em consideração os benefícios ambientais do barco elétrico em termos de redução de emissões de carbono e como isso pode afetar a análise de *payback*. É válido pôr em evidência que o investimento inicial foi de um total R\$ 1.168.484,15 e custo de manutenção anual aproxima-se dos R\$ 500,00 (PLAN *et al.*, 2021).

Verificou-se que a análise de *Payback* considerando a compensação de carbono não fará diferença em relação ao tempo de pagamento do investimento, conforme descrito na seção anterior os benefícios ambientais ainda são voluntários em relação ao mercado financeiro. A parti disso Equação 26 demonstra esse fator (FTHENAKIS *et al.*, 2011; IPCC, 2022).

$$F_{Caixa\ anual} = R_{Anual} - C_{operacional} + B_{CO2} \quad (26)$$

$$F_{Caixa\ anual} = 200.000,00 - 500,00 + 5.000,00 = 204.500\ por\ ano$$

Sendo:

Fluxo de Caixa Anual: $F_{Caixa\ anual}$;

Receitas Anuais: R_{Anual} ;

Custos Operacionais Anuais: $C_{operacional}$;

Benefício de Compensação de Carbono: B_{CO_2} (Valor calculador a partir do software RETcree).

O *payback* para essa análise mostrou que o investimento se pagaria em 5 anos, como demonstrado na Equação 27.

$$\begin{aligned} Payback_{compensação} &= \text{custo} / f_{caixa\ anual} = \\ R\$ 1.168.484,15 / 204.500 &= 5 \text{ anos} \end{aligned} \quad (27)$$

5.8.4 Análise Ambiental da mitigação de GEE

O Cálculo de estimativa e evitação de emissão de dióxidos de carbono (CO₂) foram realizados dentro do *Software RETcree*. Para essa estimativa levou em consideração o preço do diesel, em relação ao preço por kWh para o estado do Pará. Considerando as duas voltas que a embarcação realiza, ela gera um custo diário em torno de R\$ 168,00 reais com combustível a diesel, demonstrado mediante a Equação 28 (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC, 2009).

$$\begin{aligned} CUSTO_{Diário\ diesel} &= \text{consumo}(l/h) \times \text{HorasdeUsoDiário} \times \text{PreçodoDiesel}(L) \\ CUSTO_{Diário\ diesel} &= 12(l/h) \times 2 \text{ voltas} \times R\$ 7,00 = 168,00 \text{ diária} \end{aligned} \quad (28)$$

Enquanto o custo de R\$ 8,23 para recarregar as baterias usando a rede de distribuição da concessionária local com uma despesa mensal de R\$ 247,02. Essa análise é demonstrada pela Equação 29.

$$\begin{aligned} C_{Recarga} &= C_{bateria} (\text{KWh}) \times \text{Preço Eletricidade} \\ C_{Recarga} &= 207,36 \text{ kWh} \times R\$0,03971 = R\$ 8,23 \text{ reais diária} \end{aligned} \quad (29)$$

Sendo:

Custo de recarga [R\$]: $C_{Recarga}$

Capacidade da Bateria [kWh]: $C_{bateria}$

Preço do kWh de energia da concessionária local: Preço Eletricidade

Os altos custos associados ao uso de combustível fóssil tornaram-se insustentáveis em relação ao valor cobrado por viagem realizada pelo barco entre os anos de 2019 e 2022. Essa

variação demonstra que o preço do diesel teve um impacto significativo no aumento das despesas operacionais da embarcação.

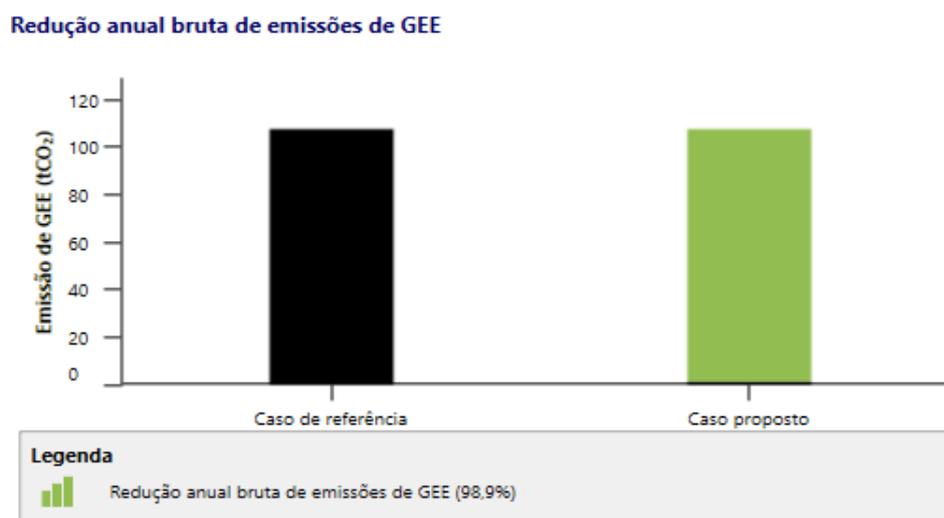
A parti desses levantamentos pode ser obter as análises de emissão e evitação da quantidade de dióxido de carbono equivalente (CO₂e) para os dois casos e assim compará-los.

Para a análise de evitação de dióxido de carbono (CO₂) em função do diesel, foi estimado a quantidade de CO₂ evitada dentro da análise do Projeto Conceitual. Sabendo que, 1 litro de óleo diesel libera aproximadamente 2,675.25 kg CO₂ a ferramenta GHG Protocol (IPCC, 2009; INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA-IPEA, 2022).

Logo um barco a combustão com potência 300 kW consome 26 l/h de diesel, com um consumo anual 227.760 litros, logo a estimativa de emissão será de: 161.226,75 tCO₂e/ano. Diante dessa análise, o presente projeto foi direcionado com objetivo buscar possíveis melhorias no transporte aquaviário, para oferecer uma maior segurança socioambiental.

Mediante a isso, os seus resultados mostram que: o transporte elétrico aquático deixaria de emitir cerca de 98,9 % CO₂e/ano, equivalente a 1,12 tCO₂e/ano, valor este estimado para sistema elétrico sem uso do gerador a diesel, esta estimativa foi calculada com base no caso real da embarcação e comparado com o projeto proposto, pelo *software REETSscreen*, demonstrada Figura 61.

Figura 61-Estimativa da evitação de carbono equivalente para o barco com propulsão elétrica

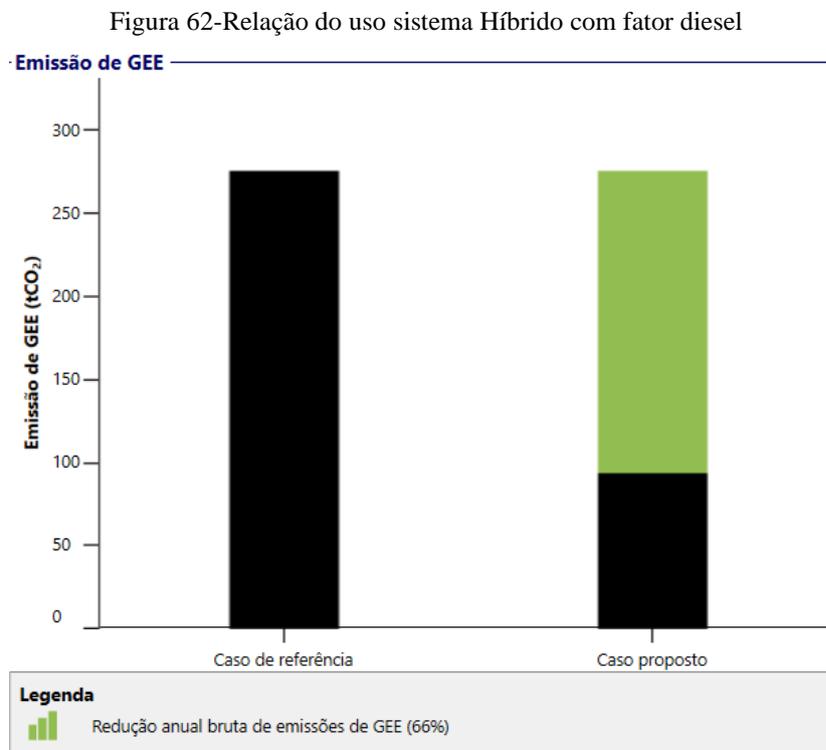


Fonte: autora

Dado o contexto, como citado na seção anterior, o uso de geradores a diesel geralmente está associado a emissões graves de emissões atmosféricas, incluindo dióxido de enxofre (SO₂),

óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas finas, além de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases de efeito estufa.

No entanto, é considerado um sistema híbrido com uso do gerador diesel apenas em caso de emergência, este desempenha um papel crucial, entrando em ação quando o banco de baterias não for capaz de atender à demanda energética necessária para a operação do barco. Apesar de existirem outras tecnologias com emissão zero para o setor marítimo, o gerador terá uma combinação de fontes renováveis, considerando uma alternativa para minimizar o impacto ambiental do sistema propulsivo híbrido. A partir disso, a Figura 62 representa os dados relacionados às Evitâncias Emissões de gases de efeito estufa (GEE) desse sistema em relação ao uso do diesel, observa-se uma redução de 66% anual de CO₂. (LEUNG *et al.*, 2017).



Fonte: adaptado Leung *et al.*, 2017.

Considerando o cenário descrito o tópico em seguida fará uma abordagem dos resultados em relação ao projeto conceitual e a ESG.

5.9 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A tendência para os próximos anos, são pesquisas que estejam alinhadas com desenvolvimentos de tecnologias, visando a redução de perdas, que possuam alta eficiência, leveza e mitigação de emissão GEE. Dos equipamentos da embarcação, os motores elétricos, baterias e módulos FV, na sua estrutura utilizam minerais ou REE que são de suma importância

para sua eficiência. Mediante a isso, realizou-se uma análise do ciclo final de vida dos componentes da embarcação e propondo uma gestão por meio da ESG, em que empresas possam adotar práticas sustentáveis com os equipamentos sendo: a destinação adequada ou reciclagem, como forma mitigar futuras destinações inadequadas.

5.9.1 Análise ambiental por meio da abordagem ESG dos minerais críticos aplicados VEs

Como visto anteriormente, o desenvolvimento da mobilidade elétrica é essencial para a difusão de uma economia de baixo carbono. Segundo o Relatório *World Energy Outlook*, elaborado pela *International Energy Agency* (IEA, 2021), a previsão de entrada dos VEs é 145 milhões até o ano de 2030. Sendo que, os investimentos globais em eficiência energética – transporte público e infraestrutura para carros elétricos – chegaram a US\$ 560 bilhões em 2022, um aumento de 16% em relação a 2021, de acordo Relatório *Energy Efficiency*, elaborado pelo IEA (2022b).

À medida que o mundo avança em direção às metas climáticas globais, espera-se que os investimentos na cadeia produtiva dos VEs, tenham aumento significativo na demanda por minerais, incluindo os REE (IEA, 2022b). Sendo acompanhado com a preocupação em torno da disponibilidade de minerais para suprir a cadeia de tecnologias, ou seja, quadruplicando o uso dos recursos minerais para desenvolver tecnologias limpas até 2040, o que exigirá seis vezes mais insumos minerais até 2040 (IEA, 2022b).

Dentro desse contexto, o Relatório “*Why is ESG so important to critical mineral supplies, and what can we do about it?*”, elaborado pela IEA (2022b), traz uma discussão em torno importância da ESG aplicada na indústria, principalmente aquelas envolvidas no processo de transição VEs, ou seja, a importância de inserir novos modelos produtivos no mercado, indo de encontro com os pilares sustentáveis da ESG – associados aos impactos ambientais, sociais e de governança ligados às suas atividades ou cadeias de abastecimento para suprir o Desenvolvimento tecnológico (IEA, 2022b).

Por meio da implementação de práticas ESG, o incentivo da indústria de reciclagem, pode ser um fator de menor dependência exportação mineral, incluindo os REEs, que estão altamente concentrados em países específicos, tornando vulnerável à instabilidade políticas, conflitos geopolíticos e possíveis restrições à exportação (IEA, 2021a; IEA, 2022b).

Sendo os países como: Europa, Japão e EUA já começaram a investir no desenvolvimento da tecnologia de reciclagem REE de toda a perspectiva da cadeia de valor, na

qual visa aumento na taxa de coleta, melhorando a eficiência da separação física, desenvolvendo processos metalúrgicos para recuperação e refino de REEs críticos, justamente com previsões de uma possível exiguidade (RADEMAKER *et al.*, 2013; AK JHA *et al.*, 2018; IEA, 2021).

Dos 17 elementos de REEs, apenas alguns têm alta demanda de mercado, tanto em relação a sua aplicabilidade, como também abundância em minas comercialmente viáveis (KRAMER *et al.*, 2012; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2022). Os riscos de abastecimento mais críticos nos próximos 5 anos estão em torno dos elementos o Európio (Eu), Térbio (Tb), Disprósio (Dy) e Ítrio (Y) (RADEMAKER *et al.*, 2013; U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2021).

Conforme estipulado pelo Plano Nacional de Mineração 2030 (PNM-2030), o governo federal adotou as Terras Raras (REE) como minerais de importância estratégica, devido à sua relevância na cadeia de produção de ímãs permanentes. Essa medida está em consonância com a Resolução nº 2, datada de 18 de junho de 2021, que destaca que esses elementos são não apenas críticos, mas também estratégicos. Eles são considerados minerais essenciais no contexto da transição energética, especialmente no âmbito da fabricação de componentes empregados em Veículos Elétricos (VEs).

Recentemente, os preços do REE minerais desencadearam um aumento acentuado no investimento em exploração e produção mineral, análise esta vista logo em seguida.

5.9.2 Preço das *Commodities* Minerais de REE

As altas no preço no final de 2020 e início de 2021, podem ser uma prévia quando o mundo acelerar para a transição economia de baixo carbono, porém esse fator é determinado por volatilidade de preços, demanda e oferta por minerais (IEA, 2021). Por conseguinte, o processo de transição, com o fornecimento inadequado de minerais pode resultar em transações mais caras, atrasadas e menos eficientes (IEA, 2021).

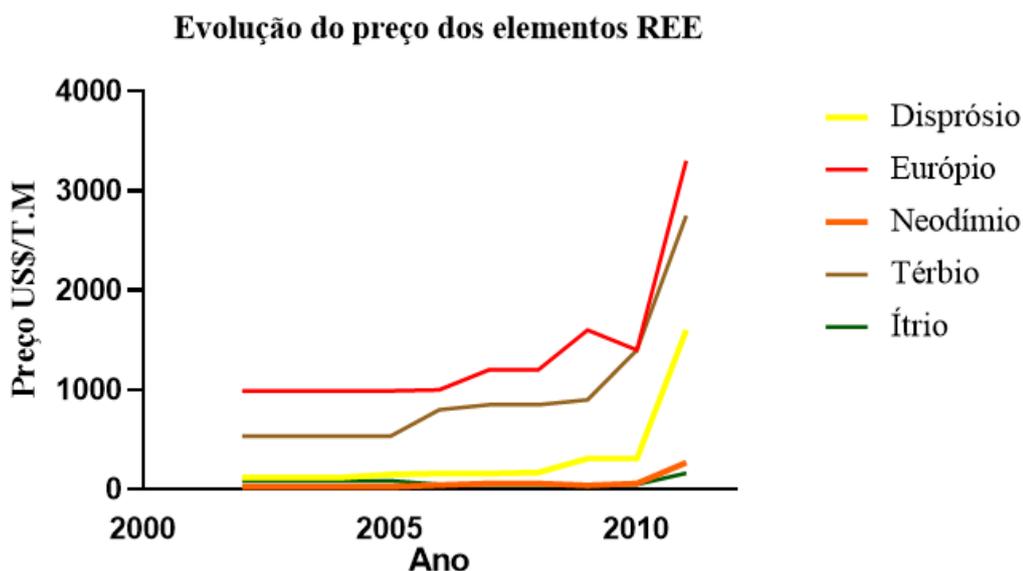
Os elementos de REE são negociados no mercado privado, no qual os elementos são vendidos com teores de 99% na forma de óxidos ou ligas variadas. Os preços oscilam de acordo com qualidade e da quantidade em toneladas do mineral, além da demanda e oferta para suprir o mercado industrial (BOFANTE, 2021; USG, 2021).

Diante da análise de cotação mineral, percebe-se que, os preços dos elementos para aplicação de ímãs permanente (que são os cinco elementos *REEs*), ambos possuem preços elevado em razão da relativa criticidade de médio prazo, maior demanda por esses elementos e

aplicabilidade (DEPARTAMENTO DE ENERGIA DOS EUA, 2011; BINNEMANS *et al.*, 2013).

Esse fator é justificado pelos preços dos elementos utilizados em ímãs – neodímio, praseodímio, disprósio e térbio – entre os anos de 2002 e 2008 triplicaram, antes da crise econômica que ocorreu entre os anos 2009 e 2010. Pós crise, o preço no segundo semestre de 2010, a exportação da China todos os elementos de REE tiveram alta significativa, entre esse aumento o európio com um aumento 16 vezes acima do valor, mostrado no Gráfico 1, expõe o preço médio considerando o ano de 2002 até 2011, com preço médio anual para elementos a teores de 99%, cotados em US\$/kg (ROCIO *et al.*, 2012).

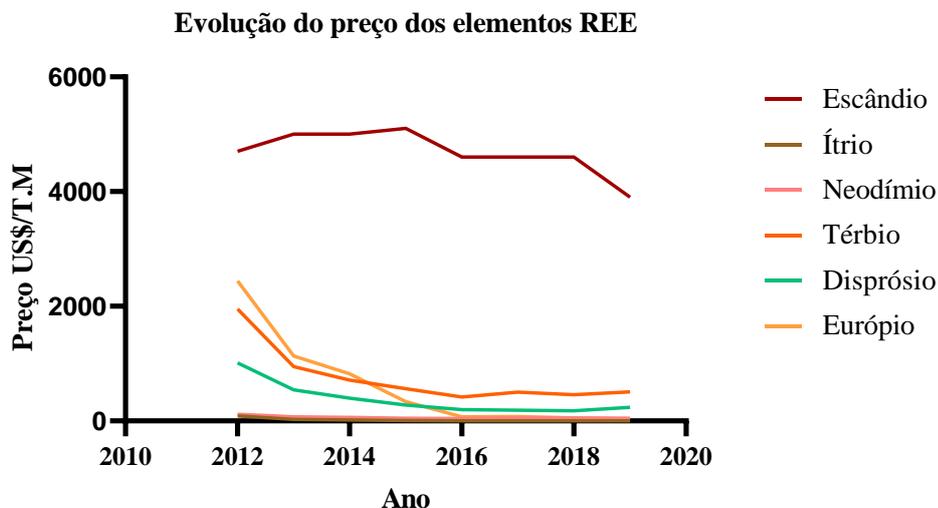
Gráfico 1- Evolução do preço dos elementos REE



Fonte: adaptado de *USG* (2019).

Esse aumento de REE exportação da China, justificado como forma de garantir o fornecimento destes minerais para a indústria nacional chinesa, como uma solução para restringir a mineração ilegal e proteger o meio ambiente, e ainda incentivar a consolidação tecnológica nacional, exportando de produtos de alto valor agregado (MANCHERI *et al.*, 2019; BONFANTE, 2021). No Gráfico 2 apresenta a evolução dos preços entre 2012 e 2019, com preços estabilizados, exceto para o escândio, metal este que, tem aplicação indústria devido ao seu ponto de fusão muito superior ao do alumínio (JOWITT *et al.*, 2018; MANCHERI *et al.*, 2019).

Gráfico 2- Evolução do preço dos elementos REE



Fonte: adaptado de USG (2019).

5.9.2.1 Análise da Reciclagem dos elementos de REEs dos equipamentos do barco

O processo de reciclagem mineral pode ser um fator importante para enfrentar o desafio do fornecimento de uma possível escassez dos elementos que apresentam criticidade, como os REEs, embora ainda eles consigam suprir a demanda do mercado.

Há pouco tempo, as empresas começaram a promover a gestão ambiental por meio da ESG, colocando-a em primeiro plano e usando-a para aprimorar seu status corporativo empresarial (CHUNG, 2022).

A palavra reciclagem, é um dos principais termo chave usada no marketing ESG, como forma aumentar as discussões da importância de produzir produtos com matérias primas derivados do processo de reciclagem e assim reduzir consideravelmente o uso de matérias-primas obtidas de recursos primários, oriundos da natureza (CHUNG, 2022).

Como exemplo, a Europa 43% da indústria é suprida pela reciclagem de metais, inclusive o cobre, com objetivo diminuir a quantidade de resíduos e abastecer a cadeia de suprimentos (ORE, 2021).

Em suma, a partir de julho de 2024, o país obriga as empresas apresentem relatório de mitigação de pegada de carbono, principalmente na produção de baterias de VEs, isso significa impor limites processo de fabricação, com base na gestão do sistema sustentável da ESG (IIT, 2022; CHUNG, 2022).

Além disso, várias empresas automobilísticas, como a Mercedes-Benz, estão tentando ativamente usar materiais reciclados na produção dos VEs. Como parte do marketing ESG, a palavra-chave é entendida e utilizada como um eixo de promoção para aderir novos processos na produção de um produto, além da contribuição para a diminuição de resíduos na terra (CHUNG, 2022).

Por imediato, ainda não existe reciclagem comercial para REEs derivadas de ímãs Permanentes, incluindo o neodímio, ferro e boro (NdFeB) no ciclo final de vida, embora os problemas de abastecimento e com o aumento acentuado nos preços dos elementos de REEs, criam incentivos para à reciclagem (RADEMAKER *et al.*, 2013; HÖGBERG *et al.*, 2015; POSKOVIC *et al.*, 2018).

No entanto, devido à composição complexa de alguns ímãs como NdFeB, são difíceis de separar e reciclar (SPRECHER *et al.*, 2014; TRENCH *et al.*, 2020). Esses ímãs contêm metais de terras raras, que são recursos naturais reduzidos e de alto valor, o processo de triagem eficiente desses materiais para reciclagem pode ser um desafio técnico e economicamente inviável (JOWITT *et al.*, 2018; NLEBEDIM *et al.*, 2018; TRENCH *et al.*, 2020).

Ainda assim, diversas literaturas estão lidando com esforços de pesquisa (principalmente em escala de laboratório) sobre reciclagem de REE e apontam metodologias de potencial de reciclagem para ímã, bem como a recuperação para serem reutilizados (MCNULTY *et al.*, 2022). Entre os processos metodológicos estão: hidrometalurgia, pirometalúrgicos, eletroquímicos e combinações destes, estão sendo explorados (MEYER E BRÁS, 2011; TANAKA *et al.*, 2013; ANDERSON *et al.*, 2012; RADEMAKER *et al.*, 2013; FUJITA *et al.*, 2022; MCNULTY *et al.*, 2022).

Esses processos de reciclagem aplicado aos ímãs permanentes é viável, desde que, desenvolvido com técnica eficientes de triagem, separação metalúrgica e métodos de refino, para chegar a um grau de pureza, para que o elemento retorne para a cadeia produtiva (BUCHERT *et al.*, 2012; WALTON *et al.*, 2013; RADEMAKER *et al.*, 2013; FUJITA *et al.*, 2022).

Contudo, a aplicação da reciclagem para recuperação dos REEs ainda é baixa, beneficiando apenas 1% dos equipamentos que possuem REEs — referida como mineração urbana — nem sempre chegar a ser um resíduo, mas sim um rejeito que precisa ser tratado para depois ser descartado com responsabilidade (BINNEMANS *et al.*, 2013).

Em suma, os equipamentos da embarcação, principalmente os motores elétricos que possuem na sua produção elementos de terras raras, diversos estudos propõem a sua remanufatura, ou seja, passar por um processo industrial, no qual suas peças danificadas são

substituídas por novas, excedendo os padrões de qualidades internacional (CAI ZHI-HAI *et al.*, 2010; A. KRINGS *et al.*, 2017). Além disso, diversos estudos de propõem a rebobinação dos motores, os chamados *ecodesign*, através da substituição de rotores e os demais elementos, no entanto na análise dos autores são considerados apenas motores elétricos de indução trifásico, por ser uma tecnologia madura no mercado (FERREIRA *et al.*, 2018; ALMEIDA *et al.*, 2022).

Também são considerados os aspectos econômicos e eficiência energética, com intuito analisar o potencial de melhoria e assim comparar com a Norma Global de Eficiência IEC 60034-30 (ALMEIDA *et al.*, 2022).

Enquanto, o processo de reciclagem das baterias de lítio vai depender do tipo de célula que compõem a bateria (J. TYTGAT, 2013; A. ALMARZOOQI *et al.*, 2019; KM TV *et al.*, 2021). Em síntese, o custo para a reciclagem vai depender dos seguintes parâmetros: matérias-primas, sazonalidade, coleta seletiva e principalmente o modelo de metodologia desenvolvida (F. MO, 2023). Assim como as baterias, os módulos não possuem REE na sua composição, porém já possuem empresas capacitadas no processo de reciclagem, o que não geraria uma preocupação quando depreciados.

Mediante a isso, no Brasil tanto a Resolução CONAMA nº 401 de 2008 como a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), ressaltam a importância da Logística Reversa, destacam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos quanto aos fabricantes importadores, distribuidores, comerciantes e consumidores, principalmente.

Para finalizar este capítulo terá uma breve descrição da importância da ESG e ODS aplicada no contexto de mobilidade elétrica marítima em complemento com a importância da reciclagem mineral.

5.9.3 Mobilidade elétrica Naval e sua contrição com a ODS por meio da ESG

As discussões em torno da sustentabilidade das atividades produtivas surgiram na década de 60, com o lançamento do livro da “Primavera Silenciosa”, escrito por Rachel Carson, na qual expôs os danos causados por pesticidas no meio ambiente, alertando sobre os riscos na indústria química.

Desde então, a temática ambiental passou a ter uma relevância no meio acadêmico (BRUNDTLAND, 2020). Mais tarde na década 1972, a publicação do livro “*Limits to Grow*” causou grande repercussão, dado que, foi apresentado um modelo computacional explicando que se o crescimento econômico progredisse no ritmo geométrico, os danos ambientais tornaram irreversíveis, tal qual, as consequências do crescimento rápido da população

mundial comprometeria os recursos naturais, tornando-os limitados, com possíveis crises sanitárias e climáticas no Século XXI (BONFANTE, 2021).

Enquanto na década 1987, a primeira-ministra da Noruega, *Gro Brundtland* inseriu o termo desenvolvimento sustentável, integrando com parâmetros ambientais o desenvolvimento econômico. E assim, o termo foi amplamente discutido durante a Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Econômico, trouxe uma pauta sobre justiça intergeracional e sustentabilidade, visto que, a geração atual tem responsabilidade de preservar os recursos naturais para que a futura geração possa usufruir (BOFANTE, 2021).

Desde então diversos, termos foram surgindo com intuito discutir sustentabilidade no mundo corporativo, esses termos inclui a sigla ESG, que passou a fazer parte do dicionário corporativo no ano de 2004, citada pela primeira vez no *Who Cares Wins*, pelo secretário geral ONU, Kofi Annan, onde convocou 50 CEOs de grandes instituições, com o principal objetivo discussões de como integrar os termos no mercado empresarial, sem causar perdas para o mercado financeiro (PACTO GLOBAL, 2021).

Em agosto de 2015, foram estabelecidos os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), realizado pela Cúpula das Nações Unidas, na qual propuseram 17 objetivos, que compõem uma agenda mundial para a construção e implementação de políticas públicas que visam guiar a humanidade até 2030, trazendo a responsabilidade para todos: empresas, governos e sociedade civil, tanto de países desenvolvidos quanto os países em subdesenvolvimento para que objetivos possam ser cumpridos até o ano de 2030 (ONU, 2021).

Os objetivos são integrados, indissociáveis e se mesclam de forma equilibrada elevando o tripé da sustentabilidade em dimensões do desenvolvimento sustentável, que estão divididos em 6 grupos sendo: econômica, social e o ambiental, evidenciados na Figura 63.

Figura 63- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável



Fonte: ONU, 2022.

O sexto grupo, estão diretamente ligados ao desenvolvimento da mobilidade elétrica marítima, que são referentes: o *objetivo 7 à energia renovável*, *objetivo 9 indústrias limpas*, *objetivo 13 poupança de emissão de GEEs*, *objetivo 14 vida na água* e *objetivo 11 cidades e comunidades sustentáveis*. Estes são grandes desafios a serem alcançados que estão interligados com o fornecimento energia “carbono zero”, que não libera dióxido de carbono na atmosfera; a eletrificação do uso de energia, passando de combustíveis fósseis para energia elétrica uso de equipamentos não utilizam combustíveis fósseis; e a eficiência energética dos sistemas, a partir de equipamentos mais tecnológicos e indústria mais eficiente (SACHS, 2020; BONFANTE, 2021; ONU, 2021).

As ações em prol dos ODS vêm sendo monitoradas, pois cada País, possui um conjunto de indicadores de acordo com o seu desenvolvimento e contribuições em prol das ações da ODS, no entanto tais ações são executadas de acordo com realidade de cada país (ONU, 2021; BONFANTE, 2021). Os indicadores de desenvolvimento para o Brasil podem ser consultados na plataforma do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e assim monitorar as ações da ODS (IBGE) (INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, 2020).

Para alcançar os objetivos propostos pela ODS, é importante que as entidades, a sociedade civil, as empresas tenham um papel importante na aplicação dessas ações na sociedade e saibam a importância de cada objetivo.

Conforme já tratado nas seções anteriores, a gestão por meio ESG de suma importância para conseguir pôr em práticas os ODS, visto que, a ESG tem a intenção de unir parâmetros essenciais para mitigar os impactos ambientais dentro do desenvolvimento de um negócio, incluindo as discussões aliada à escassez dos recursos minerais, paralelo ao desenvolvimento da transição energética (FOSS, 2021; CHUNG, 2022).

De acordo com Conselho do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), para que empresas de mineração brasileiras possam desenvolver práticas sustentáveis é importante aderir aos padrões ESG (IBRAM, 2020; BOFANTE, 2021).

Posto isso, os esforços e estratégias para trabalhar em conjunto com aplicação da ESG, necessita do envolvimento dos *stakeholders*, na qual diversos atores são envolvidos, como exemplo: clientes, investidores, fornecedores, colaboradores, governo, sociedade e Organizações Não Governamentais (ONGs), estão entre as partes interessada (BOFANTE, 2021; A. GUPTA *et al.*, 2021; TWINAMATSIKO *et al.*, 2022). Esses fatores são um diferencial para empresas que têm ambições em trabalhar com ações sustentáveis, por ora, representa compromisso e tomada de decisões para geração de lucro para empresa (BOFANTE, 2021; ALMEIDA *et al.*, 2022).

Sendo, a aplicação da modelo gestão embasado nos princípios da ESG, permite que as empresas mineral melhorem através medidas proativas e implementação de práticas sustentáveis com visão de futuro, que englobam: emissões de carbono, uso de energia e água, princípios de comércio justo, saúde e segurança do produto, independência do conselho e corrupção, além da exploração mineral ilegal, que abastece um mercado negro, gerando diversos conflitos, riscos decorrentes da gestão inadequada de resíduos e água, impactos da segurança inadequada do trabalhador, abusos dos direitos humanos (como trabalho infantil) etc. (GUPTA *et al.*, 2021; TWINAMATSIKO *et al.*, 2022; IEA, 2022; CHUNG, 2022).

Urge-se a importância da aplicação da gestão por meio da ESG dentro do setor mineral, pois é garantir que a riqueza mineral seja explorada dentro da lei, além de incentivar recuperação das áreas degradadas com intuito de diminuir as emissões de gases tóxicos, além dos desafios de incentivo a reciclagem dos minerais para abastecer a cadeia de suprimento em diversos países, indo de encontro com incentivos das empresas atuantes do desenvolvimento dos VEs.

5.10 Conclusão deste capítulo

A conclusão deste capítulo destacou os resultados satisfatórios do Projeto Conceitual, evidenciando a viabilidade e os benefícios dessa transição. Durante a fase de pesquisa, foram

exploradas e definidas as ideias e conceitos iniciais para a conversão do sistema de propulsão, com o objetivo de substituir os componentes tradicionais por um sistema elétrico mais eficiente e sustentável.

Além disso, o capítulo abordou a relevância de considerar os critérios ESG (Environmental, Social, and Governance) no dentro do projeto. A vista disso, o trabalho buscou evidenciar como as empresas devem incorporar esses princípios em suas operações, e a mobilidade elétrica é uma área em que esses critérios podem ser aplicados para minimizar o impacto ambiental, promover a responsabilidade social e garantir uma governança adequada.

A análise realizada com base em dados da literatura apresentou exemplos de como os princípios ESG se relacionam com a mobilidade elétrica, destacando:

A. Ambiental: A adoção de sistemas propulsivos elétricos reduz significativamente as emissões de gases poluentes, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e a melhoria da qualidade do ar. Além disso, a transição para veículos elétricos impulsiona o uso de fontes de energia renovável, alinhando-se aos objetivos de sustentabilidade ambiental.

B. Social: A mobilidade elétrica pode beneficiar a sociedade de várias maneiras, incluindo a redução das emissões poluentes e melhora a saúde pública. Além disso, a transição para veículos elétricos pode promover o desenvolvimento de empregos verdes e a inclusão social, impulsionando a economia local com desenvolvimento de cidades inteligentes

C. Governança: A governança adequada na mobilidade elétrica envolve a definição de políticas e regulamentações claras, o estabelecimento de padrões de segurança e qualidade, além da transparência nas informações e tomada de decisões. Uma governança eficaz promove a confiança dos investidores, consumidores e demais partes interessadas, impulsionando o avanço da mobilidade elétrica.

Essa integração dos critérios ESG na mobilidade elétrica contribui para a construção de um futuro mais sustentável, responsável socialmente e com uma governança justa. A partir desses levantamentos, o próximo capítulo trata das considerações finais do estudo e dos direcionamentos para os trabalhos futuros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as considerações finais deste estudo. Nele são apresentadas as contribuições do estudo, bem como suas limitações e direcionamentos para estudos futuros.

6.1 Contribuições

A partir dos resultados obtidos na pesquisa, foi possível concluir que esta dissertação visa contribuir para o entendimento dos desafios e oportunidades no processo de transição para mobilidade elétrica aquaviária. Ao abordar questões socioambientais relacionadas à transição da matriz de mobilidade elétrica, espera-se fornecer *insights* valiosos para futuros trabalhos.

A primeira análise da pesquisa baseia-se na autonomia e custo: ao optar por um sistema totalmente elétrico para o embarque, surge o desafio da autonomia. Em situações em que a energia solar e as baterias não fornecem energia suficiente, o barco pode ficar limitado em termos de alcance e funcionalidade. Uma solução natural seria aumentar a capacidade das baterias, mas isso pode levar a um aumento específico no peso e, conseqüentemente, requer alta demanda de energia para sua operação. Isso cria um ciclo onde o aumento do peso requer mais energia, o que por sua vez requer mais baterias, aumentando ainda mais o peso e o custo com o sistema de armazenamento.

A partir disso, o trabalho alcançou resultados satisfatórios propondo a substituição do motor a combustão por um motor elétrico, equipado com módulos FV, sistema de armazenamento de baterias e um gerador a diesel que será ligado apenas para casos de emergência da embarcação.

A análise da utilização de um sistema híbrido para embarcações, percorrendo maior autonomia e eficiência, ao mesmo tempo que também contribui para a mitigação dos gases de efeito estufa (GEE). Contudo, para alcançar resultados satisfatórios, é necessário selecionar equipamentos eficientes para composição do *powertrain* híbrido.

Mediante a isso, a escolha das baterias recaiu sobre as baterias de íon-lítio ferro-fosfato (LiFePO₄), devido às suas vantagens relacionadas à eficiência e segurança. Essas baterias proporcionam uma fonte de energia confiável e eficiente para alimentar o motor elétrico, garantindo um desempenho adequado da embarcação. Para o motor elétrico principal, optou-se pelas tecnologias elétricas de indução devido à sua alta eficiência e menor peso. Esses motores são capazes de converter a energia elétrica fornecida pelas baterias em energia mecânica de forma eficiente, resultando em um melhor desempenho e menor consumo de energia.

No que diz respeito aos sistemas auxiliares, foi considerada a utilização de módulos flexíveis, devido ao seu menor peso e maior ganho de irradiação por metro quadrado (m²). Essa escolha permite obter uma fonte adicional de energia para alimentar os sistemas auxiliares da embarcação, proporcionando maior eficiência e autonomia.

É relevante ressaltar que o controlador de carga necessário para o sistema não está disponível no mercado devido à tensão requerida. Portanto, seria necessário encomendá-lo por meio de uma empresa especializada e capacitada nesse tipo de projeto. O controlador de carga é responsável por regular o fluxo de energia dos módulos fotovoltaicos para o banco de baterias, garantindo uma carga adequada e segura.

A energia produzida pelos módulos fotovoltaicos será armazenada no banco de baterias, que servirá como uma fonte de energia para alimentar o motor elétrico e os sistemas auxiliares da embarcação. O uso de um conversor *boost* com controle de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) é recomendado para garantir o máximo aproveitamento da energia fotovoltaica gerada pelos módulos. Esse conversor permite otimizar a eficiência do sistema, rastreando continuamente o ponto de máxima potência dos módulos e ajustando a tensão de saída para maximizar a energia transferida para o banco de baterias.

No sistema de armazenamento, é recomendado adotar medidas para prolongar a vida útil das baterias. Isso pode ser alcançado por meio de um gerenciamento de carga e descarga do banco de baterias, evitando descargas profundas que possam prejudicar a integridade das baterias. Um sistema de gestão inteligente pode ser implementado para otimizar a carga e descarga das baterias, garantindo uma utilização adequada e maximizando sua vida útil.

Durante a navegação, é importante ter um controle em tempo real da autonomia de navegação, ou seja, monitorar continuamente a quantidade de energia disponível no banco de baterias em relação à demanda do motor elétrico e dos sistemas auxiliares. Esse monitoramento permite tomar decisões informadas durante a navegação, evitando quedas abruptas de energia e garantindo que a embarcação tenha autonomia suficiente para a viagem planejada.

Ao considerar essas medidas, espera-se alcançar uma operação eficiente e confiável do sistema elétrico da embarcação, garantindo uma maior vida útil das baterias, melhor aproveitamento da energia fotovoltaica e um controle preciso da autonomia de navegação.

O processo de eletrificação do sistema propulsivo de um barco resulta em um preço maior em comparação com um barco equivalente equipado com propulsão tradicional. Isso ocorre devido aos custos adicionais relacionados à seleção de equipamentos eficientes, incluindo o banco de baterias e o sistema de controle e gerenciamento. No entanto, esses custos

extras são parcialmente compensados pela redução dos custos operacionais, uma vez que os barcos elétricos não consomem combustível e geralmente têm menores custos de manutenção.

O custo adicional inicial para eletrificar o sistema propulsivo foi estimado em cerca de R\$1.456.734,88. No entanto, a economia anual durante a operação é estimada em R\$ 5.000,00. Levando em consideração essa economia anual, os custos extras são amortizados em aproximadamente 6 anos. Além disso, os barcos elétricos oferecem benefícios significativos para o meio ambiente, como o uso de energia renovável e a redução das emissões de CO₂. Esses benefícios contribuem para a preservação da fauna e promovem impactos socioeconômicos positivos.

A transição para a mobilidade elétrica tem o potencial de contribuir para diversas Metas de Desenvolvimento Sustentável (SDGs, sigla em inglês) estabelecidas pela Organização das Nações Unidas (ONU). Essas metas estão alinhadas com os objetivos da ODS, especialmente no que diz respeito à utilização de fontes renováveis de energia para carregar as baterias das embarcações e à redução da dependência de combustíveis fósseis. Essa transição também pode impulsionar a indústria, a inovação e outros setores relacionados.

Diante do exposto, foi possível concluir que, o trabalho foi desafiador ao optar por um sistema totalmente elétrico para um barco de médio porte, pois surgiu o desafio da autonomia. Em situações em que a energia solar e as baterias não fornecem energia suficiente, o embarque pode ficar limitado em termos de alcance e funcionalidade. Destacam-se, no entanto uma solução seria aumentar a capacidade das baterias, mas isso pode levar a um aumento específico no peso do modal e, conseqüentemente, na demanda de energia para sua operação. Isso cria um ciclo onde o aumento do peso requer mais energia, o que por sua vez requer mais baterias, aumentando ainda mais o peso e o custo.

A proposta de solução híbrida, combinando a energia elétrica dos motores, banco de baterias e um gerador a diesel, é uma solução viável para aumentar a autonomia. Isso permitiria que o embarque mantivesse a operação por períodos mais longos sem depender apenas das baterias. Além disso, o uso do gerador a diesel apenas em casos de emergência ou quando a carga das baterias estiver baixa pode ajudar a reduzir as emissões de CO₂ e melhorar a eficiência geral do sistema.

Embora o sistema elétrico possa oferecer benefícios em termos de redução de emissões, uma solução híbrida oferece um equilíbrio entre autonomia e eficiência, considerando os desafios práticos de peso, custo e energia. Na última análise, a abordagem escolhida deve ser uma análise cuidadosa desses fatores em relação aos objetivos e restrições do projeto.

Além disso, ressalta-se a falta de incentivos e investimentos da indústria nacional gera um desafio para a adoção generalizada dos barcos elétricos. Muitos equipamentos necessários para a eletrificação seriam importados de outros países, o que aumentaria os custos. Por outro lado, a indústria de motores elétricos já possui uma tecnologia madura e é desenvolvida localmente no Brasil, o que favorece a indústria naval e pode impulsionar o crescimento do setor.

Em resumo, espera-se promover incentivos e investimentos para acelerar a transição para a propulsão elétrica naval, aproveitando os benefícios socioeconômicos que essa tecnologia oferece para a região da Amazônia.

6.2 Desafios e oportunidades

Em resumo, o processo de eletrificação dos barcos elétricos demanda uma grande quantidade de matéria-prima mineral para aprimorar as tecnologias estratégicas, especialmente para os elementos críticos associados aos ímãs permanentes, como Pr (praseodímio), Nd (neodímio), Tb (térbio) e Dy (disprósio).

Diante desse cenário, surgem oportunidades relacionadas à recuperação desses materiais por meio de pesquisas voltadas para sua recuperação, incluindo os equipamentos da embarcação. Esses materiais poderiam ser reintegrados à cadeia produtiva por meio da implementação de políticas de gestão ambiental, social e de governança (ESG) no setor mineral e na indústria de produção de veículos elétricos.

Embora existam desafios relacionados à viabilidade econômica e às estratégias dos envolvidos, a recuperação desses materiais poderia ser uma fonte significativa de abastecimento por um determinado período. Nesse sentido, sugere-se que a empresa responsável pela embarcação adote normas de gestão ambiental baseadas na ESG para garantir a destinação adequada dos equipamentos no final de seu ciclo de vida.

Essas medidas visam promover a sustentabilidade ambiental e o uso responsável dos recursos minerais, além de impulsionar a pesquisa e o desenvolvimento de técnicas de recuperação e reciclagem. Dessa forma, poderemos maximizar o valor dos materiais utilizados nos barcos elétricos, reduzir a dependência de novas extrações minerais e minimizar o impacto ambiental associado a esses processos.

6.3 Propostas para trabalhos futuros

Recomenda-se para trabalhos futuros: teste de simulação a partir da criação do casco, seja pautado para a escolha dos materiais (alumínio, aço etc.) com objetivo verificar o desempenho da embarcação e envolvam os seguintes tópicos:

a) Eficiência energética aprimorada: pesquisar as principais tecnologias e sistemas que melhorem a eficiência energética dos barcos elétricos. Isso pode envolver o uso de materiais mais leves, *design* aerodinâmico, sistemas de propulsão mais eficientes e otimização do consumo de energia.

b) Pesquisas de tecnologias de armazenamento de energia: Aprimorar as baterias usadas em barcos elétricos é um aspecto crucial para estender a autonomia e melhorar seu desempenho, isso inclui a investigação de novos materiais para os componentes da bateria e recarga de energia.

c) Pesquisas adicionais podem se concentrar na aplicação de novos sistemas de armazenamento de energia renovável, como células de combustível de aplicação marítima, supercapacitores como resultados analisar eficiência, leveza e longa duração.

d) Por fim, ampliar estudos da importância da ESG dentro do setor mineral e empresas de mobilidade elétrica, a fim de garantir o futuro a segurança da transição energética.

e) Que estes estudos possam estar direcionados com a recuperação ímãs permanentes em particular os Neodímio–Ferro–Boro (Nd–Fe–B), Samário–Cobalto (Sm–Co), Praseodímio (Pr), Térbio (Tb) e Disprósio (Dy), através de pesquisas que visa desenvolver técnicas e métodos para restaurar ou regenerar as propriedades magnéticas dos ímãs permanentes que tenham sofrido desmagnetização ou deterioração após o fim de vida de um determinado equipamento.

f) Materiais Alternativos: Pesquisas direcionadas para materiais com propriedades semelhantes às terras raras, para serem testadas.

g) Exploração de Novas Fontes: Além de buscar substitutos, também há esforços para explorar novas fontes de REE, como depósitos marinhos e rejeitos de mineração que podem conter quantidades significativas desses elementos.

É importante ressaltar que a substituição completa das REE em alguns dispositivos pode ser desafiadora, pois suas propriedades únicas muitas vezes são difíceis de replicar completamente. No entanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos estão impulsionando avanços nessa área, buscando um equilíbrio entre o desempenho técnico, a disponibilidade de materiais e as preocupações ambientais.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICOS

AIE. Revisão de falhas de módulos fotovoltaicos: Relatório final externo da Tarefa 1. [S. l.]: IEA-PVPS, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 15 de junho de 2023.

ALVES, R. N. **Propulsão Elétrica de Navios**. Rio de Janeiro. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2007-1/2007102901-2007102901/file>. Acesso em: 3 set. 2022.

ALMEIDA, A. T. de; FERREIRA, F. J. T.; BAOMING, G. Beyond Induction Motors – Technology Trends to Move Up Efficiency. *Transactions on Industry Applications*, v. 50, n. 3, p. 2103-2114, maio/jun. 2014a. DOI: 10.1109/TIA.2013.2288425.

ALMEIDA, M. G. de; PAIVA, I. C. de S. Audit Committees and its effect on Environmental, Social, and Governance Disclosure. In: *IBERIAN CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES (CISTI)*, 2022, Madrid, Spain. **Anais [...]**. Madrid, Spain: IEEE, 2022b, p. 1-6, DOI: 10.23919/CISTI54924.2022.9820167.

ALMUTAIRI, F. N. A. **Effect of Chemically Modified Transport Layers on Photovoltaic Behavior of P3HT: IC70BA-Based Organic Solar Cell**. 2021. Thesis (Doctor of Philosophy) – Bangor University, Reino Unido, 2021. Disponível em: [https://research.bangor.ac.uk/portal/en/theses/effect-of-chemically-modified-transport-layers-on-photovoltaic-behavior-of-p3htic70babased-organic-solar-cell\(741631b9-858e-4415-9c54-df21c3239506\).html](https://research.bangor.ac.uk/portal/en/theses/effect-of-chemically-modified-transport-layers-on-photovoltaic-behavior-of-p3htic70babased-organic-solar-cell(741631b9-858e-4415-9c54-df21c3239506).html) . Acesso em: 3 set. 2022.

AOUN, A. *et al.* Evaluation Performance of Mono-and Polycrystalline Photovoltaic Modules Installed in Outdoor Environment. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE RENEWABLE ENERGY SYSTEMS AND APPLICATIONS (ICSRESA)*, 2019, Tebessa, Algeria. **Anais [...]**. Tebessa, Algeria: IEEE, 2019, p. 1-4, DOI: 10.1109/ICSRESA49121.2019.9182469.

BALARAM, V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. **Geoscience Frontiers**, v. 10, n. 4, p. 1285-1303, 2019. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.12.005.

BARAKOS, G.; MISCHO, H.; GUTZMER, J. An outlook on the rare earth elements mining industry. **AusIMM Bulletin**, n. 2, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/303140029_An_outlook_on_the_rare_earth_elements_mining_industry . Acesso em: 3 jul. 2022.

BARCELLOS, R. The hybrid propulsion system as an alternative for offshore vessels and supporting remote oilfield operations. In: *OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE BRASIL*, 2013, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: OTC, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4043/24467-MS>.

BARROZO, R. P. T. *et al.* Conversor bidirecional baseado na célula de três estados para aplicação em veículos elétricos. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON) 2010*, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: IEEE/IAS, 2010, p. 1-6. DOI: 10.1109/INDUSCON.2010.5740023.

BASTOS, R. F. A. **Potencial do sistema diesel elétrico para a redução do consumo de combustível fóssil em embarcações de pesca**: Um estudo de caso do consumo de energia da frota de espinhel de fundo do Rio de Janeiro. 2019. Tese (Doutorado em Ciências em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Tese_Final_Ricardo_PPE_2019.pdf. Acesso em: 3 jul. 2022.

B. R. Mujungu, S. Allamsetty, T. R. Choudhury, S. Debdas e S. Kundu. Design and Modelling of a Solar PV-based Propulsion System for a Catamaran Boat," *2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)*, Hubli, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/CONIT55038.2022.9848261.

BATISTA, F. A. B. *et al.*, Embarcação solar de pequeno porte como objeto de pesquisa para o desenvolvimento e divulgação do uso de tecnologias associadas às energias limpas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, dec. 2015. DOI: 10.19177/rgsa.v4e02015411-430.

BINNEMANS, K. *et al.* Recycling of rare earths: a critical review. **Journal of cleaner production**, v. 51, p. 1-22, 2013. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037.

BONFANTE, M. C. **Modelo de gestão baseado em práticas ESG para a sustentabilidade do laboratório Fábrica de Ímãs de Terras Raras**. 2021. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/229234>. Acesso em: 3 jul. 2022.

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE - BNEF. **Electric Vehicle Outlook 2022**. Disponível em: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>. Acesso em: 3 set. 2022.

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE - BNEF. **Electric cars to reach price parity by 2025**. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/electric-cars-reach-price-parity-2025/>. Acesso em: 3 set. 2022.

BOER, L. *et al.* **Energy Transition Metals**. [S. l.]: International Monetary Fund, 2021. (Working Paper, 21/243).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021**. Define a relação de minerais estratégicos para o País, de acordo com os critérios de que trata o art. 2º do Decreto nº 10.657, de 24 de março de 2021. Brasília, DF: MME, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-2-de-18-de-junho-de-2021-327352416>. Acesso em: 3 jul. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica. Diretoria. ANEEL. Resolução Normativa nº 819, de 19 de junho de 2018. **Estabelece os procedimentos**

e as condições para a realização de atividades de recarga de veículos elétricos. Diário Oficial da União: ed. 128, seção 1, p. 70, 5 jul. 2018.

BREIJS, A.; AMAM, E. E. Energy management – adapt your engine to every mission. *In: INTERNATIONAL NAVAL ENGINEERING CONFERENCE*, 13, 2016. Bristol, UK. Anais [...]. Bristol, UK: INEC, 2016. p. 1–8.

BRINKMANN, K. O. *et al.* Perovskite–organic tandem solar cells with indium oxide interconnect. *Nature*, v. 604, p. 280–286, 2022. DOI: 10.1038/s41586-022-04455-0.

BLANCAS, F. J. *et al.* A dynamic sustainable tourism evaluation using multiple benchmarks. *Journal of cleaner production*, v. 174, p. 1190-1203, fev. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617326008> . Acesso em: 2 fev. 2023

BOTTURA, C. P. BARRETO, G. **Veículos elétricos.** Campinas: Editora UNICAMP, 1989.
BONILLA, R. Z. *et al.* Multi-attribute assessment of a river electromobility concept in the Amazon region. *Energy for Sustainable Development*, v. 61, p. 139-152, 2021.

BOER, L. *et al.* **Energy Transition Metals.** [S. l.]: International Monetary Fund, 2021. (Working Paper, 21/243).

BUCHERT, M. *et al.*; **Recycling Critical Raw Materials from Waste Electronic Equipment.** Freiburg, Germany: Öko-Institut e.V., 2012. Disponível em: <https://www.oeko.de/oekodoc/1375/2012-010-en.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2022.

BLOOMBERG. **Metais de Transição Representam US\$10 Trilhões em Oportunidades.** 2023. Disponível em: <https://www.bloomberg.com.br/blog/metais-de-transicao-representam-us10-trilhoes-em-oportunidades/>. Acesso em: 20 de maio de 2023.

BUILD YOUR DREAMS – BYD. **Comunicação Interna.** Los Angeles: BYD, 2022. Disponível em: <https://en.byd.com/>. Acesso em: 3 jul. 2022.

BACH, HANNA *et al.* Implementing maritime battery-electric and hydrogen solutions: A technological innovation systems analysis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 87, p. 102492, 2020.

CAMBOGI, J. Rare earths. **U. S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries**, jan. 2021. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-rare-earth.pdf>. Acesso em: 20 de março de 2023.

COUTINHO FELIPE. A verdadeira transição energética justa. Associação dos Engenheiros da Petrobrás nos Estados do Rio de Janeiro e da Guanabara (AEPERG), 2023. Disponível em: <https://aepet.org.br/sobre-a-aepet/>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

CHASE, O. A. Arquitetura de uma plataforma de sensoriamento autônoma no contexto de tecnologia ambiental para monitoramento in situ de parâmetros ambientais e da super irradiância solar. **www. ppgee. ufpa. br/ARQUIVOS/teses/TD% 2021_2018% 20Ot% C3% A1vio% 20Andr% C**, v. 3, p. A9.

C. -L. SU, X. -T. WENG AND CHING-JIN CHEN. Power generation controls of fuel cell/energy storage hybrid ship power systems. *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Beijing, China, 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940639.

BACH, HANNA *et al.* Implementing maritime battery-electric and hydrogen solutions: A technological innovation systems analysis. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 87, p. 102492, 2020.

CAMPOS, M. S.; ALCÂNTARA, L. D. S. Interpretação dos Efeitos de Tempo Nublado e Chuvoso Sobre a Radiação Solar em Belém/PA Para Uso em Sistemas Fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 4, supl., p. 570-579, 2016.

CANDELA. 2020. Disponível em: <https://candela.com/technology/>. Acesso em: 20 fev. 2020.

CANTANE, D. A. *et al.* **Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro**. São Carlos, SP: Scienza, 2020.

CAPRARA, G.; MARTIRANO, L.; BALLETTA, C. Preliminary Analysis of the Conversion of a Leisure Boat into a Battery Electric Vehicle (BEV). *In: 2020 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING AND 2020 IEEE INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS EUROPE (EEEIC / I&CPS EUROPE)*, 2020, Madrid, Spain. Anais [...]. Madrid Spain: IEEE, 2020. p. 1-6, DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160492.

CARVALHO, P. S. L. de; MESQUITA, P. P. D.; ROCIO, M. A. R. A rota metalúrgica de produção de silício grau solar: uma oportunidade para a indústria brasileira? **BNDES Setorial**, v. 40, p. 205-234, 2014. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2901/1/A%20rota%20metal%c3%bargica%20de%20produ%c3%a7%c3%a3o%20de%20sil%c3%adcio%20grau%20solar.pdf> . Acesso em: 3 set. 2022.

CARNEIRO, R. L. *et al.* Aspectos essenciais das baterias chumbo-ácido e princípios físico-químicos e termodinâmicos do seu funcionamento. **Revista virtual de química**, v. 9, n. 3, p. 889-911, 2017. Disponível em: <https://s3.sa-east-1.amazonaws.com/static.sites.s bq.org.br/rvq.s bq.org.br/pdf/CarneiroNoPrelo.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2022.

CASTAGNARO, E.; BIANCHI, N. High-Speed Synchronous Reluctance Motor for Electric-Spindle Application, *In: International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2020, Gothenburg, Sweden. **Anais [...]**. Gothenburg, Sweden: IEEE, 2020, p. 2419-2425, DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270970.

CASTLE, E. *et al.* Spark Plasma Sintering of permanent magnets for next-generation electric vehicle motors, *In: International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)*, 2015, Salamanca, Spain. **Anais [...]**. Salamanca, Spain: IEEE, 2015, DOI: 10.1109/EUROCON.2015.7313805.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. **Usos e aplicações de Terras Raras no Brasil: 2012-2030**. Brasília, DF: CGEE, 2013. 254 p.

CHEN, P. Y. *et al.* **Environmentally responsible fabrication of efficient perovskite solar cells from recycled car batteries**. *Energy Environ Sci*, n. 11, p. 3659-3665, 2014. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/ee/c4ee00965g>. Acesso em: 3 jan. 2022.

CHUNG, K. W. Proposal on how to activate recycling of critical minerals. **Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers**, v. 59, n. 5, p. 489-497, out. 2022. DOI: [10.32390/ksmer.2022.59.5.489](https://doi.org/10.32390/ksmer.2022.59.5.489).

COELHO, G. A.; MIOTTO, J. L. Análise comparativa da redução da área de geração de energia fotovoltaica proporcionada por módulos bifaciais. **Revista Tecnológica**, v. 29, n. 1, p. 242-258, 2020. DOI: 10.4025/revtecnol.v29i1.51280.

CRUISE AND FERRY. *World's first battery-powered ferry starts services in Norway*. 2015. Disponível em: <https://www.cruiseandferry.net/articles/worlds-first-battery-powered-ferry-starts-service-in-norway>. Acesso em: 10 out. 2022.

CHEN, MIKE; MUSSALLI, GEORGE. An integrated approach to quantitative ESG investing. *The Journal of Portfolio Management*, v. 46, n. 3, p. 65-74, 2020.

CUNHA, TÚLIO JAGUAR DA. **Análise da injeção de ar como alternativa para a redução da resistência ao avanço de embarcações**. RJ, 2013.

DAMIAN, S. E. *et al.* Review on the challenges of hybrid propulsion system in marine transport system. **Journal of Energy Storage**, v. 56, part B, p. 105983, dez. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22019715>. Acesso em: 3 jul. 2022.

DARGAHI, M. *et al.* Maximum power point tracking for fuel cell in fuel cell/battery hybrid systems. In: *INTERNATIONAL MULTITOPIC CONFERENCE*, 2008, Karachi, Pakistan. **Anais [...]**. Karachi, Pakistan: IEEE, 2008, p. 33-37, DOI: 10.1109 /INMIC.2008.4777703.

DAVIS, S. C.; BOUND, R. G. **Transportation Energy Data Book**. 40. ed. Oak Ridge, TN: OENL, 2022. DOI: 10.2172/.

DEIF GROUP. **DC-bus for marine hybrid**. Campinas, SP: DEIF do Brasil, 2021. Disponível em: <https://www.deif.com.br/marine-and-offshore/applications/dc-bus-for-marine-hybrid/>. Acesso em: 23 jun. 2022.

DENG, J. *et al.* Electric Vehicles Batteries: Requirements and Challenges. **Joule**, v. 4, n. 3, p. 509–515, mar. 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254243512030043X>. Acesso em: 3 jan. 2022.

DESMOND, K. *Electric Boats and Ships: A History*. 2017. Disponível em: <https://www.amazon.com/Electric-Boats-Ships-Kevin-Desmond/dp/147666515X>. Acesso em: 26 de junho de 2023.

DIAS, R. T. C. **Propulsão elétrica azimutal realidade da propulsão naval**. 2019. Monografia (Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas) - Centro de Instrução Almirante Garça Aranha, Rio de Janeiro, 2012.

DRENTSMUSEUM. **Pesse Canoe**. 2022. Disponível em: <https://drentsmuseum.nl/en/in-the-spotlight-top-exhibits/peesse-canoe>. Acesso em: 10 dez. 2023.

DUTTAa, W. *et al.* Design of a Sustainable Electric Boat with Renewable Energy Based Charging System. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING*, 11., [s. l.], 2020. **Anais [...]**. [s. l.], ICECE, 2020. p. 242-245. DOI: 10.1109/ICECE51571.2020.9393125. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9393125>. Acesso em: 3 jul. 2022.

DE OLIVEIRA, Mauricio Aguilar Nepomuceno; SUEMITSU, Walter Issamu. Uma Análise do Desenvolvimento dos Barcos Solares. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 3, p. 120-133, 2017.

DE MOURA LUCINDO, Vitor et al. Simulação da resistência ao avanço de um casco wigley utilizando CFD. *Brazilian Applied Science Review*, v. 5, n. 2, p. 986-1001, 2021.

DIAS, Rhana Roberta Caldas et al. Avaliação técnica e ambiental da geração de energia eólica em Salinópolis, Pará. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 12, n. 10, p. 339-351, 2021.

DE OLIVEIRA, FERNANDO SCHUCK *et al.* Avaliação do Desempenho de Módulos Fotovoltaicos no Período Inicial de Operação. *In: Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*. 2020d.

DUTTA^b, S. T. ANKAN AND M. Z. R. KHAN; QUOT. Design of a Sustainable Electric Boat with Renewable Energy Based Charging System, ". 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE), Dhaka, Bangladesh, 2020, pp. 242-245, doi: 10.1109/ICECE51571.2020.9393125.

DU, Zhentao S.; LIPO, Thomas A. Cost-effective high torque density bi-magnet machines utilizing rare earth and ferrite permanent magnets. *IEEE Transactions on energy conversion*, v. 35, n. 3, p. 1577-1584, 2020.

DUTRA LACROIX, MIGUEL ANGEL. Uso de células fotovoltaicas de filmes finos para geração de energia elétrica em edifícios urbanos: estimativa de potencial / M.A. Dutra Lacroix. – versão corr. -- São Paulo, 2013. 105 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

ENERGY GOV. Enciclopédia e dicionário digital 98. Direção geral de André Koogan Breikmam. São Paulo: Delta: Estadão, 1998. 5 CD-ROM.

EPE. Sistemas de Armazenamento em Baterias – Aplicações e Questões relevantes para o Planejamento. Ministério de Minas e Energia, 2019.

E-TECH RESOURCES. **What are Rare Earth Elements (REEs), where are they found and how are they mined?**. Disponível em: <https://etech-resources.com/what-are-rare-earth-elements-rees-where-are-they-found-and-how-are-they-mined/>. Acesso em: 22 de junho de 2023.

EUROPEAN MARITIME SAFETY REPORT (EMSA). Relatório European Maritime Transport Environmental Report. 2022. Disponível em: <<<https://emsa.europa.eu/publications/item/4735-emsafe-report.html>>>. Acesso em: 07 de junho de 2023.

EISA, T. *et al.* Critical review on the synthesis, characterization, and application of highly efficient metal chalcogenide catalysts for fuel cells. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 94, jan. 2023. DOI: 101044.ISSN 0360-1285.

ELETROPAEDIA. **Battery and Energy Technologies: Lead Acid Batteries**. Chester: Woodbank COmunications, 2019. Disponível em: <https://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>. Acesso em: 3 jul. 2022.

ELY, F.; SWART, J. W. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. **Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), O Setor Elétrico**, v. 105, p. 138-139, 2014.

EUROPEAN MARITIME SAFETY AGENCY- EMSA. **Study on Electrical Energy Storage for Ships**. Lisboa: EMSA, 2020. Disponível em: <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/3895-study-on-electrical-energy-storage-for-ships.html>. Acesso em: 3 jul. 2022.

ENGINEERING AND TECHNOLOGY HISTORY WIKI - ETHW. **Revista Today's Engineer**, 2013. Disponível em: https://ethw.org/Main_Page . Acesso em: 2 set. 2022.

PACTO GLOBAL REDE BRASIL. ESG 2023. Disponível em: <https://www.pactoglobal.org.br/pg/esg>. Acesso em: 17 mar. 2023.

PACTO GLOBAL. ESG. Disponível em: <https://www.pactoglobal.org.br/pg/esg>. Acesso em: 25 de junho de 2023.

ESPINOSA,N. *et al.* Solution and vapour deposited lead perovskite solar cells: ecotoxicity from a life cycle assessment perspective. **Sol Energy Mater Sol Cells**,v. 137, p. 303-310, jun. 2015. DOI: 10.1016/j.solmat.2015.02.013 .

Enercon Wind Company. Enercon E-ship 1: a wind-hybrid commercial cargo ship in Proceedings of the 4th Conference on Ship.Efficiency, Hamburg, Germany, September 2013.

ELKAFAS, AHMED G.; ELGOHARY, MOHAMED M.; ZEID, AKRAM E. **Numerical study on the hydrodynamic drag force of a container ship model**. Alexandria Engineering Journal, v. 58, n. 3, p. 849-859, 2019.

F. BALSAMO, C. CAPASSO, T. COPPOLA, L. MICOLI, R. RUSSO AND O. VENERI. A case study on High-Temperature Fuel Cells for Hybrid Electric Ship Propulsion. *IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC)*, Venice, Italy, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ESARS-ITEC57127.2023.10114817.

FTHENAKIS, Vasilis et al. Life cycle inventories and life cycle assessment of photovoltaic systems. **International Energy Agency (IEA) PVPS Task**, v. 12, 2011.

FERAHTIA, Seydali et al. Optimal heuristic economic management strategy for microgrids based PEM fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2022.

FERREIRA, Fernando JTE et al. Overview of retrofitting options in induction motors to improve their efficiency and reliability. In: **2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)**. IEEE, 2018. p. 1-12.

FARIA, J. H. S. de. Conversor boost atuando como carga eletrônica a corrente controlada para fins de teste de uma célula a combustível. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS (INDUSCON)**, 9., 2010, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: IEEE/IAS, 2010, p. 1-6. DOI: 10.1109/INDUSCON.2010.5740007.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV. Transição Energética no Setor de Transportes para nações em desenvolvimento: A perspectiva Brasileira, **Caderno FGV Energia**, a. 9, n. 15, 2022. ISSN 23585277. Disponível em: https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/caderno_de_transicao_energetica_no_setor_de_transportes_rev4.pdf. Acesso em: 12 out. 2022.

DE ALMEIDA, Anibal T. et al. Electric motor standards, ecodesign and global market transformation. In: **2022. IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference**. IEEE, 2008. p. 1-9.

EDIÇÃO, Quinta; CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 2004.

G. S. Spagnolo, D. Papalilo and A. Martocchia, "Eco friendly electric propulsion boat," *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Rome, Italy, 2011, pp. 1-4, doi: 10.1109/EEEIC.2011.5874699.

GEAR, L. *et al.* **Electric Vehicles Land, Sea & Air 2022-2042**. [S. l.]: IDTechEx Research, 2022. Disponível em: <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-vehicles-land-sea-and-air-2022-2042/867>. Acesso em: 11 de março de 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidance notes for lead authors of the IPCC Fourth Assessment Report on Addressing Uncertainties. Retrieved February 2009 from http://ipccwg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4_UncertaintyGuidanceNote.pdf

GEAR, L. **Electric Leisure & Sea-going Boats and Ships 2021-2040**. [S. l.]: IDTechEx Research, 2022. Disponível em: <https://www.idtechex.com/en/research-report/electric-leisure-and-sea-going-boats-and-ships-2021-2040/739>. Acesso em: 12 de março de 2023.

GEERTSMA, R. D. *et al.* Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments. **Applied Energy**, v. 194, p. 30-54, 2017. ISSN: 0306-2619. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917301940>. Acesso em: 3 jul. 2022.

GHENAI, I. *et al.* Design of Solar PV/Fuel Cell/Diesel Generator Energy System for Dubai Ferry. In: *ADVANCES IN SCIENCE AND ENGINEERING TECHNOLOGY INTERNATIONAL CONFERENCES (ASET)*, 2019, Dubai, United Arab Emirates. **Anais [...]**. Dubai, United Arab Emirates: IEEE, p. 1-5, DOI: 10.1109/ICASET.2019.8714292.

GIL, L. Materiais necessários para a transição energética via mobilidade elétrica rodoviária. **Ciência e Tecnologia de Materiais**, v. 31, n. 1, 2019. Disponível em: <https://comun.rcaap.pt/bitstream/10400.26/36353/1/Materiais%20necess%C3%A1rios%20para%20a%20transi%C3%A7%C3%A3o%20energ%C3%A9tica%20via%20mobilidade%20el%C3%A9trica%20rodovi%C3%A1ria.pdf>. Acesso em: 3 set. 2022.

GRASSI, F.; RECH, C. Estudo normativo de sistemas de recarga condutiva modo 2 para veículos elétricos. In: SEMINAR ON POWER ELECTRONICS AND CONTROL, 12, 2019, Natal. **Anais [...]**. Natal: [s. n.]: 2019. Disponível em: <http://sepoc2019.ct.ufrn.br/sepoc2019/images/arquivos/papers/track12/59.-ESTUDO-NORMATIVO-DE-SISTEMAS-DERECARGA-CONDUTIVA-MODO-2-PARA-VEICULOS-ELTRICOS.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2022.

GUELLARD, B. *et al.* An overview of electric and solar boats market in France. In: WORLD ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM AND EXHIBITION (EVS27), 2013, Barcelona, Spain. **Anais [...]**. Barcelona, Spain: IEEE, 2013, p. 1-13, DOI: 10.1109/EVS.2013.6915050.

GUPTA, B.; PRASAD, K. S. **Azipod propulsion system**. [S. l.]: Martin's Marine Engineering, 2016.

GUPTA, A.; SHARMA, U.; GUPTA, S. K. The Role of ESG in Sustainable Development: An Analysis Through the Lens of Machine Learning. In: *INTERNATIONAL HUMANITARIAN TECHNOLOGY CONFERENCE (IHTC)*, 2021, Reino Unido. **Anais [...]**. Reino Unido: IEEE, 2021. DOI: 10.1109/IHTC53077.2021.9698939.

HARRIS, I. R.; JEWELL, G. W. Rare-earth magnets: properties, processing and applications. **Functional Materials for Sustainable Energy Applications**. Woodhead Publishing, Woodhead Publishing Series in Energy, p. 600-639. 2012. DOI: 10.1533/9780857096371.4.600.

HERRMANN *et al.* Introduction to hybrid electric vehicles, battery electric vehicles, and off-road electric vehicles. Booktitle, **Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles**. Woodhead Publishing, Woodhead Publishing Series in Energy, p. 3-16, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-377-5.00001-7>.

HÖGGERG, S. *et al.* Influence of demagnetization-temperature on magnetic performance of recycled Nd-Fe-B magnets. In: *INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE (IEMDC)*, 2015, Coeur d'Alene, ID. **Anais [...]**. Coeur d'Alene, ID: IEEE, 2015, p. 1242-1246, DOI: 10.1109/IEMDC.2015.7409220.

HUNG, D. P. *et al.* Development of an Energetic System Model for Long-Tail Electric Boat combining Solar Panels and a Prototype of E-Engine. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND SYSTEMS (ICEMS)*, 25., 2022, Chiang Mai, Thailand. **Anais [...]**. Chiang Mai, Thailand: IEEE, 2022, p. 1-4. DOI: 10.1109/ICEMS56177.2022.9983048.

Holtrop. J. and Mermen, G.G.J., An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress*. Vol. 29, July 1982.

IBN-MOHAMMED, T. *et al.* Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1321-1344, dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.095>.

IEA. **Why is ESG so important to critical mineral supplies, and what can we do about it?** Paris: IEA, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/why-is-esg-so-important-to-critical-mineral-supplies-and-what-can-we-do-about-it>. Acesso em: 3 jul. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Propulsão: discorre sobre tipos de propulsão**. Cachoeira Paulista: INPE, 2015. Disponível em: <http://goo.gl/a3wiDb>. Acesso em: 08 out. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY- IEA. **Global EV Outlook 2021**, IEA: Paris, 2021a. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>. Acesso em: 3 set. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY- IEA. **Global EV Outlook 2022**, IEA: Paris, 2022b. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>. Acesso em: 3 set. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **Energy Efficiency**. Paris: IEA, 2022c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>. Acesso em: 3 jul. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **The role of critical minerals in clean energy transitions**. Paris, France: IEA, 2021. (World energy outlook special report).

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. **Fortalecer os meios de implementação e revitalizar a parceria global para o desenvolvimento sustentável: O que mostra o retrato do Brasil?** Brasília, DF: IPEA, 2022. (Cadernos ODS, 17) Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/200408_Cadernos_ODS_17.pdf. Acesso em: 3 jul. 2022.

JOWITT, SIMON M. *et al.* Recycling of the rare earth elements. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 1-7, 2018.

JHA, A. K. *et al.* Weighted Index of Recycling and Energy (WIRE) Cost for Motors in Electric Vehicles. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER ELECTRONICS, ELECTRICAL*

DRIVES, AUTOMATION AND MOTION (SPEEDAM), 2018, Amalfi, Italy. **Anais [...]**. Amalfi, Italy: IEEE, 2018, p. 407-412. DOI: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445414.

JIANG, L. *et al.* Comparison of Monocrystalline and Polycrystalline Solar. *In: INFORMATION TECHNOLOGY AND MECHATRONICS ENGINEERING CONFERENCE (ITOEC)*, 2020, Chongqing, China. **Anais [...]**. Chongqing, China: IEEE, 2020, p. 341-344, DOI: 10.1109/ITOEC49072.2020.9141722.

JUMBLE, A. Kerala GOVT. Commissions India's First Solar-Powered Boat, Paves The Way For A Greener Tomorrow". *In: THE BETTER Índia*. 11 maio 2016. Disponível em: <https://www.thebetterindia.com/55045/india-s-first-solar-powered-ferry-kerala/> Acesso em: 17 jan. 2023.

JOWITT, Simon M. *et al.* Recycling of the rare earth elements. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 1-7, 2018.

K. L. J. Kan *et al.*, "Electric Waterjet Thruster Vessel Development – Concept, Charger, and Battery Monitoring," *2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, Hong Kong, China, 2020, pp. 1-7, doi: 10.1109/PESA50370.2020.9344015.

KABIR, S. M. L. *et al.* Solar powered ferry boat for the rural area of Bangladesh. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ELECTRICAL, ELECTRONIC AND SYSTEMS ENGINEERING (ICAEES)*, 2016, Putrajaya, Malaysia. **Anais [...]**. Putrajaya, Malaysia: IEEE, 2016, p. 38-42, DOI: 10.1109/ICAEES.2016.7888005.

KIM, H. S. *et al.* Organolead halide perovskite: new horizons in solar cell research. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 118, n. 11, p. 5615-5625, 2014. DOI: [10.1021/jp409025w](https://doi.org/10.1021/jp409025w).

KRAMER, M. J. *et al.* Prospects for Non-Rare Earth Permanent Magnets for Traction Motors and Generators, **JOM**, v. 64, p. 752-763, 2012. DOI: 10.1007/s11837-012-0351-z

KRINGS, A.; MONISSEN, C. Review and Trends in Electric Traction Motors for Battery Electric and Hybrid Vehicles. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES (ICEM)*, 2020, Gothenburg, Sweden. **Anais [...]**. Gothenburg, Sweden: IEEE, 2020, p. 1807-1813, DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270946.

KRINGS, A. *et al.* Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines. *In: TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELETRONICS*, 2017, [S. l.]. **Anais [...]**. [S. l.]: IEEE, 2017, p. 2405-2414, DOI: 10.1109/TIE.2016.2613844.

KRINGS, Andreas *et al.* Soft magnetic material status and trends in electric machines. **IEEE transactions on industrial electronics**, v. 64, n. 3, p. 2405-2414, 2016.

LEISMANN, EDISON LUIZ; ROESLER, DOUGLAS ANDRÉ. Investimentos governamentais e tempo de retorno. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**, v. 9, n. 16, 2009.

LE, T. N. Q. *et al.* Critical elements: opportunities for microfluidic processing and potential for ESG-powered mining investments. **Green Chemistry**, n. 23, 2022. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/gc/d2gc02214a>. Acesso em: 3 jul. 2022.

LEITE, A. W. *et al.*, **Propulsão nuclear**. In: MAPEAMENTO da Base Industrial de Defesa. Brasília: ABDI; Ipea, 2016. Cap. 4, p.251-334. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6737>. Acesso em: 3 jul. 2022.

LEUNG, C. P.; CHENG, K. W. E. Zero emission solar-powered boat development. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS SYSTEMS AND APPLICATIONS - SMART MOBILITY, POWER TRANSFER & SECURITY (PESA)*, 2017, Hong Kong, China. **Anais [...]**. Hong Kong, China: IEEE, 2017, p. 1-6. DOI: 10.1109/PESA.2017.8277736.

LIMA, P. C. R. **Terras-raras: elementos estratégicos para o Brasil**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados; Consultoria Legislativa, 2012.

LIMA, D. S. de. **A Propulsão Elétrica nos Navios Mercantes**. 2013. Monografia (Bacharelado em Ciências Náuticas) – Curso de Formação de Oficiais da Marinha Mercante, Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000005/0000054d.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2022a.

LIMA, F. de C. *et al.*, 2022. **Electric Catamaran and Energy Efficiency for sustainable development and tourism innovation in the Amazon**. THE XIV LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2022 Rio de Janeiro, Brazil, November 29 – December 1, 2022b.

LONTSIKH, P. A. *et al.* Implementation of ESG Sustainable Development Concept Criteria Using the Robust Design Methods International Conference on Quality Management. In: *TRANSPORT AND INFORMATION SECURITY, INFORMATION TECHNOLOGIES (IT&QM&IS)*, 2022, São Petersburgo, Federação Russa. **Anais [...]**. São Petersburgo, Federação Russa: IEEE, 2022, p. 173-176, DOI: 10.1109/ITQMIS56172.2022.9976803.

MARITIME BATTERY FORUM. MBF Ship registro. Disponível em: <<<https://www.maritimebatteryforum.com/ship-register>>>. Acesso em: 07 de junho de 2023.

MESSENGER, R. A.; ABTAHI, A. Photovoltaic Systems Engineering, Third Edition. 3rd edition ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.

MOLLAND, Anthony F.; TURNOCK, Stephen R.; HUDSON, Dominic A. **Ship resistance and propulsion**. Cambridge university press, 2017.

MANCHERI, N. A. *et al.* Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 142, n. July 2018, p. 101–112, 2019. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.11.017.

MELO, F. R. A geopolítica das terras raras. **Carta Internacional**, v. 12, n. 2, p. 219-243, 2017. DOI: 10.21530/ci.v12n2.2017.634.

Men'shenin, A.S.; Grigor'ev, M.A. Improving the Specific Mass and Dimensions of Synchronous Reluctance Electric Drives. *Russ. Electr. Eng.* **2018**, 89, 228–233

MOBILIDADE ELÉTRICA E PROPULSÃO EFICIENTE - PROMOB-E. **Eletropostos instalação de equipamentos de recarga para grandes demandas**. 2020. Disponível em: <https://www.pnme.org.br/biblioteca/eletropostos-instalacao-de-equipamentos-de-recarga-para-grandes-demandas/>. Acesso em: 3 jul. 2022.

MOISEIENKO, I.; DRONYUK I.; MOYSEYENKO, I. Responsibility Social Monitoring as The Sustainable Development Basis. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DECISION AID SCIENCES AND APPLICATION (DASA)*, 2020, Sakheer, Bahrain. **Anais [...]**. Sakheer, Bahrain: IEEE, 2020, p. 122-126. DOI: 10.1109/DASA51403.2020.9317288.

M. Salehifar, G. Putrus, D. Gao, V. Dargahi and P. Barras. High efficiency single stage dual output smart battery charger: Marine application. *International Conference for Students on Applied Engineering (ICSAE)*, Newcastle Upon Tyne, UK, 2016, pp. 242-247, doi: 10.1109/ICSAE.2016.7810196.

MURATALIYEV, M. *et al.* Synchronous Reluctance Machines: A Comprehensive Review and Technology Comparison. *Proceedings of the IEEE*, v. 110, n. 3, p. 382-399, mar. 2022. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3145662.

MANUAL DA EMBARCAÇÃO TRIBO KAYAPÓS. Fonte Confidencial.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY - NREL. **Calculadora PVWatts®**. 2022. Disponível em: <https://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php>. Acesso em: 10 dez 2022.

NEWELL, J. M.; YOUNG, S. S. Beyond Electric Ship, **Transactions IMarE**, v. 112, 2000.

NOGUEIRA, ELAINE GUEDES. Jogos como recurso didático no processo de alfabetização de estudantes do ensino fundamental em uma escola municipal de Cachoeiro de Itapemirim/ES. 2022.

NLEBEDIM, I. C.; KING, Alexander H. Addressing criticality in rare earth elements via permanent magnets recycling. **Jom**, v. 70, p. 115-123, 2018.

MCNULTY, T.; HAZEN, N.; PARK, S. Processing the ores of rare-earth elements. **MRS Bulletin**, v. 47, p. 258–266, mar. 2022. DOI: 10.1557/s43577-022-00288-4.

NSBA. **Review of All-Electric and Hybrid-Electric Propulsion Technology for Small Vessels**. Nova Scotia: Boatbuilders Association, 2015.

NORATO, L. T. **Propulsão elétrica**. 2013. Monografia (Aperfeiçoamento par Oficiais de Máquinas) - Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2013.

N. HASHEMNIA E B. ASAEI. Estudo comparativo da utilização de diferentes motores eléctricos em veículos eléctricos," *2008 18ª Conferência Internacional sobre Máquinas Eléctricas*, Vilamoura, Portugal, 2008, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICELMACH.2008.4800157.

OBAID W.; HAMID, A.-K.; GHENAI, C. Hybrid PEM Fuel-Cell-Diesel-Solar Power System Design with Fuzzy Battery Management System and Weather Forecasting for Electric Boats. *In: INTERNATIONAL RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY CONFERENCE (IRSEC)*, 6., 2018, Rabat, Morocco. **Anais [...]**. Rabat, Morocco: IEEE, 2018a, p. 1-7, DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702862.

OBAID W.; HAMID, A.-K.; GHENAI, C. Hybrid Power System Design for Electric Boat with Solar Irradiance Forecasting. *In: INTERNATIONAL RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY CONFERENCE (IRSEC)*, 6., 2018, Rabat, Morocco. **Anais [...]**. Rabat, Morocco: IEEE, 2018b, DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702854.

OCEANVOLT. **Sistemas de energia e propulsão marítimos híbridos e elétricos**. 2022. Disponível em: <https://oceanvolt.com/#homePage>. Acesso em: 10 out. 2022.

OGBOMO, O. *et al.* A review of photovoltaic module technologies for increased performance in tropical climate. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1225-1238, ago. 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.109.

OLIVEIRA; M. A. N. de. **Análise da viabilidade de embarcações solares para transporte de passageiros**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrrj-peno_upl//THESIS/6000229/2013_mestrando_mauricio_aguilar_nepomuceno_de_oliveira_20200405215808739.pdf. Acesso em: 3 jul. 2022a.

OLIVEIRA; M. A. N. de; SUEMITSU, W. I. Uma análise do desenvolvimento dos barcos solares. **Conex. Ci. e Tecnol.**, Fortaleza/CE, v. 11, n. 3, p. 120-133, nov. 2017b. DOI: <https://doi.org/10.21439/conexoes.v11i3.897>

OLIVEIRA. P. R. de. **A importância da propulsão híbrida na indústria naval**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Graduação Tecnológica em Construção Naval) - Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, 2018c. Disponível em: <http://www.uezo.rj.gov.br/tcc/cn/Paulo-Renato-De-Oliveira.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2022c.

PARK, N. G. Organometal perovskite light absorbers toward a 20% efficiency low-cost solid-state mesoscopic solar cell. **The Journal of Physical Chemistry Letters**, v. 4, n. 15, p. 2423-2429, 2013. DOI: [10.1021/jz400892a](https://doi.org/10.1021/jz400892a).

PLAN; BUILD; BENEFIT. solar-electric boats. Índia, **Editora:** Emerging Technology News. **Número de páginas:** 136 páginas.

PAUL, P. A History of Electric Ship Propulsion Systems [History]. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 26, n. 6, p. 9-19, nov./dez. 2020. DOI: 10.1109/MIAS.2020.3014837.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: Cepel-Cresesb, 2014.

PINTO, FABIO ANTÔNIO VIEIRA. **Um modelo para dimensionamento de postos de recarga rápida para veículos elétricos baseado no perfil de carga das baterias de Íon de lítio**. 2016. Tese de Doutorado. Ph. D. thesis.

PLATAFORMA NACIONAL DE MOBILIDADE ELÉTRICA- PNME. **1º anuário Brasileiro da mobilidade elétrica**. Brasília, DF: PNME, 2020. Disponível em: <https://www.pnme.org.br/biblioteca/1o-anuario-brasileiro-da-mobilidade-eletrica/>. Acesso em: 3 jul. 2022.

POSKOVIC, E. *et al.* A Different Approach to Rare-Earth Magnet Recycling. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING AND 2018 IEEE INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS EUROPE (EEEIC / I&CPS EUROPE)*, 2018, Palermo, Italy. **Anais [...]**. Palermo, Italy: IEEE, 2018, p. 1-6. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8494531.

PORRU, M. *et al.* Electrification of Leisure Boats: a commercial State-of-the-Art. *In: VEHICLE POWER AND PROPULSION CONFERENCE (VPPC)*, 2020, Spain. **Anais [...]**. Spain: IEEE, 2020, p. 1-6, DOI: 10.1109/VPPC49601.2020.9330879.

PINHO, J. T. *et al.* **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2008.

PERSPECTIVAS económicas mundiales. [S. l.]: Banco Mundial, 2020. Disponível em: <https://www.bancomundial.org/es/publication/global-economic-prospects>. Acesso em: 2 jul. 2022.

RADEMAKER, Jelle H.; KLEIJN, René; YANG, Yongxiang. Recycling as a strategy against rare earth element criticality: a systemic evaluation of the potential yield of NdFeB magnet recycling. **Environmental science & technology**, v. 47, n. 18, p. 10129-10136, 2013.

REIS, MARCELO CESAR DOS *et al.* Projeto conceitual de embarcação solar para o transporte público de passageiros. 2016.

RAPHAEL, E. *et al.* Células solares de perovskitas: uma nova tecnologia emergente, **Quím. Nova**, v. 41, p. 61-74, 2018. DOI: 10.21577/0100-4042.20170127.

REVANKAR, S. T. Chemical energy storage. *In: BINDRA, H.; REVANKAR, S. Storage and Hybridization of Nuclear Energy: Techno-economic integration of Renewable and Nuclear Energy*. Cambridge, MA: Academic Press, 2019. p. 177-227.

RIDDLE, M. *et al.* Global critical materials markets: An agent-based modeling approach. **Resources Policy**, v. 45, p. 307-321, 2015. DOI 10.1016/j.resourpol.2015.01.002.

SANTOS, B. de O.; PASSOS, R. S. **Sistemas de armazenamento de energia e geração distribuída: um estudo de caso**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia

Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2021.

SANTOS, C. J. C. **A disputa sino-estadunidense na OMC e a importância das terras raras na indústria de defesa**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência Política) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/12077/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20Carlos%20Jos%c3%a9%20Cr%c3%aasp%20Santos.pdf>. Acesso em: 3 set. 2022.

SAGAWA, M. *et al.* New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe. **Journal of Applied Physics**, v. 55, n. 6, p. 2083-2087, 1984.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS - SEBRAE. Fluxo de caixa. *In: ANÁLISE e Planejamento Financeiro: Manual do participante*. Brasília, DF: SEBRAE, 2011. Disponível em: https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/0_fluxo-de-caixa.pdf. Acesso em: 3 dez. 2022.

SHOKOOHYAR, S. *et al.* Sustainable transportation in practice: A systematic quantitative review of case studies. **Sustainability**, v. 14, n. 5, p. 2617, 2022. DOI 10.3390/su14052617

SNAITH, H. J. Perovskites: the emergence of a new era for low-cost, high-efficiency solar cells. **The journal of physical chemistry letters**, v. 4, n. 21, p. 3623-3630, 2013. DOI: [10.1021/jz4020162](https://doi.org/10.1021/jz4020162).

SPAGNOLO, G. S. *et al.* Solar-electric boat. **Journal of Transportation Technologies**, v. 2, n. 2, p. 144-149, 2012.

SILVEIRA, E. da. Barco autônomo. **Revista FAPESP**, n. 253, p. 82-83. mar. 2017. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2017/03/080-081_barco-solar_253-1.pdf. Acesso em: 3 jul. 2022.

SOUZA, A. C. S. P.; NASCIMENTO, M.; GIESE, E. C. Desafios para a extração sustentável de minérios portadores de terras raras. **HOLOS**, n.1, p. 1-23, 2019. DOI: [10.15628/holos.2019.8274](https://doi.org/10.15628/holos.2019.8274).

SUM, T. C.; MATHEWS, N. Advancements in perovskite solar cells: photo physics behind the photovoltaics. **Energy & Environmental Science**, v. 7, n. 8, p. 2518-2534, 2014.

SPRECHER, Benjamin *et al.* Life cycle inventory of the production of rare earths and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 7, p. 3951-3958, 2014.

TEOR, T. R.; ILYINA, I. A.; KULIBANOVA, V. V. The Influence of ESG-concept on the Reputation of High-technology Enterprises. *In: COMMUNICATION STRATEGIES IN DIGITAL SOCIETY SEMINAR (ComSDS)*, 2022, São Petersburgo, Federação Russa. **Anais**

[...]. São Petersburgo, Federação Russa: IEEE, 2022, p. 184-189, DOI: 10.1109/ComSDS55328.2022.9769074.

THANDASHERRY, S. **Solar electric boats: Plan, Build e Benefit.** Kerala: Emerging Technology News, 2021.

TOPALOGLOU, S. *et al.* Power management controller design for hybrid ship propulsion during transient operation. *In: CIMAC CONGRESS*, 28, 2016, Helsinki, Finland. **Anais [...]**. Helsinki, Finland, 2016. p. 1–9.

TORQUEEDO. Deep Blue drives for motorboats. 2022. Disponível em: <https://www.torqueedo.com/en/products/outboards/deep-blue>. Acesso em: 18 out. 2022.

TORQUEEDO. Produtos para Carregador rápido 1700 W - Potência 24-3500 (Potência 26-104). Disponível em: <https://www.torqueedo.com/en/products/accessories/charging-equipment/fast-charger-1700-w---power-24-3500--power-26-104-/2210-00.html>. Acesso em: 23 de junho de 2023.

TWINAMATSIKO, E.; KUMAR, D. Incorporating ESG in Decision Making for Responsible and Sustainable Investments using Machine Learning. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS AND RENEWABLE SYSTEMS (ICEARS)*, 2022, Tuticorin, Índia. **Anais [...]**. Tuticorin, Índia: IEEE, 2022, p. 1328-1334, DOI: 10.1109/ICEARS53579.2022.9752343.

T. COPPOLA, L. MICOLI AND M. TURCO. State of the art of high temperature fuel cells in maritime applications. *International Symposium on Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion SPEEDAM 2020*, pp. 430-435, Jun. 2020.

TRENCH, Allan; SYKES, John P. Rare earth permanent magnets and their place in the future economy. **Engineering**, v. 6, n. 2, p. 115-118, 2020.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Mineral Commodity Summaries. Disponível em: <http://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2022>. DOI - 10.3133/mcs2022.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). Human Development Report 2016: Human Development for Everyone. New York.

VARGAS, R. A. et al. Uma visão da tecnologia de células a combustível. *In: CONGRESSO DE ADMINISTRACAO DA FACULDADE ALFA CASTELO*, 1., 2006, Barueri. **Anais [...]**. Barueri: IPEN, 2006, p. 16-18. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/13238>. Acesso em: 17 nov. 2022.

VAN BIERT, V. *et al.* A review of fuel cell systems for marine applications. **J Sources of Energy**, v. 327, p. 345-364, set. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775316308631>. Acesso em: 4 set. 2022.

VENUGOPAL, A.; FERNANDEZ, F. M. Solar Powered Switched Reluctance Motor Drive for Hybrid Electric Boat. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR CONVERGENCE IN*

TECHNOLOGY (I2CT), 2018, Mangalore, India. **Anais [...]**. Mangalore, India: IEEE, 2018, p. 1-5, DOI: 10.1109/I2CT42659.2018.9058009.

VISHNUMURTHY, K. A.; GIRISH, K. H. A comprehensive review of battery technology for E-mobility. **Journal of the Indian chemical society**, v. 98, n. 10, p. 100173, 2021. DOI 10.1016/j.jics.2021.100173

WEG. Barco utilizado para o transporte escolar de comunidade ribeirinha conta com tecnologia WEG. Jaraguá do Sul: WEG, 2015a. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/barco-utilizado-para-o-transporte-escolar-de-comunidade-ribeirinha-Conta-com-tecnologia-weg>. Acesso em: 10 out. 2022.

WEG. Estação de Recarga para Veículos Elétricos (2ª Geração). 2022a. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/AE/pt/Drives/Infraestrutura-para-Mobilidade>. Acesso em: 24 set. 2022.

WEG. Soluções integradas para aplicações navais. 2019. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/solutions/marine>. Acesso em: 26 out. 2022.

WEG. Aplicação de Ímãs de Terras Raras em Máquinas Elétricas. 2022b. Disponível em: https://www.cdn.br/images/eventos/material/slides_sbtr/12-16h40_WEG_Motores-Aplicacao_de_%C3%ADmas_de_terras_raras_em_maquinas_eletricas-Sebastiao_Nau_WEG.pdf. Acesso em: 05 de dezembro de 2022.

WEG. Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG. 2015b. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hce/h39/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2022.

WEG. W22 IR3 Premium 200 cv 4P 315S/M 3F 220/380 V 60 Hz IC411 – TFVE – B5D. 2021a. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Usos-Gerais/W22/W22-/W22-IR3-Premium-200-cv-4P-315S-M-3F-220-380-V-60-Hz-IC411---TFVE---B5D/p/12994222>. Acesso em: 06 nov. 2022.

WEG. CVW800 Inversor para Tação Elétrica. 2021b. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h2e/hde/WEG-inversor-para-tracao-eletrica-CVW800-50093126-pt.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2022.

WHITMAN, E. C. The IPS Advantage. Electric Drive: A Propulsion System for Tomorrow's Submarine Fleet? **Seapower Magazine**, jul. 2001.

WALSH, J. Solar boat: Army evaluators record a plus for novel craft. *Science* (New York, NY), v. 147, n. 3665, p. 1559, 1965.

XSHORE, 2023. Disponível em: <https://xshore.com/eelex-8000>. Acesso em: 17 mar. 2023.

ZHANG, Y. *et al.* Emerging nonaqueous aluminum-ion batteries: challenges, status, and perspectives. **Advanced Materials**, v. 30, n. 38, p. 1706310, 2018. DOI 10.1002/adma.201706310.

Z. FAN, Z. WAN, Z. YANG AND S. CHEN. Design and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Motor Controller for Twin Oar Electric Boat. *International Conference on Computer Engineering and Intelligent Control (ICCEIC)*, Chongqing, China, 2021, pp. 138-142, doi: 10.1109/ICCEIC54227.2021.00035.