



ESCOLA SUPERIOR NAUTICA INFANTE D. HENRIQUE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MARÍTIMA

Mestrado em Engenharia de Máquinas Marítimas

Análise Técnico-Económica de Sistemas de Propulsão Elétrica e do seu Carregamento em Porto para Navios Mercantes

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia de Máquinas Marítimas

Ana Isabel Behrend Anjos Silva

Orientador: Prof. Sérgio Ribeiro Silva

Co-orientador: Prof. Luís Filipe Batista

2025

Agradecimentos

Desejo exprimir os meus agradecimentos a todos aqueles que, de alguma forma, permitiram que esta tese se concretizasse.

Gostaria de expressar a minha profunda gratidão à Escola Superior Náutica Infante D. Henrique e ao Departamento de Engenharia Marítima por todo o apoio durante o desenvolvimento desta dissertação.

Os meus sinceros agradecimentos ao Professor Sérgio Ribeiro Silva e ao Professor Luís Filipe Batista, pela orientação, paciência e valiosas contribuições ao longo desta jornada.

Agradeço também aos meus colegas de curso, que estiveram presentes para discussões construtivas e incentivo mútuo, e às instituições que forneceram os recursos necessários para a realização desta pesquisa.

Por fim, um agradecimento especial à minha família e amigos, pelo suporte emocional, incentivo e compreensão ao longo de todo o processo.

Resumo

O setor de transporte marítimo enfrenta o desafio duplo de reduzir o seu impacto ambiental e manter uma eficiência operacional melhorada relativamente ao transporte rodoviário, ferroviário e aeronáutico. Esta tese investiga as dimensões técnica, económica e ambiental da adoção da propulsão elétrica como alternativa aos sistemas diesel convencionais, visando fornecer informações valiosas aos armadores, autoridades portuárias e decisores políticos interessados em promover práticas sustentáveis no setor de transporte marítimo.

O estudo realiza uma análise técnica e económica abrangente da transição para sistemas de propulsão elétrica em navios mercantes. Para isso, são compilados dados detalhados junto a armadores nacionais e estrangeiros, incluindo informações sobre custos de aquisição (CAPEX) e custos operacionais (OPEX) de sistemas de propulsão convencionais em comparação com os sistemas elétricos.

Além disso, o estudo aborda questões relacionadas com o carregamento elétrico nos portos e avalia o impacto económico desta transição energética, fornecendo uma visão mais completa da viabilidade da adoção de sistemas de propulsão elétrica. Este trabalho contribui para a tomada de decisões estratégicas no setor marítimo e promove a sustentabilidade e eficiência energética no transporte marítimo global.

Do estudo efetuado concluiu-se que a transição para propulsão elétrica na indústria marítima traz benefícios significativos. Apesar do elevado investimento inicial, as análises financeiras demonstram existir um retorno positivo a médio e longo prazo. Esse retorno é impulsionado pela redução nos custos operacionais, pela maior eficiência energética e pela diminuição do uso de combustíveis fósseis.

Para além dos benefícios económicos, a propulsão diesel elétrica com fornecimento de energia híbrido reduz em média 34% as emissões dependendo da operação do navio em estudo, aumentando a viabilidade económica e contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

As conclusões evidenciam que a adoção de propulsão elétrica não é apenas economicamente viável, como também traz benefícios ambientais substanciais. Assim a indústria marítima segue na direção certa ao alinhar-se com as metas globais de sustentabilidade e eficiência energética definidas pela União Europeia.

Índice

Capítulo 1: Introdução	1
1.1. Antecedentes e Contexto.....	1
1.2. Objetivos da Investigação	2
1.3. Âmbito e Significado.....	3
Capítulo 2: Evolução da Propulsão Marítima e Sistemas de Propulsão Elétrica	5
2.1. Evolução da Propulsão Marítima	5
2.2. Sistemas de Propulsão com Energia Elétrica.....	5
2.2.1. Propulsão Mecânica Convencional com Utilização de Baterias	6
2.2.2. Propulsão Diesel-elétrica com Fornecimento Híbrido de Energia	6
2.2.3. Propulsão Híbrida com Distribuição DC	7
2.2.4. Propulsão Apenas com Armazenamento de Energia Elétrica.....	8
2.2.5. Armazenamento Distribuído	9
2.3. As Baterias.....	10
2.3.1. Construção e Funcionamento	12
2.3.2. Utilização em Instalações Elétricas	13
2.3.3. Sistema de Controlo	15
2.3.4. Segurança e Riscos.....	15
2.3.5. Baterias vs Outros Combustíveis Marítimos	21
2.4. Sistemas Híbridos	23
2.4.1. Vantagens da Propulsão Híbrida em Navios	24
2.5. Infraestruturas de Carregamento em Porto	24
2.5.1. Energia de Terra.....	24
2.5.2. Energia de Terra com Utilização de Baterias	25
2.5.1. Troca das Baterias do Navio	26
2.5.2. Geradores Portuários	27
2.5.3. Adaptação das Infraestruturas Portuárias	28
Capítulo 3: Análise de Reequipamento a Meio de Vida.....	31
3.1. Tipo de Navio	31
3.2. Sistema de Propulsão Diesel-elétrico	32
3.4. Contentor de Armazenamento de Energia.....	32

3.4.1. Componentes do Contentor de Armazenamento de Energia	33
3.4.2. Compartimento ESU	35
3.4.3. Compartimento ESC	36
3.5. Sistema de Gestão de Energia Híbrido.....	38
3.5.1. Redução de Picos de Carga - PTO.....	38
3.5.2. Modo Gerador - PTO.....	39
3.5.3. Modo Carregamento – PTI.....	39
3.5.4. Sistema de Gestão das Cadeias das Células (SMM).....	39
3.7. Análise de Risco	41
3.6.1. Análise de Risco do Sistema de Armazenamento de Energia.....	41
Capítulo 4: Controlo de Emissões e Consumo de Combustível	45
4.1. Determinação das Emissões de CO ₂	45
4.1.1. Em Porto.....	45
4.1.2. Em Trânsito	49
4.1.3. Em Posicionamento Dinâmico	53
4.1.3. Em Espera.....	56
4.2. Eficiência Energética	58
4.2.1. Índice de Eficiência Energética (EEDI)	59
4.2.2. Índice de Eficiência Energética dos Navios Existentes (EEXI).....	59
4.2.3. Indicador Anual Operacional da Intensidade de Carbono (CII)	60
4.3. Plano de Gestão da Eficiência Energética dos Navios (SEEMP) e Indicador Operacional de Eficiência Energética (EEOI).....	60
4.3.1. SEEMP	61
4.3.2. EEOI	62
Capítulo 5: Análise de Investimento e Retorno	65
5.1. Métricas Financeiras	65
5.1.1. Valor Atual Líquido.....	65
5.1.2. Taxa Interna de Retorno (IRR)	67
5.2. Avaliação de riscos.....	68
5.3. Análise SWOT	69
Capítulo 6: Avaliação do Impacto Ambiental	71
6.1. Potencial de Redução das Emissões.....	71

6.2. Conformidade com o Anexo VI da MARPOL	71
6.2.1. Óxidos de Enxofre	71
6.2.2. Óxidos de Azoto	72
6.2.3. Emissões de Gases de Efeito Estufa	72
6.3. Análise do Ciclo de Vida das Baterias Marítimas.....	73
6.3.1. Extração e Produção	73
6.3.2. Uso e Operação	73
6.3.3. Reciclagem.....	73
6.4. Implicações para a Sustentabilidade	73
Capítulo 7: Discussão e Conclusão	75
7.1. Principais Conclusões	75
7.3. Implicações para o Setor de Transporte Marítimo	76
7.4. Recomendações Políticas e Direções Futuras	76
7.5 Conclusão final.....	76
Referências Bibliográficas	77

Índice de figuras

Figura 1 - Propulsão mecânica com utilização de baterias [7]	6
Figura 2 - Propulsão Diesel-elétrica com Fornecimento Híbrido de Energia [7].....	7
Figura 3 - Sistema híbrido com distribuição DC [7].....	8
Figura 4 - Propulsão apenas com armazenamento de energia elétrica [7]	8
Figura 5 - Propulsão híbrida com baterias distribuídas [7]	9
Figura 6 – Carga e descarga da bateria [7]	12
Figura 7 - Célula / Módulo / Cadeia / Grupo de Armazenamento de Energia [15]	13
Figura 8 - Densidade de Energia	23
Figura 9 – Postos de carregamento para navios na Noruega [24]	29
Figura 10 - Localização do contentor de armazenamento de energia [8][15]	33
Figura 11 - Componentes do contentor de armazenamento de energia [15]	34
Figura 12 - Sistema de refrigeração da ESC [15]	37
Figura 13 - Parâmetros de trabalho da cadeia [15].....	40
Figura 14 - Contactor principal [9]	40
Figura 15 – Emissões em porto	47
Figura 16 - Eletricidade consumida em porto	49
Figura 17 - Emissões em trânsito.....	51
Figura 18 - Emissões por milha percorrida	53
Figura 19 - Emissões em DP	55
Figura 20 - Emissões em standby.....	57
Figura 21 - Fluxo de caixa do investimento ao longo da vida útil do ESSC	67
Figura 22 - Limite de emissões NOx [38]	72

Índice de tabelas

Tabela 1 - Diferentes tipos de baterias [10], [11], [12], [13]	10
Tabela 2 – Especificações técnicas do navio em estudo	31
Tabela 3 – Características do grupo eletrógeno	32
Tabela 4 - Especificações técnicas do motor de propulsão principal.....	32
Tabela 5 - Componentes do contentor de armazenamento de energia [15].....	34
Tabela 6 - Especificações técnicas do ESSC [15]	35
Tabela 7 - Características do transformado trifásico [15].....	36
Tabela 8 - Características da drive para ligação de energia de terra [15]	37
Tabela 9 - Consumo de MGO e emissões de CO ₂ em porto antes e depois da instalação do ESSC	46
Tabela 10 – Consumo de energia de terra em [kWh] antes e depois da instalação do ESSC...	48
Tabela 11 - Consumo de MGO e emissões de CO ₂ em trânsito antes e depois da instalação do ESSC	50
Tabela 12 - Emissões de CO ₂ em trânsito por milha percorrida antes e depois da instalação do ESSC	52
Tabela 13 - Consumo de MGO e emissões de CO ₂ em DP antes e depois da instalação do ESSC	54
Tabela 14 - Consumo de MGO e emissões de CO ₂ em standby antes e depois da instalação do ESSC	56
Tabela 15 - Comparação do EEXI antes e depois da instalação do ESSC	59
Tabela 16 – Comparação do EEOI antes e depois da instalação do ESSC	63
Tabela 17 - Indicadores financeiros em 2020	65
Tabela 18 - Poupanças Operacionais	66
Tabela 19 - Custos Operacionais	66
Tabela 20 - Análise SWOT do Investimento	69

Definições e Abreviaturas

AC – Corrente Alternada
ASOG – Diretrizes Operacionais Específicas da Atividade
BMS – Sistema de Gestão da Bateria
BS – Troca de Baterias
CAMO – Modo de Operação de Atividade Crítica
CAPEX – Despesas de Capital
CF – Fluxo de Caixa Anual
CID – Dispositivos de Interrupção de Corrente
CII – Indicador Anual Operacional da Intensidade de Carbono
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de carbono
DC – Corrente Contínua
DNV - *Det Norske Veritas*
DP – Posicionamento Dinâmico
ECA – Zona de Controlo de Emissões
EEDI – Índice de Eficiência Energética
EEXI - Índice de Eficiência Energética dos Navios Existentes
EMS / PMS – Sistema de Gestão de Energia
EMSA – Agência Europeia de Segurança Marítima
ESC – Conversor de Armazenamento de Energia
ESSC – Contentor do Sistema de Armazenamento de Energia
ESU – Sistema de Armazenamento de Energia
EU – União Europeia
GEE – Gases com Efeito de Estufa
IEC - Comissão Eletrotécnica Internacional
IMO – Organização Marítima Internacional
KPI – Indicadores de Performance
LCO – Óxido de Lítio-Cobalto
LEL – Limite Inferior de Explosividade
LFP – Fosfato de Ferro de Lítio
LMO – Óxido de Lítio-Manganês
LTO – Óxido de Lítio-Titânio
MARPOL – Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios
MCR – *Maximum Continuous Rating*
MGO – Gasóleo Marítimo
NMC – Níquel Manganês Cobalto
mi – Milha Náutica
NOx – Óxidos de Azoto

OPEX – Despesas Operacionais
OPS – Fonte de Alimentação de Terra
PSV – *Platform Supply Vessel*
PTC – Coeficiente de Temperatura Positivo
PTI – *Power Take In*
PTO – *Power Take Off*
SBC – Carregamento da Bateria em Terra
SEEMP – Plano de Gestão de Eficiência Energética do Navio
SMM - Sistema de Gestão das Cadeias das Células
SOC – Estado da Carga
SOH – Estado de Saúde
SOLAS - Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar
SPB – Banco de Potência em Terra
SWOT – Strenghts, Weaknesses, Opportunities, Threats
t – Tonelada
TIR – Taxa de Retorno Interna
VAL – Valor Atual Líquido
VDC – Tensão de Corrente Contínua

Capítulo 1: Introdução

1.1. Antecedentes e Contexto

O sector marítimo é, desde há muito, um componente vital do comércio e transporte globais, ligando os vários continentes e permitindo a troca de bens e transporte de pessoas. No entanto, o sector enfrenta desafios profundos no século XXI, principalmente no que diz respeito à sustentabilidade ambiental e eficiência operacional. A Organização Marítima Internacional (IMO) estima que o transporte marítimo seja responsável por aproximadamente 2,2% das emissões globais de gases com efeito de estufa (GEE), tornando imperativo que o sector reduza a sua pegada ambiental. Simultaneamente, as pressões económicas e a evolução da regulamentação estão a impulsionar a procura de soluções inovadoras para manter a competitividade e, em simultâneo, cumprir os objetivos de sustentabilidade.

Em resposta a estes desafios, esta tese efetua uma exploração abrangente dos sistemas de propulsão elétrica/híbrida no transporte marítimo. A propulsão elétrica representa uma via promissora para reduzir as emissões, aumentar a eficiência energética e potencialmente diminuir os custos operacionais. No entanto, a sua integração na indústria marítima é complexa e multifacetada, exigindo uma análise exaustiva das dimensões técnica, económica e ambiental.

A IMO tem um papel fundamental na regulamentação do sector marítimo global. Em 2018, a IMO adotou a Estratégia Inicial para a Redução de Emissões de Gases com Efeito de Estufa provenientes de navios [1], que visa reduzir as emissões de carbono do transporte marítimo internacional em pelo menos 40% até 2030, em comparação com os níveis de 2008, e reduzir as emissões absolutas de GEE em pelo menos 50% até 2050.

Na União Europeia, o pacote legislativo *Fit for 55*, parte integrante do *European Green Deal* [2], estabeleceu metas ambiciosas para reduzir as emissões de GEE em pelo menos 55% até 2030 relativamente aos níveis de 1990. Este pacote inclui propostas específicas para o sector marítimo, como a inclusão do transporte marítimo no Sistema de Comércio de Emissões da UE (mercado de carbono implementado pela União Europeia com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa de forma económica e eficiente) e a exigência de uma maior eficiência energética e uso de combustíveis sustentáveis.

O *European Green Deal*, é a estratégia de crescimento da UE que visa transformar a Europa no primeiro continente neutro em carbono até 2050. Este acordo inclui uma série de iniciativas políticas e regulamentares que visam promover a sustentabilidade em todos os setores, incluindo o transporte marítimo. Entre as medidas destacam-se o aumento do investimento em tecnologias verdes e a criação de um quadro regulamentar que suporte a transição para uma economia de baixo carbono.

A integração de sistemas de propulsão elétrica/híbrida no transporte marítimo é uma resposta direta a estas diretivas e metas. Ao adotar tecnologias mais limpas e eficientes, o sector marítimo

pode não apenas reduzir as suas emissões de GEE, mas também aumentar a sua competitividade no mercado global. A conformidade com as regulamentações da IMO e as iniciativas da UE como o *Fit for 55* [3,4] e o *European Green Deal* [2], é crucial para a sustentabilidade a longo prazo do sector.

1.2. Objetivos da Investigação

Esta investigação está incluída no mestrado de Engenharia de Máquinas Marítimas realizado na Escola Superior Náutica Infante D. Henrique. A motivação para estudo baseia-se no atual desenvolvimento de navios mais sustentáveis, mas rentáveis para os armadores e fretadores. Na investigação foram utilizados conhecimentos obtidos teoricamente e a bordo de diversos navios.

Nesta dissertação, efetua-se uma revisão da literatura, abrangendo vários tipos de sistemas de propulsão elétrica para navios, infraestruturas portuárias de carregamento e práticas marítimas sustentáveis. Uma revisão robusta e abrangente da literatura constitui a pedra angular desta investigação. Para obter informações sobre os sistemas de propulsão elétrica no transporte marítimo, a metodologia começa com uma análise sistemática do conhecimento e da investigação existentes neste domínio. A revisão da literatura abrange uma série de fontes, incluindo artigos académicos, artigos de conferências, livros e relatórios da indústria.

Para possibilitar uma análise mais rigorosa da utilidade dos sistemas híbridos foram recolhidos e analisados dados sobre os custos (CAPEX e OPEX) associados a um navio com propulsão diesel-elétrica reequipado a meio de vida com um contentor de armazenamento de energia.

Com os dados obtidos anteriormente, efetuou-se uma análise técnica comparativa entre a propulsão híbrida e os sistemas diesel convencionais, incluindo o cálculo do Índice de Eficiência Energética (EEDI) e do Plano de Gestão da Eficiência Energética dos Navios (SEEMP), de forma a garantir o cumprimento da regulamentação ambiental internacional, nomeadamente a Convenção MARPOL 73/78 [5].

Para verificar se foi um bom investimento foi realizada uma avaliação das implicações financeiras da transição para sistemas de propulsão híbrida, incluindo os custos associados às infraestruturas portuárias de carregamento. Esta análise avaliou o Valor Atual Líquido (VAL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) do investimento.

Não só é importante analisar o retorno do investimento como a análise do impacto ambiental da propulsão elétrica, particularmente em termos de redução de emissões e as implicações para a sustentabilidade.

Por último são discutidas as principais conclusões, as implicações para o setor marítimo e apresentadas recomendações com base nos resultados da investigação.

1.3. Âmbito e Significado

Este estudo centra-se nos sistemas de propulsão elétrica no transporte marítimo, com ênfase nos seus aspetos técnicos, económicos e ambientais. O âmbito abrange tanto os navios convencionais de propulsão diesel, como os seus homólogos elétricos, com o objetivo de fornecer uma análise abrangente das vantagens, desafios e implicações da adoção da propulsão elétrica.

A importância deste estudo reside no seu potencial para informar e orientar as partes interessadas no sector marítimo, incluindo armadores, autoridades portuárias, decisores políticos e investigadores. Ao explorar a viabilidade e os benefícios da propulsão elétrica, esta investigação contribui para os esforços em curso para reduzir as emissões de GEE, melhorar a eficiência operacional e promover a sustentabilidade no sector marítimo.

Capítulo 2: Evolução da Propulsão Marítima e Sistemas de Propulsão Elétrica

2.1. Evolução da Propulsão Marítima

A evolução da propulsão marítima tem sido marcada por avanços significativos ao longo dos anos. Os sistemas de propulsão tradicionais, predominantemente motores diesel, têm sido a “espinha dorsal” da indústria. Provaram ser fiáveis, eficientes e capazes de deslocar os navios em longas distâncias. No entanto, as consequências ambientais, nomeadamente em termos de emissões de gases com efeito de estufa e de poluição atmosférica, levaram à necessidade de explorarem-se tecnologias alternativas.

Os sistemas de propulsão elétrica estão na vanguarda desta evolução. Oferecem o potencial para revolucionar o transporte marítimo, reduzindo as emissões e aumentando a eficiência energética. Surgiram vários tipos de sistemas de propulsão elétrica, incluindo sistemas baseados em baterias elétricas, híbridos e células de combustível. Estes sistemas estão a ganhar paulatinamente quota de mercado à medida que a indústria marítima procura alinhar-se com os objetivos globais de sustentabilidade [6].

2.2. Sistemas de Propulsão com Energia Elétrica

Os sistemas de propulsão com energia elétrica podem ser classificados em várias categorias, cada uma com as suas próprias vantagens e desvantagens. A propulsão elétrica por bateria, baseia-se em baterias de grande capacidade para alimentar os motores elétricos. Esta abordagem elimina as emissões diretas, tornando-a vantajosa para o ambiente. Os sistemas híbridos combinam combustíveis fósseis tradicionais com energia elétrica, oferecendo flexibilidade e emissões reduzidas. Os sistemas baseados em células de combustível, por outro lado, utilizam hidrogénio ou outros combustíveis para produzir eletricidade para a propulsão, oferecendo um potencial de operação com emissões zero [6].

Tradicionalmente, os navios têm sistemas de energia elétrica separados para os serviços de hotelaria e funções auxiliares, enquanto a propulsão é assegurada por um motor de combustão, conhecido como motor principal. A energia elétrica para os sistemas do navio é gerada através de grupos eletrógenos, que consistem em alternadores elétricos acionados por motores de combustão interna, designados por motores auxiliares. Refere-se, em primeiro lugar, o caso particular e muito interessante dos navios de cruzeiro, que foram os primeiros a utilizar um sistema propulsor totalmente elétrico face aos consumos elevados dos serviços de hotelaria de bordo em comparação com a potência utilizada exclusivamente para a propulsão. As vantagens traduzem-se no caso dos navios cruzeiro em maior eficiência energética do navio, assim como as condições de conforto a bordo associadas à instalação de um sistema propulsor totalmente elétrico com menores vibrações e ruído.

Em relação aos navios mais modernos, estes incorporam cada vez mais energia elétrica para a propulsão, especialmente os que têm necessidades variáveis de energia (por exemplo, navios de abastecimento *offshore*). Esta alteração levou inclusivamente à adoção de vários métodos de integração de sistemas de baterias no sistema de fornecimento de energia elétrica do navio, de modo a aumentar a eficiência e adaptar o navio às necessidades de mudanças operacionais [7].

2.2.1. Propulsão Mecânica Convencional com Utilização de Baterias

Neste caso, figura 1, as baterias servem para aumentar a eficiência energética do navio e gerir melhor as suas cargas elétricas. São particularmente eficazes na suavização das cargas elétricas dos serviços de hotelaria e na gestão de grandes flutuações ou picos de carga. Quando as flutuações de carga são reduzidas, existe a possibilidade de diminuir o número de motores auxiliares utilizados.

Além disso, em cenários em que a carga tem a capacidade de regenerar energia, como no caso das gruas, as baterias podem captar e armazenar essa energia. É importante ter em conta que a eficiência global da carga-descarga na viagem de ida e volta é determinada pela eficiência da bateria e do conversor. Esta configuração também permite a utilização de baterias como fontes de energia de reserva, assegurando o fornecimento contínuo de energia sem a necessidade de usar grupos geradores [7].

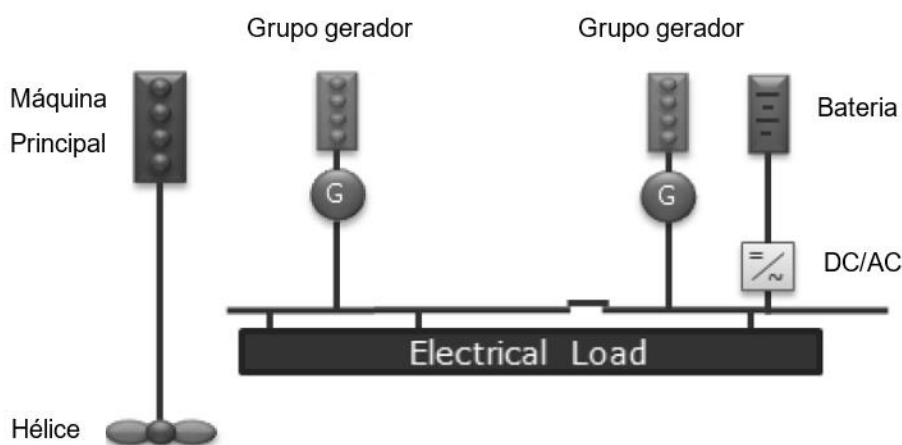


Figura 1 - Propulsão mecânica com utilização de baterias [7]

2.2.2. Propulsão Diesel-elétrica com Fornecimento Híbrido de Energia

Na propulsão diesel-elétrica, figura 2, as baterias estão perfeitamente integradas no sistema de energia do navio. Neste caso, a principal função das baterias é fornecer energia aos grandes motores de propulsão. O navio tem a flexibilidade de funcionar em vários modos, incluindo a utilização exclusiva de baterias, a utilização exclusiva de grupos eletrogéneos ou uma combinação de ambos, funcionando em paralelo.

Além disso, as baterias desempenham um papel crucial como fonte de energia para a propulsão, suavizando efetivamente as variações de carga dos grupos geradores. A introdução deste

sistema híbrido de baterias oferece várias vantagens, incluindo a redução dos níveis de ruído e vibração no navio. Além disso, permite operar com emissões zero ao entrar em porto, desde que o sistema de baterias possua a energia e potência necessárias para realizar a propulsão [7].

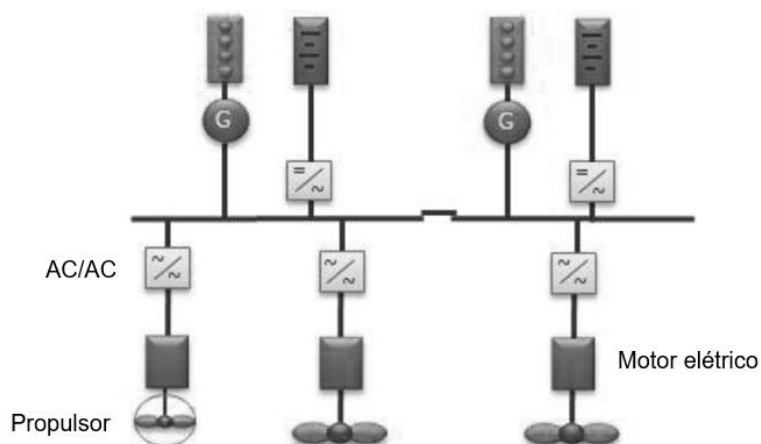


Figura 2 - Propulsão Diesel-elétrica com Fornecimento Híbrido de Energia [7]

2.2.3. Propulsão Híbrida com Distribuição DC

No sistema híbrido com distribuição de corrente contínua, figura 3, é utilizada uma combinação de componentes elétricos e mecânicos. Esta configuração inclui um sistema híbrido de baterias com capacidade de ligação ao quadro elétrico e incorpora um sistema de distribuição de corrente contínua. Uma vantagem significativa do sistema de distribuição DC é a sua capacidade de ajustar a velocidade dos motores principais dos geradores de acordo com a carga, otimizando o consumo de combustível e minimizando a pegada ambiental. Esta abordagem adaptativa garante que os geradores funcionem nos seus níveis mais eficientes em termos de consumo de combustível.

A solução híbrida elétrica/mecânica desta configuração proporciona flexibilidade, permitindo a produção de energia elétrica a partir do motor principal ou de energia de propulsão a partir de grupos geradores e baterias. Além disso, é possível fornecer potência de propulsão adicional quando o motor principal e as baterias funcionam em paralelo [7].

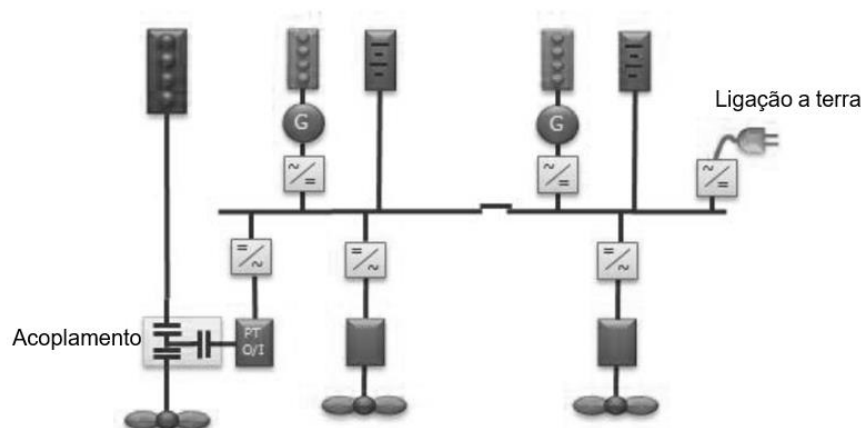


Figura 3 - Sistema híbrido com distribuição DC [7]

2.2.4. Propulsão Apenas com Armazenamento de Energia Elétrica

No sistema de propulsão totalmente elétrica, figura 4, o navio depende inteiramente das baterias para a propulsão. O carregamento destas baterias é facilitado por um conversor AC/DC, que pode estar situado no navio ou em terra. Esta configuração requer o carregamento a partir de uma fonte de energia elétrica externa. É particularmente adequada para utilização em ferries com características específicas, tais como autonomia reduzida associada a viagens limitadas e repetitivas, como travessias entre ilhas. No entanto, é essencial que a infraestrutura em terra suporte o carregamento adequado entre travessias ou a troca rápida de baterias de modo a garantir operações ininterruptas.

Para aumentar a fiabilidade, as regras de classe exigem a instalação de dois sistemas de baterias independentes e redundantes. Esta redundância assegura a existência de uma fonte de energia de propulsão de reserva em caso de falha de um dos sistemas, aumentando a segurança e a fiabilidade do sistema de propulsão do navio [7].

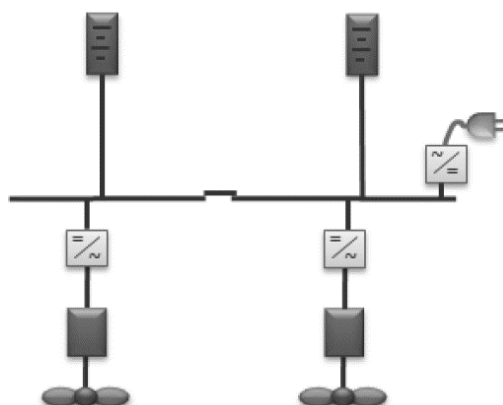


Figura 4 - Propulsão apenas com armazenamento de energia elétrica [7]

2.2.5. Armazenamento Distribuído

Um dos desafios associados à propulsão elétrica é a eficiência, principalmente devido aos conversores elétricos necessários para controlar a velocidade, o binário e a potência do motor de propulsão. Estes conversores conduzem normalmente a perdas de energia. No entanto, uma forma de atenuar estas perdas é utilizar o conceito de bateria distribuída.

No conceito de bateria “distribuída”, figura 5, as baterias estão distribuídas e associadas aos conversores de propulsão. Esta disposição apresenta várias vantagens, nomeadamente a redução das perdas de energia. Ao distribuir as baterias desta forma, as perdas associadas aos conversores elétricos podem ser reduzidas contribuindo para uma melhoria global da eficiência do sistema de propulsão elétrica.

Cada unidade de propulsão funciona de forma independente, extraindo energia diretamente da sua fonte de bateria associada. Isto pode ser particularmente vantajoso para navios com elevadas exigências de fiabilidade de propulsão, tais como navios de posicionamento dinâmico redundantes (DP2 e DP3). A redundância é crucial no posicionamento dinâmico para garantir um funcionamento ininterrupto e fiável.

Para assegurar a conformidade regulamentar, os requisitos para a capacidade e potência da bateria para posicionamento dinâmico são frequentemente especificados nas regras e regulamentos da classe [8]. O cumprimento destas regras é fundamental para garantir uma operação segura e fiável de navios com capacidades de posicionamento dinâmico.

O conceito de bateria distribuída oferece uma solução para melhorar a eficiência dos sistemas de propulsão elétrica, na medida em que aumenta a fiabilidade e a redundância das unidades de propulsão, tornando-o particularmente adequado para navios com requisitos exigentes. Esta abordagem alinha-se com os objetivos de otimização da utilização de energia e do desempenho operacional na indústria marítima [7].

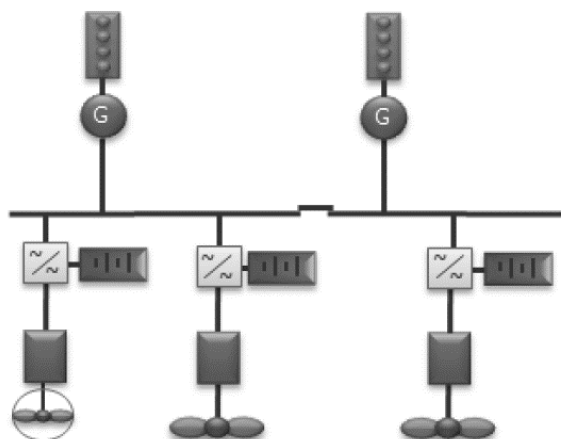


Figura 5 - Propulsão híbrida com baterias distribuídas [7]

2.3. As Baterias

As baterias são componentes essenciais nos sistemas de propulsão elétrica, armazenando a energia necessária para a operação dos motores elétricos.

Os sistemas de baterias oferecem flexibilidade e eficiência, armazenando e utilizando a energia elétrica, otimizando o funcionamento do motor. Por consequência, reduzem as emissões de carbono quando o navio está em porto, melhoram o rendimento da instalação e aumentam a fiabilidade do sistema, fornecendo energia de reserva com consumo nulo de combustível de origem fóssil.

Historicamente, as baterias eram de utilização limitada no sector marítimo *offshore* devido à baixa potência específica, à densidade energética e à curta duração de vida. As baterias de chumbo-ácido e de níquel-cádmio, comuns para o fornecimento ininterrupto de energia e de energia limpa, não tinham capacidade para uma utilização contínua de alta potência. No entanto, o aparecimento de baterias de íões de lítio com maior densidade de energia e capacidade de ciclo revolucionou as aplicações marítimas. Desenvolvidas na década de 1980 e comercializadas na década de 1990, as baterias de íões de lítio, inicialmente para eletrónica de consumo, alimentam agora aplicações de maior energia. Esta mudança tecnológica está a revolucionar a indústria marítima, aumentando a eficiência, reduzindo as emissões e melhorando a fiabilidade [9].

As baterias de íões de lítio oferecem várias vantagens aos armadores. Servem múltiplos objetivos, nomeadamente o suporte de energia de reserva, assegurando operações ininterruptas do navio. Além disso, permitem que os navios operem com zero emissões de gases com efeito de estufa, funcionando como a única fonte de eletricidade. Esta conformidade com os rigorosos regulamentos portuários é essencial para as zonas ambientalmente sensíveis (ECA). As baterias de íões de lítio também se destacam por absorver de picos de corrente substituindo os grupos geradores a bordo para fornecer eficientemente cargas de energia de elevada procura [9].

As baterias, devido à sua elevada densidade energética e custo reduzido, são o principal equipamento de armazenamento de energia a bordo dos navios. Esta característica torna-as essenciais para viabilizar sistemas de propulsão elétrica e híbrida. Contudo, é importante realizar uma análise comparativa dos diferentes tipos de baterias disponíveis atualmente no mercado, com ênfase nos vários tipos de baterias de íões de lítio, dado o seu domínio neste setor [10].

Tabela 1 - Diferentes tipos de baterias [10], [11], [12], [13]

Tipo de Bateria	Densidade Energética [Wh/kg]	Densidade do fluxo energético [W/kg]	Eficiência [%]	Duração [ciclos]	Custo de aquisição [€/kWh]
Chumbo	30-50	75-300	70-90	500-1000	70
Níquel-Cádmio	50-75	150-300	60-65	2000-2500	300

Fosfato de Ferro de Lítio	90-160	2000-10000	90-95	2000-10000	300 – 600
Níquel-Manganês-Cobalto	150-220	1000-3000	85-92	1000-3500	200 – 400
Óxido de Lítio-Manganês	100-150	700-2000	85-90	700-2000	250 – 500
Óxido de Lítio-Titânio	70-110	2000-10000	90-98	15000-20000	600 – 1000
Óxido de Lítio-Cobalto	140-190	400-1000	80-90	500-1500	200 – 500

Os dados apresentados na tabela 1 destacam as características específicas dos diferentes tipos de baterias, evidenciando as suas vantagens bem como as suas limitações. Em termos de densidade energética, as baterias de NMC e LCO sobressaem devido aos seus valores elevados, tornando-se adequadas para aplicações onde o espaço e o peso são fatores críticos. Por outro lado, as baterias de LFP possuem uma densidade energética moderada, mas compensam com maior durabilidade e segurança.

No que diz respeito à densidade do fluxo energético, as baterias de LFP e LTO destacam-se, dado que suportam cargas rápidas e descargas intensas, o que as torna mais indicadas para operações de alta utilização, como sistemas híbridos em navios. A eficiência energética é elevada em todas as tecnologias analisadas, com valores superiores a 85%. Entre elas, as baterias de LTO apresentam a maior eficiência, chegando a 98%, embora venha acompanhado de um custo inicial mais elevado.

Quando analisada a duração, medida em número de ciclos, as baterias de LTO são as melhores, com uma vida útil que pode alcançar até 20000 ciclos, superando em muito as outras opções. Em contraste, as baterias de LCO possuem a menor duração. Por fim, em termos de custo de aquisição, as baterias de LTO são as mais caras, refletindo sua superior durabilidade e eficiência. As baterias de NMC e LCO oferecem uma relação custo-benefício mais atraente para projetos de curto e médio prazo, enquanto as baterias de LFP equilibram custo, segurança e durabilidade.

As tecnologias de baterias mais antigas, como as de chumbo-ácido e níquel-cádmio, caracterizam-se por custos de aquisição mais baixos, mas apresentam uma densidade energética significativamente inferior às tecnologias modernas, como as baterias de lítio. A limitação da densidade energética implica maior peso e volume para o mesmo armazenamento de energia, tornando-as menos viáveis para aplicações marítimas. A evolução tecnológica, especialmente com o desenvolvimento das baterias de níquel-manganês-cobalto (NMC) e fosfato de ferro-lítio (LFP), foi motivada pela necessidade de soluções mais compactas, eficientes e seguras, apesar dos custos iniciais mais elevados. Essa transição reflete o investimento na procura e desenvolvimento de baterias com maior desempenho e em cumprimento com as

regulamentações ambientais rigorosas, justificando-se assim o custo adicional associado às novas tecnologias.

2.3.1. Construção e Funcionamento

As baterias modernas utilizadas em sistemas marítimos são geralmente de íon-lítio, conhecidas pela sua alta densidade energética e longa vida útil. O seu funcionamento baseia-se na movimentação de íões de lítio entre os elétrodos durante os ciclos de carga e descarga.

As baterias acima mencionadas são dispositivos eletroquímicos que armazenam energia elétrica facilitando as reações químicas de origem elétrica nos seus terminais positivo e negativo. São constituídas essencialmente por quatro componentes principais: cátodo, ânodo, eletrólito e separador. Cada componente de uma bateria de íões de lítio é essencial, uma vez que não pode funcionar quando um dos outros componentes está em falta.

Na figura 6 é possível identificar os vários componentes da bateria. O ânodo e o cátodo armazenam o lítio. O eletrólito transporta íões de lítio com carga positiva do ânodo para o cátodo e vice-versa através do separador. O movimento dos íões de lítio cria eletrões livres no ânodo, o que gera uma carga no coletor de corrente positiva. A corrente elétrica flui então do coletor de corrente através de um dispositivo que está a ser alimentado para o coletor de corrente negativo. O separador bloqueia o fluxo de eletrões no interior da bateria.

Enquanto a bateria está a descarregar e a fornecer uma corrente elétrica, o ânodo liberta íões de lítio para o cátodo, gerando um fluxo de eletrões de um lado para o outro. Quando se liga o dispositivo, acontece o contrário, os íões de lítio são libertados pelo cátodo e recebidos pelo ânodo [14].

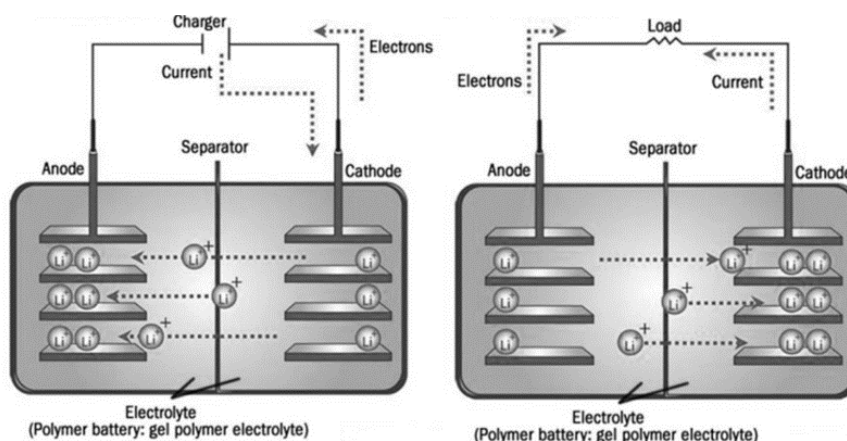


Figura 6 – Carga e descarga da bateria [7]

As baterias de íões de lítio degradam-se inevitavelmente com a utilização devido a ciclos repetidos de carga e descarga. Esta degradação tem impacto na sua capacidade de acumular íões no elétrodo (condutor elétrico) negativo. O estado (SOH) serve como um indicador do estado geral da bateria e da sua capacidade de fornecer o desempenho especificado em comparação

com uma bateria nova. Isto significa essencialmente uma redução na capacidade total de armazenamento ou libertação de energia da bateria.

As características de uma bateria, incluindo o seu armazenamento de energia e a velocidade de carga/descarga, dependem da composição da célula. As baterias podem basear-se em vários produtos químicos de iões de lítio, cada um com características diferentes. Nos sistemas de baterias marítimas, que consistem em milhares de células, é crucial que cada célula funcione de forma consistente com as outras. Isto exige um controlo e operação eficazes por parte do sistema de gestão das baterias e um fabrico de células uniforme e de alta qualidade [7].

Definições importantes

- Célula: A célula é a unidade eletroquímica mais pequena.
- Módulo: Conjunto de células que inclui algum nível de controlo eletrónico e/ou monitorização. É a unidade mais pequena que pode ser isolada eletricamente num sistema de bateria montado.
- Cadeia: A unidade mais pequena com a mesma tensão que o nível do sistema (por exemplo, células ou módulos ligados em série).
- Conversor: Um sistema de baterias funciona electroquimicamente utilizando energia contínua DC. Por isso, necessita de um conversor de energia para fazer a interface com o sistema de distribuição AC do navio.

É possível identificar os componentes principais na figura 7.



Figura 7 - Célula / Módulo / Cadeia / Grupo de Armazenamento de Energia [15]

2.3.2. Utilização em Instalações Elétricas

As baterias são integradas nos sistemas elétricos dos navios, fornecendo energia tanto para a propulsão como para outras necessidades operacionais. A sua utilização pode ser otimizada através de Sistemas de Gestão de Energia (EMS), que equilibram a carga e descarga das

baterias para maximizar a eficiência e a vida útil. As células da bateria são organizadas eletricamente através de combinações de ligações em série e em paralelo para criar a bateria. Normalmente, várias células são ligadas em paralelo para formar um módulo, sendo estes módulos frequentemente ligados em série para produzir o nível de tensão desejado, que pode variar entre 12 [V] e mais de 100 [V]. Estes módulos ligados em série são frequentemente dispostos em paralelo para obter a capacidade energética necessária para o sistema.

A integração das baterias nos sistemas de propulsão elétrica permite uma operação mais eficiente e flexível. Uma vantagem significativa desta tecnologia reside na flexibilidade do arranjo da casa da máquina, dado que, com a eliminação do veio propulsor tradicional, o layout interno do navio pode ser otimizado, permitindo uma maior libertação de espaço e proporcionando uma maior versatilidade no projeto e na disposição dos equipamentos.

As baterias podem fornecer energia adicional durante picos de carga ou operar de forma independente durante manobras em porto, onde a utilização de motores de combustão é menos desejável devido a emissões e ruído. Os Sistemas de Gestão de Baterias (BMS) são cruciais para monitorizar e gerir o estado das baterias. Estes garantem que cada célula funciona dentro dos limites de segurança, monitorizando parâmetros como tensão, corrente, temperatura e estado de carga (SOC). O BMS também protege contra sobrecarga, sobre descarga e curto-circuitos, prolongando a vida útil das baterias e garantindo a segurança do sistema.

Os sistemas de carregamento são projetados para maximizar a eficiência energética e minimizar o tempo de inatividade. A energia pode ser armazenada durante períodos de baixa procura ou quando estão disponíveis fontes renováveis, como painéis solares ou turbinas eólicas. Esta energia armazenada pode então ser utilizada durante picos de procura, melhorando a eficiência global do sistema elétrico do navio. A utilização de baterias em instalações elétricas de navios oferece várias vantagens operacionais, incluindo a redução de emissões, melhoria de eficiência energética e a redução de ruído.

Apesar das vantagens, a integração de baterias em navios apresenta desafios que precisam ser considerados. A gestão térmica, por exemplo, exige sistemas eficazes de arrefecimento para evitar sobreaquecimento das baterias. O peso e o espaço ocupados pelas baterias podem afetar o projeto a nível de estabilidade e a capacidade de carga do navio. Antes da instalação é necessária uma análise da robustez estrutural do navio. Além disso, o custo inicial elevado das baterias e dos sistemas de gestão associados pode ser um obstáculo, apesar dos benefícios a longo prazo.

O futuro da tecnologia de baterias em navios está intimamente ligado ao desenvolvimento de novas baterias e sistemas de gestão mais avançados. Inovações contínuas nesta área prometem aumentar a densidade energética, reduzir custos e melhorar a segurança, facilitando a adoção mais ampla e eficiente das baterias em aplicações marítimas.

2.3.3. Sistema de Controlo

O sistema de controlo eletrónico da bateria é normalmente designado por Sistema de Gestão da Bateria (BMS) e desempenha um papel crucial na monitorização e controlo dos diversos parâmetros de funcionamento da bateria.

O BMS é responsável pela monitorização da tensão da célula, da temperatura da célula ou módulo e da corrente na cadeia, avaliando os sinais e fornecendo indicações quando as operações do sistema precisam de ser reduzidas. Associados ao BMS estão vários sensores de tensão e temperatura vitais para monitorizar a bateria e garantir o seu funcionamento ótimo e seguro. A monitorização da tensão de cada célula permite a deteção precoce de riscos de segurança ou anomalias de desempenho. A deteção eficaz da temperatura é essencial para arrefecer as células e detetar possíveis anomalias. O sistema de controlo deve ainda indicar a tensão do sistema, a tensão máxima, mínima e média da célula bem como a temperatura máxima, mínima e média da célula ou módulo. Determina ainda o estado de carga SOC e o estado da bateria SOH. O estado de carga indica a quantidade de carga ou energia armazenada numa bateria relativamente à sua capacidade máxima. O SOC é geralmente expresso percentualmente, variando de 0% (totalmente descarregada) a 100% (totalmente carregada). Manter um SOC adequado é importante para prolongar a vida útil da bateria e garantir que está pronta para ser usada quando necessário. O SOH representa o grau de degradação da bateria ao longo do tempo [7].

De acordo com o fabricante para evitar uma descarga muito elevada da bateria o sistema de controlo abre o circuito de consumo de energia da bateria quando o SOH chegar aos 5% mantendo-a em carregamento até aos 100% [15].

O BMS monitoriza e equilibra ativamente a tensão das células que compõem as baterias. Diferenças significativas na tensão das células aumentam o risco de sobrecarga ou descarga excessiva durante o funcionamento. Se tais discrepâncias forem detetadas, o BMS corrige a tensão e reequilibra as células, através do controlo ativo de circuitos resistivos. O BMS deve proteger o sistema de baterias contra o excesso de corrente, a alta ou baixa tensão e o sobreaquecimento, desligando a bateria ou as cadeias necessárias.

2.3.4. Segurança e Riscos

A utilização de propulsão elétrica introduz novos desafios e riscos que precisam de ser geridos. A sociedade classificadora, fornece diretrizes rigorosas para garantir a segurança e a mitigação de riscos associados a esses sistemas.

Os sistemas de propulsão elétrica apresentam riscos específicos que diferem dos sistemas de propulsão convencionais. Estes incluem riscos elétricos, onde a alta tensão e correntes elétricas podem resultar em choques elétricos, incêndios ou explosões. A sociedade classificadora enfatiza a importância de um isolamento adequado, proteção contra sobrecargas e sistemas de

paragem de emergência. Além disso, componentes elétricos e baterias de lítio podem representar riscos significativos de incêndio, sendo recomendada a utilização de materiais retardadores de chama e sistemas de deteção e supressão de incêndio no local da instalação. Outra preocupação é o sobreaquecimento, pois motores elétricos e baterias podem sobreaquecer, especialmente sob cargas pesadas. Devem ser implementados sistemas de arrefecimento eficazes e monitorização contínua da temperatura. A integração de novos sistemas elétricos também pode afetar a robustez do navio, sendo necessário realizar análises de integridade estrutural para garantir que as modificações não comprometam a segurança do navio.

Para mitigar os riscos associados aos sistemas de propulsão elétrica, a sociedade classificadora sugere várias medidas tais a utilização de cabos de alta qualidade com isolamento reforçado e sistemas de proteção contra curtos-circuitos. A implementação de sistemas avançados de monitorização para detetar falhas e anomalias em tempo real é essencial. Além disso, é crucial garantir que a tripulação receba formação adequada sobre os novos sistemas e procedimentos de segurança. Deve estabelecer-se um programa rigoroso de manutenção preventiva para todos os componentes elétricos e sistemas associados, bem como projetar sistemas com redundância suficiente para garantir que uma falha num componente não resulte na perda total da propulsão.

A DNV estabelece normas específicas para a certificação e operação de sistemas de propulsão elétrica, incluindo regras para propulsão elétrica e armazenamento de energia (DNV-RU-SHIP Pt.6 Ch.2), normas técnicas para sistemas de baterias em aplicações marítimas (DNVGL-ST-0359) e regras para sistemas de energia elétrica, incluindo requisitos de proteção e segurança (DNVGL-RU-SHIP Pt.4 Ch.8) [8].

Além dos riscos já descritos, é importante destacar os desafios relacionados com a gestão térmica nas baterias de alta potência. A fuga térmica, que pode ser desencadeada por sobreaquecimento ou falhas internas, é uma preocupação crucial nos sistemas de baterias marítimas. O desenvolvimento de sistemas avançados de refrigeração, incluindo soluções líquidas e materiais de alta condutividade térmica, pode mitigar os riscos de incêndio e explosão. Estas soluções são particularmente relevantes para contentores de armazenamento de energia em navios, como os descritos nesta tese [10].

A transição para sistemas de propulsão elétrica oferece muitos benefícios para o setor marítimo, mas também exige uma abordagem rigorosa para a gestão de riscos.

2.3.4.1. Falha das Células

A falha interna das células nos sistemas de baterias pode ocorrer devido ao uso inadequado, onde a bateria é utilizada fora das suas especificações nominais. Este facto pode conduzir a uma rutura física na célula da bateria, resultando numa falha e apresentando riscos de segurança significativos ou até mesmo uma redução na vida útil.

Quando uma célula é sujeita a uma tensão de carga significativamente superior à permitida, o eletrólito no interior da célula pode decompor-se, gerando gases inflamáveis e tóxicos. Além disso, uma proporção crescente da energia introduzida é convertida em calor devido ao aumento da resistência interna da célula. O sobreaquecimento das células de íões de lítio pode levar a processos irreversíveis a partir dos 60°C. Se a temperatura exceder 80°C, a produção de gás acelera e as células podem aumentar de volume. A exposição a temperaturas superiores a 160°C resulta normalmente em fuga térmica, onde a temperatura da célula aumenta sem entrada de energia adicional, podendo levar a um incêndio da célula.

A descarga excessiva ou a utilização prolongada com um estado de carga (SOC) baixo, pode causar a rutura progressiva dos materiais dos elétrodos. Isto pode levar a que o coletor de corrente do ânodo se dissolva parcialmente no elétrodo. Quando a tensão é novamente aumentada, os íões dispersos no elétrodo podem precipitar-se em partículas metálicas, causando potencialmente um curto-circuito entre os elétrodos.

Para evitar estes modos de falha e garantir a segurança da bateria, o sistema de gestão da bateria desempenha um papel crucial. Este sistema monitoriza a tensão de cada célula e compensa fatores como a temperatura e a corrente de carga para calcular com precisão o estado de carga e a tensão. Esta função de monitorização e controlo atua como a principal medida preventiva contra a sobrecarga e a descarga excessiva das baterias [7].

Danos mecânicos no exterior da bateria geram também riscos significativos, incluindo a ocorrência de curto-circuitos numa ou mais células. Estes danos podem ser causados por impactos externos, vibrações excessivas ou falhas estruturais que comprometam a integridade do invólucro da bateria.

Quando uma célula sofre um dano físico, existe a possibilidade de formação de uma ponte condutora entre os elétrodos positivo e negativo, resultando num curto-circuito interno. Este fenómeno leva ao aquecimento localizado e, dependendo da gravidade, desencadeia reações em cadeia que resultam em fuga térmica. A falha mecânica, não afeta só a célula danificada, como pode também propagar-se para as células adjacentes, dependendo do grau de contenção e das medidas de segurança aplicadas ao sistema.

Os sistemas de armazenamento de energia devem ser projetados para suportar impactos externos e bem como outras formas de dano físico. Adicionalmente, é essencial que o sistema de gestão de bateria (BMS) monitorize continuamente parâmetros críticos, como a temperatura, a tensão e a corrente, e atue de forma a evitar que falhas as mecânicas evoluam para eventos catastróficos.

2.3.4.2. Curto-circuito

Os curto-circuitos internos nas células da bateria podem ocorrer quando se forma uma ponte condutora de eletricidade entre os elétrodos positivo e negativo da célula. Embora a maioria dos curto-circuitos internos não conduza a eventos térmicos, estes podem ocorrer caso se reúnam

condições específicas. Estas condições incluem uma impedância suficientemente elevada do curto-circuito interno para gerar calor, uma impedância suficientemente baixa para permitir um fluxo de corrente adequado e a durabilidade da ponte condutora para suportar o fluxo de corrente sem se partir. Além disso, o aquecimento deve ocorrer num local onde as temperaturas locais elevadas possam induzir reações em cadeia que resultem numa fuga térmica da célula.

Uma das causas mais comuns dos curto-circuitos internos é a contaminação ao nível da célula, muitas vezes originada no processo de fabrico. Esta contaminação, quando combinada com falhas de conceção da célula ou danos durante o serviço, pode produzir um curto-circuito, representando um risco significativo de aquecimento não detetado e não controlado ou de fuga térmica numa bateria de iões de lítio. Os fabricantes devem manter um forte enfoque na qualidade para reduzir a frequência dos eventos térmicos, o que introduz requisitos de conceção para proteção contra os piores cenários de falha.

É importante notar que a maioria dos curto-circuitos internos são benignos e podem resultar apenas num aumento da taxa de auto descarga, que pode ou não ser perceptível. Curtos-circuitos internos graves que podem levar a eventos térmicos são geralmente impossíveis de prever ou mitigar devido à sua baixa probabilidade. No entanto, para grandes sistemas de baterias, é essencial garantir que, mesmo no caso raro de um curto-circuito interno espontâneo ao nível da célula, o evento térmico seja limitado e não se espalhe por todo o sistema de baterias.

Existem meios disponíveis para proteger as células de resultados graves de curto-circuitos externos, tais como mecanismos de proteção interna, dispositivos de interrupção de corrente (CID), interligações célula a célula ou sistemas de proteção de módulos. A possibilidade de incluir medidas de proteção ao nível da célula depende do tipo e da construção da célula [7].

Definições importantes

- Dispositivos de interrupção de corrente (CID) – são componentes de segurança que desligam rapidamente a corrente elétrica em casos de sobrecarga ou curto-circuito, evitando danos ou incêndios. Estes dispositivos incluem disjuntores, fusíveis e interruptores e são essenciais para proteger equipamentos elétricos. Nos sistemas de baterias funcionam conjuntamente com os sensores de temperatura.

2.3.4.3. Aquecimento Externo ou Incêndio

Um incêndio externo à bateria representa um risco significativo para os sistemas de baterias, mesmo em sistemas com capacidades avançadas de gestão térmica e de energia. Embora os sistemas de arrefecimento ativo, especialmente os de base líquida, sejam eficazes na prevenção de temperaturas excessivas das baterias, podem não ser suficientes para atenuar totalmente o risco de incêndios externos. Por conseguinte, é crucial que a descrição de segurança aborde os potenciais efeitos de incêndios externos ou de aquecimento externo excessivo, e indique se a conceção do sistema levou em consideração esses riscos [7].

2.3.4.4. Potencial Libertação de Gases

Os sistemas de baterias de íões de lítio são normalmente selados e não produzem gases externos significativos durante o funcionamento normal. No entanto, em condições críticas, como sobrecarga ou sobreaquecimento, o eletrólito da bateria pode decompor-se, levando à formação de gases no interior da célula. A quantidade e a composição destes gases dependem de vários fatores, incluindo a química da célula, a tensão, a temperatura e o modo de falha. Estes gases são potencialmente tóxicos, inflamáveis e até explosivos.

Para lidar com estes riscos, é essencial identificar, avaliar e documentar os tipos e quantidade de gases que podem ser emitidos durante uma falha da bateria. Os sistemas de deteção e ventilação são fundamentais para gerir estes riscos. Os gases produzidos durante uma falha de uma célula de íões de lítio podem incluir hidrogénio, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e vários outros compostos. Os gases específicos emitidos dependem das circunstâncias da falha.

São necessários cálculos e testes para estimar o volume de gases inflamáveis que podem ser gerados durante uma falha. Isto inclui compreender a composição do eletrólito, as quantidades de gases esperadas e o número de células ou módulos envolvidos no evento. Fatores como o estado de carga, a temperatura e o modo de falha também influenciam a produção de gás. A dimensão da nuvem de gás inflamável, que determina o risco de incêndio e explosão, depende da taxa de emissão de gás e das condições de ventilação do espaço [7].

2.3.4.5. Fuga Térmica

A fuga térmica é um aumento rápido e perigoso da temperatura, geralmente superior a 20°C por minuto, causado por uma reação química exotérmica dentro de uma ou várias células. Este fenómeno conduz a um aumento interno da temperatura e da pressão, podendo derreter o separador e provocar um curto-circuito interno. À medida que a pressão aumenta para além da resistência mecânica do invólucro, a célula pode romper-se, com a temperatura da célula frequentemente a exceder os 200°C e podendo atingir picos de 680°C (o ponto de fusão do alumínio) ou mesmo 800°C durante um evento de fuga térmica.

Os diferentes tipos de células têm características de segurança variáveis, incluindo o dispositivo de interrupção de corrente, e podem libertar oxigénio à medida que o gás é expelido, o qual pode misturar-se com o ar circundante. As fontes de ignição podem ser faíscas da própria bateria, equipamento eletrónico ou temperaturas elevadas. A temperatura de autoignição dos solventes eletrolíticos comuns varia normalmente entre 440°C e 465°C. As consequências podem incluir incêndio, se a ignição ocorrer imediatamente, ou explosão seguida de incêndio se a ignição ocorrer mais tarde.

O risco de uma fuga térmica se espalhar para células ou módulos adjacentes, e potencialmente se propagar por toda a instalação da bateria, depende da configuração e dos sistemas de segurança da bateria [7].

2.3.4.6. Risco de Explosão

O risco de explosão num sistema de baterias está relacionado com a produção de gás e deve ser avaliado com base nos gases que podem ser libertados durante uma falha do sistema. Para avaliar este risco com precisão, é fundamental determinar a quantidade de gás que pode ser emitida e calcular o volume potencial da nuvem de gás, assumindo que o gás libertado forma uma mistura estequiométrica ideal. Estes dados devem basear-se em testes específicos das células em condições definidas, uma vez que podem ocorrer variações significativas entre diferentes fabricantes e químicos utilizados nas baterias.

É necessário projetar uma sala ou contentor que possa suportar pressões de explosão e instalar um sistema de ventilação eficaz para minimizar a probabilidade de explosões decorrentes de pequenas libertações de gás [7].

2.3.4.7. Sistemas Passivos de Combate a Incêndio

Os sistemas passivos de combate a incêndio a bordo desempenham um papel crucial na prevenção de incêndios e na contenção de riscos, especialmente em ambientes onde há manuseamento de materiais inflamáveis ou dispositivos eletrónicos. Atualmente, existem soluções como os materiais de contenção, sistemas de armazenamento e tecnologias avançadas de supressão.

Os materiais de contenção foram desenvolvidos para armazenar baterias de forma segura, estes materiais são projetados para minimizar os riscos associados a eventos térmicos ou falhas de dispositivos de armazenamento de energia. Destacam-se os agentes extintores para incêndios da classe D (metais) à base de minerais, compostos por grãos de vidro reciclado não cristalino, que possuem minúsculos poros internos capazes de absorver calor de forma eficiente, além de espumas retardantes de chama e barreiras térmicas de alta resistência, projetadas para isolar fontes de calor e evitar a propagação do fogo. Sublinha-se ainda a proibição da utilização de água como agente extintor deste tipo de incêndios da classe D.

No que diz respeito aos recipientes e sistemas de armazenamento, são utilizados contentores de segurança para as baterias, fabricados com paredes reforçadas e vedação hermética, ideais para o transporte e armazenamento seguro. São utilizadas caixas ignífugas, que retardam a propagação de chamas e são especialmente úteis para líquidos inflamáveis. Ou recipientes com isolamento térmico, que incluem várias camadas de material isolante para impedir o aquecimento de substâncias internas. Estes sistemas oferecem uma proteção contra incêndios e são especialmente projetados para limitar a propagação das chamas em situações críticas, garantindo a segurança em espaços confinados.

Algumas das soluções de supressão incorporam mecanismos complementares que contribuem para a mitigação de riscos em ambientes com maior probabilidade de incêndios, funcionando de forma integrada aos sistemas passivos. Utilizam-se sistemas de extinção por aerossol condensado, que libertam partículas finas para interromper as reações químicas do fogo, extintores automáticos equipados com sensores térmicos, que detetam rapidamente os aumentos de temperatura e libertam os agentes extintores de forma direcionada, bem como sistemas de supressão com gás inerte, que reduzem a concentração de oxigénio no ambiente, extinguindo os incêndios sem causar danos aos equipamentos sensíveis.

A combinação desses sistemas passivos com outras medidas de segurança permite melhorar significativamente a proteção contra os incêndios a bordo, especialmente em ambientes marítimos que exigem alta confiabilidade e prevenção contínua. [16]

2.3.5. Baterias vs Outros Combustíveis Marítimos

Os custos das baterias de íões de lítio para sistemas marítimos apresentam uma variedade significativa, sendo geralmente mais elevados do que os das baterias utilizadas em carros elétricos. Em 2024, o custo médio das baterias de íões de lítio pode chegar até 550 [€/kWh]. Este valor é quase quatro vezes superior ao preço das baterias para carros elétricos, que, em média, é de 127 [€/kWh] [17].

Para aplicações marítimas, os custos mais elevados são frequentemente atribuídos aos requisitos adicionais de segurança e desempenho. No entanto, inovações contínuas e a expansão da produção das baterias provavelmente contribuirão para a redução de preço no futuro.

As baterias de íões de lítio oferecem uma densidade de energia superior em comparação com outras tecnologias de baterias, embora seja inferior à do gasóleo marítimo. As baterias podem armazenar e fornecer energia de forma eficiente, mas enfrentam limitações em termos de capacidade total relativa ao peso e volume. A densidade de energia aproximada é de 150 a 250 [Wh/kg] [18].

O gasóleo marítimo, por outro lado, possui uma maior densidade de energia, permitindo armazenar uma quantidade significativa de energia num volume menor. Esta característica tem contribuído para sua preferência histórica no setor marítimo. A densidade de energia é aproximadamente de 9,7 a 12,5 [kWh/kg] [19].

No entanto, a escolha entre baterias de íões de lítio e combustíveis convencionais deve ser ponderada com base em diversos fatores, como o tipo de operação do navio, a sua autonomia, o impacto ambiental e os custos de manutenção.

Comparativamente ao gasóleo marítimo, as baterias de íões de lítio têm a desvantagem de requerer um espaço físico e um peso consideravelmente maior para armazenar a mesma quantidade de energia. Este é um fator limitante, especialmente em embarcações de grande

porte ou que operem em rotas de longa distância, onde a autonomia e o espaço para carga são críticos. Contudo, em operações de curta distância ou em portos, as baterias de íões de lítio mostram-se competitivas.

Além disso, a evolução tecnológica está constantemente a melhorar as características das baterias de íões de lítio. Os esforços em investigação e desenvolvimento estão focados em aumentar a sua densidade energética, melhorar a segurança e prolongar a vida útil, o que poderá no futuro diminuir a diferença de desempenho face aos combustíveis fósseis. A transição para uma maior eletrificação do setor marítimo depende também de inovações nos sistemas de armazenamento de energia, sendo previsível que, com o aumento da produção e a maturação da tecnologia, os custos das baterias de íões de lítio diminuam, tornando-as uma alternativa ainda mais viável.

Neste contexto, surgem também novas tecnologias de baterias que prometem superar algumas das limitações atuais. Um exemplo relevante são as baterias de ar-zinco, que estão a atrair interesse pela sua elevada densidade energética e pelo potencial de serem mais económicas e ecológicas. As baterias de ar-zinco utilizam o oxigénio do ar como reagente e oferecem uma densidade energética teórica muito superior às baterias de íões de lítio, podendo atingir cerca de 1300 [Wh/kg]. Esta característica confere-lhes um grande potencial para aplicações de armazenamento de energia a longo prazo em sistemas marítimos [20].

Contudo, as baterias de ar-zinco ainda estão em fase de desenvolvimento e enfrentam desafios técnicos, como a baixa eficiência em ciclos repetidos de carga e descarga e a degradação dos materiais. A sua integração em sistemas marítimos exigirá avanços significativos em termos de durabilidade, segurança e custo de produção. No entanto, caso estes obstáculos sejam superados, as baterias de ar-zinco poderão representar uma verdadeira revolução no setor marítimo, oferecendo uma alternativa ainda mais sustentável e com maior capacidade de armazenamento de energia do que as atuais baterias de íões de lítio.

Assim, ao comparar as baterias de íões de lítio com o gásóleo marítimo e outras alternativas emergentes, é crucial avaliar as necessidades específicas de cada aplicação. Para operações onde a sustentabilidade e a eficiência energética são prioritárias, as baterias de íões de lítio apresentam vantagens claras. Por outro lado, o gásóleo marítimo continua a ser uma opção dominante para operações de longa distância, até que soluções como as baterias de ar-zinco ou outras tecnologias avançadas consigam oferecer um compromisso mais equilibrado entre densidade de energia, custo e sustentabilidade ambiental. Na figura 8 é possível identificar as diferentes densidades de energia.

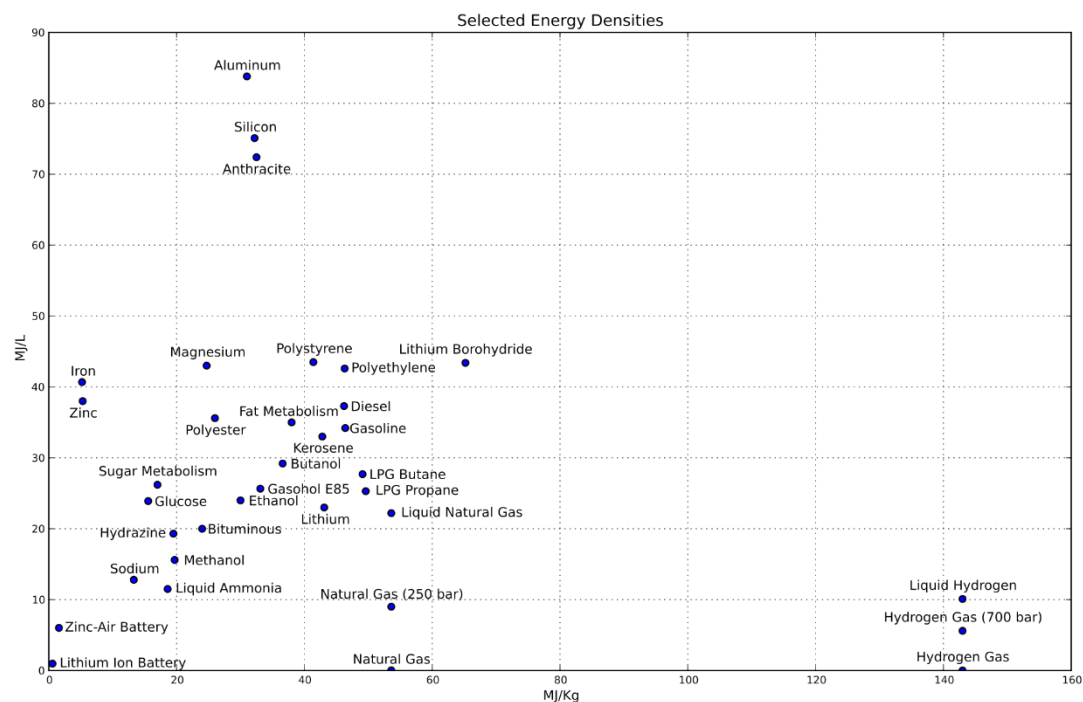


Figura 8 - Densidade de Energia

2.4. Sistemas Híbridos

Os sistemas de propulsão híbridos estão a tornar-se cada vez mais populares na indústria marítima como forma de melhorar a eficiência dos navios, reduzir as emissões e melhorar o desempenho geral. Estes sistemas combinam motores de combustão interna tradicionais (normalmente a diesel) com componentes de propulsão elétrica, sistemas de armazenamento de energia e sistemas de controlo avançados. Os sistemas de propulsão híbrida para navios dividem-se normalmente em 4 componentes principais, os motores de combustão interna, motores elétricos, os sistemas de armazenamento de energia e os sistemas de controlo e gestão de energia.

Os motores de combustão interna consomem normalmente gasóleo, fornecem a propulsão primária e servem como fonte de energia principal, ou são utilizados como geradores para propulsão diesel-elétrica. Os motores elétricos são utilizados como propulsão principal ou como fonte de energia secundária. As baterias, sistemas de armazenamento de energia armazenam energia gerada pelos motores principais e fornecem energia aos motores elétricos quando necessário. Os sistemas de controlo gerem a distribuição de energia entre os motores principais e os motores elétricos. Estes sistemas otimizam o desempenho, a eficiência e o controlo das emissões [21].

2.4.1. Vantagens da Propulsão Híbrida em Navios

Os sistemas híbridos podem melhorar significativamente a eficiência do consumo de combustível, permitindo que os navios operem na sua gama de potência mais eficiente. A utilização de propulsão elétrica em velocidades mais baixas ou durante o posicionamento dinâmico (DP) pode reduzir o consumo de combustível. Por conseguinte, a redução do consumo de combustível, leva a uma diminuição das emissões de gases de efeito de estufa e de outros poluentes, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para o cumprimento dos regulamentos relativos às emissões. A propulsão elétrica é mais silenciosa do que os motores diesel tradicionais, reduzindo a poluição sonora em ambientes marítimos sensíveis e aumentando o conforto a bordo. Os navios híbridos podem funcionar em vários modos, incluindo o modo totalmente elétrico para operações a baixa velocidade, reduzindo o desgaste dos motores e proporcionando maior flexibilidade nas manobras [21].

2.5. Infraestruturas de Carregamento em Porto

As infraestruturas de carregamento em porto são essenciais para fornecer energia para os sistemas de propulsão elétrica e híbrida. Estas infraestruturas podem incluir fornecimento de energia de terra, sistemas de carregamento de baterias, e instalações para a troca de baterias.

A poluição nas cidades próximas de portos mais movimentados é causada principalmente pelos navios durante estadia em porto. A utilização de energia de terra tem potencial para reduzir significativamente as emissões. Para facilitar a transição para a propulsão elétrica, é essencial o desenvolvimento de infraestruturas de carregamento nos portos. A energia em terra permite que os navios tenham acesso à eletricidade de que necessitam enquanto estão atracados, reduzindo a dependência dos geradores de bordo. Na sua publicação de 2022 [22], a EMSA emitiu orientações completas sobre a eletricidade em terra, que abrangem o equipamento, a tecnologia, o planeamento, as operações e aspetos relacionados com a sua utilização segura. Estas orientações constituem um recurso valioso para as autoridades e administrações portuárias que procuram implementar soluções de carregamento elétrico, promovendo práticas marítimas mais limpas e sustentáveis.

O esforço global para descarbonizar o setor do transporte marítimo aumenta a necessidade de desenvolvimento contínuo da energia em terra nos portos e de adaptação dos navios existentes. Existem alguns tipos de métodos para utilização de energia limpa em porto, que serão seguidamente apresentados.

2.5.1. Energia de Terra

O fornecimento de energia em porto, também conhecido como *On Shore Power Supply (OPS)*, é uma solução tecnológica e de infraestrutura concebida para fornecer energia elétrica aos navios em porto. Permite que os navios desliguem os seus motores auxiliares e utilizem eletricidade fornecida pelo porto, reduzindo os consumos e as emissões durante a estadia. É o

método mais convencional e já utilizado há muitos anos especialmente durante manutenções e doca seca dos navios, oferece vários benefícios, incluindo vantagens ambientais e poupança de custos, tornando-a uma opção cada vez mais popular no sector marítimo.

A utilização de energia de terra reduz significativamente as emissões de gases de efeito de estufa nas zonas portuárias, uma vez que os navios podem desligar os seus geradores de bordo e contar com eletricidade mais limpa, enquanto estão em porto. Isto ajuda a melhorar a qualidade do ar e a diminuir a pegada de carbono das operações portuárias. Elimina ainda o ruído gerado pelos geradores a bordo dos navios, contribuindo para um ambiente portuário mais silencioso e confortável para as comunidades vizinhas e para os trabalhadores portuários.

A utilização de OPS pode reduzir os custos para os operadores de navios, uma vez que a eletricidade em terra é muitas vezes mais barata e mais eficiente do que o funcionamento de geradores a bordo. Ao não utilizar geradores de bordo enquanto estão atracados, os navios consomem menos combustível, o que pode resultar em poupanças financeiras significativas para os operadores.

Os portos equipados com este tipo de infraestruturas dispõem de ligações elétricas, incluindo tomadas em terra, que permitem aos navios ligarem-se à rede local e obterem eletricidade. Este sistema está concebido para fornecer a tensão e a frequência adequadas exigidas por diferentes tipos de navios, garantindo a compatibilidade com vários tipos e dimensões de navios, podendo ser utilizado por uma vasta gama de navios, incluindo navios porta-contentores, navios de cruzeiro, ferries e outros.

Em suma, a fonte de alimentação em terra é uma solução ecológica e económica para fornecer energia elétrica aos navios enquanto estes estão atracados nos portos. Reduz as emissões, a poluição sonora e os custos operacionais, o que a torna uma tecnologia valiosa tanto para os operadores portuários como para os armadores que procuram melhorar os seus esforços de sustentabilidade [22].

2.5.2. Energia de Terra com Utilização de Baterias

Alguns portos estão a implementar sistemas de armazenamento de energia baseados em baterias para fornecer energia de terra. Estes sistemas podem armazenar energia renovável e fornecê-la aos navios conforme necessário.

A utilização de baterias em porto para fornecimento de eletricidade aos navios, é uma tecnologia emergente na indústria marítima que envolve a utilização de sistemas de baterias para fornecer energia elétrica aos navios enquanto estes estão atracados. Esta abordagem oferece várias vantagens, incluindo benefícios ambientais e eficiência operacional.

À semelhança da utilização de energia de terra este método reduz significativamente as emissões de gases de efeito de estufa e os poluentes atmosféricos, uma vez que os navios podem desligar os seus geradores de bordo e depender da energia da bateria enquanto estão

no porto. Isto contribui para um ar mais limpo e ajuda a cumprir os regulamentos ambientais. Eliminam ainda o ruído gerado pelos geradores a bordo, criando um ambiente portuário mais silencioso e agradável.

A utilização destas baterias pode conduzir a poupanças para os operadores de navios, uma vez que lhes permite evitar o funcionamento de geradores a bordo e, em vez disso, utilizar a eletricidade armazenada em baterias, que podem ser carregadas durante as horas de vazio, quando as tarifas de eletricidade são mais baixas. Os sistemas de baterias podem fornecer energia elétrica estável e de alta qualidade aos navios, garantindo uma fonte de energia fiável para os sistemas e equipamentos de bordo.

Este método de fornecimento de energia elétrica depende de sistemas de baterias de grande escala, utilizando frequentemente tecnologia avançada de baterias de íões de lítio, que podem armazenar e libertar energia elétrica de forma eficiente. Os portos equipados com este tipo de infraestrutura têm estações de carregamento de baterias que permitem aos navios ligarem-se e utilizarem esta energia enquanto estão atracados. Estes sistemas são concebidos para fornecer a tensão e a frequência adequadas exigidas por diferentes tipos de navios, garantindo a compatibilidade com vários tipos e dimensões de navios.

Estas baterias podem e devem ser integradas com fontes de energia renováveis, como a energia solar e/ou eólica, para carregar as baterias utilizando energia limpa, aumentando ainda mais os seus benefícios ambientais [22].

2.5.1. Troca das Baterias do Navio

Carregamento de baterias em terra com troca de baterias é um conceito inovador que combina a tecnologia de carregamento de baterias em terra com a troca de baterias para navios enquanto estes estão atracados em porto. O seu objetivo é abordar algumas das limitações e desafios associados ao carregamento convencional de baterias em terra e ao armazenamento de energia.

O conceito envolve uma estação de troca de baterias, quando um navio chega para atracar, as suas baterias gastas são retiradas e substituídas por outras totalmente carregadas. As baterias retiradas são depois carregadas na infraestrutura de carregamento do porto, muitas vezes utilizando fontes de energia limpas, como as energias renováveis. Este processo permite que os navios reabasteçam rapidamente o seu armazenamento de energia sem necessidade de tempos de carregamento prolongados.

A troca de baterias por ser mais rápida do que os métodos de carregamento tradicionais, permite que os navios retomem as suas operações mais rapidamente. Esta opção de troca de baterias permite ainda instalar a bordo sistemas de baterias mais pequenos, poupando potencialmente espaço e peso no navio. Para navios com tempos de estadia em porto mais curtos ou que necessitam de recarga frequente podem beneficiar da troca de baterias para manter operações contínuas.

À semelhança de outros métodos de carregamento em porto, a troca de baterias reduz as emissões e a poluição sonora nas zonas portuárias. A utilização de fontes de energia limpas para carregar as baterias trocadas aumenta ainda mais os benefícios ambientais.

Contudo, os portos precisam de investir em infraestruturas de troca de baterias, que incluam o armazenamento de baterias, equipamento de carregamento e pessoal especializado. Devem ainda garantir a compatibilidade entre diferentes navios e estações de troca de baterias para o sucesso deste conceito [22].

2.5.2. Geradores Portuários

Os geradores portuários, são sistemas de produção de energia elétrica localizados em instalações portuárias. Estes geradores são concebidos para fornecer eletricidade a vários componentes da infraestrutura de um porto, bem como aos navios.

Os geradores portuários podem variar em tamanho e capacidade. Podem incluir geradores a gásóleo, a gás natural ou mesmo geradores alimentados por fontes de energia renováveis, como a eólica ou solar. Alguns portos maiores podem ter centrais elétricas dedicadas com vários geradores para satisfazer a elevada procura de eletricidade do porto.

Os geradores portuários podem ser estrategicamente localizados para minimizar as perdas de transmissão, assegurando o fornecimento eficiente de eletricidade às instalações portuárias e aos navios. A utilização de geradores em terra para navios atracados pode reduzir significativamente as emissões atmosféricas e contribuir para um ar mais limpo em porto e nas suas imediações, ajudando a cumprir os regulamentos ambientais e os objetivos de sustentabilidade.

Os geradores portuários devem fornecer a tensão, frequência e capacidade adequadas para satisfazer as necessidades elétricas das infraestruturas portuárias e dos navios. São frequentemente utilizados sistemas de controlo avançados e equipamento de monitorização para gerir e distribuir a energia de forma eficaz.

Alguns portos com visão de futuro estão a explorar a integração de fontes de energia renováveis, como a energia eólica e solar, nos seus sistemas de geradores para reduzir as emissões de carbono e a dependência de combustíveis fósseis, como no porto de Copenhaga na Dinamarca. A Dinamarca sendo líder em energia eólica *offshore*, não poderia deixar que o porto da capital fosse exceção. Tem havido grande investimento em turbinas eólicas *offshore* para fornecer energia renovável às suas instalações e reduzir as emissões de carbono. Os portos têm investido na construção, manutenção e atualização da infraestrutura de geradores para garantir um fornecimento de energia fiável. A manutenção e a monitorização regulares são cruciais para evitar períodos de inatividade e garantir a disponibilidade contínua de eletricidade.

Os geradores portuários desempenham um papel crucial no apoio às operações dos portos e navios, com uma ênfase crescente na sustentabilidade ambiental e na redução da pegada

ecológica das atividades portuárias. À medida que a tecnologia avança e os regulamentos ambientais evoluem, é provável que as autoridades portuárias continuem a explorar formas mais limpas e eficientes de fornecer energia às suas instalações e aos navios que as visitam [22].

2.5.3. Adaptação das Infraestruturas Portuárias

A adaptação das infraestruturas marítimas, incluindo os portos, ao transporte marítimo ecológico é essencial para a transição para combustíveis de emissão zero. Esta transição requer o desenvolvimento de novas infraestruturas para fornecimento de energia elétrica a partir de terra, o que pode ser dispendioso. Os portos enfrentam o desafio de investir em infraestruturas sem a certeza de uma utilização futura ampla. Paralelamente, os armadores hesitam em investir em equipamentos a bordo sem infraestruturas terrestres adequadas [22].

Os portos devem obedecer à norma IEC 80005, que estabelece requisitos técnicos para garantir a segurança. Esta norma abrange aspetos como a capacidade de carga, a tensão elétrica, a proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos e a compatibilidade eletromagnética.

2.5.5.1. Apoios Governamentais Noruegueses e Enova

Dado os elevados custos de adaptação das infraestruturas portuárias, foram criados apoios governamentais para promover a eletrificação do transporte marítimo. A Enova, uma empresa governamental norueguesa, é responsável por promover a produção e o consumo de energia de forma ambientalmente responsável. O seu objetivo é estabelecer um mercado viável para a utilização de energia elétrica de terra, reduzindo as emissões de gases de efeito de estufa no transporte marítimo.

Nos últimos anos, a Enova tem disponibilizado concursos para apoiar a construção de infraestruturas portuárias, focando-se em agentes interessados em criar instalações elétricas acessíveis ao público. O apoio da Enova é direcionado para investimentos em infraestruturas elétricas nos portos noruegueses, com prioridade para projetos que apresentem modelos de negócio sustentáveis para a venda de eletricidade [23].

2.5.3.1. Infraestruturas Portuárias e Capacidade de Carregamento na Noruega

A imagem abaixo, figura 9, representa as instalações portuárias com fornecimento de energia elétrica de terra para navios. Alguns portos fornecem apenas energia a baixa tensão, enquanto outros já estão equipados com alta tensão para navios maiores. As instalações concluídas estão assinaladas a laranja, e as em desenvolvimento a verde. Atualmente, existem quatro locais na Noruega com capacidade para carregamento das baterias enquanto o navio carrega e descarrega. No entanto, existem mais seis locais em desenvolvimento [24].



Figura 9 – Postos de carregamento para navios na Noruega [24]

2.5.3.2. Linha de Financiamento para Armadores Noruegueses

Além do apoio ao desenvolvimento das infraestruturas portuárias, a Enova também disponibiliza uma linha de financiamento para que os armadores possam preparar os seus navios para a utilização preferencial de energia elétrica de terra sempre que estão em porto. Este financiamento visa incentivar a transição para práticas mais sustentáveis e a redução das emissões no setor marítimo.

A adaptação das infraestruturas marítimas para suportar o transporte ecológico é crucial para a sustentabilidade do setor. Os investimentos em novas infraestruturas, apoiados por financiamentos governamentais e iniciativas como a da Enova, são essenciais para garantir a transição para uma operação mais eficiente e ambientalmente responsável [25].

Capítulo 3: Análise de Reequipamento a Meio de Vida

3.1. Tipo de Navio

Os navios de apoio a instalações *offshore* fazem o abastecimento, manuseamento de âncoras e operações subaquáticas, e têm como cujo objetivo o transporte de mercadorias e pessoas para as instalações *offshore* (plataformas petrolíferas, eólicas, entre outras). Os navios *Offshore Support Vessel (OSV)* são projetados para que possam realizar operações avançadas em condições exigentes [26].

O navio analisado nesta tese é um OSV – DP II versátil, capaz de transportar carga geral, encanamentos, carga líquida e cimento. Além disso, tem capacidade para realizar operações de *stand-by/resgate*, cuja capacidade de acolhimento é de até 250 sobreviventes.

Este navio é movido por um sistema diesel-elétrico, composto por quatro grupos eletrógenos e é equipado com dois propulsores azimutais com rotação de 360° e passo variável, fornecendo uma potência total de 6 960 [kW] como propulsão principal.

Além disso, conta com um sistema de propulsão auxiliar que inclui três propulsores de proa, dois propulsores de túnel com 883 [kW] de potência cada, e um propulsor retrátil com 883 [kW] que complementam a sua capacidade de manobra.

A tabela 2 apresenta algumas das principais características do navio.

Tabela 2 – Especificações técnicas do navio em estudo [dados do armador]

Características	Valor	Unidade
Ano de construção	2009	-
Comprimento fora a fora	93	[m]
Boca	20	[m]
Calado médio	5	[m]
Arqueação bruta GT	4598	[t]
<i>Summer deadweight</i>	4100	[t]
Deslocamento	8213	[t]
Velocidade máxima	17	[nós]
Velocidade cruzeiro	10,4	[nós]
Potência	6960	[kW]
Tipo de combustível	MGO	
Capacidade e carga	4100	[t]
Capacidade hotel	29	[pax]

3.2. Sistema de Propulsão Diesel-elétrico

Um sistema de propulsão diesel-elétrico é um tipo de sistema de propulsão usado em navios, onde são usados motores diesel para gerar eletricidade que, por sua vez, alimentam os motores elétricos que fazem deslocar o navio. As principais características podem ser encontradas na tabela 3.

Tabela 3 – Características do grupo eletrógeno [Bergen Engines]

Motor diesel	Valor	Unidade
Potência nominal (MCR)	1920	[kW]
Velocidade nominal	900	[RPM]
Número de cilindros	6	-
Consumo específico	182	[g/kWh]
Consumo de combustível (MCR)	425	[l/h]
Gerador elétrico	Valor	Unidade
Potência ativa nominal	1825	[kW]
Eficiência	0,95	-
Potência de saída com FP = 0,8	2280	[kVA]

MCR – potência máxima em funcionamento contínuo dentro dos limites e condições de segurança especificados nas especificações técnicas.

O sistema de propulsão *Rolls-Royce Azipull* é um propulsor azimuthal com rotação de 360° e passo variável. Na tabela 4 apresentam-se algumas das suas principais características [27].

Tabela 4 - Especificações técnicas do motor de propulsão principal [Rolls-Royce]

Características	Valor	Unidade
Potência do motor	2200	[kW]
Rotação	0 – 1200	[RPM]
Potência do hélice (~5% perda)	2090	[kW]
Fonte de alimentação	3x690 / 60	[V / Hz]

3.4. Contentor de Armazenamento de Energia

O contentor de armazenamento de energia, figura 10, é utilizado para reduzir a necessidade de funcionamento dos geradores de bordo. Como o navio mantém a classe DP II existe uma redundância necessária na alimentação ao barramento principal. Caso ocorra uma falha num dos lados do barramento, o navio continua a poder operar com o outro lado. Este sistema de armazenamento de energia tem a possibilidade de carregar com energia de terra ou através dos geradores de bordo. A utilização de fontes de energia de terra quando o navio está em porto

permite reduzir a necessidade de produção de energia a bordo, e consequentemente reduzir as emissões.

O sistema está desenvolvido para que funcione com apenas uma alimentação externa de 24 [VDC], proveniente de uma bateria de reserva externa. Toda a restante alimentação necessária para todo o equipamento auxiliar é proveniente do grupo de armazenamento de energia. Caso não exista SOC suficiente, a alimentação é feita através do barramento principal do navio.

O projeto envolveu várias modificações e atualizações, incluindo ajustes no barramento principal do navio e a atualização do sistema de gestão de energia e o sistema de alarmes. No geral, este sistema integrado visa otimizar a gestão e a eficiência da energia no navio, fornecendo fontes de energia fiáveis e permitindo um equilíbrio inteligente da produção de energia a partir do ESSC, geradores e energia de terra, conforme necessário.

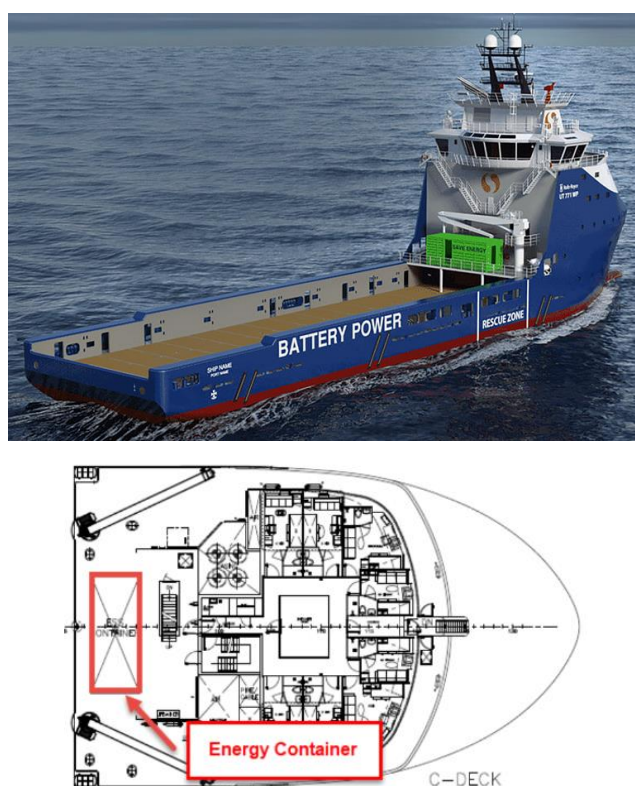


Figura 10 - Localização do contentor de armazenamento de energia [8][15]

3.4.1. Componentes do Contentor de Armazenamento de Energia

Os componentes principais do ESSC incluem o sistema de armazenamento de energia (ESU), o conversor de armazenamento de energia (ESC), transformadores e equipamentos auxiliares necessários para operar tanto a ESU quanto o ESC. Na figura 11 e tabela 5 é possível identificar todos os componentes e equipamentos instalados no contentor de armazenamento de energia [15].

Tabela 5 - Componentes do contentor de armazenamento de energia [15]

Item	Componente
1	Contentor
2	Ligações do armazenamento de energia
3	Conversor
4	Transformador
5	Unidade de controlo da <i>ESU</i>
6	Drive da ligação a energia de terra
7	Sistema de arrefecimento de propagação
8	Ar condicionado
9	Sistema fixo de combate a incêndio, NOVEC
10/11	Detetor ótico de incêndio
12	Detetor de gás
13	Sensor de fuga de água
14	Sensor de indicação de porta aberta do compartimento <i>ESU</i>
15	Sensor de indicação de porta aberta do compartimento <i>ESC</i>
16/17	Acionador manual de incêndio
18	Sistema de refrigeração
19	Ventilador

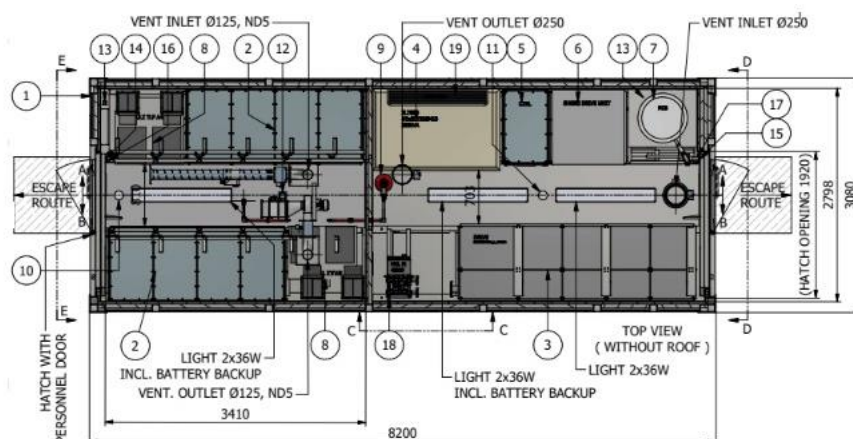


Figura 11 - Componentes do contentor de armazenamento de energia [15]

Este contentor divide-se em dois compartimentos, a *ESU* e a *ESC*. A *ESU*, unidade de armazenamento de energia, contém essencialmente as baterias de iões de lítio (7 cadeias) e os respetivos disjuntores.

A sala das baterias (*ESU*) é composta pelas células de iões de lítio, duas unidades de ar condicionado, detetor de gás, sensor de fuga de água e sensor indicativo de porta aberta.

Por outro lado, na divisão ESC é onde se encontram os dispositivos eletrônicos de potência, o conversor, os transformadores e o equipamento auxiliar necessário ao funcionamento do contentor de armazenamento de energia [15]. Algumas especificações são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Especificações técnicas do ESSC [15]

Características	Valor	Unidade
Capacidade	784	[kWh]
Corrente máxima	2198	[A]
Cadeias	7 x 112	[kWh]
Potência	1568	[kW]
Tensão	714 – 1000	[VDC]
Peso	36	[t]

3.4.2. Compartimento ESU

Por ser o compartimento que inclui as células iões de lítio, são necessárias medidas de segurança adicionais para que haja uma utilização segura para as pessoas e para o meio ambiente. Em determinadas condições de sobreaquecimento, sobretensão, descarga excessiva, entre outros, as células podem libertar o respetivo eletrólito e entrar em fuga térmica. Estes gases são inflamáveis e tóxicos pelo que a propagação térmica entre células deve ser eliminada. Como tal, o sistema de ventilação deve ser projetado com capacidade de extração suficiente [15].

No caso de uma fuga térmica, em que as células libertam gás, os níveis de gás são monitorizados através dos sensores de gás. A ventilação de emergência é iniciada se a temperatura da célula ultrapassar os 85°C ou se for detetado gás. Se houver sobrepressão, o gás é ventilado através da válvula de ventilação de sobrepressão localizada em frente ao ventilador de extração da sala ESU. Quando o sistema de alarme de gás externo indica um nível de gás superior a 30% do Limite Inferior de Explosividade (LEL) no interior da sala ESU, a alimentação do equipamento que não é à prova de explosão é desligada. Esta sequência de ações funciona de modo a gerir e mitigar os potenciais riscos de segurança associados a temperaturas elevadas e à libertação de gás na ESU.

Esta divisão está equipada com uma barreira de segurança contra incêndios A-60 (resistente ao fogo por 60 minutos) de acordo com a SOLAS, assegurando um elevado nível de resistência ao fogo. Se o sistema de alarme de gás externo detetar um nível de gás no interior da sala da ESU acima do limite inferior de explosividade (LEL), a alimentação do equipamento é automaticamente desligada como medida de segurança [28].

Caso ocorra um incêndio fora do contentor ESSC, a sala ESU pode ser arrefecida pelo sistema de arrefecimento interno. Se tal for insuficiente, devem ser adotadas medidas externas de combate a incêndios. A sala das baterias está equipada com sistema de supressão de incêndio

NOVEC 1230. A libertação do NOVEC, por ser nocivo para o ser humano, é feita manualmente no interior da sala de controlo do contentor [29].

Este compartimento está equipado com vários sensores pelos vários motivos de segurança já abordados no segundo capítulo. Alguns dos sensores são: sinal de porta aberta, sensor de temperatura e humidade, detetor de fumo e detetor de gás.

3.4.3. Compartimento ESC

A sala ESC é a zona onde está instalada a eletrónica de potência. Consiste num conversor de armazenamento de energia, transformadores e equipamentos auxiliares necessários para a operação da unidade. Algumas características apresentadas na tabela 7. Os dois principais transformadores, um para cada lado do barramento, estão localizados no interior da sala do ESC. Os transformadores são arrefecidos a ar, e a perda de calor é removida pela unidade de arrefecimento a ar da sala ESC [15].

Tabela 7 - Características do transformado trifásico [15]

Características	Valor	Unidade
Tensão	500 / 690	[V]
Corrente	234 / 167	[A]
Frequência	47 – 63	[Hz]
Potência aparente	200	[kVA]

O compartimento do ESC contém vários componentes críticos para a operação e proteção do sistema de armazenamento de energia. Os principais elementos no compartimento do ESC incluem conversores de energia, que convertem a energia armazenada nas baterias da ESU para uma forma utilizável pelo navio, gerindo a entrada e saída de energia para garantir que a transferência de energia seja eficiente e segura. Os fusíveis DC, localizados no ESC, foram projetados para proteger contra curto-circuitos. Em caso de falha desconectam as cadeias da ESU, prevenindo danos aos contactores e minimizando a necessidade de substituição de fusíveis ao nível de cadeia.

No interior da sala de controlo, também se encontra a *drive* para ligação à terra, tabela 8. Quando o navio utiliza energia de porto, esta pode ser usada para carregar diretamente as baterias ou para ligar ao barramento principal e fornecer energia diretamente ao navio. Quando a ligação é feita pelo contentor de armazenamento de energia, esta deve estar ligado ao barramento do navio para fornecer energia. Caso a ligação seja feita diretamente ao barramento do navio, esta pode ser utilizada para carregar as baterias em simultâneo.

Tabela 8 - Características da drive para ligação de energia de terra [15]

Características	Valor	Unidade
Tensão de entrada	525 - 690	[V]
Corrente	2x350	[A]
Frequência	50/60	[Hz]
Tensão de saída	640 – 1100	[VDC]

Esta sala é classificada como uma zona não-explosiva e, por conseguinte, nenhum equipamento nela contido é classificado como explosivo, uma vez que não existe risco específico de atmosferas explosivas nesta secção. A ESC possui uma barreira de segurança contra incêndios A-0, indicando medidas normais de segurança contra incêndios.

Em caso de falha de energia, a iluminação de emergência no interior do contentor é assegurada por uma bateria com duração de até uma hora. Para o arrefecimento da sala ESC, é utilizado um circuito fechado como na figura 12. O sistema de refrigeração interno mantém a temperatura ambiente abaixo de 45°C se a temperatura do ar exterior também estiver abaixo de 45°C e a água de refrigeração variar entre 5-37°C. Além disso, também pode fornecer aquecimento se a temperatura estiver abaixo de 15°C, utilizando um elemento de aquecimento.

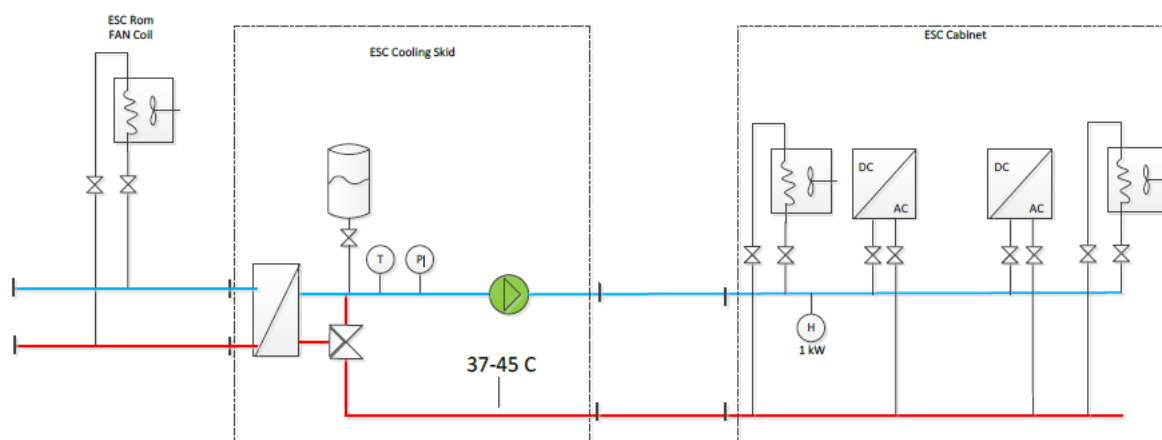


Figura 12 - Sistema de refrigeração da ESC [15]

O sistema de refrigeração da ESC arrefece eficazmente tanto o variador de velocidade como o compartimento. Os componentes incluem uma bomba de circulação de água controlada por um conversor de frequência, um permutador de calor, um tanque pressurizado, um caudalímetro, um sensor de temperatura e um sensor de pressão, que asseguram um arrefecimento eficiente. Este sistema está ligado a um sistema externo de água doce [15].

3.4.3.1. Sistema de Gestão de Energia EMS

O Sistema de Gestão de Energia (EMS) no ESC é responsável pela supervisão e controlo da distribuição de energia, garantindo que a energia seja distribuída conforme necessário, otimizando a operação do sistema e garantindo a estabilidade da instalação elétrica. Os Controladores de Bateria (BMS) monitorizam o estado das baterias, incluindo tensão, temperatura e corrente, comunicando informações críticas ao EMS e atuando para proteger as baterias contra condições de operação adversas [15].

3.5. Sistema de Gestão de Energia Híbrido

O sistema de gestão de energia é uma tecnologia avançada utilizada em navios para otimizar a produção, distribuição e consumo de energia elétrica gerada por motores diesel acoplados a geradores elétricos em conjunto com o contentor de armazenamento de energia. Este sistema é crucial para melhorar a eficiência energética, reduzir emissões e aumentar a fiabilidade e segurança operacional.

O barramento principal é alimentado pelos quatro geradores diesel elétricos e pelo contentor de armazenamento de energia. Por ser um navio DP 2, o barramento pode ser dividido com a abertura do corta circuito principal. Como referido anteriormente a bateria está ligada a dois transformadores, um no barramento de bombordo e o outro no barramento de estibordo. Através do barramento principal é feita a distribuição de energia para todos os consumidores do navio.

O operador é capaz de selecionar várias configurações entre os diferentes modos operacionais para otimizar a sua utilização em conjunto com os geradores de bordo.

3.5.1. Redução de Picos de Carga - PTO

Um dos modos de funcionamento das baterias no sistema de gestão de energia designa-se por corte de picos, em que o gerador e a bateria estão ligados em simultâneo ao barramento principal. Neste modo, o ESSC desempenha um papel crucial na absorção das variações de carga na rede elétrica equilibrando a procura de energia sentida pelos motores e eliminando a necessidade de arrancar outros geradores para lidar com os picos de carga. Isto conduz à produção de energia com a máxima eficiência e o menor custo.

No caso de uma mudança súbita de carga, o ESSC transita suavemente para lidar com a carga, e a energia é gradualmente transferida de volta para os geradores ao longo de aproximadamente 30 segundos. Isto assegura um funcionamento contínuo e eficiente, mantendo um fornecimento de energia estável da rede. Em caso de redução do SOC da bateria abaixo do limite mínimo estabelecido, é necessária a utilização dos geradores para proceder ao seu carregamento [15].

3.5.2. Modo Gerador - PTO

Neste modo, o ESSC permanece ligado ao sistema de energia num estado operacional, mas sem carregar ou descarregar ativamente. Funciona como uma fonte de energia de reserva que pode entrar rapidamente em ação para lidar com a carga em caso de perda de capacidade do gerador durante um período pré-determinado.

Quando o PMS ativa o modo de gerador, pode ser feito para partilhar a carga com outras fontes de energia ou para tornar o ESSC o único fornecedor de energia. O estado de carga da unidade de armazenamento de energia ESU aumentará ou diminuirá de acordo com a referência do PMS.

Se o estado de carga cair para um nível baixo, é enviado um sinal de pré-aviso de paragem para o PMS. A 5% do SOC, o ESSC dispara automaticamente para evitar a descarga excessiva.

O PMS é concebido para ligar automaticamente fontes de energia adicionais (grupos eletrógenos) se o ESSC atingir o seu limite mínimo de SOC. Esta medida proativa evita um *blackout* e assegura uma alimentação contínua e fiável ao navio [15].

3.5.3. Modo Carregamento – PTI

Neste modo, o ESSC extrai energia exclusivamente da rede, funcionando como consumidor. Se ocorrer uma falha de energia na instalação elétrica, o ESSC desliga-se automaticamente por razões de segurança.

O PMS pode definir a referência de carga do ESSC num intervalo de 0-100% através da interface do utilizador do PMS. Uma referência de 100% indica que o ESSC deve utilizar toda a sua capacidade de energia de entrada para o carregamento. Quando a ESSC atingir o estado de carga (SOC) de 100%, o controlador da ESU restringirá a corrente de carga para cumprir os limites de carga definidos. Isto garante o carregamento seguro e eficiente, evitando a sobrecarga quando o SOC já estiver no seu nível máximo [15].

3.5.4. Sistema de Gestão das Cadeias das Células (SMM)

O SMM (*String Management Module*) é um componente essencial em sistemas de armazenamento de energia que utilizam baterias. Este módulo é responsável pela gestão de cada cadeia (conjunto de células de bateria) dentro do sistema, assegurando o seu desempenho e proteção.

Cada SMM possui fusíveis de corrente contínua que protegem contra curto-circuitos entre a cadeia e o conversor de armazenamento de energia ESC. Em caso de curto-circuito, os fusíveis desconectam a cadeia para evitar danos e sobreaquecimento. Além disso, o SMM contém um contactor principal que serve para conectar ou desconectar a cadeia do *DC-link*. Este contactor é acionado para desconectar a cadeia em caso de falha, uso indevido ou alarme, protegendo o sistema contra possíveis danos.

O SMM monitoriza continuamente o estado da cadeia, verificando parâmetros como tensão, corrente e temperatura das células da bateria, possíveis identificar na figura 13. Estas informações são cruciais para detetar problemas e garantir que a cadeia esteja a operar dentro dos limites seguros.

Sting Information		
Min Cell Temp:	43.0 °C	7
Max Cell Temp:	44.0 °C	8
Min Cell Voltage:	3.70 V	5
Max Cell Voltage:	3.70 V	6
Max Charge Current:	0 A	9
Max Discharge Current:	0 A	10
State Of Charge:	53 %	3
State of Health:	0 %	4

Figura 13 - Parâmetros de trabalho da cadeia [15]

O SMM pode abrir ou fechar o contactor principal, figura 14, com base em comandos do Sistema de Gestão de Bateria (BMS) ou em resposta a condições operacionais, como alarmes, ajudando a isolar cadeias com problemas e a manter a segurança do sistema. Além do contactor principal, o SMM possui um aparelho de manobra que pode ser operado manualmente para desconectar ou conectar a cadeia para fins de manutenção e proteção [15].

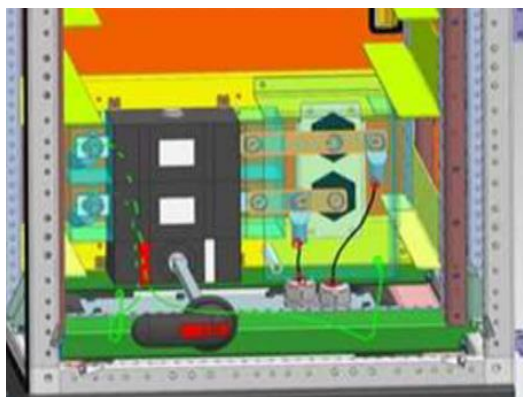


Figura 14 - Contactor principal [9]

A importância do SMM reside na sua capacidade de garantir que cada cadeia de baterias opere dentro dos parâmetros seguros, evitando condições perigosas como sobrecargas ou curto-circuitos que poderiam causar danos ou incêndios. Ao monitorizar e controlar individualmente cada cadeia, o SMM ajuda a manter o desempenho do sistema de armazenamento de energia, assegurando que a energia seja distribuída e utilizada de forma eficiente [15].

Definições importantes:

- DC-Link: É um componente crucial em sistemas de conversão de energia, especialmente em sistemas que envolvem a transformação de corrente AC para corrente contínua e vice-versa.

Estabiliza e regula a energia antes desta ser usada ou convertida novamente. Isso garante que a energia fornecida seja constante e sem interrupções.

3.7. Análise de Risco

A análise de risco para o sistema de armazenamento de energia deve considerar vários fatores para garantir a segurança e a eficiência operacional. Os principais componentes e suas possíveis falhas são analisados para identificar os riscos e implementar medidas de mitigação apropriadas. A seguir, são descritas as etapas típicas de uma análise de risco para um sistema de armazenamento de energia conforme descrito.

Em primeiro, é feita a identificação de perigos envolve a identificação de todos os possíveis perigos associados aos componentes do sistema, incluindo baterias, conversores, sistemas de gestão de energia, fusíveis e contactores. Exemplos de perigos incluem curto-circuitos, sobreaquecimento, falha de componentes e mau funcionamento do software de controlo.

A avaliação de probabilidades e consequências é a etapa seguinte, onde cada perigo identificado é avaliado quanto à probabilidade de ocorrência e às potenciais consequências. Isso pode incluir a avaliação da frequência de falhas conhecidas e o impacto dessas falhas na operação do sistema e na segurança.

Com base nas avaliações de probabilidade e consequências, procede-se à classificação de risco. Os riscos são classificados em categorias, como alto, médio ou baixo risco. Isso ajuda a priorizar as medidas de mitigação que precisam de ser implementadas.

Em seguida, desenvolvem-se e implementam-se medidas de mitigação para reduzir os riscos identificados. Isso pode incluir os fusíveis de proteção, redundância de componentes, melhoramento do software de controlo, formação dos operadores e a implementação de procedimentos de emergência.

Por fim, é crucial estabelecer um sistema contínuo de monitorização e revisão para identificar quaisquer novos riscos que possam surgir durante a operação. Revisões periódicas da análise de risco são realizadas para garantir que todas as medidas de mitigação sejam eficazes e que novos riscos sejam abordados de forma imediata.

A análise de risco é um processo contínuo e dinâmico que exige atenção constante e atualização para garantir a segurança e a eficiência operacional do sistema de armazenamento de energia [30].

3.6.1. Análise de Risco do Sistema de Armazenamento de Energia

Durante a análise, foram identificados e avaliados 37 perigos/riscos quanto à probabilidade e ocorrência. A classificação de risco foi realizada em duas etapas: inicialmente com o ESSC como

está (classificação de risco inicial) e, numa segunda etapa, após a implementação das ações recomendadas (classificação de risco revista). A classificação inicial dos riscos identificou 11 riscos como toleráveis e 26 como amplamente aceitáveis [30].

3.6.1.1. Riscos Identificados na Análise de Risco do Sistema de Armazenamento de Energia

- R1: Sobreaquecimento de uma célula devido a curto-circuito interno ou abuso operacional;
- R2: Ignição de gás de uma célula devido a uma fonte de ignição;
- R3: Propagação térmica entre os módulos da bateria;
- R4: Explosão de gás inflamável acumulado;
- R5: Incêndio dentro de um dos módulos da bateria;
- R6: Defeito de fabrico resultando em falha catastrófica;
- R7: Curto-circuito devido a falha mecânica;
- R8: Evento de fuga térmica;
- R9: Falha do sistema de gestão da bateria (BMS);
- R10: Sobrecarga ou descarga excessiva causando superaquecimento;
- R11: Sensor de temperatura defeituoso;
- R12: Falha na ventoinha do módulo de refrigeração;
- R13: Falha na libertação automática do sistema de NOVEC;
- R14: Fuga de líquido refrigerante;
- R15: Falha do sistema de deteção de gases;
- R16: Curto-circuito durante a manutenção;
- R17: Sobreaquecimento devido a uma falha na ventilação;
- R18: Desgaste prematuro das baterias;
- R19: Desconexão incorreta durante a manutenção;
- R20: Falha na comunicação entre BMS e o sistema de controlo;
- R21: Explosão devido a falha no sistema de controlo de temperatura;
- R22: Falha no sistema de supressão de incêndio;
- R23: Quebra do invólucro da célula;
- R24: Sobrecarga mecânica causando dano estrutural;
- R25: Interferência eletromagnética (EMI) afetando o BMS;
- R26: Descarte inadequado no final de vida útil;
- R27: Evento térmico no inversor;
- R28: Falta de formação do pessoal de manutenção;
- R29: Células mal equilibradas;
- R30: Estado de Saúde (SOH) ou Estado de Carga (SOC) incorretos;
- R31: Entrada incorreta no BMS;
- R32: Falha na fonte de alimentação do BMS;

- R33: Falha de isolamento elétrico;
- R34: Curto-circuito externo ao sistema de baterias;
- R35: Sobrecarga térmica devido a falha de refrigeração;
- R36: Falha em fornecer atmosfera respirável na sala SEU;
- R37: Falha em fornecer atmosfera respirável na sala ESC.

3.6.1.2. Redução dos Riscos

Para cada um destes riscos, foram avaliados os controlos existentes e as ações adicionais necessárias para mitigá-los, resultando numa classificação de risco inicial e revista, assegurando a segurança do sistema e da tripulação do navio.

Algumas destas ações adicionais são:

- Inspeção do sistema de combate a incêndio, garantindo o seu adequado funcionamento quando necessário;
- Testes e inspeções periódicas ao sistema de ventilação e extração garantindo o seu correto funcionamento.
- Procedimentos operacionais proibindo o armazenamento de objetos no espaço da bateria.
- Verificação do bom funcionamento dos sensores e dos dispositivos de segurança;
- Certificação de conhecimentos de baixa tensão para a tripulação;
- Formação adequada para a resposta a diferentes modos de falha [30].

Uma abordagem muito importante para mitigar os riscos nos sistemas de armazenamento de energia é a inspeção visual periódica das baterias, com foco na identificação de danos mecânicos na caixa exterior. Tais danos podem comprometer a integridade estrutural e funcional das baterias, aumentando o risco de curto-circuitos internos e a propagação térmica entre as células. As inspeções regulares permitem identificar deformações estruturais, como fendas, amolgadelas ou outros sinais visíveis de danos que possam indicar problemas internos na bateria, prevenir falhas associadas através da deteção precoce de danos, minimizando o risco de eventos como curto-circuitos externos e aquecimento descontrolado, além de garantir condições operacionais seguras ao verificar se os módulos permanecem dentro das especificações de segurança contra impactos mecânicos e exposição ambiental.

A realização destas inspeções deve ser complementada pela formação da tripulação, assegurando que os membros da equipa sejam capacitados para realizar inspeções eficazes e identificar anomalias relevantes; pela implementação de protocolos documentados, com listas de verificação detalhadas que orientem o processo de inspeção e manutenção; e pela execução de manutenções preventivas, substituindo ou reparando módulos que apresentem danos antes que possam causar falhas mais graves. Estas ações, quando implementadas de forma consistente, reduzem significativamente a probabilidade de falhas catastróficas, promovendo maior fiabilidade e segurança no uso de baterias de alta potência a bordo.

Capítulo 4: Controlo de Emissões e Consumo de Combustível

A redução de emissões poluentes é uma métrica fundamental no contexto da propulsão híbrida, já que um dos principais benefícios é a redução das emissões de gases poluentes e de efeito de estufa. Os motores elétricos, quando alimentados por fontes de energia mais limpas (por exemplo, baterias recarregáveis), emitem menos CO₂ quando comparados com os motores diesel convencionais. Esta diferença contribui para atingir as metas de redução de emissões, como as estabelecidas pela IMO 2020.

4.1. Determinação das Emissões de CO₂

Este capítulo aborda a análise das emissões de CO₂ dos navios, focalizando em diferentes condições operacionais. A determinação das emissões é essencial para avaliar o impacto ambiental e desenvolver estratégias de mitigação.

As emissões de carbono de um navio resultam da queima de combustíveis fósseis, como o MGO. Segue-se a forma de cálculo destas emissões:

Equação 1

$$\text{Emissões [kg]} = \text{Consumo de combustível [kg]} * \text{Factor de emissão [kg]}$$

Onde,

Emissões em [kg], consumo de combustível em [kg] e fator de emissão em [kg] de CO₂ por [kg] de combustível. Assume-se fator de emissão de 3,206 [kg] de acordo com as a orientação da IMO para cálculos de eficiência energética [31].

Serão examinados fatores operacionais, tais como a gama operacional dos navios e a sua capacidade de satisfazer as exigências de várias rotas e condições marítimas. Esta análise irá determinar a adequação dos sistemas de propulsão elétrica a diferentes aplicações na indústria marítima.

4.1.1. Em Porto

As emissões em porto são um problema significativo devido à proximidade com áreas urbanas. Durante a operação em porto, os navios utilizam energia para várias funções essenciais, resultando em emissões contínuas de CO₂. A utilização de energia de terra é uma solução para reduzir essas emissões, permitindo que os navios desliguem os geradores a diesel enquanto atracados.

Neste estudo, quando o navio está em porto ou fundeado, existe uma grande oportunidade para poupança de combustível. Isto ocorre porque os propulsores, que são os maiores consumidores

de combustível, não estão em funcionamento. Assim, é possível utilizar apenas um gerador a baixa carga, ou até mesmo o grupo de baterias, ou ligar o navio à rede elétrica terrestre. Esta prática não só reduz significativamente o consumo de combustível, como também minimiza as emissões associadas, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar nas áreas portuárias.

Na tabela 9 estão contemplados os consumos e emissões do navio em porto, 11 meses antes e depois da instalação das baterias.

Tabela 9 - Consumo de MGO e emissões de CO₂ em porto antes e depois da instalação do ESSC [dados do armador]

	Período	MGO [kg]	Emissões [kg]	Horas	MGO [kg/h]	Emissões [kg/h]
ANTES	Março 2020	36 480	116 955	456	80	256
	Abril 2020	37 752	121 033	484	78	250
	Maio 2020	31 647	101 460	411	77	247
	Junho 2020	29 952	96 026	384	78	250
	Julho 2020	31 200	100 027	390	80	256
	Agosto 2020	26 404	84 651	322	82	263
	Setembro 2020	19 110	61 267	245	78	250
	Outubro 2020	27 552	88 332	574	48	154
	Novembro 2020	29 602	94 904	361	82	263
	Dezembro 2020	13 986	44 839	222	63	202
	Janeiro 2021	6 790	21 769	194	35	112
DEPOIS	Fevereiro 2021	2 380	7 630	170	14	45
	Março 2021	3 160	10 131	40	79	253
	Abril 2021	5 544	17 774	77	72	231
	Maio 2021	2 600	8 336	40	65	208
	Junho 2021	2 727	8 743	101	27	87
	Julho 2021	7 744	24 827	121	64	205
	Agosto 2021	6 223	19 951	127	49	157
	Setembro 2021	10 824	34 702	164	66	212
	Outubro 2021	11 770	37 735	110	107	343
	Novembro 2021	10 580	33 919	230	46	147
	Dezembro 2021	23 908	76 649	278	86	276
TOTAL		377 935	1 211 660	5 501	1 456	4 668

Da análise do consumo horário nos meses de março, abril e maio antes e depois da instalação das baterias podemos obter algumas conclusões.

Em março houve uma redução significativa no consumo de combustível, de 80 [kg/h] para 14 [kg/h]. Atribuiu-se esta redução ao uso do contentor de armazenamento de energia, que permitiu reduzir a dependência de MGO para a produção de energia a bordo.

Por outro lado, no mês de abril o consumo aumentou para 79 [kg/h], o que é quase igual ao valor antes da instalação da bateria. Isso pode indicar que, durante este mês, o sistema de armazenamento de energia foi menos eficiente ou menos utilizado.

No mês de maio o consumo reduziu-se para 72 [kg/h], uma melhoria em relação aos valores anteriores, embora não tenha retornado ao nível extremamente baixo observado em março.

Todos estes valores dependem imenso da quantidade de vezes que o navio esteve em porto nos meses em análise bem como o número de horas. Na figura 15 foi traçada para melhor identificação a linha de redução média das emissões depois da instalação.

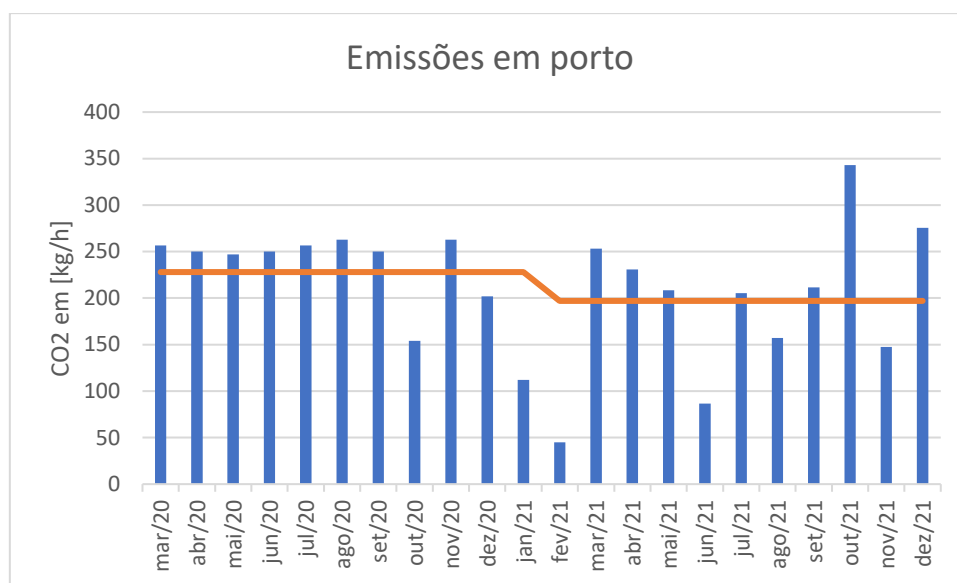


Figura 15 – Emissões em porto

Na tabela 9 verificamos que nos 11 meses antes da instalação das baterias temos um consumo médio de combustível de 71 [kg/h]. Nos 11 meses seguintes, após instalação das baterias, o consumo médio de combustível baixa para 61 [kg/h]. Um decréscimo no consumo médio de combustível de cerca de 14%, que consequentemente se traduz na mesma redução das emissões. Decréscimo de consumo visível na figura 15.

De notar que tanto o consumo horário de combustível como as emissões, após a instalação das baterias, não têm um comportamento linear e constante uma vez que a sua utilização em porto é uma escolha do operador. Apesar do sistema de baterias estar completamente enquadrado com o sistema de gestão de energia, cabe ao chefe de máquinas decidir se utiliza o gerador de bordo, a bateria ou energia de terra.

Quando o sistema de armazenamento de energia é utilizado em porto, este pode ser carregado com energia de terra ou gerador de bordo. Nas figuras 15 e 16 é possível verificar que no período compreendido entre fevereiro e dezembro de 2021, tanto foram usados os geradores de bordo para carregar as baterias como energia de terra. Esta escolha depende da operação do navio e

do número de horas que está atracado, sendo que numa estadia curta é preferencial utilizar gerador de bordo por ser uma operação mais prática.

Na tabela 10 estão contemplada a utilização de energia de terra, antes e depois da instalação das baterias.

Tabela 10 – Consumo de energia de terra em [kWh] antes e depois da instalação do ESSC [dados do armador]

	Período	Horas de terra	energia de terra [kWh]
ANTES	Março 2020	0	0
	Abril 2020	0	0
	Maio 2020	0	0
	Junho 2020	0	0
	Julho 2020	0	0
	Agosto 2020	0	0
	Setembro 2020	0	0
	Outubro 2020	0	0
	Novembro 2020	0	0
	Dezembro 2020	0	0
	Janeiro 2021	0	0
DEPOIS	Fevereiro 2021	6	883
	Março 2021	176	26 508
	Abril 2021	88	21 341
	Maio 2021	139	25 205
	Junho 2021	130	26 053
	Julho 2021	132	24 272
	Agosto 2021	35	4 918
	Setembro 2021	0	0
	Outubro 2021	116	22 152
	Novembro 2021	111	17 466
	Dezembro 2021	35	8 507
TOTAL		968	177 305

Da análise do consumo horário de energia de terra nos meses de março, abril e maio antes e depois da instalação das baterias podemos obter algumas conclusões.

Em março a utilização foi relativamente baixa (6 horas), o que sugere que a bateria foi eficaz para cobrir as necessidades de consumo energético a bordo. Ou eventualmente, o navio esteve pouco tempo em porto.

No mês de abril a utilização de energia de terra aumentou bastante (176 horas). Este aumento ocorreu muito provavelmente pela maior estadia do navio em porto.

Em maio a utilização de energia de terra foi de 88 horas, o que é consideravelmente mais alto que março, mas menor que abril. Isso pode indicar uma utilização mais equilibrada de energia de terra e armazenamento a bordo.

Todos estes valores dependem imenso da quantidade de vezes que o navio esteve em porto nos meses em análise bem como o número de horas.

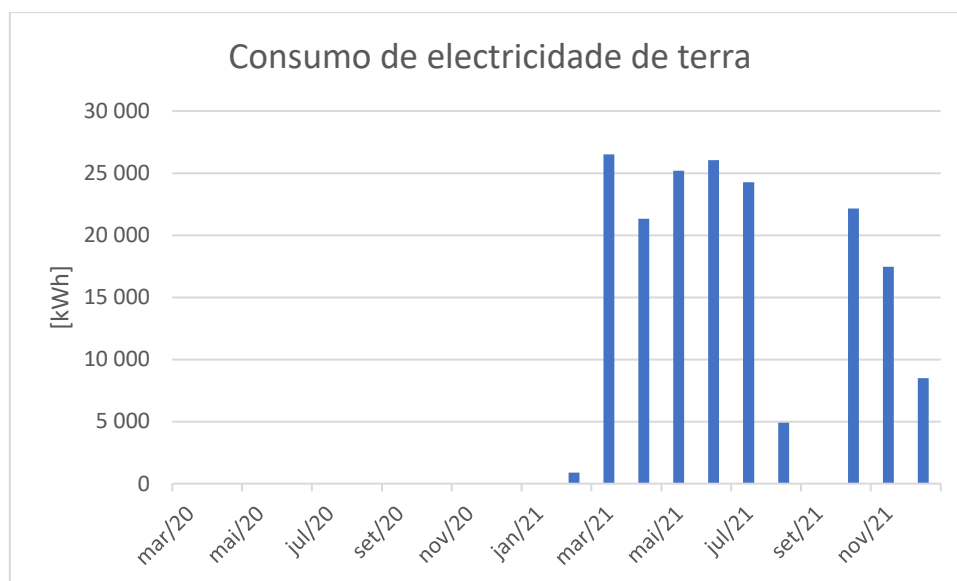


Figura 16 - Eletricidade consumida em porto

Tal como se pode observar na tabela 10 e na figura 16, no mês de setembro de 2021 foram apenas utilizados os geradores de bordo para carregar as baterias enquanto o navio estava atracado.

4.1.2. Em Trânsito

Durante a operação de trânsito, as emissões de CO₂ dos navios são diretamente relacionadas com o consumo de combustível. A velocidade e a eficiência dos motores são fatores críticos. A implementação de sistemas de propulsão híbrida e elétrica pode reduzir significativamente as emissões.

Trânsito é o modo de funcionamento do navio que trata do transporte de e para as instalações *offshore*. A velocidade com que o navio navega depende de condições como a hora de chegada previamente acordada assim como das condições climáticas. Em certos momentos torna-se urgente a entrega de mercadorias ou pessoas pelo que a poupança de combustível perde relevância. Em situações de condições climáticas adversas, a segurança dos navio e tripulantes também se sobrepõem à poupança de combustível. Sempre que possível, a viagem deve ser preparada de modo que o navio navegue à sua velocidade económica.

Neste caso, o contentor de armazenamento de energia não é suficiente para o acionar todos os propulsores necessários. Contudo, quando associado o seu funcionamento com um gerador de bordo, é possível reduzir a carga da máquina necessária. Neste caso, o modo económico a navegar passa pela utilização de um gerador em conjunto com a bateria.

Na tabela 11 estão contemplados os consumos e emissões do navio em trânsito, 11 meses antes e depois da instalação das baterias.

Tabela 11 - Consumo de MGO e emissões de CO₂ em trânsito antes e depois da instalação do ESSC [dados do armador]

	Período	MGO [kg]	Emissões [kg]	Horas	MGO [kg/h]	Emissões [kg/h]
ANTES	Março 2020	51 408	164 814	180	286	916
	Abril 2020	59 290	190 084	154	385	1 234
	Maio 2020	30 622	98 174	136	225	722
	Junho 2020	57 969	185 849	171	339	1 087
	Julho 2020	9 611	30 813	56	172	550
	Agosto 2020	71 085	227 899	215	331	1 060
	Setembro 2020	79 779	255 771	203	393	1 260
	Outubro 2020	49 742	159 473	119	418	1 340
	Novembro 2020	74 258	238 071	214	347	1 112
	Dezembro 2020	107 080	343 298	284	377	1 209
	Janeiro 2021	60 873	195 159	197	309	991
DEPOIS	Fevereiro 2021	119 681	383 697	335	357	1 145
	Março 2021	102 142	327 467	251	407	1 305
	Abril 2021	45 988	147 438	201	229	734
	Maio 2021	44 608	143 013	196	228	730
	Junho 2021	52 550	168 475	174	302	968
	Julho 2021	40 004	128 253	140	286	916
	Agosto 2021	60 602	194 290	209	290	930
	Setembro 2021	17 679	56 679	107	165	530
	Outubro 2021	84 659	271 417	225	376	1 206
	Novembro 2021	51 618	165 487	150	344	1 103
	Dezembro 2021	111 644	357 931	226	494	1 584
	TOTAL	1 382 892	4 433 552	4 143	7 059	22 631

Da análise do consumo horário nos meses de março, abril e maio antes e depois da instalação das baterias podemos obter algumas conclusões.

O consumo horário de MGO em trânsito aumentou significativamente em março após a instalação do contentor de armazenamento de energia. A causa pode ser uma maior

dependência de produção de energia a bordo durante as operações ou um aumento no consumo de energia devido a outras mudanças operacionais ou cargas.

Em abril, houve uma redução significativa no consumo de MGO, o que sugere que o contentor de armazenamento de energia ajudou a reduzir a necessidade de combustível durante a navegação. Isso pode ser resultado de uma maior eficiência no uso de energia ou uma maior capacidade de aproveitar a energia armazenada.

O consumo em maio foi praticamente o mesmo antes e depois da instalação da bateria, com uma ligeira variação. Isso pode indicar que o impacto do contentor de armazenamento de energia foi mínimo ou que a eficiência da operação em trânsito permaneceu constante.

Estes resultados indicam que o efeito da instalação do contentor de armazenamento de energia pode variar com as condições operacionais e da eficiência do sistema.

Na figura 117 é possível verificar a redução média das emissões em trânsito depois da instalação.

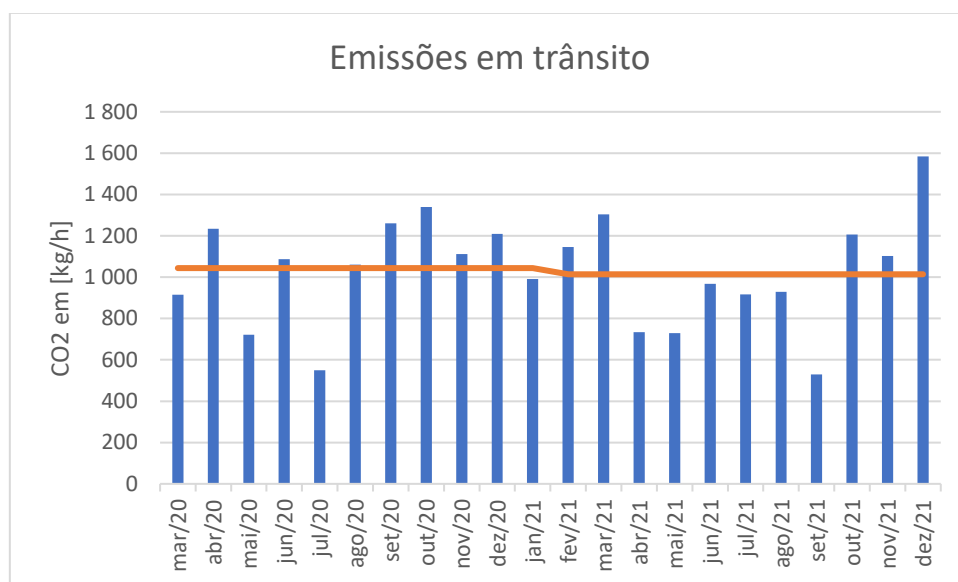


Figura 17 - Emissões em trânsito

Da análise da figura 17 verificamos que antes da instalação das baterias média de emissões de 1044 [kg/h]. Após a instalação das baterias, as emissões baixam para 1014 [kg/h]. Um decréscimo no consumo médio de combustível de apenas 3%, que consequentemente se traduz na mesma redução das emissões.

É mais difícil obter uma redução significativa a navegar uma vez que os consumos de combustível estão dependentes de condições climatéricas e da necessidade de chegada a porto ou à instalação offshore a uma certa hora. Sempre que possível, é preferível navegar com um gerador e a bateria ligados ao barramento, contudo esta potência nem sempre é suficiente para operar o navio.

Além do consumo horário, é importante analisar o consumo em trânsito por milha percorrida. Os dados referentes às emissões em trânsito por milha percorrida estão descritos na tabela 12.

Tabela 12 - Emissões de CO₂ em trânsito por milha percorrida antes e depois da instalação do ESSC [dados do armador]

	Período	Distância percorrida [mi]	MGO por milha [kg/mi]	Emissões [kg]	Emissões [kg/mi]
ANTES	Março 2020	1 534	34	164 814	107
	Abril 2020	1 326	45	190 084	143
	Maio 2020	1 631	19	98 174	60
	Junho 2020	1 493	39	185 849	124
	Julho 2020	1 417	7	30 813	22
	Agosto 2020	1 723	41	227 899	132
	Setembro 2020	1 697	47	255 771	151
	Outubro 2020	1 137	44	159 473	140
	Novembro 2020	1 241	60	238 071	192
	Dezembro 2020	2 943	36	343 298	117
	Janeiro 2021	1 603	38	195 159	122
DEPOIS	Fevereiro 2021	3 151	38	383 697	122
	Março 2021	3 367	30	327 467	97
	Abril 2021	3 082	15	147 438	48
	Maio 2021	3 232	14	143 013	44
	Junho 2021	1 841	29	168 475	92
	Julho 2021	1 701	24	128 253	75
	Agosto 2021	2 294	26	194 290	85
	Setembro 2021	2 297	8	56 679	25
	Outubro 2021	2 229	38	271 417	122
	Novembro 2021	1 299	40	165 487	127
	Dezembro 2021	2 071	54	357 931	173
TOTAL		44 309	724	4 443 552	2 320

Da análise da tabela 12 verificamos que, antes da instalação das baterias, temos um consumo médio de combustível de 37 [kg/mi]. Após a instalação das baterias, o consumo médio de combustível baixa para 29 [kg/mi]. Analisando o consumo por milha náutica, já observamos uma redução do consumo médio de combustível de cerca de 21%, que consequentemente se traduz na mesma redução das emissões.

Apesar de em trânsito o decréscimo no consumo médio de combustível por [kg/h] ser apenas 3%, quando calculado por milha percorrida já é possível obter valores mais interessantes e capazes de evidenciar o impacto da instalação do ESSC nos consumos energéticos do navio.

Da análise do consumo horário nos meses de março, abril e maio antes e depois da instalação das baterias podemos obter algumas conclusões.

Em março, o consumo de gasóleo por milha náutica reduziu-se após a instalação do contentor de armazenamento de energia. Isto sugere que o sistema de armazenamento ajudou a melhorar a eficiência energética, possivelmente permitindo um uso mais eficiente do combustível durante a navegação.

Em abril, a redução foi ainda mais significativa, tendo o consumo por milha náutica diminuído de 45 [kg/mi] para 15 [kg/mi]. Indica uma melhoria substancial na eficiência energética, possivelmente devido ao uso mais eficaz da energia armazenada, reduzindo assim a necessidade de utilização de combustível fóssil.

Em maio, o consumo por milha náutica também foi inferior, embora de forma menos acentuada do que em abril. A redução de 19 [kg/mi] para 14 [kg/mi] demonstra uma melhoria na eficiência energética proporcionada pelo contentor de armazenamento de energia. Como demonstrado na figura 18.

É importante considerar outros fatores que influenciam o consumo de gasóleo, como alterações nas rotas, condições meteorológicas e operações do navio.

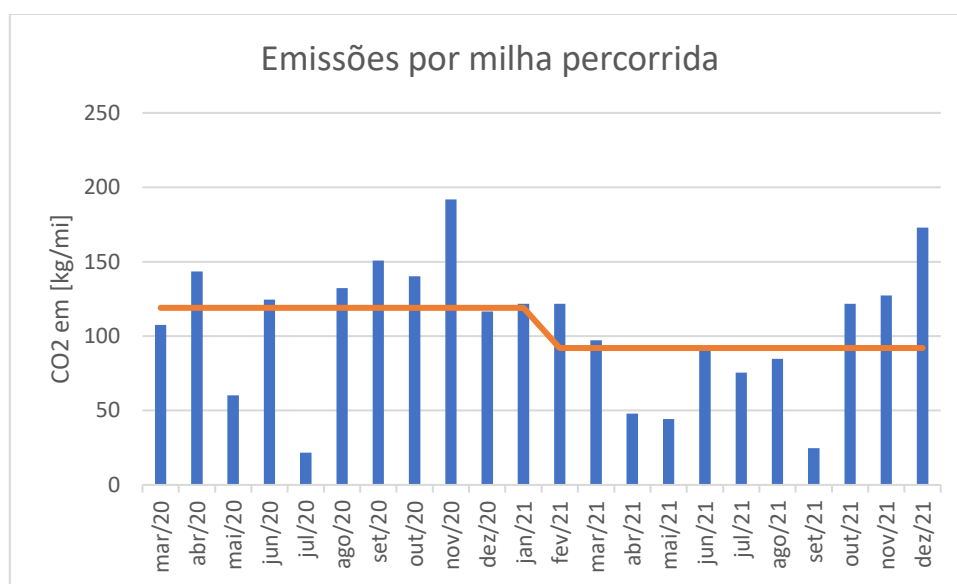


Figura 18 - Emissões por milha percorrida

4.1.3. Em Posicionamento Dinâmico

O posicionamento dinâmico é uma técnica estabelecida no mundo do transporte marítimo especializado e offshore. A principal função do DP é permitir que o navio mantenha uma posição e um rumo fixos e, evidentemente, efetuar alterações nessa posição e/ou rumo de forma controlada. O sistema recebe informações de diversos sensores (vento, posição), para gerir os propulsores consoante a posição que se deseja manter [32].

O posicionamento dinâmico requer o uso contínuo de propulsores e impulsores para manter a posição do navio, resultando em altos níveis de consumo de combustível e emissões. A otimização do sistema DP faz-se através da integração de baterias para diminuir as emissões, utilizando energia armazenada para suportar as operações de DP e cobrir os picos de consumo.

Em termos operacionais, a utilização dos geradores depende em muito das condições meteorológicas, sendo que a segurança do navio e da instalação *offshore* se sobrepõe à poupança de combustível. Contudo o ESSC pode e deve ser utilizado.

De acordo com o ASOG a SOC da ESSC deve ser superior a 80% e o consumo elétrico do gerador a diesel ligado ao barramento inferior a 1300 [kW], para que possa ser utilizada na operação do navio. Caso seja inferior e o consumo do gerador em uso superior a 1300 [kW] outro diesel gerador deve ser ligado ao barramento. Isto deve-se a um dos requisitos também presentes no ASOG que refere que o total de consumo num dos barramentos deve ser inferior a 45% para que, em caso de perda de energia no outro barramento, esta possa absorver os consumos necessário à manutenção da posição do navio.

Na tabela 13 estão descritos os consumos e emissões do navio em DP, 11 meses antes e depois da instalação das baterias.

Tabela 13 - Consumo de MGO e emissões de CO₂ em DP antes e depois da instalação do ESSC [dados do armador]

	Período	MGO [kg]	Emissões [kg]	Horas	MGO [kg/h]	Emissões [kg/h]
ANTES	Março 2020	11 040	35 394	40	276	885
	Abril 2020	8 877	28 460	33	269	862
	Maio 2020	23 200	74 379	80	290	930
	Junho 2020	19 383	62 142	71	273	875
	Julho 2020	17 806	57 086	58	307	984
	Agosto 2020	24 255	77 762	99	245	785
	Setembro 2020	26 048	83 510	88	296	949
	Outubro 2020	8 937	28 652	27	331	1 061
	Novembro 2020	13 110	42 031	46	285	914
	Dezembro 2020	41 202	132 094	126	327	1 048
	Janeiro 2021	24 297	77 896	91	267	856
DEPOIS	Fevereiro 2021	31 501	100 992	109	289	927
	Março 2021	37 837	121 305	157	241	773
	Abril 2021	23 154	74 232	102	227	728
	Maio 2021	29 880	95 795	120	249	798
	Junho 2021	20 805	66 701	95	219	702
	Julho 2021	32 412	103 913	146	222	712
	Agosto 2021	25 132	80 573	122	206	660
	Setembro 2021	21 696	69 557	96	226	725

Outubro 2021	30 923	99 139	107	289	927
Novembro 2021	20 501	65 726	83	247	792
Dezembro 2021	5 913	18 957	27	219	702
TOTAL	497 909	1 596 296	1 923	5 800	18 595

Da análise do consumo horário nos meses de março, abril e maio antes e depois da instalação das baterias podemos obter algumas conclusões.

O consumo horário de MGO referente ao mês de março do ano anterior e posterior à instalação das baterias reduziu de 276 [kg/h] para 241 [kg/h] após a instalação do contentor de armazenamento de energia. Essa redução de 35 [kg/h] representa uma melhoria na eficiência durante o posicionamento dinâmico, indicando que o sistema de armazenamento de energia ajudou a diminuir o consumo de combustível nesse mês.

A redução foi ainda mais significativa em abril, tendo o consumo baixado de 269 [kg/h] para 227 [kg/h]. A economia de 42 [kg/h] sugere uma melhora substancial na eficiência, provavelmente devido a um uso mais eficaz do armazenamento de energia.

Em maio, o consumo reduziu-se de 290 [kg/h] para 249 [kg/h]. A redução de 41 [kg/h] ainda demonstra uma melhoria na eficiência, embora o consumo permaneça relativamente alto em comparação com os meses março e abril.

Com os resultados da tabela 13 é possível traçar o gráfico das emissões em DP ao longo do tempo, figura 19.

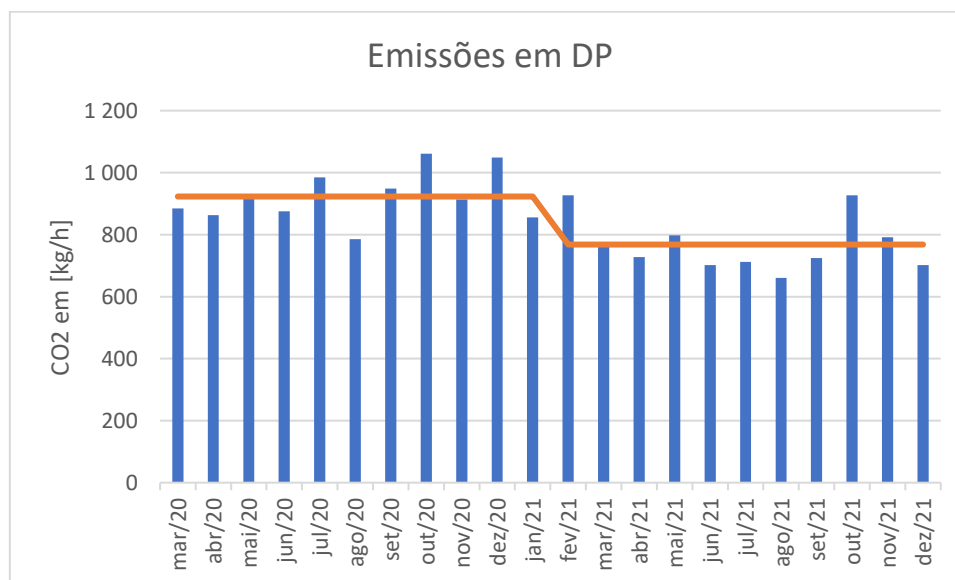


Figura 19 - Emissões em DP

Da análise da tabela 13 verificamos que nos 11 meses anteriores à instalação das baterias, temos um consumo médio de combustível de 288 [kg/h]. Nos 11 meses seguintes, após instalação das baterias, o consumo médio de combustível baixou para 239 [kg/h]. Obteve-se um decréscimo no

consumo médio de combustível de cerca de 17%, que consequentemente se traduz na mesma redução das emissões.

Uma vez que é possível manter o navio em posicionamento dinâmico só com um gerador e a bateria ligada ao barramento, verifica-se uma substancial economia de combustível. Antes da instalação da bateria era sempre necessária utilizar dois geradores.

4.1.3. Em Espera

Em modo de espera, os navios consomem combustível principalmente para manter os sistemas vitais operacionais. A eficiência energética pode ser melhorada através do uso de baterias para fornecer energia durante períodos de baixo consumo, reduzindo o consumo de combustível e as emissões de CO₂.

Um navio a operar em espera significa que mantém sua posição enquanto aguarda por uma situação de operação. Normalmente, o navio fica fora da zona de segurança da instalação offshore, podendo reduzir a necessidade de propulsores e geradores. Ao contrário do modo DP, o navio não necessita de permanecer na mesma posição ficando numa situação de deriva controlada. Caso as condições meteorológicas o permitam, é possível ficar num modo económico com um gerador e a bateria ligados ao barramento principal reduzindo o consumo de combustível. Por motivos de prontidão e segurança, é necessário manter o gerador a alimentar todos os propulsores necessários.

Na tabela 14 estão descritos os consumos e emissões do navio em standby, 11 meses antes e depois da instalação das baterias.

Tabela 14 - Consumo de MGO e emissões de CO₂ em standby antes e depois da instalação do ESSC [do armador]

	Período	MGO [kg]	Emissões [kg]	Horas	MGO [kg/h]	Emissões [kg/h]
ANTES	Março 2020	11 346	36 375	62	183	587
	Abril 2020	9 604	30 790	49	196	628
	Maio 2020	16 400	52 578	80	205	657
	Junho 2020	12 596	40 383	94	134	430
	Julho 2020	24 534	78 656	141	174	558
	Agosto 2020	13 260	42 512	102	130	417
	Setembro 2020	32 560	104 387	185	176	564
	Outubro 2020	3 720	11 926	24	155	497
	Novembro 2020	21 582	69 192	99	218	699
	Dezembro 2020	13 736	44 038	68	202	648
	Janeiro 2021	47 502	152 291	261	182	583
DEPOIS	Fevereiro 2021	6 970	22 346	34	205	657
	Março 2021	14 193	45 503	83	171	548
	Abril 2021	36 062	115 615	146	247	792

Maio 2021	22 939	73 542	113	203	651
Junho 2021	25 344	81 253	198	128	410
Julho 2021	19 154	61 408	157	122	391
Agosto 2021	27 126	86 966	198	137	439
Setembro 2021	33 880	108 619	220	154	494
Outubro 2021	27 720	88 870	154	180	577
Novembro 2021	17 061	54 698	121	141	452
Dezembro 2021	32 037	102 711	177	181	580
TOTAL	469 326	1 504 659	2 766	3 824	12 260

Da análise do consumo horário nos meses de março, abril e maio antes e depois da instalação das baterias podemos obter algumas conclusões. O consumo horário de MGO referente ao mês de março do ano anterior e posterior à instalação das baterias reduziu de 183 [kg/h] para 171 [kg/h]. Esta redução de 12 [kg/h] sugere que o contentor de armazenamento de energia teve um efeito positivo na eficiência durante o tempo em que o navio esteve em espera.

Em abril, o consumo aumentou de 196 [kg/h] para 247 [kg/h], um aumento de 51 [kg/h]. Isto indica que, apesar da instalação do contentor de armazenamento de energia, o consumo de MGO durante o tempo de espera aumentou significativamente. Esse aumento atribuiu-se a vários fatores, como uma maior utilização de sistemas de energia a bordo ou mudanças operacionais que levaram a um aumento no consumo de energia. Também as condições climáticas têm influência na quantidade de consumo de energia dos propulsores.

Em maio, o consumo de MGO foi de 205 [kg/h] antes da instalação da bateria e reduziu para 203 [kg/h] após a instalação. A redução de 2 [kg/h] é pequena, mas ainda assim indica uma ligeira melhoria na eficiência em comparação com o período anterior.

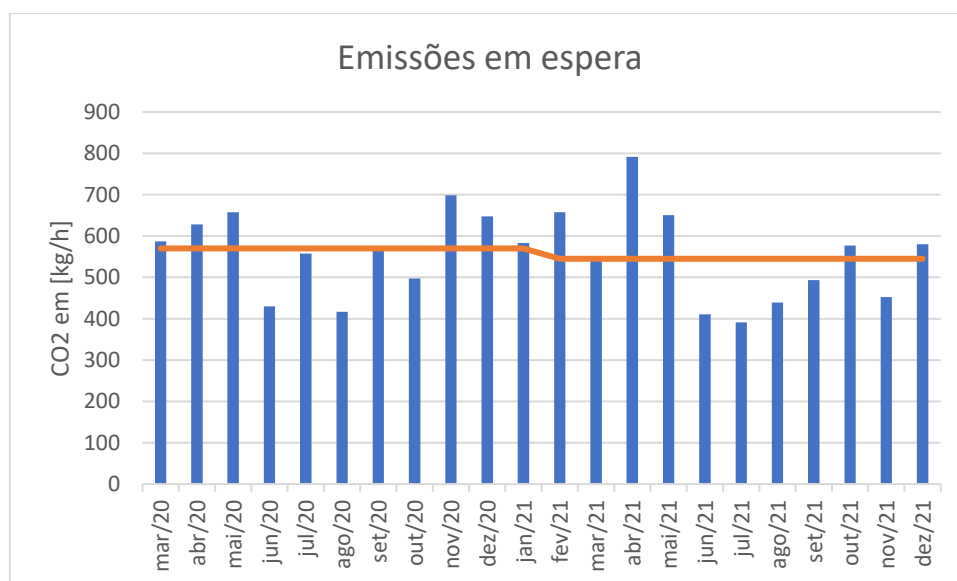


Figura 20 - Emissões em standby

Com os dados da tabela 14 foi possível traçar o gráfico da evolução das emissões em standby da figura 20.

Da análise da tabela 14 verificamos que, antes da instalação das baterias temos um consumo médio de combustível de 178 [kg/h]. Após a instalação das baterias, o consumo médio de combustível baixa para 170 [kg/h]. Um decréscimo no consumo médio de combustível de cerca de 4%, que consequentemente se traduz na mesma redução das emissões.

Este decréscimo não é significativo uma vez que em espera, o navio já utilizava apenas um gerador. Com a utilização da bateria é possível reduzir a carga do gerador, mas não eliminar a sua utilização, pois é necessário que o navio mantenha os propulsores em funcionamento.

4.2. Eficiência Energética

A avaliação da eficiência energética tem em conta a eficiência com que cada navio converte energia consumida em trabalho realizado na atividade de transporte, é medida pelo Índice de Eficiência Energética (EEDI). O cálculo do EEDI é essencial para avaliar a conformidade com os regulamentos ambientais internacionais [5].

O Índice de Eficiência Energética dos Navios Existentes (EEXI) é outra medida da eficiência energética dos navios existentes, semelhante ao EEDI para os navios novos. O cálculo do EEXI baseia-se na eficiência energética dos parâmetros operacionais atuais de um navio e é utilizado principalmente para efeitos de cumprimento da regulamentação.

Em 2011, a IMO adotou medidas técnicas e operacionais obrigatórias de eficiência energética que se espera virem a reduzir significativamente a quantidade de emissões de CO₂ emitidas pela atividade marítima. Estas medidas técnicas (EEDI/SEEMP) entraram em vigor a 1 de janeiro de 2013 [33].

A IMO adotou importantes diretrizes que visam apoiar a implementação das medidas obrigatórias para aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões de GEE da navegação internacional, abrindo caminho para que os regulamentos sobre EEDI e SEEMP sejam implementados sem problemas pelas administrações e pela indústria. O EEDI foi tornado obrigatório para os novos navios e o SEEMP para todos os navios com a adoção de alterações ao Anexo VI da MARPOL [33].

Os requisitos técnicos incluem uma norma operacional baseada em objetivos que regulam diretamente a quantidade de CO₂ emitida por unidade de trabalho de transporte e a quantidade de carbono. Os navios são obrigados a adotar ambas as abordagens para ajudar a cumprir o mínimo de carbono 2030 da IMO. A medida técnica proposta, EEXI, é uma norma de eficiência técnica da frota existente que limita a quantidade de CO₂ emitida por unidade de fornecimento de transporte [34].

Os requisitos operacionais de redução da intensidade de carbono têm por base um novo indicador operacional de intensidade de carbono (CII) [5].

4.2.1. Índice de Eficiência Energética (EEDI)

O EEDI é uma métrica fundamental para avaliar a eficiência energética dos navios. Este cálculo será efetuado tanto para os sistemas de propulsão elétrica como para os sistemas de propulsão diesel, permitindo uma comparação direta da sua eficiência no cumprimento dos regulamentos ambientais internacionais.

A avaliação da eficiência energética tem em conta a eficácia com que cada sistema de propulsão converte energia em potência de propulsão, com especial incidência no EEDI.

4.2.2. Índice de Eficiência Energética dos Navios Existentes (EEXI)

O *EEXI* é um índice semelhante ao *EEDI*, mas para os navios existentes. A aplicação está prevista para todos os navios de arqueação bruta igual ou superior a 400 toneladas, exceto para alguns navios especiais como é o caso dos navios *Heavy Load Carrier*.

O Arquivo Técnico *EEXI* deve ser emitido para a maioria dos tipos de navios, exceto para navios já construídos de acordo com os requisitos *EEDI* e deve incluir o cálculo do *EEXI* alcançado que deve estar abaixo do valor obrigatório.

As emissões são calculadas a partir da potência instalada do motor principal, do consumo específico do combustível correspondente do motor principal e dos motores auxiliares e de um fator de conversão entre o combustível e a massa CO₂ correspondente [35].

Para cálculo do EEXI utilizou-se a seguinte equação.

Equação 2

$$EEXI \left[\frac{g}{t \cdot mi} \right] = \frac{Emissões \ de \ CO_2 \ [g]}{Distância \ [mi] \times Capacidade[t]}$$

Nesta expressão, são consideradas as emissões de CO₂ apenas em operações em mar aberto utilizada a distância real percorrida pelo navio e a sua capacidade de carga. Das tabelas 11, 13 e 14 é possível determinar o total de emissões de CO₂ para cálculo do EEXI. Da tabela 12 utiliza-se a distância percorrida pelo navio. Na tabela 15 encontram-se os EEXI calculados.

Tabela 15 - Comparação do EEXI antes e depois da instalação do ESSC

EEXI	Emissões de CO ₂ [g]	Distância [mi]	Capacidade [t]	EEXI [g/tmi]
Sem ESSC	3 451 939 000	17 745	4 598	42,31
Com ESSC	4 082 568 000	26 564	4 598	33,42

Da análise da tabela 15 é possível observar uma redução percentual no EEXI após a instalação das baterias de aproximadamente 21%. Esta redução de 42,31 [g/tmi] para 33,42 [g/tmi] após a

instalação do contentor de armazenamento de energia é um indicador positivo da melhoria na eficiência energética e na redução das emissões do navio.

4.2.3. Indicador Anual Operacional da Intensidade de Carbono (CII)

O CII determina o fator de redução anual necessário para assegurar a melhoria contínua da intensidade de carbono operacional do navio dentro de um nível de classificação específico.

O CII operacional anual efetivo alcançado tem de ser documentado e verificado em relação ao CII operacional anual requerido. Isto permite determinar a classificação da intensidade de carbono operacional. A classificação é dada numa escala - classificação de intensidade de carbono operacional A, B, C, D ou E - indicando um nível de desempenho maior, menor superior, moderado, menor inferior, ou inferior. O nível de desempenho é registado no SEEMP.

Um navio com classificação D durante três anos consecutivos, ou E, terá de apresentar um plano de ação corretivo, para mostrar como o índice exigido (C ou superior) será alcançado. Estas medidas entraram em vigor em novembro de 2022 [5].

4.3. Plano de Gestão da Eficiência Energética dos Navios (SEEMP) e Indicador Operacional de Eficiência Energética (EEOI)

O SEEMP é uma medida operacional que estabelece um mecanismo para melhorar a eficiência energética de um navio de uma forma rentável. O SEEMP também proporciona uma abordagem às companhias de navegação para gerir o desempenho da eficiência dos navios e da frota ao longo do tempo, utilizando, por exemplo, o EEOI como ferramenta de monitorização. A orientação sobre o desenvolvimento do SEEMP para navios novos e existentes incorpora as melhores práticas para o funcionamento eficiente dos navios em termos de combustível, bem como orientações para o uso voluntário do EEOI para navios novos e existentes.

A EEOI permite aos operadores medir a eficiência do combustível de um navio em operação e medir o efeito de quaisquer alterações na operação, como por exemplo, melhorar o planeamento da viagem, limpeza mais frequente da hélice ou introdução de medidas técnicas como sistemas de recuperação de calor residual. O SEEMP incentiva o armador e o operador do navio em cada fase do plano a considerar novas tecnologias e práticas, ao procurar otimizar o desempenho de um navio [5].

O SEEMP foi concebido para ser um documento dinâmico e evolutivo, permitindo aos operadores de navios melhorar continuamente a eficiência energética dos seus navios e reduzir o seu impacto ambiental. O cumprimento do SEEMP é obrigatório ao abrigo dos regulamentos do Índice de Eficiência Energética dos Navios Existentes (EEXI) da IMO, que têm como objetivo melhorar a eficiência energética dos navios existentes. O SEEMP é uma ferramenta crucial para ajudar o setor do transporte marítimo a reduzir a sua pegada de carbono e contribuir para os esforços globais de combate às alterações climáticas.

4.3.1. SEEMP

O SEEMP define um conjunto de medidas de poupança de energia e de melhoria da eficiência de transporte a adotar pelo navio. Estas medidas podem incluir a otimização do funcionamento do navio, a melhoria das práticas de manutenção e o investimento em tecnologias e equipamentos mais eficientes em termos de combustível.

O plano inclui diversas disposições, tais como as indicadas abaixo, para monitorizar e comunicar o consumo de energia e o desempenho do navio, nomeadamente o consumo de combustível, a velocidade e os dados relativos à viagem. Estes dados permitem que os operadores acompanhem os seus progressos e identifiquem as áreas a melhorar. Pode incluir orientações para o planeamento da viagem, a fim de otimizar as rotas e a velocidade, tendo em conta as condições meteorológicas, as correntes e outros fatores que afetam o consumo de combustível.

O SEEMP pode incluir recomendações para manutenção regular e melhorias técnicas para garantir que os motores, o casco e outros sistemas do navio funcionem com a máxima eficiência.

O plano pode incluir programas de formação para a tripulação do navio, para que esta opere o navio da forma mais eficiente em termos energéticos e compreenda a importância de reduzir as emissões de gases de efeito de estufa.

De acordo com a regulamentação internacional, os armadores são frequentemente obrigados a comunicar às autoridades competentes os dados relativos à eficiência energética e às emissões.

Operação do navio

- Durante o planeamento da viagem devem ser tidas em consideração as condições climáticas, otimizando a utilização de combustível;
- Acordar com o fretador a velocidade económica, registando todos os pedidos de alteração ou aumento de velocidade;
- Comunicar antecipadamente com o piloto ou porto para melhor determinação da hora de chegada otimizando a velocidade do navio;
- Estabelecer melhores práticas de eficiência energética em porto, utilizando apenas um gerador do navio, ligação a terra ou utilização de baterias;
- Reduzir a potência de funcionamento para o mínimo necessário quando em stand-by para operação ou entrada em porto;
- Estabelecer melhores práticas / melhor configuração optimizada durante operações operações DP;
- Avaliar a utilização do sistema DP para manter posicionamento aguardando entrada em porto, ou optar por fundear o navio.
- Monitorizar consumo dos propulsores de modo a obter uma utilização ótima.

Casco e hélice

- Avaliar o revestimento e a limpeza do casco e dos hélices como parte da manutenção planeada para manter o bom desempenho do navio;
- Avaliar o polimento dos hélices, caso seja necessário;
- Otimizar o calado e o caimento do navio consoante os diferentes modos de funcionamento;
- Compreender os diferentes modos de funcionamento do navio e os diferentes consumos de combustível;
- Evitar que as defensas toquem na superfície da água.

Casa da máquina

- Estabelecer as melhores práticas de gestão de energia para reduzir o consumo de combustível nos diferentes modos de funcionamento do navio;
- Avaliar e registar os consumos de combustível nos diferentes modos de funcionamento, a fim de permitir uma melhor avaliação comparativa dentro da frota.

Outros consumidores

- Estabelecer melhores práticas para uma utilização energeticamente eficiente do ar condicionado;
- Garantir uma utilização eficiente das luzes/energia elétrica. Manter as luzes apagadas quando não são necessárias e optar por iluminação LED em vez de outras fontes de luz;
- Reduzir a utilização de aquecimento elétrico através da utilização eficiente da recuperação de calor;
- Evitar a utilização desnecessária de água doce mantendo a produção a bordo a um nível mínimo, na medida em que a operação e a área de operação o permitam. O abastecimento de água doce em porto é a solução preferida para uma melhor eficiência energética.

4.3.2. EEOI

O Indicador de Eficiência Energética Operacional (EEOI) é uma métrica utilizada no setor marítimo para avaliar a eficiência energética e o desempenho ambiental dos navios, nomeadamente no que diz respeito às suas emissões de gases de efeito de estufa. O EEOI é um cálculo que permite aos operadores e armadores medir a intensidade de carbono das operações. Este indicador considera as emissões durante a operação do navio, incluindo tanto o tempo em mar aberto quanto em porto. É calculada a eficiência energética operacional do navio usando dados reais de consumo de combustível, distância percorrida e carga transportada.

Eis como o EEOI é normalmente calculado:

Equação 3

$$EEOI \left[\frac{g}{t.mi} \right] = \frac{\text{Emissões de CO}_2 \text{ num período de tempo [g]}}{\text{Total de trabalho de transporte [t.mi]}}$$

O número de emissões de CO₂ é calculado com base na quantidade de combustível consumido, no tipo de combustível e no fator de emissão desse combustível. O trabalho total de transporte representa a quantidade de carga transportada multiplicada pela distância percorrida em toneladas-milha.

O EEOI fornece uma medida da eficiência de um navio em termos de consumo de energia e emissões de carbono por unidade de carga transportada. Este indicador permite às companhias de navegação aferir e comparar o desempenho ambiental de diferentes navios e identificar áreas de melhoria nas suas operações. Valores mais baixos de EEOI indicam uma melhor eficiência energética e uma menor pegada de carbono.

O EEOI é uma ferramenta valiosa para avaliar e melhorar o desempenho ambiental dos navios e pode ser utilizado em conjunto com outras métricas e diretrizes para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e tornar o transporte marítimo mais sustentável.

Das tabelas 9, 11, 13 e 14 é possível determinar o total de emissões de CO₂ para cálculo do EEOI. Da tabela 12 utiliza-se a distância percorrida pelo navio. Os cálculos do EEOI registaram-se na tabela 16.

Tabela 16 – Comparação do EEOI antes e depois da instalação do ESSC

EEOI	Emissões CO ₂ [g]	Distância [mi]	Carga Transportada [t]	EEOI [g/tmi]
Sem ESSC	4 383 202 000	17 745	2870 ¹	86,07
Com ESSC	4 362 965 000	26 564	2870	57,23

Da análise da tabela 16 é possível observar uma redução percentual no EEOI após a instalação das baterias de aproximadamente 34%. Isso significa que houve uma redução de aproximadamente 34% nas emissões de CO₂ por tonelada de carga transportada por milha náutica percorrida após a implementação das baterias.

Os valores típicos de EEOI para navios PSV diesel elétricos podem variar amplamente, mas é comum encontrar valores na faixa de 30 a 70 gramas de CO₂ por tonelada de carga transportada por milha náutica [36].

Um valor de EEOI de 57,23 gramas de CO₂ por tonelada de carga transportada por milha náutica para este navio após a instalação do contentor de armazenamento de energia é um valor

¹ Valor assumido para efeitos de cálculo, navio 70% carregado.

razoável e indica uma boa eficiência energética para este tipo de navio. Mesmo sendo um valor bom, há sempre espaço para melhorias adicionais no que diz respeito a eficiência energética. Tecnologias emergentes, como sistemas de propulsão híbrida ou elétrica avançados, podem potencialmente reduzir ainda mais o EEOI no futuro. De notar que a eficiência energética também varia bastante com base nas condições operacionais do navio, incluindo velocidade de cruzeiro, carga transportada, rotas navegadas e práticas de gestão de energia a bordo.

Apesar dos cálculos acima efetuados terem sido realizados com valores reais não é possível comparar com o valor de EEOI do navio uma vez que, este tipo de navio e propulsão, de acordo com os regulamentos 19.3 e 25.1 do Anexo VI da MARPOL, se encontra isento.

Capítulo 5: Análise de Investimento e Retorno

Neste capítulo, são focados os aspetos financeiros da transição energética para sistemas de propulsão híbrida elétrica no transporte marítimo. O objetivo é efetuar uma análise de investimento abrangente que avalie as implicações económicas da adoção da tecnologia de propulsão com baterias, incluindo os custos associados à utilização da infraestrutura de carregamento nos portos.

5.1. Métricas Financeiras

Para avaliar a viabilidade financeira dos sistemas de propulsão elétrica, serão utilizadas várias métricas financeiras definidas pelo armador e apresentadas na tabela 17:

Tabela 17 - Indicadores financeiros em 2020 [dados do armador]

KPI	Valor	Unidade
Investimento	1 700 000	[€]
Financiamento Público	595 000	[€]
Vida Útil do Equipamento	10	[anos]
Poupança de Combustível Anual	573	[t]
Poupança de Horas de Funcionamento dos Geradores	5 662	[horas]
Custos Hora de Manutenção Geradores	14	[€/h]
Preço do Combustível	414	[€]
Imposto sobre combustível	110	[€/t]
Imposto NO _x	1	[€/kg]
Consumo NO _x	43,76	[kg/t] de MGO
Preço Energia de Terra	0,4	[€/kWh]

De referir que a poupança de combustível anual, 573 toneladas, se refere a uma estimativa feita pelo armador para cálculos da rentabilidade do investimento. Este valor representa o consumo do ano anterior em standby e em porto.

5.1.1. Valor Atual Líquido

O valor atual líquido é uma métrica financeira utilizada para avaliar a rentabilidade de um investimento ou projeto. É amplamente utilizado em finanças e na tomada de decisões empresariais para determinar se um investimento ou projeto é suscetível de gerar um retorno positivo do investimento. Tem em consideração os custos do investimento inicial, a redução dos custos operacionais e os fluxos de caixa futuros, descontados no valor atual.

O valor atual líquido é calculado através da seguinte equação [37]:

Equação 4

$$VAL = \sum_{t=10}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - C_0$$

Nesta equação, CF é o fluxo de caixa anual, r a taxa de desconto (assumindo 8%), t o período, e C_0 o investimento inicial. Para efeitos do cálculo do valor atual líquido será considerado um período de 10 anos, vida útil do ESSC.

Em primeiro lugar foi necessário identificar todos os fluxos de caixa associados ao investimento ao longo da sua vida útil prevista. Estes fluxos de caixa incluem receitas e despesas operacionais. Neste caso não existem receitas recorrentes da instalação do contentor de armazenamento de energia pelo que para efeitos de cálculo será considerada a poupança nos custos operacionais, indicados na tabela 18.

Tabela 18 - Poupanças Operacionais

Poupanças Operacionais	Valor	Preço Unitário	Poupança [€]
Consumo de Combustível (dados do armador)	573 [t]	414 [€/t]	237 222
Manutenção Horas Geradores	5 662 [horas]	14 [€/h]	79 268
Imposto sobre Combustível		110 [€/t]	63 030
Imposto NOx	44 [kg/t MGO]	1	44
TOTAL		379 564 €	

Os custos operacionais, indicados na tabela 19, incluem o valor anual da manutenção do contentor de armazenamento de energia feita pelo fabricante e o consumo de energia em terra.

Tabela 19 - Custos Operacionais

Custos Operacionais	Valor	Preço Unitário	Custo [€]
Manutenção ESSC			8 813
Custos Energia de Terra	177 305	0,4 [€/kWh]	70 922
TOTAL		79 735 €	

Sabendo o valor das poupanças e dos custos operacionais é possível determinar um fluxo de caixa anual de 299 829 €. É então possível determinar o valor atual líquido através da seguinte equação.

$$VAL = \sum_{t=1}^{10} \frac{299\,829}{(1 + 0,08)^t} - 1\,105\,000 \Leftrightarrow VAL = 906\,877 \text{ €}$$

Apenas através do VAL não é possível determinar se estamos perante um bom investimento, contudo é já possível verificar que a instalação do contentor de armazenamento de energia gera um retorno positivo após desconto do custo do capital.

Para determinar se o investimento é viável é necessária uma avaliação da taxa interna de retorno.

Com os valores anteriormente determinados fez-se um gráfico de fluxo de caixa do investimento, indicado na figura 21. De referir que é uma mera projeção feita com os custos de mercados atuais e mantendo os custos operacionais do navio iguais ao longo do tempo. Com a inflação e flutuabilidade dos mercados financeiros esta abordagem sofrerá algumas alterações nomeadamente com o aumento dos preços do combustível fóssil bem como o acréscimo no custo de energia em terra. Também é importante ter em consideração que a gestão dos recursos e a utilização dos geradores a bordo influencia bastante esta projeção.

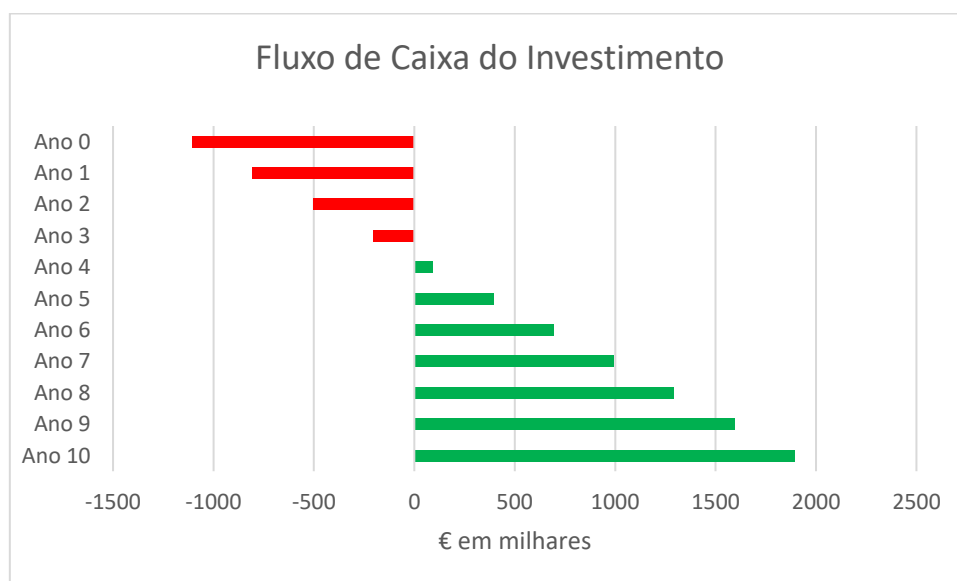


Figura 21 - Fluxo de caixa do investimento ao longo da vida útil do ESSC

5.1.2. Taxa Interna de Retorno (IRR)

A análise da IRR avalia a taxa à qual se espera que o investimento gere retornos. Uma IRR mais elevada sugere uma oportunidade de investimento mais atrativa. Estes incluem os custos de aquisição e instalação de equipamento de propulsão elétrica e os sistemas associados. Os custos operacionais incluem as despesas correntes associadas à manutenção, eletricidade e eventual formação ou certificação adicional da tripulação do navio.

O tempo necessário para recuperar o investimento depende de fatores tais como as necessidades de energia do navio e a duração da estadia em porto. Os navios com maiores necessidades de energia e estadias mais longas têm normalmente um retorno mais rápido do investimento.

Embora os serviços de energia em terra tenham custos, muitas vezes mais elevados do que as tarifas normais de eletricidade, as poupanças resultantes da redução do consumo de combustível, do aumento da eficiência energética e da redução da manutenção tendem a compensar estas despesas. A redução do funcionamento do motor diesel também diminui as necessidades de manutenção.

Considerando o investimento inicial de 1 105 000 € e um fluxo de caixa anual de 299 829 € ao longo dos 10 anos de vida útil da bateria obtém-se uma taxa interna de retorno de 24%.

Comparativamente com a taxa de desconto a taxa interna de retorno é significativamente maior indicando que o projeto oferece um retorno muito superior ao custo do capital (ou à taxa mínima de atratividade). Uma TIR maior que a taxa de desconto sugere que o projeto é economicamente viável e altamente atrativo. Neste caso, o investimento inicial é compensado e os fluxos de caixa futuros proporcionam um retorno considerável.

5.2. Avaliação de riscos

A adoção de sistemas de propulsão elétrica apresenta várias vantagens, incluindo redução de emissões e custos operacionais mais baixos a longo prazo. No entanto, também existem riscos financeiros e incertezas que devem ser considerados para compreender a potencial variabilidade dos resultados financeiros.

Caso não existam apoios governamentais para a implementação de baterias nos navios ou desenvolvimentos de novos navios elétricos torna-se desafiante para os armadores uma vez que o custo das baterias ainda é superior aos sistemas de propulsão convencional ou diesel elétrica.

Outro aspeto a ter em consideração é a flutuabilidade nos preços da eletricidade consoante a localização e políticas governamentais. Esta variação pode ter um impacto significativo nos custos operacionais. Além do preço, é necessária uma disponibilidade de fontes de energia renováveis e de infraestruturas para suportar o carregamento eficiente de grandes frotas elétricas. Estas podem ser limitadas nalgumas regiões, o que irá afetar a viabilidade e os custos operacionais.

A tecnologia de baterias ainda está em evolução, e problemas como a degradação da bateria, a capacidade limitada e os tempos de carregamento afetam a eficiência operacional e os custos de manutenção. De referir que a manutenção é especializada o que acarreta mais custos e fica à mercê da disponibilidade de técnicos qualificados o que pode causar incertezas operacionais.

Outros fatores que devem ser tidos em consideração são as futuras normas ambientais que podem ser mais restritivas aumentando os custos de conformidade, enquanto políticas favoráveis

podem ajudar a reduzir custos operacionais. Deve ter-se também em consideração as novas tecnologias emergentes na área dos combustíveis marítimos alternativos que podem oferecer alternativas à propulsão elétrica, como o LNG, o metanol ou, eventualmente, os biocombustíveis, afetando a competitividade e a viabilidade dos sistemas elétricos.

Por último, é importante referir que a substituição e reciclagem das baterias representa um desafio ambiental significativo, sendo que novas regulamentações podem aumentar os custos associados.

Embora os sistemas de propulsão elétrica ofereçam benefícios significativos em termos de redução de emissões e custos operacionais a longo prazo, é crucial considerar os riscos financeiros e as incertezas associadas. Avaliações cuidadosas dos custos iniciais, variabilidade dos custos de energia, desempenho tecnológico, regulamentações governamentais e aceitação do mercado são essenciais para tomar decisões informadas e minimizar a variabilidade dos resultados financeiros [38].

5.3. Análise SWOT

A análise SWOT, definida na tabela 20, proporciona uma visão clara dos pontos fortes e fracos, bem como das oportunidades e ameaças associadas ao investimento em sistemas de baterias para propulsão elétrica de navios. É fundamental considerar estes fatores na tomada de decisões informadas bem como definir estratégias eficazes de mitigação de risco.

Tabela 20 - Análise SWOT do Investimento

Fatores	Descrição
Forças	Redução significativa das emissões de CO ₂ e poluentes
	Custos operacionais mais baixos a longo prazo devido à maior eficiência energética e menor necessidade de manutenção comparado aos motores diesel.
	Menor dependência de combustíveis fósseis
	Melhor desempenho energético e eficiência
	Aumento da competitividade e inovação tecnológica
	Atratividade económica
	Menos vibrações e ruído que o sistema de propulsão convencional, assim como menor stock de sobressalentes, resposta melhorada a variações bruscas de carga e um nível de fiabilidade maior.
Fraquezas	Alto investimento inicial
	Necessidade de infraestruturas de carregamento adequadas
	A disponibilidade limitada de materiais críticos para a produção de baterias, como lítio, cobalto e níquel, pode elevar os custos e dificultar a produção em larga escala

	Problemas de degradação da bateria e necessidade de manutenção especializada
	Tempos de carregamento ainda significativos
Oportunidades	Desenvolvimento de políticas governamentais favoráveis e incentivos financeiros
	Avanços tecnológicos e melhoria contínua das baterias
	Potencial de liderar a transição para um transporte marítimo mais sustentável
	Expansão do mercado de baterias e novas oportunidades de negócios
Ameaças	Volatilidade nos preços da eletricidade e influência das políticas governamentais
	Riscos financeiros devido à incerteza dos custos operacionais
	Futuras regulamentações ambientais mais restritas aumentando os custos de conformidade
	Desafios na substituição e reciclagem das baterias e os impactos ambientais associados
	Competição com outras tecnologias emergentes de armazenamento como o supercondensador elétrico (supercapacitor) e os volantes de inércia (<i>flywheel</i>)

A análise SWOT destaca que o investimento em sistemas de baterias para a propulsão elétrica de navios possui um grande potencial para transformar o setor do transporte marítimo, tornando-o mais sustentável e eficiente. No entanto, também enfatiza a necessidade de abordar as fraquezas e ameaças, como o elevado custo inicial, a necessidade de infraestrutura de carregamento e a volatilidade do preço da eletricidade. Estratégias de mitigação de riscos, políticas governamentais favoráveis e avanços tecnológicos contínuos são fundamentais para superar esses desafios e aproveitar as oportunidades.

Capítulo 6: Avaliação do Impacto Ambiental

Neste capítulo, a atenção é centrada no impacto ambiental da adoção de sistemas de propulsão elétrica no transporte marítimo. Avaliamos as potenciais reduções de emissões e as implicações de sustentabilidade mais amplas desta transição são também avaliadas.

6.1. Potencial de Redução das Emissões

A transição para sistemas de propulsão elétrica oferece um potencial significativo para a redução de emissões de gases de efeito de estufa e outros poluentes atmosféricos. Os navios movidos a eletricidade, especialmente aqueles que utilizam fontes de energia renováveis, emitem consideravelmente menos dióxido de carbono, óxidos de azoto, óxidos de enxofre e partículas em comparação com os sistemas de propulsão tradicionais a diesel.

A utilização de baterias recarregáveis pode reduzir as emissões diretas durante a operação em portos, áreas costeiras e rotas marítimas. A adoção de sistemas de propulsão elétrica pode levar a uma redução de até 100% das emissões de CO₂ em modos operacionais totalmente elétricos, desde que a eletricidade seja proveniente de fontes renováveis.

A integração de sistemas de propulsão elétrica híbrida em navios não reduz apenas as emissões de gases com efeito de estufa, mas melhora também a eficiência energética em operações de longa duração. Este ponto reforça a análise apresentada nesta tese, demonstrando que a adoção de tecnologias modernas, como as baterias de alta densidade energética e sistemas de distribuição DC, está alinhada com os objetivos do MARPOL e da Estratégia Inicial da IMO. Além disso, a utilização de energia de terra em portos contribui significativamente para a redução das emissões locais e para a melhoria da qualidade do ar nas zonas portuárias [11][12].

6.2. Conformidade com o Anexo VI da MARPOL

O Anexo VI da MARPOL estabelece limites rigorosos para as emissões de poluentes atmosféricos provenientes dos navios. A conformidade com estas regulamentações é essencial para os armadores que operam internacionalmente.

Os sistemas de propulsão elétrica ajudam a cumprir essas normas, reduzindo significativamente as emissões de NO_x e SO_x, que são reguladas no Anexo VI. Além disso, a adoção destas tecnologias facilita a conformidade com os futuros regulamentos ambientais que poderão ser ainda mais restritos.

6.2.1. Óxidos de Enxofre

Neste anexo, estão estabelecidos limites para o teor de enxofre no combustível marítimo. Desde 1 de janeiro de 2020, o limite global de teor de enxofre no combustível foi reduzido para 0,50% [m/m] (massa por massa).

Em Áreas de Controle de Emissões ECA, o limite é ainda mais baixo, 0,10% m/m. Limite este em vigor desde 2015.

6.2.2. Óxidos de Azoto

Os limites de NO_x estão divididos em três níveis (*Tiers*), figura 22, dependendo do ano de construção do navio e da área de operação:

- *Tier I*: Aplica-se a navios construídos entre 1 de janeiro de 2000 e 31 de dezembro de 2010;
- *Tier II*: Aplica-se a navios construídos a partir de 1 de janeiro de 2011.
- *Tier III*: Aplica-se a navios construídos a partir de 1 de janeiro de 2016, mas apenas quando operam em ECAs designadas para controlo de NO_x. Os limites do *Tier III* são significativamente mais baixos do que os do *Tier II*.

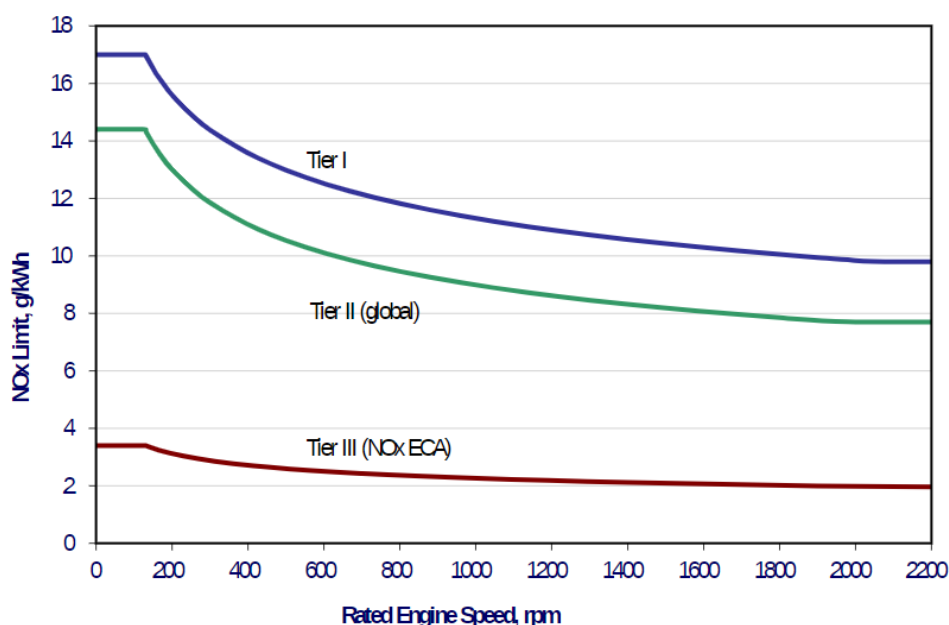


Figura 22 - Limite de emissões NO_x [38]

6.2.3. Emissões de Gases de Efeito Estufa

O Anexo VI inclui também regulamentos para aumentar a eficiência energética dos navios, contribuindo para a redução das emissões de CO₂. Como definido anteriormente no capítulo 4, através do Índice de Eficiência Energética para Navios Novos e do Plano de Gestão de Eficiência Energética do Navio.

Esses regulamentos têm como objetivo reduzir significativamente a poluição atmosférica proveniente dos navios, melhorando a qualidade do ar e contribuindo para a proteção do meio ambiente e da saúde humana [3].

6.3. Análise do Ciclo de Vida das Baterias Marítimas

A análise do ciclo de vida das baterias marítimas é fundamental para compreender o impacto ambiental total das tecnologias de propulsão elétrica. Este método avalia as emissões e os impactos ambientais associados a todas as fases do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas até a sua eliminação final.

6.3.1. Extração e Produção

A produção de baterias, especialmente as de íões de lítio, envolve a extração de materiais como lítio, cobalto e níquel, que podem causar impactos ambientais significativos. A mineração destes materiais pode resultar em degradação ambiental e poluição da água. No entanto, avanços na tecnologia de baterias e práticas de mineração mais sustentáveis estão a ser desenvolvidos para mitigar esses impactos.

6.3.2. Uso e Operação

Durante a fase de uso, as baterias contribuem para a redução de emissões, especialmente quando carregadas com eletricidade obtida a partir de fontes renováveis. A eficiência energética das baterias, bem como a gestão da carga e descarga, são cruciais para maximizar os benefícios ambientais. Os sistemas de gestão de energia ajudam a equilibrar a carga e descarga das baterias, otimizando a sua eficiência e prolongando a sua vida útil.

6.3.3. Reciclagem

A reciclagem de baterias é um aspeto crítico do seu ciclo de vida. Métodos eficazes de reciclagem podem recuperar materiais valiosos e reduzir a necessidade de extração de novos recursos. A pesquisa contínua em tecnologias de reciclagem de baterias de íões de lítio é essencial para minimizar o impacto ambiental a longo prazo [3].

6.4. Implicações para a Sustentabilidade

Além das reduções de emissões, a transição para sistemas de propulsão elétrica tem implicações mais amplas para a sustentabilidade. A utilização de eletricidade, especialmente a proveniente de fontes renováveis como solar, eólica ou hidroelétrica, contribui para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis.

A sustentabilidade também se reflete na gestão do ciclo de vida das baterias. O desenvolvimento de tecnologias para a reciclagem e reutilização de baterias é fundamental para minimizar o impacto ambiental a longo prazo. O uso de materiais menos tóxicos e mais recicláveis no fabrico de baterias é uma área de pesquisa ativa e crítica para o avanço da sustentabilidade no setor marítimo.

Outro aspeto a ser considerado é o impacto na biodiversidade marinha. A redução do uso de combustíveis fósseis diminui a poluição do ar e da água, o que beneficia os ecossistemas. Além disso, a menor emissão de ruídos subaquáticos dos motores elétricos comparados aos motores a diesel reduz a perturbação da vida marinha, melhorando a qualidade ambiental dos oceanos. [3].

Capítulo 7: Discussão e Conclusão

Neste capítulo final, são sintetizados os principais resultados e percepções dos capítulos anteriores e são tiradas conclusões com base na investigação efetuada. Também são discutidas as implicações da pesquisa para o sector marítimo, e indicadas recomendações de políticas e delineados potenciais caminhos para pesquisas futuras.

7.1. Principais Conclusões

A transição para sistemas de propulsão elétrica no setor marítimo oferece uma série de benefícios significativos. A análise de investimento e retorno, as poupanças de consumo de combustível, e a redução das emissões destacam-se como áreas de impacto positivo desta transição.

A análise financeira indicou que, apesar do custo inicial elevado para a instalação de sistemas de propulsão elétrica, o retorno sobre o investimento é positivo a médio e longo prazo. O período de *payback period* varia entre 4 a 5 anos, dependendo do tipo de navio e do tipo de operação. Este retorno positivo é impulsionado pela significativa redução nos custos operacionais dada a superior eficiência energética dos sistemas de armazenamento de energia e a consequente diminuição dos custos associados ao consumo de combustíveis fósseis.

A utilização de propulsão diesel elétrica com fornecimento de energia híbrida resultou numa redução de cerca de 34% nas emissões de acordo com o EEOI determinado. Esta poupança não diminui apenas os custos operacionais, mas contribuiu também para a viabilidade económica da transição, tornando as operações mais sustentáveis a longo prazo.

A análise de emissões mostrou uma redução significativa de CO₂, NO_x e SO_x. Os navios equipados com sistemas de propulsão híbrida, especialmente quando alimentados por fontes de energia renováveis, podem reduzir as emissões de CO₂ até 21%, enquanto as emissões de NO_x e SO_x podem ser praticamente eliminadas.

A instalação de baterias a bordo dos navios mostrou-se altamente benéfica. As baterias permitem apenas a operação em modo elétrico puro em áreas sensíveis e portos, reduzindo significativamente as emissões locais e a poluição sonora, como também oferecem uma flexibilidade operacional adicional. Durante períodos de baixo consumo de energia, as baterias podem ser carregadas e, posteriormente, utilizadas para complementar a energia dos motores principais, otimizando o consumo de combustível. A capacidade de operar com zero emissões em determinadas áreas é uma vantagem crucial num cenário de crescente preocupação ambiental e regulamentações mais rígidas.

7.3. Implicações para o Setor de Transporte Marítimo

As implicações da adoção de propulsão elétrica no setor marítimo são vastas e significativas. No entanto em termos de infraestrutura portuária, é necessário um investimento considerável na adaptação das infraestruturas para suportar o carregamento de navios elétricos. Isso inclui a instalação de pontos de carregamento nos cais e respetiva ligação ao sistema de energia de terra, essenciais para garantir a operação eficiente e contínua dos navios elétricos. Relativamente às regulamentações e normas, a conformidade com regulamentações internacionais, como o Anexo VI da MARPOL, é facilitada pela transição para a propulsão elétrica, uma vez que estas tecnologias cumprem ou até mesmo superam os padrões de emissões estabelecidos. Isso representa um avanço significativo na redução do impacto ambiental do setor marítimo. Além disso, a economia e a competitividade das empresas marítimas também serão beneficiadas a longo prazo. A redução dos custos operacionais, devido à maior eficiência energética dos sistemas de propulsão elétrica, juntamente com a diminuição dos custos associados às emissões, pode aumentar a competitividade das empresas que adotarem essas tecnologias. Desta forma, a transição para a propulsão elétrica não só promove a sustentabilidade ambiental, como também oferece vantagens económicas substanciais para o setor.

7.4. Recomendações Políticas e Direções Futuras

Para apoiar a transição para a propulsão elétrica no setor marítimo, é essencial implementar incentivos fiscais e subsídios, além de regulamentações rigorosas sobre emissões e uso de energia renovável. Investimentos em infraestruturas portuárias e pesquisa e desenvolvimento de baterias mais eficientes e tecnologias de carregamento rápido são cruciais. A integração de energias renováveis e a pesquisa contínua sobre o impacto ambiental e a biodiversidade também são necessárias. Normas internacionais específicas para propulsão elétrica garantirão maior segurança e eficiência. Finalmente, programas de formação para engenheiros e marítimos são fundamentais para enfrentar os desafios técnicos e operacionais das novas tecnologias.

7.5 Conclusão final

A transição para sistemas de propulsão elétrica representa um passo crucial para um setor do transporte marítimo mais sustentável e eficiente. Embora existam desafios significativos, os benefícios ambientais, económicos e sociais fazem desta transição energética uma prioridade. A análise de investimento e retorno, do caso de estudo aqui apresentado, demonstra a viabilidade económica a longo prazo, enquanto a poupança de consumo de combustível e a redução de emissões reforçam os benefícios ambientais. A instalação de baterias a bordo dos navios mostrou-se benéfica, oferecendo flexibilidade e contribuindo para operações mais limpas, em termos ambientais. A colaboração entre governos e indústria é essencial para superar os obstáculos e maximizar os benefícios desta importante mudança tecnológica.

Referências Bibliográficas

- [1] International Maritime Organization (IMO). (2018). Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. London: IMO.
- [2] European Commission. (2023). Delivering the European Green Deal. Brussels: European Commission.
- [3] International Maritime Organization (IMO). (2022). *MEPC.351(78)*. London: IMO.
- [4] DNV. (2016). Life Cycle Analysis of Batteries in Maritime Sector. Høvik: DNV.
- [5] International Maritime Organization (IMO). (2020). IMO Environment Committee Approves Amendments to Cut Ship Emissions. London: IMO.
- [6] Pawlowski, A. (2018). Electric Propulsion for Modern Ships – Driving Forces, Challenges and Design.
- [7] DNV. (2016). *DNV Handbook for Maritime and Offshore Battery Systems*. Høvik: DNV.
- [8] DNV. (n.d.). Rules and Standards Explorer. Retrieved from Veracity by DNV.
- [9] Battery University. (2021). The History of Battery Technology.
- [10] Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2017). Novel thermal management system using boiling cooling for high-powered lithium-ion battery packs for hybrid electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 363, 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.07.067>
- [11] Nuchtaree, C., Li, T., & Xia, H. (2018). Energy efficiency of integrated electric propulsion for ships – a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110145. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110145>
- [12] Aneke, M., & Wang, M. (2016). Energy storage technologies and real life applications – a state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350–377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
- [13] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage systems: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3), 291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
- [14] Gupta, T. A. (2022). Lithium-Sulfur Batteries: Materials, Challenges and Applications.
- [15] Kongsberg. (2020). Technical Description Energy Storage System Container. Kongsberg Gruppen.
- [16] Cellblock. (2025). Lithium-ion Battery Fire Containment Systems.
- [17] BloombergNEF. (2023). Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh.
- [18] Chen, Y. (2020). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards.
- [19] International Maritime Organization (IMO). (n.d.). Marine Fuels: Characteristics, Supply and Performance. London: IMO.
- [20] Fu, J., Cano, Z. P., Park, M. G., Yu, A., Fowler, M., & Chen, Z. (2017). Recent advances in rechargeable zinc–air batteries. *Advanced Materials*, 29(30), 1604685. <https://doi.org/10.1002/adma.201604685>
- [21] Wartsila. (n.d.). Ship Electrification Solutions.

- [22] European Maritime Safety Agency (EMSA). (2022). Shore-Side Electricity – Guidance to Port Authorities and Administrations (Part 1 – Equipment and Technology, Part 2 – Planning, Operations and Safety).
- [23] Enova. (2023). Vårt bidrag for maritim transport i 2023.
- [24] PlugPort. (n.d.). Explore Our Shore Power Locations.
- [25] Enova. (2023). Disse går foran – Europas mest miljøvennlige flåte for nærskipsfart.
- [26] DNV. (2019). Ensuring Safer and More Predictable DP Operations.
- [27] Kongsberg. (n.d.). Azipull Thruster – Proven High Propulsive and Hydrodynamic Efficiency.
- [28] International Maritime Organization (IMO). (1974). International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS).
- [29] Kongsberg. (2020). Fixed Fire Extinguishing System ESSC.
- [30] Kongsberg. (2020). Risk Analysis Energy Storage System Container.
- [31] International Maritime Organization (IMO). (2009). Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator.
- [32] The Nautical Institute. (2020). DP Operator's Handbook. London: The Nautical Institute.
- [33] International Maritime Organization (IMO). (n.d.). Technical and Operational Measures.
- [34] Rutherford, D., & Mao, X. (2020). Potential CO2 reductions under the Energy Efficiency Existing Ship Index. International Council on Clean Transportation (ICCT).
- [35] Zaccone, R., Campora, U., & Martelli, M. (2021). Optimisation of a diesel–electric ship propulsion and power generation system using a genetic algorithm. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 120. <https://doi.org/10.3390/jmse9020120>
- [36] DNV. (2024). Maritime Forecast to 2050.
- [37] Investopedia. (2024). Net Present Value (NPV): What It Means and Steps to Calculate It. Retrieved from <https://www.investopedia.com>
- [38] International Maritime Organization (IMO). (1973/78). MARPOL Annex VI, Regulations 23 and 25.