



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Joana Vaz Caixinha

Descarbonização da Navegação

Uma avaliação em contexto militar

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais,
na especialidade de Engenharia Naval – Ramo de Mecânica



Alfeite
2023



ESCOLA NAVAL



la sainte bi-faire

Joana Vaz Caixinha

Descarbonização da Navegação

Uma avaliação em contexto militar

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval – Ramo de Mecânica

Orientação de: Prof. Doutor Miguel José Pereira Sales Cavique Santos

O Aluno Mestrando

Joana Vaz Caixinha

ASPOF Joana Vaz Caixinha

O Orientador

Miguel Santos

Prof. Doutor Miguel Cavique Santos

Alfeite

2023

“By failing to prepare, you are preparing to fail.”

Benjamin Franklin

Agradecimentos

Para um Aspirante a Oficial, a conclusão da Dissertação de Mestrado marca o culminar de cinco anos de trabalho, ensinamentos e experiências inesquecíveis. Ao longo desta jornada, pude contar com o apoio de diversas pessoas, sendo, portanto, de suma importância expressar os meus sinceros agradecimentos a todas elas.

Expresso a minha mais sincera gratidão ao Professor Doutor Miguel Cavique, o meu orientador, por todo o seu apoio, constante disponibilidade e motivação, guiando-me sempre a um bom porto, durante a realização da dissertação.

Agradeço ao Exmo. Sr. Vice-Almirante Augusto Ezequiel, ao Sr. Coronel Caetano de Sousa, ao Sr. Engenheiro Rebocho Antunes e ao Sr. Engenheiro Cunha Gomes, que prontamente aceitaram participar neste estudo, tendo dado contributos valiosos para o desenvolvimento e sustentação da estratégia proposta na presente dissertação.

Agradeço aos meus camaradas de Classe, pela amizade e união que caracterizaram estes cinco anos e que, com certeza continuarão a prevalecer. Ao Curso Contra-Almirante Manuel Armando Ferraz, por todos os momentos de camaradagem e vitórias alcançadas ao superarmos todos os desafios que surgiram no nosso caminho. Estas experiências fortaleceram a nossa união e tornaram-nos mais resilientes. Juntos, enfrentamos as dificuldades e celebramos as conquistas, criando memórias inesquecíveis que levarei para toda a vida.

Agradeço de coração à minha família, aos meus pais, Ricardo e Ana, ao meu irmão Miguel, à minha avó, à Cristina, ao Noé e ao Henrique, pela força incessante, apoio incansável, palavras de motivação e carinho demonstrado ao longo desta jornada.

Ao Daniel, que me acompanhou incansavelmente nesta caminhada lado a lado, onde com apoio mútuo, muita força e motivação, conseguimos alcançar com sucesso este destino. Obrigada por estares comigo nos bons e nos maus momentos e por seres o meu porto de abrigo.

A todos vós, muito obrigada.

Resumo

No mundo atual, as alterações climáticas impõem metas restritivas para as emissões, sendo marcos os anos de 2030 e 2050. O setor marítimo representa cerca de 2,89% das emissões totais de CO₂, resultante das atividades antropogénicas.

O presente estudo avalia as opções de combustíveis alternativos para navios militares da Marinha Portuguesa, de tipologia NPO, com capacidade de combate, num horizonte temporal de aplicação de 10 a 20 anos. Foram avaliadas sete opções de combustíveis alternativos com potencial aplicação para o setor naval, cada uma com vantagens, limitações e considerações técnicas específicas.

A metodologia adotada inicia com a definição de constrangimentos de segurança, que excluem fluidos criogénicos ou armazenados a pressões superiores a 50 bar, seguido de uma análise energética das opções, comparando massa e volume associado ao seu armazenamento. Uma análise de risco foi realizada, com recurso à conjugação do método FMEA, um processo sistemático de avaliação de risco para modos de falha específicos, com a técnica AHP, aplicada para a quantificação dos parâmetros ocorrência, severidade e detetabilidade, por comparação das alternativas par a par.

A Teoria de Dempster-Shafer é uma teoria para o tratamento da incerteza em ambientes de informação incompleta, considerando dois limites, a crença e a plausibilidade. Quatro *experts* na área, avaliaram os elementos focais propostos, atribuindo massas de probabilidade a cada um dos conjuntos. Os resultados apontam que o conjunto constituído pelos hidrocarbonetos verdes conjuntamente com o metanol, bem como, uma frota diversificada com soluções de hidrocarbonetos verdes, hidrogénio, metanol e outras opções futuras, constituem as opções com maior viabilidade e potencial de aplicação.

Palavras-chave: Descarbonização, Combustíveis Alternativos, Análise de Risco, Teoria de Dempster-Shafer, FMEA-AHP

Abstract

In today's world, climate change imposes restrictive emission reduction goals, with key milestones set for 2030 and 2050. The maritime sector contributes approximately 2,89 percent of total CO₂ emissions stemming from human activities.

This research assesses alternative fuel options for combat-ready NPO military vessels of the Portuguese Navy, within a temporal framework spanning 10 to 20 years. Seven alternative fuel options, each characterized by distinct advantages, limitations, and technical aspects, were subjected to evaluation.

The employed methodology initiates with the delineation of safety constraints, thereby excluding cryogenic substances or those stored under pressures exceeding 50 bar. This was followed by an energy analysis of the available options, entailing a comparative assessment of mass and volume associated with their storage. Furthermore, a risk analysis was conducted by combining the FMEA method, a systematic risk assessment process for specific failure modes, with the AHP technique. This application facilitated the quantification of parameters such as occurrence, severity, and detectability, by a pairwise comparison of the alternatives.

The Dempster-Shafer theory is a framework designed to address uncertainty within contexts characterized by incomplete information. It operates within the bounds of two key parameters: belief and plausibility. In this study, four experts evaluated the proposed focal elements, attributing probability masses to each of the sets under consideration. The outcomes of this evaluation highlight that the set comprising green hydrocarbons in conjunction with methanol, along with a diversified fleet featuring green hydrocarbon solutions, hydrogen, methanol, and other prospective alternatives, represent the options characterized by the highest degree of feasibility and potential application.

Keywords: Decarbonization, Alternative Fuels, Risk Analysis, Dempster-Shafer theory, FMEA-AHP

Índice Geral

INTRODUÇÃO	1
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
1.1. Emissões marítimas e impacto na qualidade do ar	5
1.2. Enquadramento Legislativo	10
<i>International Maritime Organization (IMO)</i>	10
Metas de Descarbonização	13
1.3. Tipos de Descarbonização	14
1.3.1. Principais Conceitos	15
Densidade Energética	15
Toxicidade	16
<i>Flash-Point</i>	16
Temperatura de Autoignição	16
Limites de Inflamabilidade	17
Número de Octanas e Número de Cetano	17
Emissões <i>Well-to-Tank (WTT)</i> e <i>Tank-to-Propeller (TTP)</i>	17
1.3.2. Combustíveis Alternativos	18
Biodiesel/ Diesel Sintético	18
Hidrogénio	21
Amoníaco	28
Metanol	31
Gás Natural Liquefeito (GNL)	35
Gás de Petróleo Liquefeito (GPL)	38
Eletricidade (baterias)	42
1.4. Discussão	48
1.4.1. Síntese	48
2. METODOLOGIA	53

2.1.	Análise de Risco	54
2.1.1.	<i>Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)</i>	55
2.1.2.	<i>Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)</i>	57
2.1.2.1.	<i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i>	58
2.2.	Teoria de <i>Dempster-Shafer</i> (DST)	63
2.2.1.	Combinação de Corpos de Evidência	65
3.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	67
3.1.	Seleção dos Combustíveis para Análise	67
3.2.	Análise FMEA-AHP	74
3.3.	Combinação de Opiniões dos <i>Experts</i>	78
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	APÊNDICES	123
	Apêndice A – Processos de Produção dos Combustíveis em Análise	123
	Biodiesel/Diesel Sintético	123
	Hidrogénio	124
	Amoníaco	127
	Metanol	128
	Gás Natural Liquefeito (GNL)	131
	Gás de Petróleo Liquefeito (GPL)	131
	Apêndice B – Cálculos Análise Energética	133
	Apêndice C – Cálculo de K_1	135

Apêndice D– Método da Média dos Valores Normalizados	137
Apêndice E– Matrizes de Comparação Paritária	139
Apêndice F– Seleção de Elementos Focais para Aplicação da DST	141
Apêndice G – Inquéritos	143
Inquérito Versão 1	143
Inquérito Versão 2	144
Apêndice H – Cálculos de Combinação de Corpos de Evidência	145
Apêndice I – Programa de Combinação e Análise de Opiniões	151
ANEXOS	157
Anexo A – Potenciais Configurações de Sistemas de Propulsão a Amoníaco	157
Anexo B – Escalas <i>Rank</i> FMEA	159
Anexo C – Dados para o Cálculo da Autonomia	161
Anexo D – Respostas aos Inquéritos	163
Resposta <i>Expert</i> 1	163
Resposta <i>Expert</i> 2	165
Resposta <i>Expert</i> 3	166
Resposta <i>Expert</i> 4	167

Lista de Figuras

Figura 1 – Tipos de emissões de um navio genérico (adaptado de EEA & EMSA, 2021)	6
Figura 2 - Mortalidade mundial anual associada a doenças cardiopulmonares derivada de emissões de PM _{2,5} (Corbett et al., 2007).....	8
Figura 3 - Emissões de NO _x , SO ₂ e PM _{2,5} referentes a navios que atracaram em portos da EU e do EEA (EEA & EMSA, 2021).....	9
Figura 4 - Evolução temporal dos limites de teor de enxofre no combustível marítimo (Rata et al., 2017)	11
Figura 5 - Áreas de Controlo de Emissões existentes (Mao & Rutherford, 2018).....	11
Figura 6 - Perspetiva geral dos combustíveis alternativos e das suas diferentes vias de produção (Wang & Wright, 2021).....	15
Figura 7 - Método de armazenamento hidretos metálicos (Abe et al., 2019).....	24
Figura 8 – Reações de hidrogenação e desidrogenação do LOHC (Melcher et al., 2021)	26
Figura 9 - Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE) (Moita, 2023)	40
Figura 10 - Componentes de uma bateria (adaptado de EMSA & DNV GL, 2020).....	43
Figura 11 - Configuração de sistema 100% elétrico (adaptado de DNV GL, 2015).....	46
Figura 12 - Fluxograma da metodologia aplicada	53
Figura 13 - Passo-a-passo FMEA (adaptado de Stamatis, 2003)	56
Figura 14 - Etapas do AHP (adaptado de Saaty, 2004, 2008).....	59
Figura 15 - Estrutura Hierárquica AHP (adaptado de Saaty, 1987)	60
Figura 16 - Navio Patrulha Oceânico da Classe Viana do Castelo (Marinha Portuguesa, 2023).....	67
Figura 17 . Processo de Transesterificação (Shahid & Jamal, 2011)	123
Figura 18 – Processo Fischer-Tropsch (Brynolf et al., 2022)	124
Figura 19 - Esquema de unidade básica de Eletrólise da Água (Zeng & Zhang, 2010).....	126
Figura 20 - Diagrama do processo Haber-Bosch (Ash & Scarbrough, 2019).....	128
Figura 21 - Classificação do Metanol segundo as diferentes fontes de produção (IRENA & Methanol Institute, 2021)	129
Figura 22 - Matrizes de comparação paritária para cada modo de falha e o correspondente critério de FMEA avaliado	139

Figura 23 - Síntese de possíveis sistemas de propulsão alimentados a amoníaco (de Vries, 2019; Giddey et al., 2017; adaptado de Hansson et al., 2020; MAN Energy Solutions, 2019)..... 157

Lista de Quadros

Quadro 1 - Breve revisão da tecnologia atual no âmbito das baterias com maior aplicabilidade para o setor marítimo (BEPA Association, 2022; Echandia, 2022; EMSA & DNV GL, 2020; Flash Battery, 2022; Levasseur, 2017; Rose, 2022; Sachitanad, 2021; Schipper et al., 2017; Tvette, 2021; Ulvestad, 2018; Yu et al., 2017)	44
Quadro 2 - Escala Fundamental de Saaty (adaptado de Saaty, 1987)	60
Quadro 3 – Elementos Focais para avaliação	79
Quadro 4 - Síntese de alguns dos métodos de produção de hidrogénio (adaptado de Abdalla et al., 2018; Dincer, 2012; Noureldin et al., 2015; N. A. A. M. P. Santos, 2022)	125
Quadro 5 –Elementos focais propostos para o estudo em contraste com os sugeridos pelos peritos.....	142
Quadro 6 - Escala referente ao parâmetro Ocorrência (O) (adaptado de Kabir & Papadopoulos, 2018; Liu et al., 2013)	159
Quadro 7 - Escala referente ao parâmetro Severidade (S) (adaptado de Kabir & Papadopoulos, 2018; Liu et al., 2013)	159
Quadro 8 - Escala referente ao parâmetro Detetabilidade (D) (adaptado de Kabir & Papadopoulos, 2018; Liu et al., 2013)	160

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação de propriedades entre biodiesel de colza , diesel sintético e combustível NATO F-76 (Kass et al., 2018; Sajjadi et al., 2016; Tosh et al., 1992).....	19
Tabela 2 - Densidade Energética do Hidrogénio (Depken et al., 2022; Melcher et al., 2021; Rivard et al., 2019).....	24
Tabela 3 - Resumo dos parâmetros (VALERO, 2014).....	48
Tabela 4 - Índices de Consistência Aleatória (Saaty, 2004).....	62
Tabela 5 - Valores de Eficiência associados a cada aplicação (Goldmann et al., 2018; Innovation & Technology Network of WLPGA, 2021; Mckinlay et al., 2020; Tunér et al., 2018).....	70
Tabela 6 - Análise energética dos combustíveis.....	71
Tabela 7 - Análise comparativa do impacto do deslocamento na potência necessária para manter a velocidade de 15 nós.....	73
Tabela 8 - Aplicação da Análise FMEA-AHP	77
Tabela 9 - Massas de probabilidade atribuídas pelos peritos aos elementos focais enunciados	80
Tabela 10 – Valores de Crença e Plausibilidade das opiniões dos experts	83
Tabela 11 – Resumo dos valores de combinação de opiniões.....	85
Tabela 12 - Cálculo do parâmetro K1	136
Tabela 13 – Elementos Focais	143
Tabela 14 – Elementos Focais	144
Tabela 15 - Combinação das opiniões dos peritos ($m1 \oplus m2$)	145
Tabela 16 - Cálculos da combinação ($m1 \oplus m2$)	146
Tabela 17 - Combinação das opiniões dos peritos ($m1 \oplus m2 \oplus m3$)	147
Tabela 18 - Cálculos da combinação ($m1 \oplus m2 \oplus m3$)	148
Tabela 19 - Combinação das opiniões dos peritos ($m1 \oplus m2 \oplus m3 \oplus m4$).....	149
Tabela 20 - Cálculos das Combinações de Opiniões.....	150
Tabela 21 - Dados de Consumo vs. Velocidade dos NPO (adaptado de Marinha Portuguesa, 2020).....	161
Tabela 22 – Elementos focais e respetivas massas propostas pelo Expert 1	164
Tabela 23 - Elementos focais e respetivas massas propostas pelo Expert 2.....	165

Tabela 24 - Elementos focais e respectivas massas propostas pelo Expert 3.....	166
Tabela 25 - Elementos focais e respectivas massas propostas pelo Expert 4.....	167

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Relação de densidade energética dos combustíveis em análise.....	49
Gráfico 2 – Valores de Crença e Plausibilidade dos elementos focais em análise.....	86
Gráfico 3 - Valores de Crença e Plausibilidade de outros elementos focais adicionais.	87
Gráfico 4 - Gráfico Potência vs. Velocidade, dados provenientes de Provas de Mar (Leite, 2020; Marinha Portuguesa, n.d.).....	162

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrônimos

AC - Corrente Alternada (*Alternating Current*)

ACGIH - *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*

AEM - Membrana de Troca de Aniões Alcalinos (*Anion Exchange Membrane*)

AHP - Processo Hierárquico Analítico (*Analytic Hierarchy Process*)

AKI - *Anti-Knock Index*

ATR - Reforma Autotérmica (*Autothermal Reforming*)

AWE - Eletrólise de Água Alcalina (*Alkaline Water Electrolysis*)

BC - Carbono Negro (*Black Carbon*)

BFB - Leito Fluidizado Borbulhante (*Bubbling Fluidized Bed*)

BLEVE - *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*

BSFC - Consumo de Combustível Específico (*Brake Specific Fuel Consumption*)

CI - Combustão Interna

CI - Índice de Consistência (*Consistency Index*)

CII - *Carbon Intensity Indicator*

COGES - *Combined Gas Turbine-Electric and Steam*

COP - Conferência das Partes (*Conference of the Parties*)

COV - Compostos Orgânicos Voláteis

CR - Razão de Consistência (*Consistency Ratio*)

D - Detetabilidade

DA - Digestão Anaeróbia

DAC - Captação Direta do Ar (*Direct Air Capture*)

DC - Corrente Contínua (*Direct Current*)

DMFC - *Direct Methanol Fuel Cells*

DST - Teoria de Dempster-Shafer (*Dempster-Shafer Theory*)

ECA - Área de Controlo de Emissões (*Emission Control Area*)

EEA - Agência Europeia do Ambiente (*European Environment Agency*)

EEA - Espaço Económico Europeu (*European Economic Area*)

EEDI - *Energy Efficiency Design Index*

EEOI - *Energy Efficiency Operational Indicator*

EEXI - *Energy Efficiency Existing Ship Index*

EGR - Recirculação dos Gases de Escape (*Exhaust Gas Recirculation*)

ELECTRE - *Elimination and Choice Expressing*

EMTER - *European Maritime Transport Environmental Report*

EST - Esquema de Separação de Tráfego

FC - Célula de Combustível (*Fuel Cell*)

FMEA - Análise de Modos de Falha e Efeitos (*Failure Mode and Effects Analysis*)

FT - *Fischer-Tropsch*

GEE- Gases Efeito de Estufa (*Greenhouse Gases*)

GNL - Gás Natural Liquefeito (*Liquefied Natural Gas*)

GPL - Gás de Petróleo Liquefeito (*Liquefied Petroleum Gas*)

GWP - Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential*)

HC - Hidrocarbonetos

HFO - *Heavy Fuel Oil*

HVO - *Hydrotreated Vegetable Oil*

IA - Inteligência Artificial

IMO - Organização Marítima Internacional (*International Maritime Organization*)

IO - Índice de Octanas

KP - Protocolo de Quioto (*Kyoto Protocol*)

LFP - Fosfato de Ferro-Lítio (*Lithium Iron Phosphate*)

LHV - Poder Calorífico Inferior (*Low Heating Value*)

LOHC - *Liquid Organic Hydrogen Carriers*

LTO - Titanato de Lítio (*Lithium-Titanium Oxide*)

MARPOL - Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição dos Navios
(*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*)

MAUT - *Multi-Attribute Utility Theory*

MCDA - Análise Multicritério (*Multi-Criteria Decision Analysis*)

MCFC - Célula de Combustível de Carbonato Fundido (*Molten-Carbonate Fuel Cell*)

MDO - *Marine Diesel Oil*

MF - Modo de Falha

MGO- *Marine Gas Oil*

MON - *Motor Octane Number*

NATO – Organização do Tratado do Atlântico Norte (*North Atlantic Treaty Organization*)

NC - Número de Cetano (*Cetane Number*)

NCA - Óxido de Lítio Níquel Cobalto Alumínio (*Lithium Nickel-Cobalt-Aluminum Oxide*)

NIOSH - *The National Institute for Occupational Safety and Health*

NIR - *National Inventory Report*

NMC - Óxido de Níquel Cobalto Manganês (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*)

NMCOVs - Compostos Orgânicos Voláteis Não-Metânicos

NPO - Navio Patrulha Oceânico

O - Ocorrência

ODS - Substâncias Depletoras da Camada de Ozono Troposférico (*Ozone-Depleting Substances*)

ONU - Organização das Nações Unidas (*United Nations*)

PEM - Membrana de Troca de Protões (*Proton Exchange Membrane*)

PEMFC - Célula de Combustível de Membrana Polimérica

PGNAVSUP 105 - Manual de Manobra das Unidades Navais da Classe Viana do Castelo

PM - Partículas em Suspensão (*Particulate Matter*)

POX - Oxidação Parcial (*Partial Oxidation*)

PROMETHEE - *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*

PSA - *Pressure Swing Adsorption*

RI - Índice de Consistência Aleatória (*Random Index*)

RON - *Research Octane Number*

RPN - Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number*)

RPT - *Rapid Phase Transition*

S - Severidade

SCR - Redução Seletiva Catalítica à Base de Ureia (*Selective Catalytic Reduction*)

SECA - Área de Controlo de Emissões de Enxofre (*Sulphur Emissions Control Area*)

SEEMP - *Ship Energy Efficiency Management Plan*

SMART - *Simple Multi-Attribute Rating Technique*

SMR - Reforma a Vapor de Metano (*Steam Methane Reforming*)

SOE - Eletrólise de Óxido Sólido (*Solid Oxide Electrolyzer*)

SOFC - Célula de Combustível de Óxido Sólido (*Solid Oxide Fuel Cell*)

TLVs - *Threshold Limit Values*

TOPSIS - *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*

TTP - *Tank-to-Propeller*

TWA - *Time Weighted Average Concentration*

UE - União Europeia (*European Union*)

WTT - *Well-to-Tank*

Introdução

No mundo atual, as alterações climáticas são um indicador irrefutável da necessidade de mudança, servindo como fator de consciencialização para o risco de insustentabilidade da vida humana. As presentes mudanças têm vindo a impulsionar restrições na emissão de gases poluentes para a atmosfera, bem como a catalisar o desenvolvimento tecnológico e a criação de alternativas aos meios existentes.

A procura por um combustível alternativo para o setor marítimo, que cumpra os requisitos, já existentes e cumpridos com sucesso pelo *Marine Gas Oil* (MGO), é um desafio de larga escala, com um período de implementação relativamente reduzido, face às diversas regras e metas, implementadas pela *International Maritime Organization* (IMO). Até há cerca de 1 ano, estas metas tinham um carácter obrigatório, em termos legais, apenas para a marinha mercante, colocando os navios militares numa posição neutra relativamente à implementação de combustíveis alternativos ou métodos para redução de emissões. A aplicação destas opções em navios comerciais já é um desafio significativo, sendo que para navios militares, devido às inúmeras questões de segurança, técnicas e logísticas, torna-se ainda mais complexa. No entanto, a sua adoção pode trazer diversas vantagens, não só ambientais como operacionais, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e aumentando a flexibilidade operacional. A possibilidade de implementação de vários tipos de combustível no sistema de propulsão, através de configurações *dual fuel*, potenciam uma maior redundância em termos de abastecimento. A densidade energética, inflamabilidade e riscos inerentes do combustível são fatores determinantes na escolha de novas alternativas, especialmente em navios militares, com possibilidade de combate, onde a segurança da guarnição e dos equipamentos críticos é fundamental. Assim, a guarnição e a sua integridade devem ser o ponto fulcral a garantir, conjugado com a integridade dos sistemas, aplicabilidade logística, autonomia, eficiência e diminuição do impacto ambiental.

No presente estudo efetua-se uma análise das principais alternativas existentes em termos de combustíveis marítimos, tendo como principal foco a sua aplicabilidade em navios militares da Marinha Portuguesa. Esta análise, será uma análise de risco, que pretende concluir quais os combustíveis com viabilidade de aplicação, numa escala a médio/longo prazo, isto é, com implementação de projetos entre 10 a 20 anos. Até lá,

espera-se um potencial desenvolvimento de todas estas tecnologias, principalmente no que concerne a métodos de produção e disponibilidade dos combustíveis, por forma a ultrapassar estes fatores balizadores na atualidade.

Nesta dissertação, o estudo das propriedades e comparação dos combustíveis alternativos é apoiado extensivamente por artigos científicos no âmbito do tema. A metodologia proposta comporta uma análise energética, seguida da aplicação da Análise de Modos de Falha e Efeitos – *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA), conjugada com uma técnica do *Analytic Hierarchy Process* (AHP), de comparação de situações dois a dois, para alcançar um conjunto de combustíveis possíveis. A conclusão final obtém-se da conjugação da opinião de especialistas utilizando a Teoria de Dempster-Shafer (DST).

O método FMEA-AHP consiste num processo sistemático de avaliação de modos de falha num sistema, através de ferramentas que permitem priorizar possíveis modos de falha com a determinação do *Risk Priority Number* (RPN). O AHP foi utilizado para determinação dos vetores prioridade de cada modo de falha, relativamente à Ocorrência, Severidade e Detetabilidade.

A DST é uma teoria probabilística amplamente aplicada no tratamento da incerteza em ambientes de informação incompleta ou ambígua. Esta oferece uma estrutura matemática para representar e combinar diferentes fontes de informação levando em consideração dois limites para a possibilidade de acontecimentos, crença e plausibilidade. Na presente dissertação foi utilizada a Regra de Combinação de Dempster, para conjugar as opiniões de *experts* relativas ao futuro combustível, com maior viabilidade para implementação em navios militares.

O primeiro capítulo consiste numa revisão bibliográfica de sete combustíveis primários tomados para análise: Biodiesel/Diesel Sintético; Hidrogénio; Amónio; Metanol; Gás Natural Liquefeito (GNL); Gás de Petróleo Liquefeito (GPL); e Eletricidade armazenada em baterias. Este culmina com uma tabela resumo dos parâmetros mais relevantes e uma breve análise dos resultados apresentados. No segundo capítulo realizou-se uma revisão dos métodos propostos. No Capítulo 3 é

aplicada a metodologia proposta e no Capítulo 4 são discutidos e analisados os resultados e retiradas as respectivas conclusões.

1. Revisão Bibliográfica

O presente capítulo aborda conceitos, convenções IMO e projetos existentes, bem como a motivação para o estudo, permitindo uma melhor compreensão da evolução do tema “Descarbonização” no âmbito naval, e mais especificamente, militar. Inicia com uma introdução ao problema e necessidade de redução de emissões, referindo as principais metas impostas nas mais recentes conferências sobre as alterações climáticas, como a COP26. Há cerca de três décadas, a Organização das Nações Unidas (ONU), promoveu cimeiras globais, denominadas *Conference of the Parties* (COP), nas quais são discutidas e tomadas decisões no âmbito das alterações climáticas. Em 2015, teve lugar em Paris a COP21, uma das mais importantes conferências recentes, onde todos os estados concordaram em trabalhar, conjuntamente, para limitar o aquecimento global a valores abaixo dos 2 °C e empregar esforços para limitar este fenómeno a 1,5 °C. A COP26 realizou-se em Glasgow em 2021, com o principal objetivo de analisar os progressos realizados relativamente aos objetivos assumidos no Acordo de Paris e debater o compromisso de adoção de metas mais ambiciosas para a redução de emissões de gases com efeito estufa até 2030 (UNFCCC, n.d.).

Seguidamente, será apresentada uma revisão da literatura, relativa à legislação vigente e aos sistemas alternativos de propulsão, visando a diminuição da pegada carbónica e a melhoria da eficiência.

1.1. Emissões marítimas e impacto na qualidade do ar

Desde há séculos que o transporte marítimo tem sido uma peça essencial na globalização, sendo por isso, uma atividade em evidente ascensão, diretamente relacionada com o aumento da economia e mercados mundiais. De acordo com dados de 2019, cerca de 11,08 mil milhões de toneladas de bens foram transportados pelo mar, o que demonstra um crescimento de 85% desde o ano de 2000. Porém, a dependência de combustíveis fósseis e a conseqüente poluição atmosférica são desafios importantes (United Nations Publications, 2020).

O transporte marítimo é considerado um dos mais eficientes em termos energéticos, por carga transportada por quilómetro. Todavia, a poluição proveniente das

atividades marítimas tem implicações muito significativas na qualidade do ar e da água. A Figura 1 engloba os diversos tipos de emissões de compostos poluentes de um navio genérico.

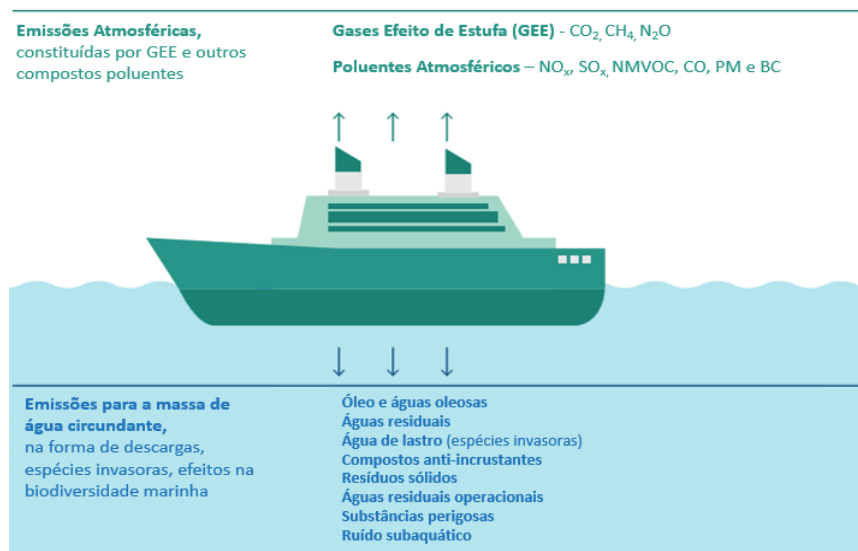


Figura 1 – Tipos de emissões de um navio genérico (adaptado de European Environment Agency [EEA] & European Maritime Safety Agency [EMSA], 2021)

No presente estudo, o foco será exclusivamente nos impactos das atividades marítimas na poluição atmosférica. De acordo com o quarto estudo realizado pela IMO, em 2018, as emissões de gases efeito de estufa (GEE) representavam cerca de 2,89% do total de CO₂ das atividades antropogénicas, tendo aumentado em relação a 2012 (2,76%) (IMO, 2020). Ao nível europeu, o setor marítimo contribui com cerca de 14,1% das emissões de GEE no setor dos transportes, de acordo com os dados mais recentes da *European Environment Agency* (EEA). Globalmente o panorama é semelhante, com cerca de 11% das emissões de GEE provenientes do setor dos transportes a corresponder ao setor marítimo (International Energy Agency [IEA], 2022).

Comparativamente com fontes terrestres de poluição atmosférica, as emissões resultantes da atividade marítima são menos perceptíveis, uma vez que ocorrem longe de áreas povoadas (Miola et al., 2010). Vários estudos e representações das principais rotas de transporte marítimo, demonstram que, cerca de 70% das emissões ocorrem a menos de 200 milhas da costa, podendo ser transportadas na atmosfera, afetando a qualidade do ar no mar e em terra. Assim, as emissões provenientes dos motores diesel marítimos,

representam uma fonte crescente de poluição atmosférica, com consequências para o clima, qualidade do ar e saúde pública (Eyring et al., 2010).

Em termos de impacto ambiental atmosférico, os principais compostos emitidos são os precursores de ozônio, tais como, óxidos de azoto (NO_x), os compostos orgânicos voláteis não-metânicos (NMCOVs) e o monóxido de carbono (CO) e ainda, o dióxido de carbono (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2), partículas em suspensão (PM), o carbono negro (BC), incluindo outros GEE como o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) (IMO, 2020; Matthias et al., 2010).

As consequências associadas à presença de compostos como NO_x , CO, SO_2 , PM e NMCOVs na atmosfera são preocupantes, devido ao seu potencial impacto na saúde humana. Mais especificamente, o SO_2 e o NO_x presentes na atmosfera, contribuem para a formação de chuvas ácidas, afetando os cursos de água e solos. O NO_x interage com gases vestigiais na atmosfera, absorvendo radiação na gama espectral relevante para o efeito de estufa. Além disso, é um precursor do N_2O , um GEE de longa duração, que contribui para a destruição da camada de ozônio e o aumento do efeito de estufa. O CO_2 é alvo de particular destaque devido ao seu potencial no aumento do efeito de estufa e consequente aquecimento global (Lammel & Graßl, 1995; Matthias et al., 2010).

Quanto às PM são partículas de fuligem, elementos incombustíveis e combustível não queimado, oriundos da queima de combustíveis fósseis (Antunes, 2014). As PM variam em diâmetros aerodinâmicos, sendo as mais prejudiciais para o sistema respiratório humano as com diâmetro inferior a $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$), que equivalem a cerca de 95% das PM geradas pela combustão de um motor diesel marítimo (Sharma, 2006). Estas partículas estão correlacionadas com problemas do foro cardiorrespiratório, como, ataques de asma e cardíacos, além de aumentar a mortalidade prematura (Corbett et al., 2007). Um estudo realizado por Corbett et al. (2007), relacionou as emissões derivadas do setor de transporte marítimo, mais especificamente as $\text{PM}_{2,5}$, com a mortalidade anual associada a doenças cardiopulmonares, a nível mundial, como se verifica na Figura 2.

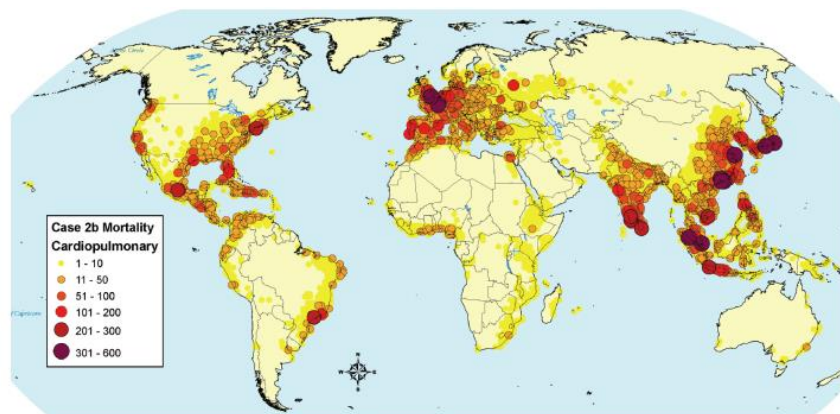


Figura 2 - Mortalidade mundial anual associada a doenças cardiopulmonares derivada de emissões de $PM_{2,5}$ (Corbett et al., 2007)

O BC, associado às PM, corresponde às partículas negras emitidas, absorvendo a energia solar, o que resulta na aceleração da fusão da neve e do gelo, particularmente na zona do Ártico (Miola et al., 2010). Atualmente, a produção de partículas associadas ao BC é consequência da prática de “*slow steaming*”, isto é, uma utilização pouco efetiva e reduzida da potência de serviço das máquinas propulsoras, resultando no fornecimento insuficiente de ar aos turbocompressores (Antunes, 2014). O estudo realizado por Lack & Corbett (2012) demonstra que os fatores de emissão aumentam 3 a 6 vezes com cargas baixas do motor, em comparação com cargas elevadas (85-100%). O termo NMCOV refere-se aos compostos orgânicos voláteis não-metânicos, originados por oxidações parciais dos óleos lubrificantes, cujas emissões dependem das tecnologias de injeção e respetivos ciclos de trabalho. Estes são compostos por diversas substâncias indutoras de cancro, como, formaldeídos e furanos (Antunes, 2014).

De uma perspetiva global, de acordo com os últimos dados da IMO, as emissões de GEE, incluindo o CO_2 , CH_4 e N_2O aumentaram cerca 9,6% de 2012 a 2018, alcançando 1076 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_2e). Quanto às emissões de CO_2 , exclusivamente, aumentaram 9,3%, atingindo o valor de 1056 milhões de toneladas em 2018. Com base nas projeções, prevê-se que estes valores aumentem de 90%, no ano de 2018, para 90-130% até 2050, em relação ao nível de emissões de 2008, até 2050, dependendo dos diversos cenários económicos e energéticos a longo prazo (IMO, 2020).

Segundo os dados do *European Maritime Transport Environmental Report* (EMTER), em 2019, as emissões de NO_x, dos navios que atracaram em portos da União Europeia (UE) e do Espaço Económico Europeu (EEA), foram cerca de 4,46 milhões de toneladas, representando 22% das emissões globais deste composto no setor marítimo. A Figura 3a) ilustra as emissões de NO_x nas áreas supramencionadas, em 2019, permitindo identificar claramente as rotas marítimas mais utilizadas. Relativamente ao SO₂, em 2019 apresentou valores de emissões de cerca de 1,63 milhões de toneladas, o que representa cerca de 16% das emissões globais do setor. A Figura 3b) mostra a variação destas emissões entre 2014 e 2019, destacando a redução nas áreas do Canal da Mancha, Mar do Norte e Mar Báltico comparativamente a 2014, devido à implementação de regulamentos de controlo de enxofre. Nas áreas não regulamentadas, como o Mar Mediterrâneo, as emissões permaneceram em grande parte inalteradas ou sofreram um aumento. Quanto às emissões de PM_{2,5} totalizaram, em 2019, cerca de 0,27 milhões de toneladas, representando aproximadamente 18% das emissões globais deste composto provenientes de navios. A Figura 3c) ilustra as emissões de PM_{2,5}, na área marítima europeia no mesmo ano (European Environment Agency [EEA] & European Maritime Safety Agency [EMSA], 2021).

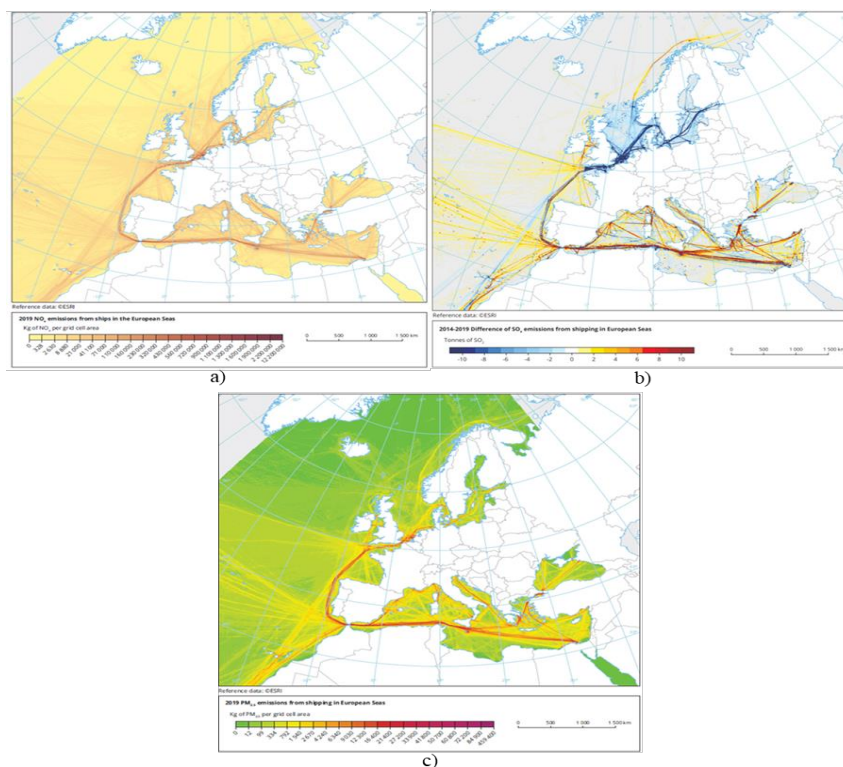


Figura 3 - Emissões de NO_x, SO₂ e PM_{2,5} referentes a navios que atracaram em portos da EU e do EEA (European Environment Agency [EEA] & European Maritime Safety Agency [EMSA], 2021)

Ao longo dos anos surgiram regulamentos e restrições ao nível das emissões de poluentes, as quais serão abordadas no próximo subcapítulo. Devido ao facto de o trabalho incidir numa abordagem militar, torna-se importante salientar que os dados não incluem informações relativas a emissões de navios militares. Segundo o disposto no *National Inventory Report* (NIR) de Portugal em 2022, que aborda dados relativos a emissões e, conseqüente, poluição atmosférica, não existe qualquer referência a emissões de origem militar, à exceção da aviação militar (Pereira et al., 2022).

1.2. Enquadramento Legislativo

International Maritime Organization (IMO)

A IMO, agência das Nações Unidas, é a autoridade especializada que estabelece padrões para a segurança, proteção e sustentabilidade da navegação internacional. Concebida em 1948, na Conferência Internacional de Genebra, tem como principal objetivo a criação de um quadro regulamentar para a indústria naval, que seja justo e universalmente implementado (IMO, 2023a). Cerca de 25 anos mais tarde foi adotada a Convenção MARPOL (*International Convention for the Prevention of Pollution from Ships*) responsável pela prevenção da poluição do ambiente marinho por navios. Após a ocorrência de diversos acidentes com petroleiros entre 1976 e 1977, surgiu a necessidade de regular a atividade para prevenir desastres ambientais. Como resposta, foi adotado o Protocolo MARPOL, em 1978, absorvendo a Convenção-mãe, não vigente. Este foi o ponto de viragem na regulamentação da IMO, que para além da segurança e da navegação se expandiu para as questões ambientais (IMO, 2023b). A convenção MARPOL é composta por seis anexos técnicos, abordando diferentes fontes de poluição marítima, destacando-se, o petróleo, os esgotos sanitários, o lixo proveniente dos navios e a poluição atmosférica.

No ano de 1997, foi adotado o Anexo VI da MARPOL para a prevenção da poluição atmosférica por navios, estabelecendo limites e restrições relativos às emissões dos principais poluentes atmosféricos, presentes nos gases de exaustão dos navios, como NO_x, SO_x, compostos orgânicos voláteis (COV), visando ainda a proibição de emissões de compostos depletadores da camada de ozono troposférico (ODS) (IMO, 2011b). Em 2008, adotou-se a revisão do Anexo VI conjuntamente com o Código

Tecnológico do NO_x , cujas principais alterações corresponderam a uma redução progressiva, a nível global, das emissões de SO_x , NO_x e PM , bem como a introdução de áreas de controlo de emissões (ECAs) (IMO, 2008).

Ao abrigo da revisão do Anexo VI em 2008, ocorreu uma diminuição do limite global de enxofre, dos 4,5% para os 3,5% m/m, alcançando os 0,5%, em janeiro de 2020. Por forma a reduzir as emissões de SO_x , provenientes dos navios a navegar nas suas áreas de jurisdição, alguns países definiram *Sulphur Emissions Control Areas* (SECAs), onde o limite de enxofre presente no combustível dos navios passou a ser de 1,00% a partir de 2010, reduzindo em 2015 para 0,10%, como se verifica na Figura 4 (IMO, 2008).

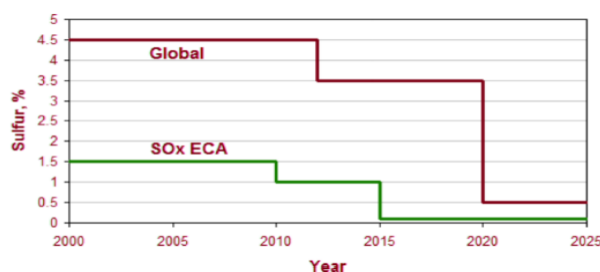


Figura 4 - Evolução temporal dos limites de teor de enxofre no combustível marítimo (Rata et al., 2017)

Atualmente existem quatro *Emissions Control Areas* (ECAs) estabelecidas a nível global, apresentadas na Figura 5, localizadas, no Mar Báltico e no Mar do Norte com limites para a emissão de SO_x , desde 2006 e 2007 respetivamente, e NO_x , desde 2021. A América do Norte e a Área marítima dos E.U.A. no Mar das Caraíbas possuem restrições para as emissões de SO_x e PM , desde 2012 e de NO_x desde 2016 (IMO, 2019). No entanto, prevê-se a implementação de uma nova área de controlo de emissões de SO_x e PM na zona do Mediterrâneo, passando a ter efeito a partir de 2025 (IMO, 2022).



Figura 5 - Áreas de Controlo de Emissões existentes (Mao & Rutherford, 2018)

No que concerne, às emissões de NOx provenientes dos motores diesel são geralmente segregadas em três níveis (*Tier*), dependendo do ano de construção do navio. As normas de Nível I, adotadas em 1997, aplicadas a navios construídos ou que sofreram uma grande reestruturação após 2000. Quanto às normas de nível II e III, introduzidas em 2008, abrangiam navios construídos a partir de 2011 e a partir de 2016, respetivamente (IMO, 2008).

Ao longo dos anos, a IMO reconheceu a urgência de controlar as emissões marítimas. Assim, em 2011, introduziu um novo capítulo ao Anexo VI da MARPOL, com medidas obrigatórias, aplicáveis aos navios novos e existentes, de teor técnico e operacional, para a melhoria da eficiência energética e a redução de emissões de GEE, cujo objetivo foi a redução do consumo de energia nos navios em 30% até 2025. Este tratado entrou em vigor em 2013, sendo o primeiro com caráter juridicamente vinculativo desde o Protocolo de Quioto¹ (IMO, 2011b).

O novo capítulo, introduziu novas medidas compostas por dois itens, o *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) e o *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP). O EEDI é um indicador, que promove os navios novos e em fase de projeto a adotarem sistemas mais eficientes e, por conseguinte, menos poluentes. Este é calculado com base nas características técnicas de projeto, visando-se minimizar o EEDI, expresso em gramas de CO₂ emitido por tonelada-milha (IMO, 2011a).

No entanto, para além de alterações na fase de conceção, é essencial a implementação de um plano de gestão de eficiência energética. O SEEMP abrange navios existentes, otimizando processos e operações, através de limpezas periódicas ao casco, gestão de velocidade mais eficiente, otimização da potência dos motores, planeamento de rotas de viagem e uso de combustíveis alternativos (IMO, 2011a). De forma complementar, o SEEMP oferece aos armadores uma gestão autónoma de desempenho das frotas ao longo do tempo, através do *Energy Efficiency Operational Indicator* (EEOI). Diferente do EEDI, o EEOI mede a eficiência energética de um navio

¹ Protocolo de Quioto (KP) foi o primeiro tratado jurídico internacional a estabelecer limites, quantificados, para as emissões de GEE, provenientes dos países envolvidos. Seguindo o princípio das responsabilidades comuns, mas diferenciadas, os países desenvolvidos, tinham obrigação de cumprir com os limites impostos, enquanto, países em vias de desenvolvimento, não possuíam metas quantificadas (Agência Portuguesa do Ambiente, 2021).

em operação e não de um navio em projeto (Marine Environment Protection Committee [MEPC], 2009).

Metas de Descarbonização

A 13 de abril de 2018 foi adotada a *Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships*, que representa o compromisso da IMO na redução de emissões de GEE provenientes do setor marítimo com a maior brevidade possível, alinhadas com o Acordo de Paris. A IMO estabeleceu diferentes níveis de ação, enfatizando a inovação tecnológica e a adoção de combustíveis alternativos, como fator essencial para o cumprimento das metas ambicionadas. A presente estratégia definia três níveis de objetivos a cumprir:

- Diminuição da intensidade carbônica proveniente dos navios através da implementação de novas fases do EEDI para novos navios;
- Redução das emissões de CO₂ emitido por tonelada-milha em pelo menos 40% até 2030 e 70% até 2050, comparativamente com os dados de 2008;
- Redução em pelo menos 50% das emissões de GEE totais anuais até 2050, comparativamente a 2008 (MEPC, 2018).

Em 2022 entrou em vigor a última Revisão do Anexo VI, desenvolvida de acordo com as metas supramencionadas. Esta previa a implementação de medidas a curto-prazo, respeitantes ao cálculo do *Energy Efficiency Existing Ship Index* (EEXI) e o início da recolha de dados relativos ao *Carbon Intensity Indicator* (CII), de caráter obrigatório para todos os navios abrangidos pelo Anexo VI. O EEXI atingido, em inglês *Attained EEXI*, é calculado para navios existentes, sendo depois comparado com o EEXI requerido, que corresponde a uma percentagem do valor base de EEDI previsto para cada navio, dependente da sua categoria. Para cumprir com as metas, o EEXI atingido deve ser inferior ao requerido. Quanto ao CII, corresponde a um indicador operacional da redução anual necessária para garantir a redução contínua da intensidade carbônica operacional (MEPC, 2021).

Em junho de 2022, o secretário-geral da *North Atlantic Treaty Organization* (NATO), comunicou aos estados-membros o objetivo de redução de emissões em pelo

menos 45% até 2030 e atingir emissões zero provenientes das missões e atividades da organização até 2050. Na Cimeira de Madrid, relativa à cooperação militar, a NATO aprovou um novo Conceito Estratégico, que orienta as opções da NATO para a próxima década, onde as alterações climáticas são evidenciadas como uma das prioridades mais desafiantes (Agência Lusa, 2022).

A nível nacional, o governo português segue os compromissos assumidos após o Acordo de Paris, revistos em 2020, comprometendo-se em assegurar a neutralidade carbónica até finais de 2050. Assim, foi elaborado o Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050, onde são identificadas as principais áreas de descarbonização da economia e delineadas as medidas essenciais para atingir este fim, de acordo com diferentes cenários de desenvolvimento. A Defesa Nacional tem um papel fundamental na consecução da meta de neutralidade carbónica, apesar de enfrentar certas limitações. Foi desenvolvido o Plano de Ação da Diretiva Ambiental, que estabelece os objetivos a implementar pelos organismos da Defesa nos próximos anos. No contexto desta estratégia, a Marinha Portuguesa está envolvida na implementação de estratégias de redução de emissões, tanto no âmbito das unidades navais como na frota automóvel (Ministério da Defesa Nacional, 2020).

1.3. Tipos de Descarbonização

O processo de descarbonização do setor marítimo está fortemente dependente da aplicação de combustíveis alternativos nos navios, bem como, da implementação de processos e tecnologias mais eficientes. De salientar, que o setor logístico, por forma a cumprir com sucesso as metas ambicionadas, deverá acompanhar a evolução dos novos combustíveis. Os combustíveis alternativos considerados no presente estudo são o biodiesel/diesel sintético, hidrogénio, amoníaco, metanol, gás natural liquefeito (GNL), gás de petróleo liquefeito sintético (GPL) e eletricidade armazenada em baterias. A Figura 6 apresenta o processo de produção de cada um dos combustíveis alternativos supramencionados, bem como, dos combustíveis fósseis atualmente empregues no setor marítimo, desde a fonte de energia primária até ao produto final consumido a bordo (Wang & Wright, 2021). Assim, o presente subcapítulo inicia com uma breve revisão dos principais conceitos abordados mais exaustivamente na revisão de cada alternativa.

Segue-se uma revisão de cada um dos combustíveis apresentados, finalizando com uma discussão e síntese dos pontos fulcrais. Pretende-se assim fornecer uma análise de alternativas disponíveis, auxiliando o processo de escolha das melhores opções. A opção nuclear não é tratada nesta fase, sendo considerada na aplicação da DST, bem como outras soluções futuras. Relativamente aos processos de produção de cada um dos combustíveis, encontram-se descritos no Apêndice A.

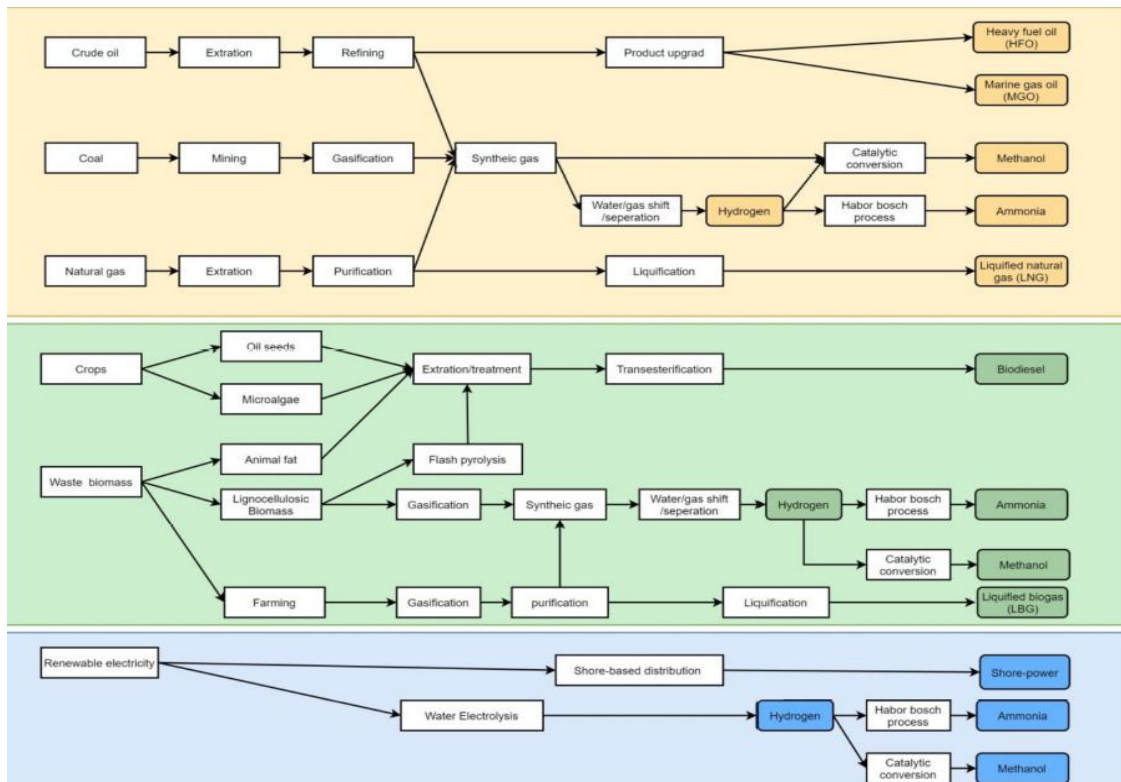


Figura 6 - Perspetiva geral dos combustíveis alternativos e das suas diferentes vias de produção (Wang & Wright, 2021)

1.3.1. Principais Conceitos

Densidade Energética

A densidade energética ou conteúdo energético de uma fonte de energia consiste na energia disponível por unidade de peso ou volume (Rodrigue, 2020). No âmbito do estudo é de particular interesse a comparação entre valores de densidade energética volumétrica, na medida em que, quanto maior este valor, menor o espaço ocupado a bordo, o que determina a aplicabilidade de um combustível em navios militares.

Toxicidade

A toxicidade pode ser definida como o grau em que uma substância pode ser prejudicial para os seres humanos ou animais (Stöppler, n.d.). Esta deve ser criteriosamente abordada, especialmente ao implementar combustíveis tóxicos, por forma a garantir a segurança da guarnição. Todo o sistema de armazenamento de combustível e espaço de máquinas, deve estar equipado com detetores de fuga e ventilação adequada. A *American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) define os *Threshold Limit Values* (TLVs) como a concentração média máxima segura de uma substância perigosa para operadores adultos saudáveis, ao longo de 8 horas, numa semana de trabalho de 40 horas, durante uma vida de trabalho, sem efeitos adversos para a saúde. Existem diversos tipos de TLVs, sendo que um dos mais comumente utilizados é o *Time Weighted Average Concentration* (TWA), consistindo na concentração média de uma substância durante um dia de trabalho, com 8 horas de duração (ACGIH, 2020; Office of Response and Restoration, 2022). No presente estudo será considerado o TLV-TWA.

Flash-Point

O ponto de inflamação, mais comumente designado, por *Flash-Point*, é uma propriedade química importante em termos de segurança ao nível do armazenamento e manuseamento. É a temperatura mais baixa a que um líquido gera uma quantidade suficiente de vapor passível de formar uma mistura vapor/ar, que possa ser inflamada, por uma fonte de ignição externa. A esta temperatura a pressão de vapor do líquido fornece uma concentração de vapor igual ao limite inferior de inflamabilidade (Stauffer et al., 2008a).

Temperatura de Autoignição

A temperatura de autoignição consiste na temperatura mais baixa a que o combustível se autoinflama, isto é, a temperatura mínima necessária para inflamar um fluido sem a presença de uma fonte externa de ignição, como uma chama ou faísca. Esta propriedade de um determinado combustível diminui à medida que a pressão ou a concentração de oxigénio aumenta (Skybrary, 2021).

Limites de Inflamabilidade

Os limites de inflamabilidade ou de explosividade representam a faixa de concentrações de uma mistura de vapor ou gás inflamável no ar, expressa em percentagem volúmica, sobre a qual essa mistura pode ser inflamada a 26 °C e pressão atmosférica (Ludwig, 1999). Assim, uma ampla gama de inflamabilidade indica um combustível suscetível de inflamar sob diversas condições, pelo que indica um risco mais elevado.

Número de Octanas e Número de Cetano

O número de octanas é uma medida da performance/estabilidade do combustível, baseada na pressão mínima a que um combustível entra em autoignição, num motor de teste. Esta pode ser definida por diversos indicadores como o índice de octanas (IO), o *Research Octane Number* (RON), o *Motor Octane Number* (MON) e o *Anti-Knock Index* (AKI). Quanto maior o valor destes indicadores, mais estável é o combustível, isto é, maior a resistência do combustível ao fenómeno de *engine knock*, que ocorre quando o combustível queima de forma descontrolada e desigual nos cilindros (Concawe, 2019; Kalghatgi, 2001; Stauffer et al., 2008b).

Relativamente ao número de cetano (NC), consiste numa medida da qualidade de ignição em motores diesel, correspondendo ao atraso entre o início da injeção e o início da combustão. NC mais elevados indicam um melhor desempenho do motor diesel, com uma combustão uniforme e completa, resultando numa menor percentagem de fuligem, PM e hidrocarbonetos (HC) não queimados (Jääskeläinen, 2007). Os combustíveis com baixo NC tendem a apresentar um aumento das emissões de poluentes, devido à ocorrência de combustão incompleta, provocando também o fenómeno de *engine knocking* (Patel & Shah, 2015). O índice de cetano é um outro indicador da qualidade do combustível diesel, com base na sua densidade e temperatura da curva de destilação, sem recorrer a testes no motor, com base na norma ISO 4264:2018 (ISO, 2018; Luning Prak et al., 2021).

Emissões *Well-to-Tank* (WTT) e *Tank-to-Propeller* (TTP)

Para comparar o impacto ambiental dos diferentes combustíveis alternativos é necessário analisar o seu ciclo de vida, considerando tanto a fase de produção e

distribuição (*Well-to-Tank*), quanto a fase de utilização (*Tank-to-Propeller*) (Istrate et al., 2022). O primeiro parâmetro foi definido em emissões de $\text{gCO}_{2\text{eq}}/\text{MJ}$, onde o $\text{CO}_{2\text{eq}}$ estabelece a equivalência entre os GEE e tem em consideração o Potencial de Aquecimento Global (GWP), isto é a capacidade de cada um dos GEE em absorver energia na atmosfera durante um determinado período, geralmente de 100 anos. No caso do $\text{CO}_{2\text{eq}}$, este é calculado através da multiplicação de uma determinada quantidade de GEE pelo seu GWP (Brander, 2012). Relativamente às emissões *Tank-to-Propeller* foram analisadas numa perspetiva do fator de emissão de CO_2 , denominado de $C_{f\text{CO}_2}$, isto é, um rácio da massa de CO_2 emitida por massa de combustível (European Commission, 2022).

1.3.2. Combustíveis Alternativos

Biodiesel/ Diesel Sintético

O biodiesel é um combustível alternativo produzido através de fontes de energia renováveis ou mesmo resíduos, sendo que pode ser utilizado como um substituto direto do diesel marítimo. Não é um derivado do petróleo, no entanto, é compatível com o MGO, podendo ser misturado, em qualquer proporção (Lin et al., 2011). As matérias-primas utilizadas para a sua produção consistem em óleos e gorduras de origem vegetal e animal (Atabani et al., 2017).

O biodiesel é imiscível com a água e apresenta-se no estado líquido à temperatura ambiente, com propriedades químicas variáveis de acordo com as matérias-primas utilizadas. Outra alternativa é o diesel sintético, também conhecido como “*Fischer-Tropsch (FT) diesel*” ou “*E-diesel*”. Esta opção é produzida a partir de hidrogénio verde e CO_2 capturado, sendo utilizado diretamente em motores de combustão interna (CI). A Tabela 1 mostra as propriedades de três tipos de combustível relevantes para o estudo, biodiesel de colza, o mais produzido na Europa (Mohd Noor et al., 2018), diesel sintético e combustível MGO NATO F-76, utilizado em navios de guerra, inclusive da Marinha Portuguesa.

Tabela 1 - Comparação de propriedades entre biodiesel de colza , diesel sintético e combustível NATO F-76 (Kass et al., 2018; Sajjadi et al., 2016; Tosh et al., 1992)

Propriedades	Biodiesel de Colza	Diesel Sintético	(MGO) NATO F-76
Massa específica a 15°C (kg/m ³)	879	765	844
Número de Cetano	48,25	>70	45
Viscosidade (mm ² /s. @40°C)	4,4	2	1,7-4,3
Densidade Energética MJ/kg	35,8	43	42,6
Densidade Energética MJ/l	33,4	32,9	35,9
Ponto de Inflamação (°C)	169,5	74	60

O biodiesel é composto por uma elevada percentagem de oxigénio, o que de acordo com a maioria dos autores, promove uma combustão mais completa e, conseqüente, uma redução de emissões. Contudo, esta característica está também associada a um menor poder calorífico, o que pode resultar num aumento do consumo de combustível específico e em algumas perdas de energia (Murillo et al., 2007). Segundo os dados da Tabela 1, verifica-se que o biodiesel tem um poder calorífico cerca de 16% inferior ao Diesel NATO F-76, o que leva a um aumento no consumo de combustível de cerca de 15% de acordo com Öner & Altun (2009). Além disso, estudos indicam que o biodiesel se degrada muito mais rapidamente do que o MGO, formando peróxidos, ácidos e outras partículas insolúveis (Moirangthem, 2016). Apesar de ter um *flash-point* superior ao MGO, o biodiesel é inflamável, com limites de inflamabilidade entre 0,7%-5%, sendo que a temperatura de autoignição varia entre 373 a 448 °C, dependendo da composição (Lehmann et al., 2014; PUMA Energy, 2013). Este combustível não é tóxico, sendo que a dose letal via oral é cerca de 17,4 g/kg de peso corporal. Em comparação, o NaCl é cerca de 10 vezes mais tóxico (Franzinger, 2004).

O diesel sintético, assemelha-se ao MGO em termos de características químicas, excetuando o NC mais elevado, o que lhe confere uma boa ignição em motores de ciclo Diesel. Em termos de segurança, não é tóxico e apresenta um *flash-point* superior ao MGO (Carvalho et al., 2021).

No que concerne à aplicação de biodiesel em motores de combustão interna (CI), Murillo et al. (2007) estudaram a implementação de biodiesel proveniente de óleos usados, misturado com MGO nas diferentes proporções de 10%, 30%, 50% e 100%, em motores diesel marítimos fora de borda. Os resultados obtidos demonstraram uma redução de cerca de 7,14% na potência ao veio, especialmente na mistura B100 (100%). No entanto, Roskilly et al. (2008) denotaram apenas uma diferença de 1% na potência ao veio de um pequeno motor diesel marítimo em funcionamento com os dois tipos de combustível. Os mesmos autores observaram o aumento do consumo de combustível específico (BSFC), em cerca de 8,6-20,9%, em ambos os motores marítimos testados com biodiesel. Estas variações são atribuídas ao teor de oxigénio elevado (10,5-10,7%) e valores baixos de poder calorífico inferior no biodiesel.

Diversos estudos analisaram o impacto do biodiesel nas emissões atmosféricas provenientes dos motores, concluindo, de um modo geral, que a utilização de biodiesel, reduz as emissões de poluentes, tais como, PM, CO₂ e CO, denotando-se um aumento no NO_x. No entanto, as emissões variam conforme as especificações de cada motor, qualidade do combustível e condições de operação (Hasan & Rahman, 2017). De acordo com um estudo realizado num motor diesel marítimo com biodiesel de óleo de *Parinari polyandra*, denotou-se nas três misturas testadas, B10, B20 e B30, um decréscimo significativo nas emissões de CO e CO₂ (redução de 81,7% e 65,7%, respetivamente) comparativamente ao diesel marítimo convencional, excetuando o NO_x (Ogunkunle & Ahmed, 2020). O biodiesel de óleo de palma (Yusop et al., 2013) diminui em cerca de 50% as emissões de PM, relativamente ao diesel marítimo.

O biodiesel é uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis, sendo uma fonte de energia renovável, não tóxica, biodegradável e isenta de enxofre (Mohd Noor et al., 2018). No entanto, é necessária uma avaliação cuidada dos impactos ambientais associados à sua produção. A análise do ciclo de vida demonstra que a quantidade de energia fóssil utilizada para a produção e transporte deste combustível, tem um grande impacto nas emissões de GEE. Além disso, a produção de biodiesel promove a conversão de áreas florestais, em monoculturas intensivas a larga escala, influenciando a biodiversidade local e pressionando os recursos hídricos (Hasan & Rahman, 2017). Segundo a Comissão Europeia (2022) , numa perspetiva de emissões de *Well-to-Tank*

(WTT), para o biodiesel de colza produzido na EU, o valor é cerca de 115,1 gCO_{2eq}/MJ, com as emissões *Tank-to-Propeller* (TTP) a alcançar um valor de C_{fCO_2} igual a 2,8. Relativamente a estes indicadores no caso do “*E-Diesel*”, isto é, diesel sintético produzido através de CO₂ capturado e hidrogénio verde, as emissões WTT são negativas, de cerca -47,6 gCO_{2eq}/MJ, fenómeno associado a uma maior taxa de captura de CO₂ do que emissão. Por sua vez o MGO, tem associado um valor de emissões WTT de 14,9 gCO_{2eq}/MJ e um C_{fCO_2} igual a 3,2.

Em 2012, a Marinha dos E.U.A implementou biodiesel derivado de óleo alimentar usado, algas e gordura de frango, numa mistura B50, durante um exercício, em cerca de 40 navios da sua frota, 6 submarinos e 200 aeronaves. Mais tarde, em 2016, a *USS John C. Stennis Carrier Strike Group*, tornou-se na primeira frota de navios a utilizar biodiesel, como parte das suas missões regulares. Este marco assinalou o verdadeiro lançamento da *Great Green Fleet*, que até agora tem como parte integrante das suas fontes energéticas os combustíveis alternativos (Stolark, 2016). Também em 2012, mas a nível europeu, a Marinha Italiana cooperou com a *Ente Nazionale Idrocarburi* para o desenvolvimento do combustível *GreenDiesel*TM, que pode ser aplicado numa mistura B50 com MGO, sem necessidade de modificação do sistema de propulsão. Este biodiesel é proveniente de óleo de palma e foi testado com sucesso no navio patrulha *Comandante Foscari*, sendo posteriormente aplicado no porta-aviões *ITS Cavour*, onde permitiu uma redução de cerca de 6% das emissões de NO_x. No ano de 2015, o *GreenDiesel* foi ainda testado a bordo de outras unidades navais, inclusive um submarino, onde cumpriu com sucesso os testes nos sistemas de propulsão. Um ano depois, no decorrer de um exercício com a Marinha dos E.U.A. foi executado com sucesso o primeiro reabastecimento no mar de *GreenDiesel* (Marina Militare, 2018).

Hidrogénio

Entre as possíveis fontes de energia alternativas, o hidrogénio é considerado como uma das mais promissoras, especialmente devido ao seu impacto ambiental reduzido, podendo ser produzido a partir de diversas fontes renováveis, como a energia eólica, solar, biomassa e pela energia nuclear. Por ser o elemento químico mais simples, quando envolvido numa reação de combustão tem como subprodutos, unicamente, água e uma pequena quantidade de NO_x (Wang & Wright, 2021). O hidrogénio pode ser

classificado como cinzento, azul ou verde, dependendo da sua origem e ciclo de vida. O primeiro é obtido através do processo chamado “reforma a vapor”, tendo como origem a reação de combustíveis fósseis a altas temperaturas com vapor de água (IEA, 2019). O hidrogénio azul é obtido através do mesmo processo que o anterior, no entanto é menos poluente, pois as emissões de CO₂ resultantes são reduzidas através de tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Hidrogénio Verde é o termo utilizado para caracterizar o combustível que utiliza fontes de energia e matérias-primas renováveis no seu processo de produção (d’Amore-Domenech & Leo, 2019; Hosseini & Wahid, 2020).

Em termos de segurança é importante destacar certas propriedades deste combustível, tais como, a combinação entre a baixa energia de ignição, cerca de 0,017 MJ, com um amplo limite de inflamabilidade, entre 4 a 75 vol% no ar, o que origina um combustível facilmente inflamável (IMO, 2016). No caso do H₂ líquido, a partir da temperatura de ebulição, este entra em ignição caso esteja em contacto com uma fonte de ignição. O fluxo ou agitação deste combustível no estado líquido ou gasoso pode provocar cargas eletrostáticas, que poderão resultar em faíscas e levar à sua ignição. Deste modo, é importante assegurar que todo equipamento utilizado no transporte e manuseamento de H₂, se encontra protegido da acumulação de cargas elétricas e eventuais faíscas (ABS, 2021). Por ter um pequeno peso molecular e baixa viscosidade, o H₂ facilmente passa entre fissuras e juntas existentes nas tubagens e tanques, o que pode resultar em fugas. No entanto, a alta difusividade resulta numa vantagem, pois quando libertado ao ar livre, dispersa-se rapidamente (Saffers & Molkov, 2014). Relativamente à toxicidade, o H₂ é um gás inodoro, invisível, não tóxico mas que provoca asfixia, pois substitui o oxigénio no ar, quando em concentrações elevadas (ABS, 2021).

O armazenamento de H₂ em estado comprimido ou líquido criogénico requer especial atenção, devido ao risco de roturas explosivas ou derrames. Estas roturas são geralmente causadas por um incêndio no exterior do tanque, que resulta num aumento drástico da temperatura e pressão no interior do mesmo. No caso do H₂ líquido, devem ser utilizados materiais adequados para o seu armazenamento, com resistência a baixas temperaturas, sendo que os casos de derrame a bordo podem tornar-se especialmente

perigosos, na medida em que, certos materiais como o aço contraem-se quando são sujeitos a temperaturas muito baixas e tornam-se quebradiços. Caso ocorram tensões muito elevadas, podem resultar numa falha estrutural, provocando danos no casco ou outros componentes, e mesmo possíveis fugas. Este problema está relacionado com a diminuição drástica da ductilidade dos diferentes metais a temperaturas muito reduzidas. Apenas os aços inoxidáveis austeníticos, o cobre e o alumínio são metais adequados para aplicações a temperaturas criogénicas (Depken et al., 2022). Outro perigo inerente a estes derrames são as nuvens de líquido criogénico, a baixas temperaturas, que congelam rapidamente os tecidos humanos, provocando graves queimaduras, representando um risco elevado para as pessoas a bordo. Estas nuvens contêm muito vapor de água, o que as torna mais densas que o ar, não se dispersando como os combustíveis no estado gasoso, sendo que este efeito aumenta o perigo de explosão e asfixia (Atilhan et al., 2021).

O armazenamento de hidrogénio gasoso, pressurizado a 350 e 700 bar, tem associado o risco de rotura do tanque e, conseqüentemente, a libertação explosiva do hidrogénio. Esta rotura pode ter diversas causas, desde um incêndio das imediações do tanque ou uma perfuração de origem externa. No caso do incêndio, este provoca um aumento drástico da temperatura e pressão no interior do reservatório, até que o material deixa de conseguir suportar a carga. Adicionalmente, quando ocorre uma libertação súbita de hidrogénio sob alta pressão na atmosfera, esta provoca uma onda de choque que se mistura com o ar e o comprime e aquece até ao ponto de autoignição do hidrogénio (Depken et al., 2022)

Do referido nos parágrafos anteriores, denota-se que a relação entre o tipo de armazenamento do hidrogénio e a segurança a bordo é significativa. No entanto, existem outros desafios associados ao armazenamento deste combustível. Devido à sua baixa densidade energética comparativamente com os combustíveis convencionais, o hidrogénio tanto liquefeito como no estado gasoso, necessita de mais espaço por unidade de energia (CE Delft & ECORYS, 2021). À temperatura ambiente e pressão atmosférica, 1 kg de H₂ ocupa um volume de 11 m³, o que corresponde a uma massa volúmica extremamente baixa, de cerca de 0,09 kg/m³, pelo que se torna inviável o seu armazenamento sob condições atmosféricas. Relativamente à densidade energética por

unidade de massa e de volume, a Tabela 2 enuncia os diferentes valores destas propriedades de acordo com alguns dos tipos de armazenamento do H₂.

Tabela 2 - Densidade Energética do Hidrogénio (Depken et al., 2022; Melcher et al., 2021; Rivard et al., 2019)

Combustível	Massa Volúmica kg/m ³	Densidade Energética MJ/kg	Densidade Energética MJ/L
Hidrogénio Líquido (<-253 °C)	70,96	120	8,5
H₂ (350 bar)	23,3	120	2,8
H₂ (700 bar)	39,3	120	5,0
Hidretos Metálicos de elevada temperatura (ex.: MgH₂)	1450	9,1	13,22
LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carriers) - Benzyltoluene	996	7,44	7,41

Atualmente, existem diversas formas de armazenamento do H₂, seja no estado líquido ou gasoso, através de reservatórios criogénicos ou de gás comprimido; em superfícies ou entre sólidos, com recurso a hidretos metálicos, microesferas de vidro e nanotubos de carbono; e ainda quimicamente, em compostos orgânicos líquidos (Abdalla et al., 2018; Niaz et al., 2015; Nikolaidis & Poullikkas, 2017). Nos hidretos metálicos, o H₂ é quimicamente ligado a uma fase sólida através de uma reação reversível endotérmica entre o metal e/ou composto intermetálico com o H₂ no estado gasoso (Figura 7). Atualmente, na maioria dos submarinos com propulsão a H₂, o método de armazenamento consiste em hidretos metálicos, mais especificamente em hidretos de alumínio, AlH₃ (Graetz, 2009).

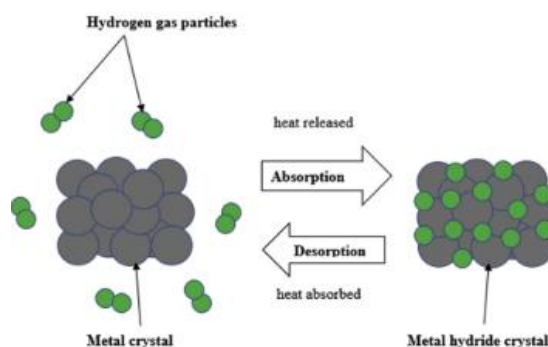


Figura 7 - Método de armazenamento hidretos metálicos (Abe et al., 2019)

Em termos de segurança, os hidretos metálicos apresentam um baixo risco de fugas acidentais, uma vez que o H₂ é armazenado no interior do cristal e necessita de energia para ser libertado. O hidreto de magnésio apresentado na Tabela 2 foi selecionado para esta análise por ser um dos hidretos com maior densidade energética volumétrica e gravimétrica. O magnésio e as suas ligas têm sido amplamente estudados para o armazenamento de H₂ a bordo, devido à sua elevada capacidade de armazenamento por peso e volume, aliado a um baixo custo e elevada disponibilidade de matéria-prima. Além disso, apresentam vantagens, como, a reversibilidade, reciclabilidade, resistência ao calor e capacidade de absorção de vibrações, mas também desvantagens como a elevada temperatura necessária para a libertação do H₂ (cerca de 300°C) e cinética de dessorção relativamente lenta (Sakintuna et al., 2007). Torna-se válido ressaltar que, o MgH₂ sintetizado quimicamente é altamente reativo, autoinflama quando exposto ao ar e reage intensamente com a água. Porém, o hidreto de magnésio obtido pela interação do Mg metálico com o gás H₂ é relativamente inerte e seguro durante o manuseamento (Yartys et al., 2019).

O armazenamento de H₂ através de LOHC consiste noutro método que tem revolucionado o desafio da baixa densidade energética volumétrica e segurança, associada a este combustível alternativo. Estes compostos utilizam uma molécula orgânica, capaz de estabelecer ligações químicas covalentes com o H₂ (Ali et al., 2022). Através destas moléculas são realizadas reações de hidrogenação e desidrogenação, a elevadas temperaturas e com recurso a um catalisador, tendo por base a Equação 1 (Melcher et al., 2021). As reações de hidrogenação são exotérmicas e as de desidrogenação são endotérmicas, exigindo assim energia térmica para libertar o H₂ gasoso do líquido de transporte (LOHC).



No presente caso foi discutido o *Benzyltoluene*, como uma solução de LOHC, devido às suas características. Este composto cujas propriedades energéticas e físicas se encontram apresentadas na Tabela 2 detém uma capacidade de armazenamento gravimétrico de H₂ de cerca de 6,2 wt%. As reações de hidrogenação e desidrogenação deste composto são representadas de forma objetiva na Figura 8.

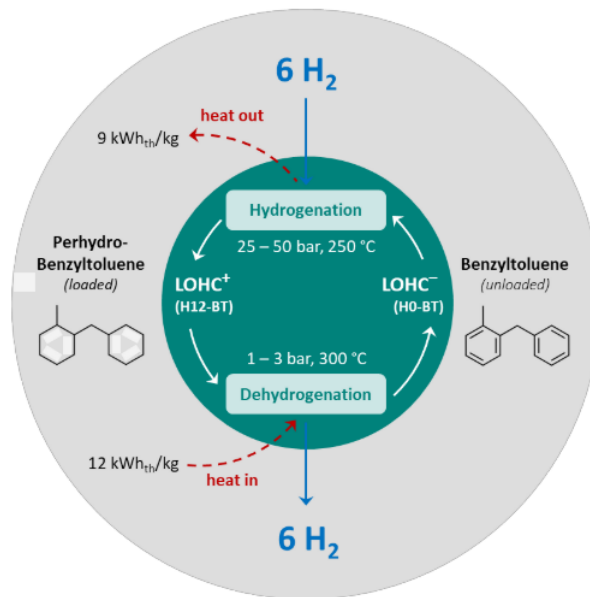


Figura 8 – Reações de hidrogenação e desidrogenação do LOHC (Melcher et al., 2021)

À semelhança dos hidretos metálicos, o LOHC é fortemente dependente da existência de energia térmica e de um catalisador adequado, para que se dê a libertação de H_2 gasoso. Esta característica facilita o controlo dos riscos associados ao transporte e ao perigo de explosão deste combustível na forma gasosa. Outro aspeto a destacar é o elevado *flash-point* do *Perhydro-Benzyltoluene*, que é de aproximadamente $115^\circ C$, o que o torna numa opção muito viável para uma utilização segura (Melcher et al., 2021).

Quanto à sua aplicação, o hidrogénio pode ser implementado tanto em células de combustível, como em motores CI. No entanto, a sua aplicação em motores CI marítimos ainda se encontra em desenvolvimento, enquanto nas células de combustível (FC) já atingiu uma elevada maturidade tecnológica (CE Delft & ECORYS, 2021). Estas operam através de uma reação inversa à eletrólise, sendo caracterizadas por uma elevada eficiência e baixas emissões poluentes. Um sistema de FC é constituído por um ânodo, onde se dá a oxidação do H_2 e um cátodo onde se dá a redução do oxidante, separados por um eletrólito que conduz apenas iões, não eletrões. Os eletrões resultantes da semirreação do ânodo migram até ao cátodo, no qual fazem parte da semirreação catódica, resultando em corrente elétrica (Coralli et al., 2019). Existem vários tipos de FC, destacando-se a de membrana polimérica (PEMFC), devido à sua potência por volume e operação em diversas gamas de temperatura (Coralli et al., 2019; Van Hoecke et al., 2021). No entanto, esta requer H_2 com elevada pureza e está sujeito a

contaminações por CO e NH₃ (Wee, 2007). Para superar estes desafios, foram desenvolvidas células de combustível mais resistentes, tais como as células de combustível de carbonato fundido (MCFC) e de óxido sólido (SOFC), que operam a altas temperaturas, sendo menos suscetíveis a contaminações (Van Hoecke et al., 2021).

Relativamente ao uso de H₂ em motores CI, este tem sido geralmente implementado como uma mistura de combustível em motores convencionais a gás ou bicomcombustível. A sua baixa energia de ignição, de ordem de magnitude inferior à necessária para o MGO, pode resultar em pré-ignição e, conseqüentemente, a uma perda no controlo da combustão, particularmente em cargas elevadas. Já a elevada temperatura de autoignição, de cerca de 584,8 °C, aliada a um RON de 130, prevêem uma alta resistência deste combustível ao *engine knock* (Stępień, 2021). Ao nível de emissões, diversos estudos demonstram a adição de H₂ em pequenas percentagens com MGO pode melhorar a eficiência do motor e reduzir significativamente as emissões de carbono (ABS, 2021).

De acordo com o estudo efetuado por Antunes *et al.* (2009), no qual se desenvolveu uma configuração experimental para o ensaio de um motor diesel com injeção direta alimentado a H₂, verificou-se uma maior relação potência/peso comparativamente a um motor a diesel convencional. O pico de potência desta configuração foi cerca de 14% superior. Os autores verificaram uma redução nas emissões NO_x, bem como uma melhoria significativa de eficiência, o que, segundo estes, se deve, principalmente, à redução das perdas por fricção do motor e da transferência de calor.

Em termos de impacto ambiental, o hidrogénio cinzento liquefeito, proveniente do gás natural, detém uma pegada carbónica de emissões WTT, de cerca de 132 gCO_{2eq}/MJ. Relativamente ao hidrogénio verde liquefeito, as emissões WTT correspondem a valores de, aproximadamente, 3,6 gCO_{2eq}/MJ (European Commission, 2022). Quanto às emissões resultantes da queima do hidrogénio (TTP), como já referido, da sua reação de combustão com o oxigénio, resulta apenas vapor de água. No entanto, a certas temperaturas pode ocorrer a formação de NO_x, devendo ser utilizadas técnicas para mitigar a sua formação, como misturas ricas em ar (*lean mixtures*),

sistemas de recirculação dos gases de escape (EGR) e sistemas de redução seletiva catalítica à base de ureia (SCR) (Onorati et al., 2022; Schlapbach & Züttel, 2010).

O setor comercial já conta com diversos projetos inovadores, tais como, o ferry *MF Hydra*, propulsionado a H₂ líquido, através de PEMFC, atualmente em fase de testes (DNV GL, 2022; Klevstrand, 2023). O navio *Energy Observer*, lançado à água em 2017, produz, armazena e utiliza H₂ gasoso, através da eletrólise da água salgada. Verificou-se através de diversos testes que o H₂ produzido tinha qualidade compatível com as especificações da norma *Hydrogen fuel quality – Product Specification* (Energy Observer, 2021; ISO, 2019). Esta tecnologia atraiu o interesse da Marinha dos E.U.A., visando aumentar a autonomia das plataformas e reduzir a logística associada aos reabastecimentos (Harress, 2014).

Relativamente ao panorama atual de implementação do hidrogénio como combustível em unidades navais, diversos países como os E.U.A., Alemanha e Coreia do Sul, estão interessados no desenvolvimento e aplicação de FC de H₂ a bordo, tanto para produção de energia para alimentação dos equipamentos de bordo como para a propulsão. Esta tecnologia foi adotada por submarinos não-nucleares, como por exemplo os produzidos pelo estaleiro alemão HDW, *Type 212* e *Type 214*. Este último modelo é do tipo dos dois submarinos pertencentes à *Classe Tridente* da Marinha Portuguesa. Atualmente, existem cerca de 50 submarinos movidos a H₂, a nível global. Esta tecnologia tem melhor eficiência a baixa potência, o que é o inverso de um motor CI. Este fator pode resultar numa vantagem ou desvantagem, dependendo do campo de aplicação, podendo ser um desafio para a sua aplicabilidade a navios de superfície (DNV GL, 2022).

Amoníaco

Atualmente, cerca de 80% do consumo global de amoníaco é utilizado para a produção de fertilizantes, sendo o restante aplicado no âmbito industrial (Giddey et al., 2017). Esta procura à escala global levou ao desenvolvimento de normas e tecnologias de armazenamento e transporte seguro deste composto, a bordo dos navios. O amoníaco é produzido, maioritariamente, a partir de combustíveis fósseis, resultando por isso em emissões de GEE. No entanto, de forma similar ao hidrogénio é possível produzir este

composto com recurso a fontes de energia renováveis, como energia eólica e solar (Ash & Scarbrough, 2019).

O amoníaco, NH_3 , é inerentemente livre de carbono, um gás incolor à temperatura ambiente, com ponto de ebulição de $-33,3^\circ\text{C}$, podendo ser manuseado no estado líquido sob pressão moderada. Apresenta uma massa específica às condições de 8,6 bar e 20°C de cerca de 610 kg/m^3 (Overstreet & Giaque, 1937). Estas propriedades tornam o armazenamento do amoníaco uma tarefa mais fácil, comparativamente com o hidrogénio. Este tem um valor de poder calorífico inferior, de cerca de 18,6 MJ/kg, o que corresponde a cerca de metade do teor energético do MGO, em termos de massa e 30% em termos volúmicos no estado líquido (DNV GL, 2020). Quanto à densidade energética por unidade de volume esta é de 12,7 MJ/L (Cheliotis et al., 2021). Com um valor de RON elevado, cerca de 130, torna-se vantajoso para motores de ignição por faísca, pois a sua resistência ao *engine knocking* pode resultar em taxas de compressão mais elevadas e, por sua vez, numa melhoria da eficiência do motor (Tornatore et al., 2022). Os limites de inflamabilidade encontram-se entre os 16-25% por volume de ar e apresenta uma temperatura de autoignição de 651°C (Hansson et al., 2020).

Outra particularidade do amoníaco é o seu poder corrosivo na presença de alguns materiais como o cobre, ligas de cobre e zinco, e sob tensão, na presença de aços de carbono, manganês e níquel. Adicionalmente, a presença de oxigénio dissolvido no amoníaco líquido aumenta o risco de corrosão. No entanto, a probabilidade de fissuração do material é significativamente reduzida através da adição de uma pequena quantidade de água ao combustível, com uma percentagem de pelo menos 0,2% (Loginow, 1989).

Relativamente ao seu armazenamento, este combustível pode ser armazenado a bordo sob pressão, ou em tanques refrigerados no estado líquido. No entanto, numa perspetiva de risco de fuga, os tanques refrigerados são uma opção mais segura (Wärtsilä Corporation, 2020). Em termos de segurança, o amoníaco apresenta desafios, sendo que é uma substância tóxica e corrosiva, sufocante, com forte odor, pelo que potenciais fugas e derrames deste composto colocam em causa a segurança do ser humano e do ambiente, particularmente do meio aquático, no caso da aplicação a navios. No entanto, a característica de forte odor deste composto torna-o facilmente

detetável em caso de fugas (Ash & Scarbrough, 2019). Segundo os dados do *The National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH), o limite de exposição imediatamente perigoso para a vida e saúde humana é estimado em 300 ppm (NIOSH, 2019). Já em termos de valor de TLV-TWA, este é de 25 ppm (ACGIH, 2022). A utilização de amoníaco a bordo requer uma ventilação apropriada, sistemas de detecção de gases, equipamento de proteção individual adequado e quimicamente resistente, bem como, alterações no sistema de combustível (tubagens e tanques) (Ash & Scarbrough, 2019; Vries, 2019). Do ponto de vista da inflamabilidade, o amoníaco é mais seguro que outros combustíveis, tendo uma velocidade de chama lenta e alta energia de ignição. Explosões com libertação repentina de amoníaco foram já documentadas, mas apenas em grandes instalações industriais (Valera-Medina et al., 2018).

Diversos estudos demonstraram a aplicação de amoníaco como combustível em motores de CI, como motores *Diesel* e *Otto*, bem como em FC. No Anexo A – Potenciais Configurações de Sistemas de Propulsão a Amoníaco são apresentadas de forma sintetizada, quatro potenciais configurações de sistemas de propulsão a amoníaco, com aplicabilidade para o setor marítimo. Reiter e Kong (2008, 2011) estudaram a aplicabilidade do amoníaco num motor diesel com uma configuração *dual-fuel*. Os resultados indicaram que por forma a obter uma eficiência favorável, a proporção de combustível a utilizar deveria ser de 40-60% de diesel conjuntamente com cerca de 60-40% de amoníaco. As emissões de CO e HC, foram superiores em comparação com o uso exclusivo de diesel. A combustão incompleta resultou em elevadas emissões de amoníaco, entre as 1000 a 3000 ppmV, demandando tecnologias de pós-tratamento para mitigação.

O amoníaco pode ser aplicado nas FC de tipologia PEM, através da utilização de hidrogénio purificado obtido pelo processo denominado *ammonia cracking* (decomposição parcial do amoníaco), bem como as SOFC que se baseiam no uso direto do amoníaco (Vries, 2019). O processo de *ammonia cracking* exigiria uma unidade adicional a bordo, o que resultaria em custos adicionais e mais volume ocupado (Ash & Scarbrough, 2019). Assim, as SOFC são uma opção mais viável, oferecendo alta eficiência. As temperaturas elevadas destas FC, superiores a 1 000 °C, promovem a

decomposição acelerada do amoníaco em hidrogénio e azoto, proporcionando um desempenho similar às FC de hidrogénio (Cheddie, 2012).

Ao nível das emissões provenientes da utilização deste combustível, de acordo com Bicer e Dincer (2018a) a aplicação de amoníaco e hidrogénio numa configuração de *dual fuel*, conjuntamente com uma percentagem de 50% de *Heavy Fuel Oil* (HFO), pode reduzir as emissões de GEE em cerca de 27% a 40% por tonelada-kilómetro, respetivamente. Numa perspetiva de emissões WTT, o amoníaco produzido através de hidrogénio com origem no gás natural, detém o valor de 121 gCO_{2eq}/MJ. Ao considerar as emissões de operação, designadas por TTP estas são nulas, no que concerne ao C_{fCO_2} , pois este composto é livre de carbono (European Commission, 2022)

Até à data não existem referências a projetos ou navios militares movidos a amoníaco a nível global. Tal como o hidrogénio, o amoníaco é um combustível desafiante em termos de segurança, pelo que esta pode ser uma das razões para o não investimento neste combustível alternativo como vetor energético no meio militar. No entanto, no setor comercial já estão em desenvolvimento diversos projetos de motores marítimos a amoníaco com recurso à tecnologia de *dual fuel*. Em janeiro de 2022, o armador grego *Avin International* recebeu a entrega de *Kriti Future*, o primeiro navio com o sistema de propulsão pronto a operar com amoníaco, embora atualmente use MGO. Ao nível de motores, a *Wärtsilä Marine Power* realizou testes de combustão com amoníaco em março de 2020, sendo que planeava iniciar o desenvolvimento de testes num motor à escala real, a quatro tempos, no ano de 2021, em colaboração com outras empresas do setor marítimo (Wärtsilä Corporation, 2020).

Metanol

Desde os anos 70 que o metanol tem sido considerado como uma opção de combustível, sendo que foi amplamente estudado nas décadas de 80 e 90, para aplicação em motores de CI (Verhelst et al., 2019). A China é um dos principais utilizadores de metanol como combustível para os transportes, correspondendo a cerca de 7-8% do combustível total utilizado para este fim. Este fator deve-se à abundância de matérias-primas facilmente disponíveis, como o carvão, gás-natural e biomassa, utilizadas para a produção deste combustível alternativo, onde o carvão é a matéria-prima de eleição. A

nível europeu, o interesse pelos combustíveis alternativos motivou a criação de uma norma, em 2004, que permite a mistura de até 3%vol. de metanol com gasolina (Bromberg & Cheng, 2010). Uma das maiores vantagens do metanol é a existência de capacidade de produção e infraestruturas em larga escala, sendo que é um dos produtos químicos mais utilizados, com uma produção de cerca de 70 milhões de toneladas métricas em 2015 e capacidade de produção global de cerca de 110 milhões de toneladas métricas (Verhelst et al., 2019). Além disso, é amplamente utilizado na indústria petroquímica e na produção de pesticidas e medicamentos (Yang & Jackson, 2012).

À semelhança do hidrogénio, o metanol pode ser classificado em metanol castanho, cinzento, azul e verde, dependendo das suas fontes de produção. O metanol pode ser produzido a partir de fontes de carbono concentrado, como os já referidos, gás natural, carvão e biomassa, ou ainda, CO₂ de diversas fontes incluindo os gases de exaustão industriais ou mesmo captação direta do ar (DAC) (Bertau et al., 2014; Olah, 2005).

No que concerne às propriedades deste combustível, o metanol (CH₃OH) é um líquido incolor, volátil, solúvel em água, inflamável e com um ligeiro odor alcoólico. Em termos de temperatura de ebulição é de 64,7°C, apresenta uma massa volúmica de 791,4 kg/m³ aos 20°C e congela a -97,6°C (Measurement Canada, 2017; National Center for Biotechnology Information, 2023). A sua queima resulta apenas em água e CO₂, no caso de combustão completa, pelo que, quando utilizado em motores de CI, não emite SO_x, e as emissões de PM e NO_x são em concentrações não significativas. Em termos de poder calorífico inferior é de cerca de 20,27 MJ/kg, sendo este valor inferior ao do MGO, pelo que é necessária uma maior quantidade de metanol para obter o mesmo desempenho do que no caso do motor alimentado a MGO. No entanto, o rácio estequiométrico de combustível/ar elevado, conjugado com o elevado teor de oxigénio e também elevada relação H/C pode resultar numa vantagem ao nível da combustão e reduzir as emissões de carbono negro e fumo (Bayraktar, 2008). Relativamente ao calor latente de vaporização este é superior no metanol, comparativamente ao diesel, pelo que este necessita de mais energia na mudança para o estado gasoso, o que potencia um efeito de arrefecimento do cilindro. Este efeito pode resultar numa diminuição de

temperatura no interior do cilindro e, conseqüentemente, numa redução das emissões de NO_x. Devido ao baixo número de cetano (3), elevada temperatura de autoignição e elevado calor latente de vaporização, o metanol tem um comportamento de ignição fraco, o que resulta em atrasos na ignição. Deste modo, deve ser utilizado numa configuração *dualfuel*, conjuntamente com um combustível de ignição ou mesmo com um *ignition improver* (IEA, 2023; Verhelst et al., 2019). Uma vantagem deste combustível consiste na sua baixa viscosidade em comparação com o diesel, o que permite uma fácil injeção e eficiente atomização. No caso do RON encontra-se nos valores entre 106-115, pelo que pode ser utilizado diretamente em motores de ignição por fâisca (SGS, 2020).

O metanol tem sido amplamente estudado como combustível em motores CI, mais especificamente os motores de ciclo *Otto*, onde é necessária muito pouca adaptação (Svanberg et al., 2018). No âmbito do setor marítimo, a grande maioria dos motores utilizados é de grandes dimensões e com ignição por compressão, o que obriga a uma maior adaptação, devido às temperaturas elevadas de autoignição do metanol, de cerca de 470 °C (IEA, 2023). Apesar dos estudos efetuados neste tipo de motores serem quantitativamente inferiores, já existem algumas implementações com sucesso em motores marítimos. Song et al. (2008) testou a aplicação de metanol num motor diesel com configuração *dualfuel* para apoio na ignição, tendo obtido resultados de menor consumo de combustível, boa potência do motor, conjugado com baixas emissões de partículas e NO_x. Grandes fabricantes de motores marítimos como a *Wärtsilä* e a *MAN Energy Solutions* têm vindo a desenvolver diferentes conceitos de combustão de metanol nos seus motores. A *Wärtsilä* participou na conversão dos motores do *ferry Stena Germanica*, para um sistema de propulsão a metanol, onde este é queimado com uma pequena quantidade de MGO, que funciona como combustível de ignição. O motor utilizado na conversão foi o *Wärtsilä 32*, que permite a utilização de diversos combustíveis como, o metanol, biodiesel, HFO e *Marine Diesel Oil* (MDO) (*Wärtsilä Corporation*, 2023). Relativamente à *MAN Energy Solutions*, esta desenvolveu uma versão dos seus motores ME-LGIM a dois tempos, numa configuração de *dualfuel*, podendo este ser tanto alimentado a metanol, verificando, de acordo com testes efetuados, uma redução significativa das emissões de CO₂, NO_x e SO_x. Estes motores apresentaram uma eficiência igual ou ligeiramente superior à do mesmo motor operado

com HFO. A empresa está neste momento a desenvolver um motor de 4 tempos a metanol, numa configuração *dual-fuel* conjuntamente com o biodiesel, o que permitirá alcançar um funcionamento do motor totalmente neutro em carbono (MAN Energy Solutions, 2022b). O metanol pode ainda ser aplicado a bordo através de FC como as *Direct Methanol Fuel Cells* (DMFC), semelhantes às já referidas PEMFC, com a variante de neste caso o combustível ser metanol. No entanto, esta tecnologia ainda se encontra numa fase inicial de desenvolvimento (de-Troya et al., 2016).

O armazenamento de metanol a bordo requer algumas alterações nos tanques, encanamentos e sistemas de segurança, mas em menor grau, quando comparado com líquidos criogénicos, sendo armazenado à temperatura ambiente. No entanto, uma limitação é a sua baixa densidade energética, cerca de 16,04 MJ/l, quando comparado com o MGO, o que resulta em menor capacidade de armazenamento ou necessidade de reabastecimento mais frequente (Ren & Lützen, 2017; Verhelst et al., 2019). Para o seu armazenamento a bordo não são necessários tanques de pressão especiais, pois o metanol é armazenado à temperatura e pressão ambiente. As alterações envolvem a adição de revestimentos compatíveis com o metanol, tanto nos tanques, como nos encanamentos e componentes específicos dos motores de CI, como os injetores. No caso dos tanques de metanol existe a possibilidade destes se encontrarem junto ao casco (Svanberg et al., 2018).

No concerne à segurança, o metanol apresenta limites de inflamabilidade entre 6-36,5 vol%, com um *flash point* entre os 11 e 12 °C e uma chama incolor, o que pode preocupante em termos de segurança (IEA, 2023). Os vapores de metanol são mais densos que o ar, pelo que se acumulam em áreas mais baixas, o que requer atenção especial (DNV GL, 2023). Assim, é aconselhada a colocação de detetores nos compartimentos com maior risco de fuga, assim como, encanamentos de parede dupla, ao nível dos espaços de máquinas (Deniz & Zincir, 2016; Oloruntobi et al., 2023). No entanto, a avaliação de risco realizada no *ferry Stena Germanica*, resultou numa avaliação de segurança equivalente à dos combustíveis convencionais (Ellis & Tanneberger, 2015). A principal desvantagem é a sua toxicidade, causando danos por inalação, contato com a pele e olhos e ingestão, podendo esta última ser letal com doses acima dos 20 ml. Quantidades inferiores a 20 ml podem causar cegueira irreversível,

pelo que devem ser tomadas precauções adequadas durante o manuseamento deste combustível (IRENA & Methanol Institute, 2021). Ao nível do concentração de TLV-TWA é de cerca de 200 ppm (Methanol Institute, 2017).

Em termos de emissões de GEE durante o ciclo de vida, estas dependem da fonte de produção, pelo que segundo a *European Commission* (2022), o metanol produzido através de gás natural resulta em emissões WTT de 31,3 gCO_{2eq}/MJ e um valor de emissões TTP de $C_{fCO_2} = 1,375$. No entanto, ao nível de emissões WTT o “e-metanol” apresenta um valor negativo de -67,1 gCO_{2eq}/MJ e C_{fCO_2} neutro, pois a sua combustão emite uma quantidade de CO₂ que é compensada pela quantidade capturada durante o processo de produção.

A implementação deste combustível alternativo a navios militares ainda não foi devidamente estudada para que se possa ter uma perceção do nível de aplicabilidade. No entanto, a Marinha Real Holandesa está atualmente a substituir a sua frota por 8 novos navios, quatro de alto mar e quatro de apoio ao mergulho, todos com sistemas de *dualfuel* com possibilidade de implementação de metanol. O objetivo será incidir na utilização de metanol verde, no entanto, se este não estiver disponível será utilizado metanol cinzento ou MGO. Estima-se que, caso seja utilizado metanol verde para o abastecimento destes 8 navios, resultará numa redução de 13 kilotoneladas de CO₂ por ano, comparativamente com os navios atuais (Buitendijk, 2022).

Gás Natural Liquefeito (GNL)

O gás natural liquefeito (GNL) é um dos combustíveis alternativos mais comumente utilizados pelo setor marítimo, por forma a cumprir com os atuais limites de SO_x e NO_x, bem como, reduzir as emissões de CO₂ provenientes da sua operação. Até à recente adoção destes limites pela IMO, a utilização de GNL cingia-se, há mais de 40 anos, apenas à indústria de transporte deste combustível que o utilizava como fonte de energia para a propulsão do navio (Burel et al., 2013).

O metano é o componente principal do GNL com, geralmente, mais de cerca de 95%vol, dependendo da fonte de extração. Tem misturas de outros hidrocarbonetos parafínicos, tais como, o etano, propano e butano com pequenas quantidades de azoto.

O gás natural é convertido em GNL através do seu arrefecimento até -162°C , passando ao estado líquido e facilitando o seu armazenamento, com uma redução de volume de cerca de 600 vezes. O GNL é um líquido inodoro, incolor, não-corrosivo, não-inflamável no estado líquido, e não-tóxico, cuja massa volúmica varia entre 420 kg/m^3 e 470 kg/m^3 . Relativamente à temperatura de autoignição é de cerca 599°C , muito superior à do MGO. Os limites de inflamabilidade do metano são de aproximadamente 5%-15%vol e o *flash point* é de -188°C . Quanto ao RON assume o valor de 120 (Putzig et al., 2021). Devido à sua composição química, o gás natural é o combustível fóssil mais “limpo”, pois emite a menor concentração de CO_2 , quando comparado com outros hidrocarbonetos. Esta redução está relacionada com o elevado poder calorífico inferior ($49,0\text{ MJ/kg}$), baixo teor de carbono e combustão eficiente (International Group of Liquefied Natural Gas Importers, 2019; PGW, 2015; Strande & Johnsson, 2013).

Em termos de armazenamento, devido à menor massa volúmica, quando comparado com o MGO e HFO, e ao revestimento térmico necessário, os tanques de GNL devem ser cerca de volume 2,5 vezes superior aos de MGO, o que resulta num desafio para a sua implementação a bordo dos navios (Herdzik, 2011). Atualmente existem quatro tipos de tanques para armazenamento de GNL, nomeadamente, do tipo A, B, C e tanques de membrana, sendo que os do tipo A, B e membrana são tanques de baixa pressão e o de tipo C é pressurizado (ABS, 2022).

Quanto aos potenciais perigos associados à utilização de GNL a bordo, destacam-se a elevada taxa de expansão de gás que pode ocorrer em caso de derrame, bem como os potenciais ferimentos por congelação e fragilidade estrutural, devido ao líquido criogénico. Os amplos limites de inflamabilidade conjuntamente com o baixo ponto de inflamação resultam também em riscos potenciais em caso de fugas de GNL (Burel et al., 2013). Quando ocorre uma fuga de vapor de GNL, por este ser menos denso que o ar, a mistura inflamável, se não tiver uma fonte de ignição irá aquecer e dissipar-se na atmosfera. De ressaltar que nos casos em que o GNL é armazenado à pressão atmosférica, uma fissura ou perfuração do tanque não irá provocar uma explosão imediata (Herdzik, 2011). Outro desafio está associado aos grandes volumes de gás, provenientes da vaporização dos líquidos criogénicos, mesmo em tanques bem isolados. Esta vaporização denominada *Rapid Phase Transition* (RPT), pode produzir

enormes pressões nos tanques e levar à rotura dos mesmos. Para lidar com esta questão é necessário utilizar tanques projetados para suportar pressões elevadas e equipados com diversos dispositivos de prevenção para a sobrepressão (Air Products, 2014; Vandebroek & Berghmans, 2012).

No caso da aplicação de GNL em motores de CI foram alvos de estudo, tanto os motores de ignição por compressão como os de ignição por faísca. Nas duas tipologias de motores verificou-se que problemas como, *engine knocking* e elevadas emissões, estão dependentes da correta regulação da injeção e da geometria dos cilindros (Elgohary et al., 2015). De acordo com o estudo de Banawan et al. (2010), relativo à implementação de um motor diesel *dualfuel* a GNL num navio de passageiros de alta-velocidade, verificou-se uma diminuição nas emissões de NO_x, SO_x, PM e CO₂ de 72%, 91%, 85% e 10%, respetivamente. A utilização de GNL em turbinas é outra possibilidade para a aplicação deste combustível a bordo dos navios. Esta técnica é já usada nas estações de produção de energia e a utilização de gás natural resulta em menor produção de carbono negro, comparativamente aos combustíveis fósseis líquidos. No que concerne às emissões de poluentes atmosféricos, segundo El-Gohary (2012), estas foram menores, excetuando o CO₂ devido ao elevado consumo de combustível, consequência da menor eficiência das turbinas a gás comparativamente com os motores de CI.

Relativamente às vantagens do GNL na redução de emissões de SO_x, NO_x e PM, estas são evidentes, com uma redução de cerca de 80-85% nas emissões de NO_x, neutralidade nas emissões de SO_x e baixa formação de PM. Embora menos evidentes no caso do CO₂, verifica-se uma redução de cerca de 20-30% das emissões, comparativamente com o HFO/MGO. Contudo, os motores operados a GNL podem estar sujeitos a fugas de combustível, um fenómeno denominado de *methane slip*, que consiste na combustão incompleta do gás natural (Burel et al., 2013; Le Fevre, 2018). O metano tem um potencial de aquecimento global de 100-ano (GWP100), cerca de 25 vezes superior ao do CO₂ o que significa que, 1 kg de metano tem o mesmo potencial de aquecimento global de 25 kg de CO₂, pelo que este fenómeno deve ser controlado para que o setor marítimo beneficie da utilização de GNL (IPCC, 2007). No que concerne às emissões de GNL numa perspetiva de WTT são de cerca de 18,5 gCO_{2eq}/MJ e de -38,9

gCO_{2eq}/MJ no caso do “bio-metano”. Quanto às emissões TTP, estas correspondem a um C_{fCO_2} de 2,75, no caso de aplicação tanto em motores *dualfuel* de ciclo *Diesel* como de ciclo *Otto* (European Commission, 2022).

No que concerne à aplicação deste combustível alternativo no setor marítimo, de acordo com dados de janeiro de 2022 existiam cerca de 251 navios alimentados a GNL em operação, excluindo os navios-tanque de GNL e embarcações de navegação interior, e cerca de 403 projetados cuja construção será executada nos próximos 5 anos (DNV GL, 2022). Em Singapura, a empresa *Sembcorp Marine* está a liderar a construção de rebocadores com propulsão a GNL e híbrida, tendo já verificado uma redução de 22% nas emissões de CO₂ e de 15% dos níveis de ruído, o que resulta num melhor conforto para a guarnição (Wingrove, 2021). O fator de redução de ruído poderia ser vantajoso no caso de aplicação de GNL em navios militares, de acordo com a tipologia de missões. Outro exemplo da aplicação no setor marítimo é o do navio de apoio *offshore* “*Viking Lady*”, que utiliza o GNL tanto para fins de propulsão num motor de configuração *dualfuel*, bem como para produção de energia através de uma FC (Ship Technology, 2010). Apesar da diversidade de aplicações de GNL no setor comercial, ainda não existem implementações relatadas deste combustível em navios militares, pois a sua aplicação terá mais exigências operacionais específicas e requisitos de segurança. Alguns dos desafios poderão estar relacionados com a necessidade de infraestruturas específicas de abastecimento em bases militares, garantindo a segurança no armazenamento e manuseamento, bem como, a elevada demanda de espaço para o armazenamento deste combustível alternativo.

Gás de Petróleo Liquefeito (GPL)

O gás de petróleo liquefeito, geralmente denominado de GPL, é um produto gasoso resultante da separação de frações mais leves do petróleo, sendo constituído predominantemente por propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀), bem como por, propeno (C₃H₆) e outros hidrocarbonetos leves (Raslavičius et al., 2014). Em termos de composição, o GPL pode ser composto por diferentes rácios de propano e butano, sendo que estes variam consideravelmente entre diferentes países. Em Espanha o GPL é constituído por uma percentagem volúmica de 30% de propano e 70% de butano,

enquanto que, na Alemanha é de cerca de 90% de propano e 10% de butano (Saleh, 2008).

O propano encontra-se no estado gasoso às condições ambiente, com um ponto de ebulição de $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, pelo que, quando sujeito a pressões acima de 8,4 bar a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, apresenta-se no estado líquido, sendo mais fácil o seu armazenamento e transporte. No caso do butano, este pode assumir duas tipologias, o n-butano ou o isobutano, apresentando pontos de ebulição de $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, respetivamente, pelo que podem ser liquefeitos a pressões mais baixas (Brinks & Chryssakis, 2017). No caso do presente estudo considerou-se o GPL como uma mistura de 40%vol de propano e 60%vol de butano, pelo que as propriedades apresentadas são referentes a esta composição. Relativamente à massa volúmica desta mistura é de cerca 540 kg/m^3 e o poder calorífico inferior de $46,04\text{ MJ/kg}$, o que corresponde a uma densidade energética por unidade de volume de $24,86\text{ MJ/l}$ (Raslavičius et al., 2014).

No que concerne ao armazenamento do GPL, este combustível é reservado num tanque pressurizado à temperatura ambiente, sendo uma opção fiável e mais acessível, quando comparado com os tanques refrigerados de GNL. Relativamente à massa volúmica deste combustível, esta é superior à do ar, pelo que, em caso de fuga, deposita-se nas superfícies inferiores, não se dispersando na atmosfera, ao contrário do GNL (Brinks & Chryssakis, 2017). Deste modo, é necessária uma especial atenção à ventilação dos espaços de armazenamento do GPL, por forma a facilitar uma descarga externa (WLPGA, 2017). O fenómeno de *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (BLEVE) é extremamente pertinente, pois está associado a inúmeros acidentes com tanques pressurizados de GPL. O BLEVE ocorre quando uma substância, por norma um gás liquefeito num reservatório sob pressão, é sujeito a temperaturas muito superiores ao seu ponto de ebulição (Figura 9). Ocorre a vaporização do fluido, que conjugada com danos no reservatório, diminui a resistência do reservatório à pressão interna elevada, dando origem à rutura do reservatório e a uma libertação repentina explosiva, produzindo uma onda de choque acompanhada pela inflamação do fluido armazenado (Patrício et al., 2010).

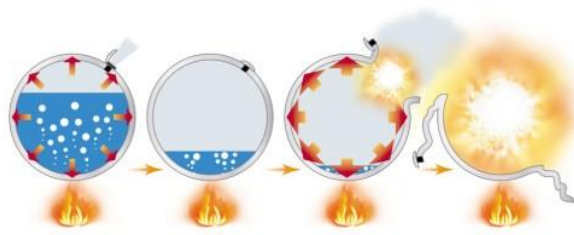


Figura 9 - *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (BLEVE) (Moita, 2023)

Outra propriedade que deve ser atendida é o baixo ponto de inflamação do GPL, de cerca de $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$, pelo que quando utilizado a bordo num espaço com elevado risco de incêndio e presença humana, como o espaço de máquinas, devem ser utilizados encanamentos de parede dupla para o transporte deste combustível (Brinks & Chryssakis, 2017; ELGAS, 2020). Os limites de inflamabilidade do GPL assumem os valores, em termos de volume de gás no ar, entre 1,8-9,5%, o que lhe confere uma gama de inflamabilidade superior ao MGO (Raslavičius et al., 2014). Relativamente à temperatura de autoignição, esta varia entre os $410\text{-}580\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependendo da composição do GPL. Quanto à toxicidade, o GPL não é tóxico no estado gasoso, no entanto, pode sufocar quando em grandes concentrações no ar, sendo também incolor e inodoro (NRL, 2023), embora vendido normalmente odorizado. Ao nível do indicador TLV-TWA, este pode assumir o valor do propano, de cerca de 1000 ppm (New Jersey Health Department, 2015).

No que concerne à aplicação a máquinas térmicas, existem três abordagens principais na implementação do GPL como combustível em motores marítimos: motores de ciclo *Diesel* a dois-tempos; motores de ciclo *Otto* a quatro-tempos; e turbinas a gás. Devido ao seu elevado índice de octanas, RON, que varia entre 94 e 112, o GPL é altamente adequado para motores de ciclo *Otto*, com ignição por faísca (IEA, 2012). No caso desta tipologia de motores, a *Wärtsilä* desenvolveu, apenas para centrais elétricas e ainda sem aplicação para os motores marítimos, a série *Wärtsilä 34SG*, que consistem em motores de *lean-burn*, isto é, que operam com a injeção de uma mistura pobre de ar-combustível no cilindro e, portanto, com uma concentração de ar superior à necessária para a combustão estequiométrica. Uma das vantagens da utilização deste método é a redução de emissões de NO_x , devido à diminuição da temperatura de pico durante a combustão. Algumas das vantagens da aplicação deste motor são o facto de

motores a ciclo *Otto* requererem uma pressão de gás baixa de cerca de 4-5 bar, o que permite a não utilização de compressores e bombas para pressurizar o gás antes de este entrar no motor; bem como, a ausência do fenómeno de *knocking* ou falhas na ignição, devido ao controlo preciso da relação ar-gás (Brinks & Chryssakis, 2017; Wärtsilä Corporation, 2022).

Atualmente para aplicação marítima, já desenvolvidos e comercializados, apenas estão disponíveis motores de ciclo *Diesel* a dois-tempos e turbinas a gás. No caso dos primeiros, a *MAN Diesel & Turbo* desenvolveu a série de motores *MAN ME-LGI*, com objetivo de aplicação de combustíveis líquidos com baixo ponto de inflamação, como é o caso do metanol e GPL. Para a ignição é necessária a injeção de combustível HFO, com o motor a 100% de carga. Após a ignição, o motor pode funcionar com GPL para cargas do motor superiores a 10%, o que resulta numa redução de emissões de SO_x de até 90-97%, de NO_x de 15-20%, de PM de cerca de 90% e de CO₂ de cerca de 20%, comparativamente ao HFO (MAN B&W, 2016). No que se refere à aplicação de GPL em turbinas a gás, a General Electric (GE) desenvolveu turbinas da série LM2500 para aplicação no setor marítimo. Apesar da implementação do GPL nestas turbinas não requerer modificações ao nível do sistema de injeção de combustível, são necessárias modificações ao nível da segurança, mais especificamente, nos detetores de fugas e sistemas de ventilação. Esta série de turbinas pode fornecer potências entre os 22-33 MW, com eficiências em ciclo simples de 36-38%, com potencial melhoria para os 53-55% através da combinação com uma turbina de vapor ou de CO₂ (Brinks & Chryssakis, 2017; GE, 2022). Em 2016, a GE aceitou cooperar com parceiros sul-coreanos e mundiais para o desenvolvimento do projeto de um *ferry* alimentado a GPL, através de um sistema de propulsão composto por uma turbina a gás de ciclo combinado, elétrico e a vapor (COGES) (GE, 2017).

Relativamente às emissões WTT, segundo Lindstad et al. (2021), no caso do GPL são de 16,6 gCO_{2eq}/MJ, e com um valor de C_{fCO_2} de cerca de 3, numa perspetiva de TTP. De acordo com o estudo efetuado por Yeo et al. (2022) a aplicação de GPL nos navios registados na Coreia do Sul, com possibilidade para a conversão dos seus sistemas para este combustível alternativo, potenciava a eliminação de poluentes muito

nocivos como as PM e os SO_x, aliada a uma redução das emissões de CO₂ da ordem dos 10-14%.

No que respeita à implementação de GPL em navios militares atualmente não há registo de qualquer projeto em desenvolvimento, o que também se denota no setor comercial onde os projetos desenvolvidos e já concluídos são quantitativamente inferiores, quando em comparação com outros combustíveis alternativos já abordados. No entanto, algumas empresas como a BW LPG, um dos principais proprietários e operadores de transporte de GPL, está atualmente a desenvolver um projeto que consiste na conversão de 15 navios da sua frota, para aplicação de GPL. O primeiro navio a ser convertido foi construído em 2015, tendo completado com sucesso as provas de mar em 2020. Os resultados desta conversão indicam que a eficiência do sistema de propulsão aumentou em cerca de 10%, comparativamente com o diesel convencional, o que irá potenciar uma diminuição no consumo de combustível (International Registries, 2021). Um dos desafios na implementação deste combustível nos navios resulta da necessidade de desenvolvimento de uma infraestrutura de abastecimento, apesar da extensa rede de importação e exportação de GPL a nível mundial (DNV GL, 2022).

Eletricidade (baterias)

Nos últimos anos, assistiu-se a um aumento na utilização de baterias eletroquímicas como estratégia de mitigação de emissões no setor automóvel. No caso do setor marítimo, a propulsão elétrica com baterias, não é de todo, um novo conceito, sendo que o primeiro navio movido a energia proveniente de baterias era um navio de transporte de passageiros, construído no ano de 1839 em São Petersburgo, Rússia. Com o aparecimento dos motores de CI no início do século XX, os navios com propulsão elétrica perderam o seu destaque, voltando a ser evidenciados nos anos 70 devido à crise energética que se sentia na altura (Alnes et al., 2017). As baterias são elementos já presentes a bordo em inúmeros sistemas, como por exemplo, no arranque de sistemas de emergência e nos equipamentos de navegação e comunicações. No entanto, a aplicação de baterias para todo o sistema de propulsão e distribuição de energia a bordo, requer uma demanda de potência muito superior, que tem de ser balanceada com o perfil operacional do navio (EMSA & DNV GL, 2020).

No âmbito do presente estudo a implementação de propulsão elétrica incide apenas numa abordagem de um navio totalmente elétrico, no qual o sistema de armazenamento de energia se baseia em baterias, que são carregadas quando o navio atraca através de uma ligação à rede elétrica em terra. No entanto, existem outras configurações, nomeadamente sistemas híbridos convencionais e híbridos *plug-in*, que também potenciam a mitigação de emissões (DNV GL, 2019; Peng Wu & Richard Bucknall, 2016) .

A maioria destes sistemas baseiam-se nas baterias como fonte de armazenamento de energia, no entanto, existem outros sistemas de armazenamento, como os volantes de inércia, vulgarmente conhecidos por *flywheel* e os ultracapacitores (Nuchtaree et al., 2020). Uma bateria consiste num dispositivo de armazenamento de energia, ao qual estão associadas perdas energéticas, sendo que na maioria dos casos estas são substancialmente inferiores quando comparados com os combustíveis convencionais. Relativamente à sua constituição, uma bateria é composta por dois polos distintos, o cátodo ou eléctrodo positivo e o ânodo ou eléctrodo negativo, como se verifica na Figura 10. No interior está presente um material denominado de eletrólito, que permite a circulação dos iões ou portadores de carga, entre os polos. Deste modo, quando os polos são conectados através de um material condutor, os eletrões fluem através do circuito elétrico externo e os iões através do eletrólito (DNV GL, 2019; Goodenough, 2012).

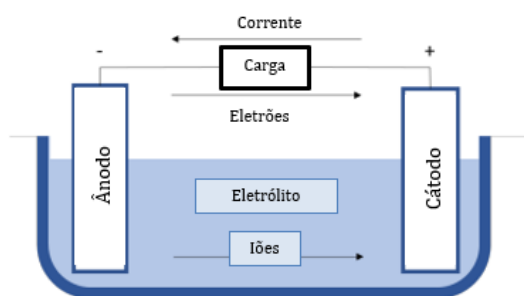


Figura 10 - Componentes de uma bateria (adaptado de EMSA & DNV GL, 2020)

Nos últimos dez anos a tecnologia de baterias mais desenvolvida foi a de baterias à base de iões de lítio, presentes em equipamentos eletrónicos portáteis e na maioria dos automóveis 100% elétricos (Nogueira et al., 2021). No entanto, existem

outras possibilidades algumas com aplicação marítima, que se encontram revistas no Quadro 1.

Quadro 1 - Breve revisão da tecnologia atual no âmbito das baterias com maior aplicabilidade para o setor marítimo (BEPA Association, 2022; Echandia, 2022; EMSA & DNV GL, 2020; Flash Battery, 2022; Levasseur, 2017; Rose, 2022; Sachitanad, 2021; Schipper et al., 2017; Tvette, 2021; Ulvestad, 2018; Yu et al., 2017)

Bateria	Energia Específica (MJ/kg)	Densidade Energética (MJ/l)	Vantagens	Desvantagens	Segurança	Aplicação Marítima
Chumbo-ácido	0,11-0,18	0,29-0,32	<ul style="list-style-type: none"> Baixo custo Elevada disponibilidade 	<ul style="list-style-type: none"> Baixa energia específica e densidade energética Ciclo de vida curto 	<ul style="list-style-type: none"> Eléctrodos não inflamáveis o que confere um maior grau de segurança 	<ul style="list-style-type: none"> Energia específica e densidade energética muito baixas para aplicação marítima
Óxido de Lítio Níquel Cobalto Manganês (NMC)	0,54-0,79	1,28	<ul style="list-style-type: none"> Elevada energia específica Densidade energética, custo e segurança ajustáveis (dependentes da composição) 	<ul style="list-style-type: none"> Balanco difícil das propriedades dos elementos constituintes, por forma a assegurar um tempo de vida útil estável 	<ul style="list-style-type: none"> Quando imersa em água salgada descarrega completamente em menos de 15 min., sendo observado um aumento de temperatura de 400 l de água de 20 °C em 15 min. Menos estáveis e mais sujeitas a fuga térmica comparativamente com as baterias de LFP Forma dendrites em torno do ânodo, o que pode resultar em curto-circuitos internos 	<ul style="list-style-type: none"> Design flexível em termos de energia e capacidade Alguma maturidade tecnológica em aplicações marítimas Por forma a diminuir o risco, deverão ser usadas baterias com baixo teor de níquel ou combinadas com eletrólito <i>solid-state</i>
Fosfato de ferro-lítio (LFP)	0,32-0,58	1,26	<ul style="list-style-type: none"> Resistente a flutuações de temperatura Dopagem catódica com outros materiais é possível, para aplicações de maior potência Menor custo 	<ul style="list-style-type: none"> Energia específica mais baixa Baixo potencial eletroquímico (voltagem) 	<ul style="list-style-type: none"> Construção estável que não se decompõe, aquece ou colapsa A inexistência de uma fonte de oxigénio no cátodo, representa uma magnitude de risco de fuga térmica significativamente reduzida 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnologia utilizada no setor marítimo devido às suas propriedades de baixo risco

Óxido de Lítio Níquel Cobalto Alumínio (NCA)	0,72-0,94	1,98	<ul style="list-style-type: none"> Energia específica e densidade energética elevadas Melhoria ao nível do <i>Calendar aging</i> 	<ul style="list-style-type: none"> Segurança inferior Custo mais elevado 	<ul style="list-style-type: none"> O elevado teor de níquel aumenta a propensão para a ocorrência de fugas térmicas Quando aquecida a 180 °C entra em fuga térmica 	<ul style="list-style-type: none"> Densidade energética elevada, uma das propriedades mais importantes na aplicação a bordo No entanto, apresenta um risco superior o que se torna menos apelativo para aplicação a bordo
Titanato de Lítio (LTO)	0,18-0,29	0,64	<ul style="list-style-type: none"> Ciclo de vida muito elevado Capacidade de potência elevada apesar baixa energia específica, o que requer uma maior quantidade de baterias 	<ul style="list-style-type: none"> Energia específica relativamente baixa Elevado investimento inicial, mas custo de vida total potencialmente inferior 	<ul style="list-style-type: none"> Caraterísticas de segurança elevadas Possui um mecanismo de autoproteção contra os efeitos de um curto-circuito, e consequente, fuga térmica Não forma dendrites, devido ao material constituinte do ânodo que não contém carbono 	<ul style="list-style-type: none"> Adequado para aplicações que requerem carregamento rápido, com elevada potência e muitos ciclos
Solid-State	0,72-1,44	2,88-3,6	<ul style="list-style-type: none"> Elevado potencial para energia específica e densidade energética superiores 	<ul style="list-style-type: none"> Elevado custo de produção Baixo tempo de vida Baixa condutividade e elevada impedância na interface eletrodo-eletrólito 	<ul style="list-style-type: none"> Eletrólito não inflamável e anula a formação de dendrite A natureza não-combustível, ou a resistência à autoignição das baterias <i>solid-state</i>, reduz o risco de fuga térmica 	<ul style="list-style-type: none"> Tecnologia mais promissora ao nível da diminuição do risco a bordo, bem como, no aumento da energia específica e densidade energética Necessita de mais testes de segurança para ser viável a sua aplicação a bordo

De destacar a importância dos parâmetros de segurança referidos no Quadro 1, pois as ameaças externas aos sistemas de baterias são um fator a ter em consideração em cenários marítimos, onde existe, humidade, água salgada e mesmo a perfuração por parte de munições, no caso específico das navais militares, representam um risco acrescido de incêndios e explosões a bordo (Echandia, 2022).

A configuração apresentada na Figura 11, pode ser designada por propulsão 100% elétrica, onde os veios são propulsionados por motores elétricos alimentados através de um sistema de baterias, carregado por energia de terra, quando atracado, por meio de um conversor AC/DC. Um fator importante nesta aplicação é a existência de mais do que um sistema de baterias por forma a garantir uma redundância em caso de falha (DNV GL, 2015).

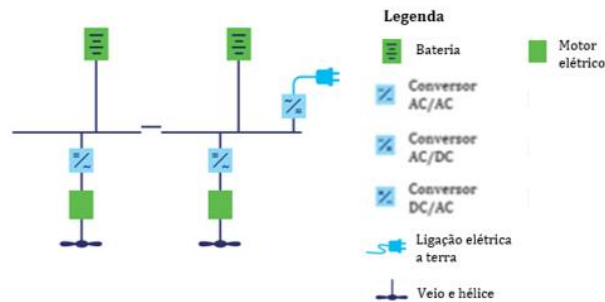


Figura 11 - Configuração de sistema 100% elétrico (adaptado de DNV GL, 2015)

Relativamente ao potencial benefício de uma configuração 100% elétrica, nas emissões num ponto de vista TTP, este será inquestionável, correspondendo a uma redução de 100%. No entanto, a produção de baterias tem vindo a ser debatida nos últimos tempos devido à sua impactante pegada ambiental. Segundo Peters et al. (2017), em média, e de acordo com uma análise de ciclo de vida com ênfase em parâmetros de performance das baterias como a densidade energética e eficiência, a produção de 1Wh de capacidade de armazenamento resulta num consumo de energia de cerca de 328 Wh. Assim, numa perspetiva WTT, as emissões de um sistema de baterias podem variar entre os 55 e os 222 gCO_{2eq}/MJ, dependendo da percentagem de energia produzida através de fontes renováveis presente na energia armazenada (DNV GL, 2019).

Ao nível da segurança, o ponto fulcral neste tipo de propulsão está relacionado com as baterias, mais precisamente, com a presença de um eletrólito inflamável e instável e também, com a presença de elétrodos metálicos. Incêndios podem ser desencadeados pelo eletrólito, enquanto o elétrodo pode dificultar a extinção do mesmo. Existem dois modos de falha das baterias de íões de lítio, que consistem, na libertação de gases tóxicos e inflamáveis e na fuga térmica em cascata. O primeiro modo resulta da presença de gases inflamáveis, que representam um risco de explosão e ainda a libertação de compostos tóxicos como o HCl e o HF. Uma fuga térmica consiste numa

reação exotérmica, que ocorre quando uma bateria de íons de lítio sofre uma reação de combustão. Normalmente este modo de falha é despoletado por um mecanismo de abuso, que por sua vez, provoca um aumento da temperatura interna suficiente para iniciar a ignição do eletrólito. Este fenómeno é de elevada perigosidade pois propaga-se pelas restantes células, levando a uma deflagração do incêndio por toda a bateria (EMSA & DNV GL, 2020).

Atualmente a utilização de baterias a bordo de navios militares ainda não está disponível, excetuando nos submarinos, onde a tecnologia é já fortemente implementada e documentada. No entanto, no que concerne à aplicação em navios de superfície no setor comercial, existem já inúmeros projetos desenvolvidos. Segundo a DNV (2022), cerca de 410 navios com baterias estavam em operação no ano de 2022, dos quais 135 são 100% elétricos. O navio de apoio offshore *Viking Lady* foi o primeiro navio com um sistema de propulsão a GNL e híbrido com baterias. No navio foram instaladas baterias de íons de Lítio com cerca de 450 kWh de capacidade, o que permitiu uma redução do consumo de combustível de cerca de 20-30%. Relativamente às vantagens da utilização desta configuração, destacam-se a possibilidade de navegação a uma velocidade de trânsito com condições meteorológicas adversas, onde a bateria é utilizada para reduzir as variações de carga nos motores e também a possibilidade de utilização de menos um grupo eletrogéneo. A redução das emissões é também significativa, sendo que as emissões no porto são eliminadas (Wärtsilä Corporation, n.d.). O caso do navio *Alphenaar* é referente a um navio 100% elétrico alimentado a baterias, um projeto da empresa *Zero Emission Services* (ZES). Este navio é alimentado por 45 módulos de baterias, carregadas com energia de origem renovável, com uma capacidade total de 2 MWh, o que é equivalente a 36 automóveis elétricos (Randall, 2021). O desafio da autonomia, devido à necessidade de carregamento frequente destes sistemas, é um dos obstáculos para a implementação em navios de longa navegação. Este tipo de propulsão poderá ser aplicável a pequenos navios de apoio militar, que efetuam saídas diárias para o mar, como por exemplo, as lanchas de fiscalização. A necessidade de substituição dos módulos de baterias quando atingem a sua vida útil, de acordo com os ciclos de carga/descarga, também é outro dos desafios ao nível económico, que requer mais desenvolvimento tecnológico para ser passível a sua aplicação em navios militares.

1.4. Discussão

1.4.1. Síntese

A Tabela 3 e o Gráfico 1 sintetizam alguns dos parâmetros apresentados na revisão bibliográfica, por forma a possibilitar uma comparação mais objetiva dos combustíveis alternativos abordados no presente estudo.

Tabela 3 - Resumo dos parâmetros (VALERO, 2014)

	MGO	Biodiesel/ Diesel Sintético	Hidrogé- nio	Amoníaco	Metanol	GNL	GPL	Eletrici- dade	
Aplicabilidade	Configuraçã o	Motore s de CI	Aplicaçã o em FC ou em motores de CI	Aplicaçã o em FC (com necessidad e de um <i>ammonia cracker</i>) ou em motores de CI	Aplicaçã o em motores de CI (principalm ente de ignição por faísca) e FC	Aplicaçã o em motores de CI e FC	Motores de ciclo <i>Diesel</i> a dois- tempos; motores de ciclo <i>Otto</i> a quatro- tempos; e turbinas a gás	Híbrido convenci onal; híbrido <i>plug-in</i> ; e 100% elétrico	
Propriedades	Toxicidade (TLV)	Não tóxico	Não tóxico	Não tóxico	Extremame nte tóxico (facilmente detetável) 25 ppm	Tóxico 200 ppm	Não tóxico	Não tóxico 1000 ppm	-
	<i>Flash Point</i> (°C)	60	169,5/74	-	-	11-12	-188	-104	-
	Temperatur a de autoignição (°C)	257	373-448	584,8	651	470	599	410-580	-
	Limites de inflamabilid ade (vol%)	0,4-8	0,7-5	4-75	16-25	6-36,5	5-15	1,8-9,5	-
	Número de octanas (RON)	-	-	130	>130	106-115	120	94-112	-
	Número de cetano	45	48,25/>70	-	-	3	-	-	-

Emissões	Well-to-tank (gCO _{2eq} /MJ) GWP100	14,9	115,1/-47,6	132 ² 3,6 ³	121	31,3 ⁴ -67,1 ⁵	18,5 -38,9 ⁶	16,6	55-222
	Tank-to-propeller (C _{fCO₂})	3,2	2,8/-	-	-	1,375	2,75	3	-

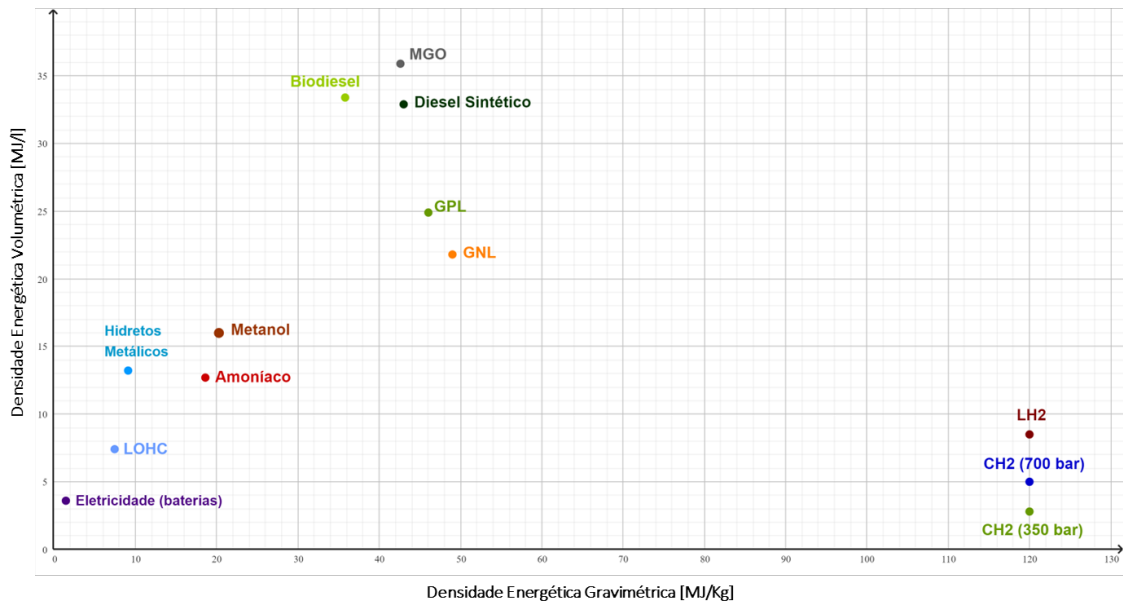


Gráfico 1 - Relação de densidade energética dos combustíveis em análise

Através da análise do Gráfico 1, verifica-se que a densidade energética, tanto por unidade de volume como por unidade de massa, varia de forma significativa. Numa avaliação macroscópica denota-se que o combustível alternativo com os níveis mais baixos de densidade energética é a eletricidade, armazenada na forma de baterias. Estes valores baixos implicam tanto uma elevada demanda de espaço, como de condições de estabilidade, devido ao elevado acréscimo de deslocamento associado aos módulos de baterias. Este parâmetro coloca esta opção numa posição desconfortável para aplicação em navios militares. O biodiesel/diesel sintético, de todas as alternativas apresentadas, é o que tem o maior valor de densidade energética por unidade de volume, o que nos dá uma perceção mais realista ao nível de necessidade de espaço de armazenamento, apresentando um valor próximo do combustível NATO F-76 (utilizado nos navios da

² Hidrogénio Cinzento liquefeito

³ Hidrogénio Verde liquefeito

⁴ Produzido a partir de gás natural

⁵ “e-metanol”

⁶ “Bio-metano”

Marinha Portuguesa). Quanto ao GNL e ao GPL, estes detêm uma densidade energética volumétrica cerca de 35% inferior ao MGO. O armazenamento de hidrogénio em hidretos metálicos, como o hidreto de magnésio é uma opção, que comparativamente, com as alternativas de armazenamento apresentadas, lhe confere uma elevada densidade energética, cerca de 30% inferior ao do GPL e GNL. Esta alternativa potencia uma maior segurança no armazenamento do hidrogénio a bordo dos navios militares à temperatura ambiente. Quanto ao metanol, apesar de ser cerca de 30% inferior em termos de densidade energética comparativamente com o GNL e GPL, o seu sistema de armazenamento requer menos espaço, pelo que, na prática, o aproxima do GNL e GPL neste parâmetro. O amoníaco tem uma densidade energética por unidade de volume cerca de 70% inferior à do MGO e 50% inferior ao GNL e GPL, sendo que tem um sistema de armazenamento semelhante ao do GNL.

Ao nível de configurações passíveis de ser implementadas a bordo, destacam-se pela facilidade e simplicidade de conversão os motores de combustão interna de ciclo *Diesel* para o biodiesel/diesel sintético e GNL, com uma maturidade tecnológica considerável, desde sistemas já aplicados e comumente utilizados a bordo, até sistemas disponíveis comercialmente, mas com poucos anos de aplicação. Relativamente aos motores de combustão interna de ciclo *Otto* são aplicáveis, com alguma maturidade tecnológica, na conversão para Metanol e GPL. As células de combustível são tecnologias ainda pouco desenvolvidas e estudadas na aplicação em navios de superfície, sendo, no entanto, promissoras na propulsão naval.

Relativamente a parâmetros associados à segurança dos combustíveis, estes devem ser criteriosos na seleção do combustível a implementar, dando ênfase à toxicidade dos componentes e inflamabilidade dos mesmos, o que em caso de fuga pode ser extremamente prejudicial para a guarnição, não se cumprindo com o objetivo principal que é a salvaguarda da vida humana.

Quanto à toxicidade destacam-se o amoníaco e o metanol. O primeiro apesar de extremamente tóxico é facilmente detetável pelo ser humano, devido ao forte odor, pelo que se torna menos perigoso em caso de fuga. O metanol apesar de ter uma baixa toxicidade aguda, tem um odor fraco a álcool, o que o torna difícil de detetar pelo ser humano. De referir que todos os espaços de máquinas devem ter detetores destes

compostos para reduzir o risco em caso de fuga. Todos os outros combustíveis apesar de não serem tóxicos diminuem a concentração de oxigénio no ar, pelo que provocam o efeito de asfixia, igualmente perigoso.

O *flash-point*, os limites de inflamabilidade e a temperatura de autoignição são parâmetros também associados à segurança e ao risco de incêndio a bordo. No caso dos limites de inflamabilidade, uma gama ampla indica que um combustível é inflamável sob diversas condições, o que acresce em larga escala este risco. De todos os combustíveis abordados o hidrogénio é o confere uma maior gama de inflamabilidade, o que associado a uma baixa energia de ignição o torna num combustível muito inflamável e muito perigoso em caso de fuga.

No que concerne a parâmetros relacionados com a performance destes combustíveis nos motores, destacam-se o hidrogénio, o amoníaco e o GNL, com índice de octanas bastante elevado, o que indica, como já referido, uma elevada resistência ao fenómeno de *engine knock*, excetuando o hidrogénio, que apesar de um valor de RON elevado, os estudos registam a existência de *engine knock* associado a uma baixa energia de ignição que pode levar à pré-ignição e, conseqüentemente, a uma perda no controlo da combustão.

Por último, relativamente à análise das emissões de GEE dos diferentes combustíveis alternativos numa perspetiva de ciclo de vida, verificou-se que para algumas das configurações a literatura existente é de pequena escala, o que dificulta, a comparação deste parâmetro de forma completa, principalmente no que concerne aos métodos de produção mais sustentáveis. No entanto, de acordo com os dados recolhidos, verifica-se que baixas emissões numa perspetiva de *Tank-to-Propeller* não são indicadoras de baixas emissões ao nível da produção, transporte e armazenamento, como se pode observar no caso do Amoníaco e Hidrogénio produzidos através de gás natural, bem como o Biodiesel. Assim, por forma a encontrar a opção mais sustentável é necessária uma abordagem global, onde os impactos ambientais da produção devem ser equilibrados com os impactos ambientais da combustão ou utilização, desse mesmo combustível.

2. Metodologia

A metodologia adotada para a seleção de combustíveis marítimos alternativos encontra-se representada no fluxograma da Figura 12. A grafia do fluxograma está segundo a Norma ISO 5807-1985 (ISO, 1985). Esta inicia-se com uma seleção dos combustíveis para análise, através de dois métodos de exclusão, seguido da identificação dos modos de falha, através do *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA), que sofrem uma hierarquização através do método de *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Consecutivamente, a partir das diferentes alternativas possíveis, são selecionados conjuntos de soluções com base na opinião e análise de *experts*, conjugadas com a Teoria de Dempster-Shafer (DST).

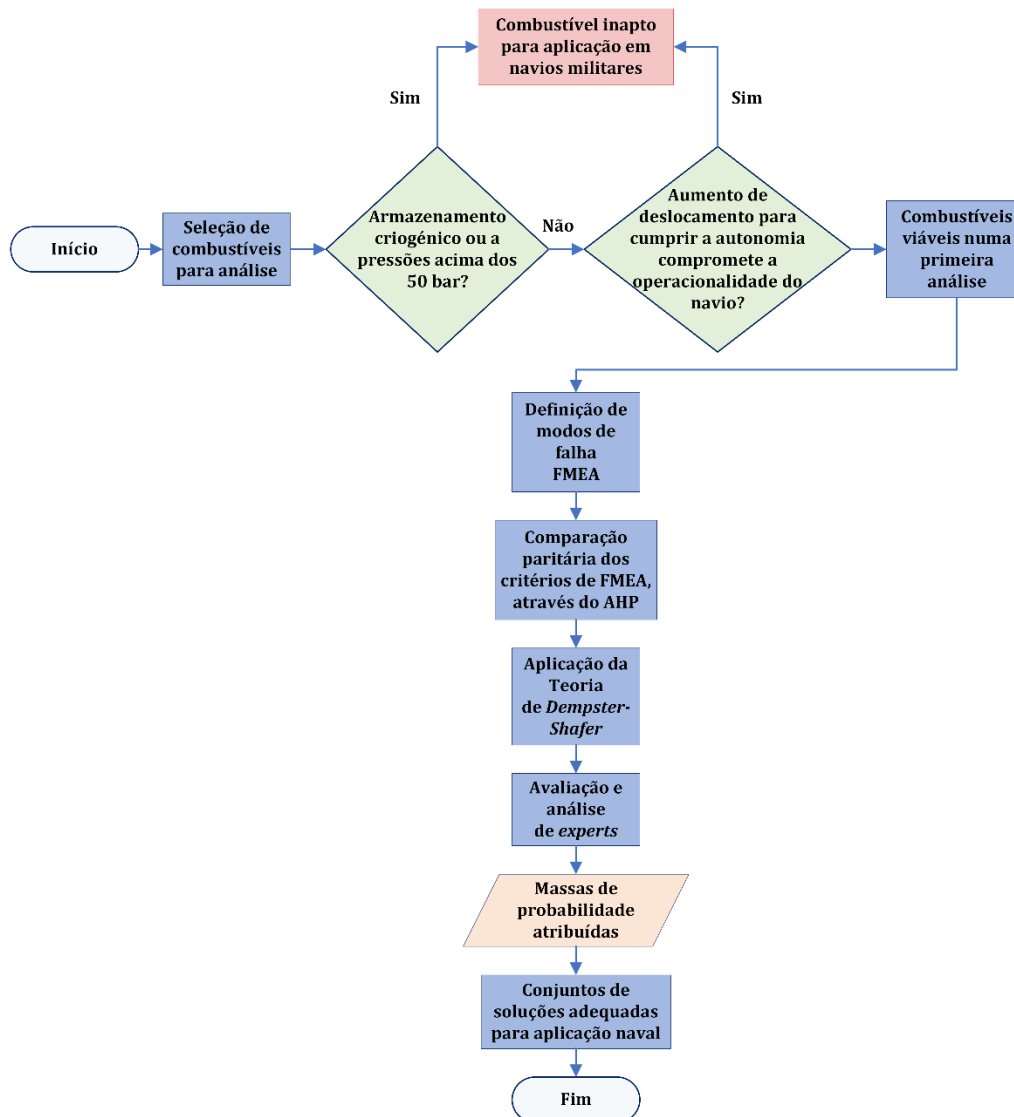


Figura 12 - Fluxograma da metodologia aplicada

2.1. Análise de Risco

Segundo Yoe (2019), o risco pode ser definido como uma medida da probabilidade e das potenciais consequências de acontecimentos futuros incertos. Por outras palavras é a suscetibilidade da ocorrência de um resultado indesejado. Esta “probabilidade” existe e resulta, muitas vezes, da ausência de informação sobre determinados eventos que ainda não ocorreram, ao que se chama incerteza, sendo que a natureza imprevisível do futuro e a variabilidade de fatores são as razões da mesma. O autor descreve o risco segundo a Equação 2, constituída por duas variáveis fundamentais: a consequência, seja ela positiva ou negativa, e a probabilidade de ocorrência.

$$\text{Risco} = \text{Consequência} \times \text{Probabilidade} \quad (2)$$

De salientar que esta expressão não descreve o cálculo do risco, mas sim, a combinação de elementos que deve estar presente para que exista um risco real. Assim, se não existir uma consequência associada a um acontecimento, então não há risco. No presente contexto, isto é, da mesma forma que se um determinado evento não tem probabilidade de ocorrência, também não tem risco associado. No âmbito do presente trabalho pretende-se estudar o risco associado a consequências adversas, pelo que é importante definir o “perigo”.

Um perigo consiste em algo que possa representar uma fonte potencial de dano a um bem de valor, sendo que se aplica a situações relacionadas com acontecimentos naturais e antropogénicos, que comprometam a segurança pessoal, ambiental e ocupacional (Yoe, 2019). Exemplos de eventos perigosos a bordo incluem incêndios, explosões, falhas estruturais, derrames e fugas de combustível, colisões, encalhes, falhas de sistemas de propulsão, entre outros, alguns deles relacionados com o combustível utilizado.

De acordo com Yoe (2019), a identificação de um risco pode ser sintetizada em cinco passos essenciais:

- Identificação do evento que desencadeia o acontecimento;
- Identificação do(s) dano(s) específicos que podem resultar de

determinado perigo;

- Especificação da sequência de eventos necessários para que esse perigo resulte no(s) dano(s) identificados;
- Identificar as principais incertezas associadas às etapas anteriores.

Estes conceitos base fundamentam a análise de risco como uma ciência em ascensão, tal como foi definida por Aven (2018) e Yoe (2019), apesar de não ser amplamente aceite como uma verdadeira ciência. No entanto, tem-se assistido a uma evolução de raciocínio, onde as previsões exatas e estimativas de risco são substituídas por métodos de gestão de risco, que incluem, conhecimentos relacionados com conceitos, teorias, enquadramentos, abordagens, princípios, métodos e modelos para uma melhor compreensão, caracterização e avaliação (Aven, 2018). Assim, quando se trata de tomada de decisões, o método científico tradicional não é aplicável, em especial quando se tem um grau de incerteza associado elevado e os valores sociais são dominantes. Portanto, pode definir-se a análise do risco como um método de tomada de decisões em situações com um grau de incerteza associado, assente em três processos: avaliação do risco; gestão do risco; e comunicação do risco. De uma forma mais objetiva, a análise de risco separa o que sabemos, isto é, o que está definido e comprovado cientificamente, do que não sabemos, a incerteza, dando ênfase a esta segunda variável e como esta pode afetar os resultados da decisão tomada (Yoe, 2019).

2.1.1. *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)*

A *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* consiste numa técnica de análise de risco muito utilizada para definir, identificar e mitigar falhas conhecidas e/ou potenciais de um sistema, projeto, processo ou serviço (Stamatis, 2003). A presente metodologia foi desenvolvida e implementada inicialmente por militares do Exército dos E.U.A. em 1949, sendo que na década de 70, o seu campo de aplicação expandiu para a indústria automóvel e aeroespacial e, posteriormente, para a indústria no geral (Scipioni et al., 2002). Geralmente, esta análise é executada na fase de projeto ou desenvolvimento do processo, pelo que é imperativa quando se comparam diferentes alternativas de combustíveis (McDermott et al., 2008). A aplicação desta análise em navios e nos seus sistemas e subsistemas já é alvo de algum estudo, no entanto, a sua

correlação com combustíveis alternativos e os seus diferentes sistemas pode ser considerada como uma nova e ainda prematura abordagem.

Este é um mecanismo que consiste numa abordagem passo-a-passo de acordo com os pontos apresentados na Figura 13. O objetivo principal é identificar de forma exaustiva todos os possíveis modos de falha de um produto, sistema ou processo (McDermott et al., 2008). De ressaltar que a abordagem apresentada no presente trabalho é uma versão da técnica FMEA, tendo apenas como objetivo identificar os principais modos de falha do sistema, com potencial correlação com o combustível utilizado.

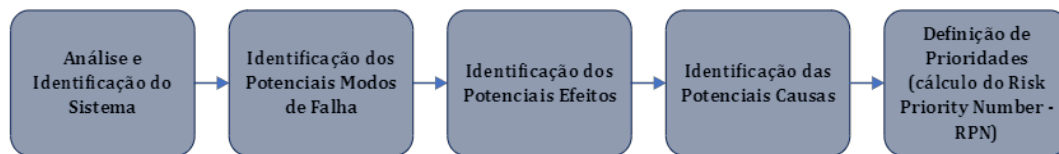


Figura 13 - Passo-a-passo FMEA (adaptado de Stamatis, 2003)

Segundo Stamatis (2003) o processo inicia com a identificação do sistema e análise do mesmo, seguida da identificação dos potenciais modos de falha associados a esse sistema. Este processo é baseado num trabalho de equipa, sendo estas, por norma, constituídas por diversos elementos e especialistas das mais diversas áreas por forma a diversificar o conhecimento e as perspetivas. Quando se identificam estas potenciais falhas, deve pensar-se na perda de uma função do sistema, sendo que quanto mais específica for esta análise, mais provável será a identificação dos efeitos e causas da falha. Relativamente à identificação dos potenciais efeitos associados à falha, estes podem ser considerados como consequências da mesma, sendo que a questão geralmente colocada é “O que pode acontecer ou quais são as ramificações deste problema ou falha?”. Seguidamente são identificadas as potenciais causas associadas aos modos de falha definidos, podendo ser indicações de deficiências do projeto ou associadas a desgaste, corrosão, fadiga e instabilidade do material. Após a identificação dos modos de falha, bem como os seus potenciais efeitos e causas é realizada uma análise quantitativa, cujo objetivo é priorizar os diferentes modos de falha. Esta análise consiste no cálculo do *Risk Priority Number* (RPN), que é uma medida do impacto de falha, segundo a Equação 3, o qual é definido pelo menos pelos seguintes três

parâmetros: Ocorrência (O), Severidade (S) e Detetabilidade (D), de determinado modo de falha.

$$RPN = O \times S \times D \quad (3)$$

A ocorrência pode ser definida como a frequência de falha ou uma medida da probabilidade de falha, sendo que o melhor método para determinar este parâmetro é utilizar dados de registos de falha ou de manutenção. No entanto, quando tal não é possível, este valor tem de ser estimado, sendo que ter conhecimento da causa da falha ajuda na estimativa deste parâmetro. A severidade consiste na seriedade/gravidade dos efeitos causados pela falha e a detetabilidade pode ser definida como a capacidade/probabilidade de deteção da falha e reparação. No caso da detetabilidade esta medida baseia-se na existência de dispositivos de controlo para deteção de falhas ou dos efeitos das falhas, sendo que se estes não existirem a probabilidade de deteção é baixa, o que resulta num valor de detetabilidade elevado. Estes parâmetros são avaliados numa escala de 1 a 10, sendo 1 o melhor caso e 10 o pior, à exceção d existindo diversas parametrizações destes valores. Os quadros presentes no Anexo B, representam as escalas para cada um dos parâmetros a analisar.

2.1.2. *Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)*

Na tomada de decisão a informação disponível serve como ferramenta de auxílio para a compreensão de certos acontecimentos, por forma a desenvolver juízos adequados (R. W. Saaty, 1987a). Na literatura existem diversos métodos para auxílio no processo de tomada de decisão, sendo que, as técnicas de *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA), em português Análise Multicritério, são o método mais adequado para resolução de problemas complexos, com necessidade de comparação de diversos critérios conflitantes cujos dados possam conter informação qualitativa ou quantitativa. Esta técnica engloba diversos métodos, sendo os mais comuns o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (R. W. Saaty, 1987b); *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT) (Keeney & Raiffa, 1993); *Elimination and Choice Expressing* (ELECTRE) (Benayoun et al., 1966); *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations* (PROMETHEE) (Brans, 1982); *Simple Multi-Attribute Rating Technique* (SMART) (Edwards, 1977), *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*

(TOPSIS) (Hwang & Yoon, 1981), entre outros. Quanto à aplicabilidade dos mesmos, estes métodos são utilizados em áreas como a saúde, educação, transporte, finanças, engenharia e setor da energia, sendo este último através do *ranking* de fontes de energia renováveis, por exemplo (Taherdoost & Madanchian, 2023).

A seleção de um combustível marítimo alternativo consiste num processo de decisão complexo, com uma elevada multiplicidade de critérios a considerar, no âmbito da segurança, aplicabilidade, impacto ambiental, disponibilidade, o que torna a aplicação de um método MCDA apropriada. Na literatura atual existem já alguns estudos da aplicação de métodos MCDA na área da engenharia e setor energético, com ênfase para o setor dos transportes rodoviários e transporte marítimo. Hansson et al. (2019) aplicaram o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para comparar sete combustíveis marítimos de acordo com a opinião de *stakeholders* suecos. Já Ren & Liang (2017) compararam três opções de descarbonização, através da lógica *Fuzzy* e da variante da técnica TOPSIS, denominada TOPSIS *Fuzzy*. Quanto a Datta et al. (2011), estes utilizaram o método AHP para avaliar as fontes de energia renováveis existentes e encontrar a seleção adequada, através da análise e comparação das suas principais características. De acordo com Tahersoodt & Madanchian (2023), o método AHP é a técnica de MCDA mais citada e aplicada em artigos científicos, sendo que prevalece relativamente aos restantes métodos, dada a simplicidade da sua aplicação e entendimento. A técnica aplicada para hierarquização dos critérios foi o AHP, pelo que o seguinte subcapítulo corresponderá a uma revisão bibliográfica do mesmo.

2.1.2.1. *Analytic Hierarchy Process* (AHP)

Nos finais da década de 60, o matemático Thomas L. Saaty, encontrava-se a dirigir projetos de investigação para a Agência de Controlo de Armas e Desarmamento do Departamento de Estado dos E.U.A., o que o levou a refletir acerca das dificuldades de comunicação entre intervenientes do projeto, devido à ausência de uma abordagem prática e sistemática para a definição de prioridades e tomada de decisões (Forman & Selly, 2001). Assim surgiu, no ano de 1971, o método multicritério designado por *Analytic Hierarchy Process* (AHP), podendo ser definido como uma teoria geral de medição, que utiliza comparações entre pares de alternativas e resulta em escalas de prioridades das mesmas. Estas comparações são efetuadas de acordo com uma escala de

juízos relativos, que representa o quanto um elemento domina em relação a outro, em determinado critério. Após a construção de hierarquias e a definição de prioridades, o modelo proposto é avaliado quanto à sua consistência, com o objetivo de verificar se os julgamentos foram realizados de forma adequada e coerente (R. W. Saaty, 1987b). O autor define esta metodologia como um procedimento sistemático de representação de elementos de qualquer tipo de problema, de forma hierarquizada. Ao decompor o problema nos seus constituintes, organiza o raciocínio e orienta os decisores através de juízos de comparação entre os elementos na hierarquia (T. L. Saaty & Kearns, 1985). No presente trabalho é fundamental estabelecer prioridades entre combustíveis, por forma a compreender qual deles é mais adequado para a descarbonização dos navios militares.

De acordo com Saaty (1987a; 2004), por forma a tomar uma decisão de forma organizada, através da hierarquização de critérios, é necessário decompor o processo nas etapas apresentadas na Figura 14 e descritas de seguida.

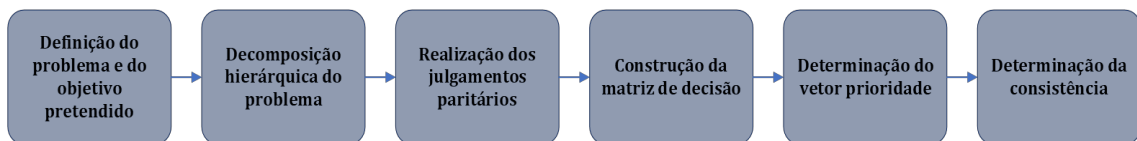


Figura 14 - Etapas do AHP (R. W. Saaty, 1987a; adaptado de T. L. Saaty, 2004)

1. **Definição do problema e determinação do objetivo pretendido;**
2. **Hierarquização do problema desestruturado**, partindo do topo com o objetivo final a atingir, seguido dos objetivos numa perspetiva macroscópica (critérios), passando pelos níveis intermédios ou subcritérios, culminando nas diferentes alternativas (Figura 15);

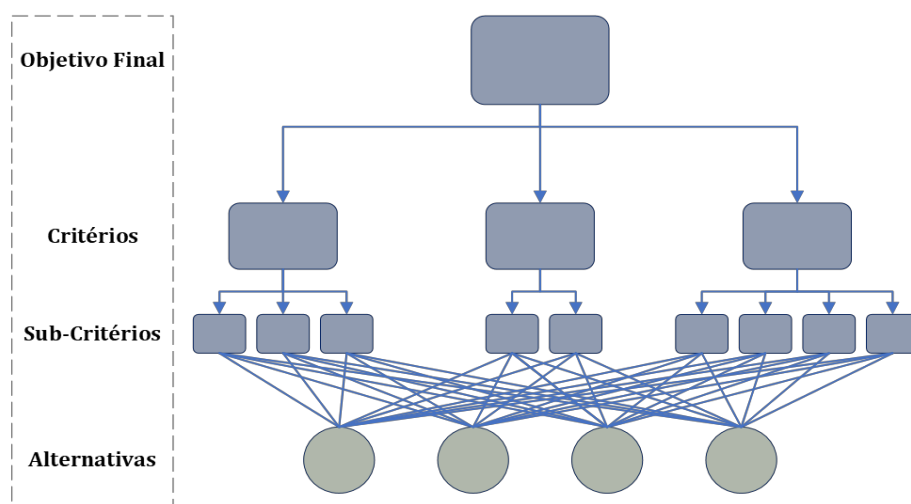


Figura 15 - Estrutura Hierárquica AHP (adaptado de R. W. Saaty, 1987b)

- Realização dos julgamentos paritários**, entre as alternativas e cada sub-critério, bem como, em relação aos níveis superiores. A comparação deve ser ponderada de acordo com a escala fundamental definida por Saaty, presente no Quadro 2.

Quadro 2 - Escala Fundamental de Saaty (adaptado de R. W. Saaty, 1987b)

Intensidade de Importância (escala absoluta)	Definição	Explicação
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem de forma igual para o objetivo
3	Pequena importância de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente uma atividade sobre a outra
5	Elevada importância ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade sobre a outra
7	Importância muito elevada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra, sendo que a sua dominância é verificada na prática
9	Extrema importância	A evidência favorece uma atividade relativamente a outra, com o mais alto grau de certeza associado
2, 4, 6, 8	Valores intermédios entre valores adjacentes	Razão de compromisso entre duas definições

4. **Construção da matriz de comparação paritária**, denominada matriz de decisão, quadrada, recíproca, positiva, de ordem n , igual ao número de elementos comparados, que segue as seguintes regras:

- a. $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$, isto é, se $a_{ij} = w$, então $a_{ji} = \frac{1}{w}$, para todo $w > 0$;
- b. $a_{ii} = 1$ para todo i , pelo que, qualquer critério comparado com si mesmo possui a mesma importância.

A matriz deve apresentar a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \frac{1}{a_{3n}} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

5. **Determinação das prioridades através do cálculo do vetor e valor próprio dominante da matriz** (T. L. Saaty, 2003). Nesta etapa, as matrizes de comparação são manipuladas por forma a obter as prioridades relativas de cada um dos critérios. Este cálculo pode ser efetuado através de métodos algébricos ou numéricos, sendo estes últimos mais precisos e aplicados em matrizes de dimensão superior. No presente caso utilizou-se o método da média para o cálculo das prioridades. A descrição deste método de cálculo encontra-se especificada no Apêndice D.

6. **Determinação da consistência**. O método AHP baseia-se na realização de julgamentos de valor, que podem resultar, por vezes, em avaliações inconsistentes. Assim, Saaty (1985) propôs procedimentos que permitem avaliar a consistência dos julgamentos, tais como, o *Consistency Index* (CI), em português Índice de Consistência, e o *Consistency Ratio* (CR), Razão de Consistência em português.

- a. **Cálculo do CI**: O Índice de Consistência é dado pela Equação 5, onde n corresponde ao número de critérios avaliados e $\lambda_{m\acute{a}x}$ ao valor próprio dominante da matriz de comparações, obtida através do

Método da Média dos Valores Normalizados.

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (5)$$

b. Cálculo da CR: Saaty (1990) propôs a utilização da Razão de Consistência, que permite a avaliação da inconsistência em função da ordem, n , da matriz de decisão. Esta é definida pela Equação 6 que consiste no rácio entre o CI e o Índice de Consistência Aleatória (RI), sendo este um valor constante definido consoante o número de critérios utilizados, cujos valores se encontram na Tabela 4.

$$CR = \frac{CI}{RI} < 10\% \quad (6)$$

Tabela 4 - Índices de Consistência Aleatória (T. L. Saaty, 2004)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Consistência Aleatória (RI)	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

De acordo com Saaty (2004), as comparações efetuadas são consideradas consistentes se a Razão de Consistência, CR, for inferior a 10%. Caso contrário, o decisor terá de reavaliar os julgamentos efetuados, por forma a garantir a coerência e a lógica do processo de decisão.

2.2. Teoria de Dempster-Shafer (DST)

A Teoria de Dempster-Shafer (DST), também conhecida por Teoria Matemática da Evidência, primeiramente apresentada por Dempster (1966, 1968) e, posteriormente, desenvolvida e formalizada por Shafer (1976), foi publicada pela primeira vez em 1976. Segundo Shafer (1976), a teoria apresentada consiste, simultaneamente, numa teoria da evidência e do raciocínio provável. Por outras palavras, a DST permite lidar com informações incertas, ao contrário da Teoria da Probabilidade Bayesiana, através de uma avaliação subjetiva da massa de probabilidade de um conjunto de acontecimentos. Esta abordagem é útil para situações em que a informação disponível é incompleta ou ambígua. A presente teoria tem sido amplamente aplicada em diversas áreas, tais como, a inteligência artificial (IA), mais especificamente em *machine learning* e sistemas especialistas; bem como em engenharia, através da análise de risco, fusão de informação, quantificação da incerteza; e ainda na análise de decisão com múltiplos critérios (Awasthi & Chauhan, 2011; Wang et al., 2006).

Como referido pelos seus autores, a DST é considerada uma teoria mais geral e robusta quando comparada com o *Teorema de Bayes*. A diferença reside no facto de que a DST lida com diferentes níveis de precisão da informação e não requer outros pressupostos, ou antecedentes, para representar a informação. No caso da DST, a crença inicial de uma proposição é 0, sendo que neste ponto, o fator de incerteza, representativo da ignorância, é de 1 (Guo, 2004). Assim, quanto maior for a crença numa proposição, menor é o fator de incerteza. Outra característica consiste na possibilidade de representar diretamente a incerteza nas respostas do sistema, no qual uma entrada imprecisa pode ser caracterizada por um conjunto ou um intervalo e a saída resultante também é um conjunto ou intervalo (Sentz & Ferson, 2002).

Os denominados “eventos” da Teoria da Probabilidade são designados de “proposições”, $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n\}$ mutuamente exclusivas. Estes inserem-se no conjunto de parâmetros finitos $\theta = \{\theta_i\}$, denominado de quadro de discernimento. Ao contrário da teoria das probabilidades, que tem como número de hipóteses $\#\Omega$, a DST tem $2^{\#\Omega}$ proposições. Assim, todas as possíveis combinações do conjunto Ω , inclusive \emptyset e o próprio Ω são possíveis hipóteses do conjunto θ .

A TDS pode ser definida por três funções principais: a função de massa de probabilidade básica (*bpa* ou *m*), a função de crença (*Bel*) e a função de plausibilidade (*Pl*). A função de massa de probabilidade básica (*bpa* ou *m*) define um mapeamento do conjunto de potências para o intervalo entre 0 e 1, no qual *m* do conjunto vazio é 0 e a soma de *m* de todos os subconjuntos pertencentes a θ é 1. Por outras palavras, o valor de *bpa* de um determinado conjunto *A*, representado por $m(A)$, mede a evidência de que um elemento *X*, do conjunto universal, pertence exclusivamente ao conjunto *A* e a nenhum outro subconjunto. Analogamente à teoria da probabilidade, onde *A* seria um acontecimento e $P(A)$ a sua probabilidade, a massa de probabilidade de *A* é exclusiva ao conjunto *A* e, deste modo, não fornece evidências adicionais sobre outros subconjuntos de *A*. Caso existam outras evidências relacionadas com os subconjuntos de *A*, estas seriam representadas por outra *bpa*, isto é, se $B \subset A$, então $m(B)$ seria a massa de probabilidade básica de *B*. Assim, matematicamente a função *m* é definida pelas seguintes expressões:

$$m(\emptyset) = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{A \in \theta} m(A) = 1 \quad (8)$$

$$m(A) \geq 0, \forall A \in \theta \quad (9)$$

A probabilidade atribuída a θ , isto é, $m(\theta)$, é designada por grau de ignorância, que representa a incerteza ou falta de conhecimento sobre a distribuição de probabilidade dos subconjuntos em questão. Na Equação 9 os subconjuntos de *A* que respeitam a condição estabelecida são designados de elementos focais de *m*. No caso do presente estudo, as opiniões de *experts* serão utilizadas para definir a família de subconjuntos de interesse, *F* dentro do quadro de discernimento θ , sendo que *F* contém os elementos focais. Estes também definem as massas de probabilidade básica, *m*, que consideram adequadas para cada subconjunto focal. Assim, o par (F, m) representa o corpo de evidência utilizado na análise.

Através das massas de probabilidade básicas é possível definir os limites superior e inferior de um intervalo. Este intervalo contém a probabilidade exata de um

conjunto de interesse e é delimitado por duas medidas não aditivas, denominadas de Crença e Plausibilidade. A Crença ou limite inferior de um conjunto A é definido como o somatório de todas as massas de probabilidade básicas dos subconjuntos próprios B , do conjunto de interesse A , em que $B \subseteq A$ (Equação 10). Já o limite superior ou Plausibilidade corresponde à soma de todas as massas de probabilidade básicas dos conjuntos B , que intersejam o conjunto de interesse A ($B \cap A \neq \emptyset$) (Equação 11). Assim, a Plausibilidade é igual ou superior à Crença. Caso a Crença iguale a Plausibilidade, isto indica que as evidências são coerentes e a medida resultante pode ser interpretada como uma probabilidade.

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (10)$$

$$Pl(A) = \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \quad (11)$$

Assim a função Bel representa uma medida da evidência perante um cenário, isto é, até que ponto as informações fornecidas sustentam a proposição A . Já a função Pl representa toda a evidência que não contradiz a hipótese ou cenário em questão. A diferença entre a crença e a plausibilidade de um conjunto A , descreve a ignorância da avaliação do mesmo (Shafer, 1976).

2.2.1. Combinação de Corpos de Evidência

As três funções definidas anteriormente, $m(A)$, $Bel(A)$ e $Pl(A)$, podem ser consideradas como três formas de expressão da mesma informação, pelo que devem ser combinadas de acordo com estratégias de agregação de informação proveniente de diversas fontes, tais como, regras de combinação. No caso da regra de combinação de Dempster, esta combina as múltiplas massas de probabilidade básica, sendo que é uma regra de combinação conjuntiva, isto é, apenas são consideradas operações de interseção de conjuntos. Estas funções m , são definidas no mesmo quadro de discernimento, mas baseiam-se em argumentos independentes. Esta regra assume que as fontes de informação são independentes e utiliza a soma ortogonal para combinar as

múltiplas estruturas de crenças, de acordo com a Equação 12, na qual, \oplus simboliza o operador de combinação.

$$m = m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4 \oplus \dots \oplus m_K \quad (12)$$

A Equação 13, define a combinação de duas evidências e, por sua vez, duas massas de probabilidade, m_1 e m_2 , sendo que $A \neq \emptyset$ e $m_{12}(\emptyset) = 0$. A regra de combinação de duas evidências do subconjunto A pode ser definida como o somatório dos produtos das massas de probabilidade dos dois conjuntos, quando a interseção entre os dois for igual a A. De salientar que a presente regra cumpre com as propriedades de associatividade e comutatividade, podendo as massas ser combinadas por qualquer ordem.

$$m_{12} = \frac{\sum_{B \cap C = A} m_1(B) \cdot m_2(C)}{1 - K} \quad (13)$$

A característica principal da presente regra é que o conflito da informação, isto é, entre os corpos de evidência, é normalizado através da constante K (Equação 14).

$$K = \sum_{B \cap C = \emptyset} m_1(B) m_2(C) \quad (14)$$

3. Aplicação da Metodologia

3.1. Seleção dos Combustíveis para Análise

Após a revisão bibliográfica, é necessário fazer uma pré-seleção dos combustíveis adequados para uso nos navios da Marinha Portuguesa. O presente estudo inspirou-se numa plataforma do tipo Patrulha Oceânico, Classe *Viana do Castelo* (Figura 16). Esta tipologia de navios é utilizada, prioritariamente, em ações não combatentes, desempenhando missões no âmbito da segurança e autoridade do Estado do Mar, tais como, Busca e Salvamento Marítimo; Fiscalização da Pesca; Controlo dos Esquemas de Separação de Tráfego (EST); Prevenção e Combate do Fluxo de Migração Ilegal e Narcotráfico; Prevenção e Combate à Poluição Marítima, bem como, missões de interesse público (Marinha Portuguesa, 2007). No entanto, a análise de risco considerou a possibilidade de uma plataforma análoga entrar em combate.



Figura 16 - Navio Patrulha Oceânico da Classe Viana do Castelo (Marinha Portuguesa, 2023)

A avaliação incide apenas no risco de armazenamento e quantificação do impacto a bordo. Não considera riscos de trasfega, riscos de armazenamento nos portos, de transporte até ao porto, ou de produção. Do mesmo modo, não considera efeitos ambientais, económicos ou sociais ao longo de toda a linha desde a produção à utilização.

Começou por se considerar constrangimentos de pressão e temperatura no armazenamento no navio. Excluem-se todos os combustíveis com pressões de armazenamento superiores a 50 bar, bem como aqueles que requerem armazenamento

criogénico. No que diz respeito ao constrangimento de pressão, a IMO estabeleceu na Resolução MPC.285(86), que o armazenamento de combustíveis gasosos a pressões superiores a 10 bar em espaços fechados não é permitido, a menos que existam sistemas adequados de deteção de fugas e extinção de incêndios (IMO, 2009). No entanto, para fins do presente estudo, adotou-se o limite de 50 bar. Estes critérios foram estabelecidos tendo em consideração os potenciais riscos e complexidades técnicas associadas ao armazenamento. Foram ainda considerados constrangimentos operacionais de autonomia.

Os líquidos criogénicos são gases liquefeitos, que são mantidos no estado líquido a temperaturas extremamente baixas. São gases que, por norma, têm temperaturas de ebulição inferiores a -90°C . Assim, existem diversas precauções gerais e práticas que deve ser consideradas devido às temperaturas extremamente baixas e taxas de conversão em gás destes líquidos criogénicos (Air Products, 2014).

Dos combustíveis analisados, apenas o hidrogénio líquido e o gás natural liquefeito (GNL) são armazenados de forma criogénica, devido às suas temperaturas de ebulição de $-252,76^{\circ}\text{C}$ e -162°C , respetivamente (Abohamzeh et al., 2021; Vandebroek & Berghmans, 2012). Devido aos elevados riscos associados ao armazenamento criogénico e de gases a elevadas pressões, descritos na revisão bibliográfica, os combustíveis GNL e hidrogénio líquido e gasoso foram considerados inviáveis para aplicação em navios militares. As missões militares têm sempre um nível de incerteza e possibilidade de ocorrência de incidentes. Nestas situações, a presença de líquidos criogénicos inflamáveis ou gases a elevadas pressões aumentaria consideravelmente o risco de incidentes graves, colocando em causa a segurança da guarnição, a integridade do navio e a continuidade da missão.

No que concerne à análise de autonomia, avaliou-se a energia para a propulsão dos Navios Patrulha Oceânicos (NPOs), propulsionado apenas com os dois motores diesel. Considerou-se uma velocidade de cruzeiro/operação de 15 nós. De acordo com o *Manual de Manobra das Unidades Navais da Classe Viana do Castelo* (PGNAVSUP 105), a autonomia destes navios é de cerca de 5000 milhas náuticas, garantindo uma reserva de estabilidade de 20% (Marinha Portuguesa, 2020).

Assim, de acordo com a Equação 15, em que T corresponde à autonomia em dias, d à distância em milhas náuticas e V à velocidade considerada, o sistema de propulsão atual, confere uma autonomia de aproximadamente 14 dias.

$$T [dias] = \frac{d [nm]}{V [nós] \times 24} = \frac{5000}{15 \times 24} = 13,9 \text{ dias} \quad (15)$$

Com base nos dados apresentados no PGNAVSUP 105 e nas informações presentes na Tabela 21 presente no Anexo C, obtidos nas provas de mar realizadas nos navios desta classe, verificou-se que para uma configuração de propulsão de dois Motores *Diesel*, à velocidade de 15 nós, a percentagem correspondente nos telégrafos é de 65% e a potência total necessária para o desempenho operacional do navio é de 1953 kW, na condição de deslocamento normal de operação de 1838 ton. De salientar que a análise tem por base a capacidade dos tanques de armazenamento dos navios em questão, com uma capacidade de cerca de 220 m³ e considerando uma reserva de estabilidade de 20% (CertiTecna, 2009) .

Sendo que a potência corresponde à energia por unidade de tempo, considerando uma autonomia de 14 dias e uma potência total de 1953 kW, pode-se calcular a energia total consumida para cumprir essa autonomia, através da Equação 16. Para fins de comparação com outras alternativas energéticas, a energia obtida foi utilizada como ponto de referência.

$$\begin{aligned} E_{total\ requerida} [MJ] &= P [kW] \times Autonomia [dias] \times 24 \\ E_{total\ requerida} [MJ] &= 1953 \times 14 \times 24 [kWh] = 656\ 208 \text{ kWh} \times 3,6 \quad (16) \\ &= 2\ 362\ 348,8 \text{ MJ} \end{aligned}$$

A partir da energia total requerida e do poder calorífico inferior (LHV) do MGO, a eficiência do sistema propulsor do navio em análise foi calculada. Considerando o valor de massa específica do MGO e do volume total de armazenamento a bordo, determinou-se a massa total de combustível armazenada nos tanques (Equação 17). Com base no valor de densidade energética gravimétrica, equivalente ao LHV, e à massa total de combustível, obteve-se a energia total contida no combustível (Equação 18).

$$\rho_{combustível} \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{m[kg]}{V[m^3]} \leftrightarrow m_{combustível}[kg] = \rho_{combustível} \times V \quad (17)$$

$$m_{combustível} = 844 \times 220 = 185\,680 \text{ kg}$$

$$E_{total\,combustível}[MJ] = LHV \left[\frac{MJ}{kg} \right] \times m_{combustível}[kg] \quad (18)$$

$$E_{total\,combustível}[MJ] = 42,6 \times 185\,680 = 7\,909\,968 \text{ MJ}$$

O valor de eficiência do sistema de propulsão em análise obteve-se a partir do rácio entre o valor de $E_{total\,requerida}$ e de $E_{total\,combustível}$, conforme apresentado na Equação 19.

$$\eta_{MGO} = \frac{E_{total\,requerida}[MJ]}{E_{total\,combustível}[MJ]} = \frac{2\,362\,348,8}{7\,909\,968} \cong 0,30 = 30\% \quad (19)$$

Diferentes aplicações dos combustíveis têm associadas diferentes eficiências, pelo que estas devem ser tidas em consideração na análise energética. A Tabela 5 apresenta os valores de eficiência para os combustíveis em análise de acordo com a sua aplicação.

Tabela 5 - Valores de Eficiência associados a cada aplicação (Goldmann et al., 2018; Innovation & Technology Network of WLPGA, 2021; Mckinlay et al., 2020; Tunér et al., 2018)

Eficiência (η)		
MGO	MCI	30%
Biodiesel		
Diesel-Sintético		
Hidrogénio	FC	60%
	MCI	40%
Amoníaco	FC	60%
	MCI	30%
Metanol	FC	60%
	MCI	53%
GPL	MCI	50%
Eletricidade	Baterias	70-95%

Deste modo, com base nos dados apresentados no Gráfico 1 e Tabela 5, avaliou-se o volume de cada um dos combustíveis em análise, conforme a

Tabela 6. Os cálculos referentes a cada um dos parâmetros encontram-se descritos no Apêndice B.

Tabela 6 - Análise energética dos combustíveis

Combustível	Densidade Energética Gravimétrica [MJ/kg]	Densidade [kg/m ³]	$E_{Combustível}$ [MJ]		Massa [ton]		Volume [m ³]		Deslocamento Total [ton]		Rácio _v	
MGO	42,6	844	MCI									
			7874496	185	219	1838	-					
Biodiesel	35,8	879	7874496	220	250	1873	1,14					
Diesel Sintético	43	765	7874496	183	239	1836	1,09					
GPL	46,04	540	4724698	103	190	1756	0,87					
Amoníaco	18,6	610	FC	MCI	FC	MCI	FC	MCI	FC	MCI	FC	MCI
			3937248	7874496	212	423	347	694	1865	2077	1,58	3,17
Metanol	20,27	791	3937248	4457262	194	220	246	278	1847	1873	1,12	1,27
LOHC	7,44	996	3937248	5905872	529	794	531	797	2182	2447	2,43	3,64
Hidretos Metálicos	9,1	1450	3937248	5905872	433	649	298	448	2086	2302	1,36	2,04
Eletricidade	0,79 ⁷	1620	Baterias									
			3374784 - 2486683	4271 - 3148	2636 - 1943	5924 - 4801	12,04 - 8,89					

⁷ Considerados valores correspondentes a baterias de Óxido de Lítio Níquel Cobalto Manganês (NMC)

Através da avaliação da

Tabela 6, verifica-se que, relativamente à demanda de volume de armazenamento, as baterias, o LOHC e o amoníaco aplicado em MCI, são as opções mais dispendiosas em comparação com o MGO. Em termos de massa, as opções mais limitativas são os referidos anteriormente e ainda os hidretos metálicos, devido à sua elevada massa volúmica e, densidades energéticas não muito elevadas. No caso do amoníaco, a limitação prende-se à massa volúmica baixa e densidade energética volumétrica cerca de 3 vezes menor que a do MGO.

Após a análise de todos os combustíveis e consideração da necessidade de aumento da capacidade de armazenamento por forma a cumprir a autonomia, surge a questão de redução de autonomia, por forma a se adequar à capacidade de armazenamento de cerca de 220 m³ dos NPO. No entanto, esta abordagem implica uma redução da capacidade operacional dos navios, o que não se pretende, pelo menos em grande escala. Com o objetivo de compreender o impacto potencial da massa adicional no deslocamento de 1838 toneladas dos NPO e a possível necessidade de aumento de potência para a utilização dos combustíveis em análise, realizou-se uma avaliação. Esta baseou-se na aplicação da Equação 20, que permite analisar o efeito do deslocamento na potência necessária para o sistema de propulsão de um navio, a determinada velocidade. Assim, é importante ressaltar que a massa adicional num navio pode afetar diretamente o seu desempenho, resultando num aumento da resistência ao avanço e comprometendo a eficiência energética, uma vez que a potência extra necessária para compensar a massa adicional, leva a um aumento do consumo de combustível. A Tabela 7 sintetiza as potências necessárias para os respetivos deslocamentos, por forma a manter a velocidade de 15 nós determinada.

$$Pot [kW] = K_1 \times m[ton]^\alpha \times V[m/s]^3 \quad (20)$$

Onde, $K_1 = 0,0028$ e $\alpha = 0,99$.

O cálculo das constantes K_1 e α encontra-se especificado no Apêndice C, com base nos dados de potência total e velocidade obtidos durante as provas de mar destes navios, apresentados no Gráfico 4 do Anexo C:

Tabela 7 - Análise comparativa do impacto do deslocamento na potência necessária para manter a velocidade de 15 nós

Combustível	Deslocamento Total [ton]		Potência Necessária [kW]	
MGO	MCI			
	1838		2223,8	
Biodiesel	1873		2265,8	
Diesel Sintético	1836		2221,7	
GPL	1756		2125,3	
Amoníaco	FC	MCI	FC	MCI
	1865	2077	2255,9	2509,3
Metanol	1847	1873	2235,0	2265,7
LOHC	2182	2447	2635,9	2952,1
Hidretos Metálicos	2086	2302	2520,4	2779,1
Eletricidade	Baterias			
	5924 - 4801		7084,1 - 5753,3	

A aplicação da Equação 20 resulta num erro de aproximadamente 14%, em relação à potência total medida nas provas de mar de 1953 kW para cumprir com os 15 nós, o que advém do método de cálculo e determinação das constantes K_1 e α . No entanto, o seu uso possibilita uma estimativa da influência do deslocamento na potência necessária para o sistema de propulsão de um navio. A análise de todos os dados apresentados revela que, à exceção do GPL e do Diesel Sintético, que devido à sua densidade inferior ao MGO e densidade energética relativamente elevada, não provoca um aumento do deslocamento, todos potenciam um aumento do deslocamento do navio e, por sua vez, uma maior potência requerida e maior consumo de combustível. Além disso, todos exigem um aumento no volume de armazenamento. Assim, para a maioria dos combustíveis, seria necessário alterar a estrutura do navio e a compartimentação, mantendo a tipologia de navio, a fim de aumentar o espaço dedicado ao armazenamento de combustível. Devido à elevada demanda de espaço e massa e, conseqüente, potência necessária para cumprir com a autonomia associada à aplicação de baterias, considerou-

se esta fonte energética como excluída para posteriores análises. No entanto, destacam-se o LOHC e os hidretos metálicos, que devido à sua densidade elevada e densidade energética relativamente mais baixa, resultam num deslocamento adicional significativo. É importante ressaltar que estes métodos de armazenamento de hidrogénio vão ser considerados na análise FMEA-AHP, pois são métodos em desenvolvimento e considerados potenciais soluções para o futuro, que podem ser implementadas e resultar na aplicação de hidrogénio verde a bordo de forma segura. Esta abordagem pode tornar-se uma opção interessante, mesmo que exija uma ligeira diminuição na autonomia do navio. No entanto, a avaliação exata obrigaria a um cálculo iterativo para se garantir a autonomia.

3.2. Análise FMEA-AHP

Os combustíveis considerados para a análise FMEA-AHP e os seus respetivos modos de armazenamento são os seguintes (Kjartansson, 2011; MAN Energy Solutions, 2022a):

- **Biodiesel (A1)** – armazenado no estado líquido, sem requerer modificações aos tanques de MGO, à T_{amb}/p_{atm} ;
- **Hidrogénio (A2)** – armazenado de forma química em LOHC, à T_{amb}/p_{atm} ;
- **Hidrogénio (A3)** – armazenado em hidretos metálicos (hidreto de magnésio) – reação de desidrogenação do hidreto de magnésio a $300^{\circ}C/20$ bar;
- **Amoníaco (A4)** – armazenado no estado líquido, a $-33^{\circ}C/p_{atm}$;
- **Metanol (A5)** – armazenado no estado líquido à T_{amb}/p_{atm} ;
- **GPL (A6)** – armazenado no estado líquido à $T_{amb}/18$ bar.

Nos estudos realizados com a aplicação do método FMEA, é comum que os critérios de Ocorrência, Severidade e Detetabilidade sejam quantificados por grupos de trabalho. Nesta aplicação realizaram-se comparações paritárias entre os modos de falha, relacionadas a cada um dos critérios do método FMEA, dando origem ao método FMEA-AHP.

A Tabela 8 representa os modos de falha analisados, com os respectivos potenciais efeitos e causas associados, para cada um dos seis tipos de combustíveis alternativos, com foco no sistema de armazenamento de combustível. A análise FMEA foi conduzida de forma individual, comparando os combustíveis dois a dois, para cada tipo de falha. Foram considerados dois modos de falha (MF) genéricos, que comprometeriam uma função de determinado sistema:

- Tanques de armazenamento
 - Fuga (MF1)
 - Explosão (MF2)

De seguida foram efetuados julgamentos paritários para as seis alternativas de combustíveis, de acordo com a Escala Fundamental de *Saaty*, presente no Quadro 2, relativos aos critérios associados de Ocorrência, Severidade e Detetabilidade, para cada um dos modos de falha. Das matrizes de comparação paritárias resultaram vetores prioridade, através do cálculo dos vetores e valores próprios da mesma. Os vetores prioridade para cada critério (O, S, D) foram multiplicados entre si, por forma a obter o vetor prioridade global, correspondente ao RPN, para cada modo de falha. Em seguida, o valor de RPN final foi multiplicado por uma constante, $w=10000$, para facilidade de leitura. Os valores obtidos têm significado relativo nesta comparação. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 8. Relativamente às matrizes utilizadas para realizar a comparação paritária, estão presentes no Apêndice E.

Da análise da Tabela 8 verifica-se, que tanto o Amoníaco (A4) como o GPL (A6), apresentam para o MF1, um valor de RPN de ordens de grandeza superior às restantes opções. No caso do amoníaco, este valor elevado está relacionado com a sua elevada toxicidade (TLV – 25 ppm). Quanto ao GPL, o seu ponto de inflamação extremamente baixo, cerca de -104°C , aumenta o risco de incêndios em caso de fuga. O metanol apresenta um valor de RPN inferior ao Amoníaco e GPL, mas ainda superior aos restantes, principalmente devido à sua toxicidade, de cerca de 200 ppm, de acordo com os parâmetros TLV. Além disso, a sua ampla gama de inflamabilidade coloca-o numa posição intermédia em relação ao risco de incêndio.

No caso do MF2, o risco de explosão e colapso dos tanques de armazenamento está frequentemente associado ao fenómeno BLEVE, registado em tanques de armazenamento de GPL e de Amoníaco, daí o valor elevado de RPN associado a este modo de falha.

Sistema	Função	Código	Modo de falha	Efeito	Causa	Biodiesel (A1)				LOHC (A2)				Hidretos Metálicos (A3)				Amoníaco (A4)				Metanol (A5)				GPL (A6)																							
						O	S	D	RPN	O	S	D	RPN	O	S	D	RPN	O	S	D	RPN	O	S	D	RPN	O	S	D	RPN																				
Armazenamento (tanques)	Armazenar combustível de forma segura	MF1	Fuga	Intoxicação; incêndio (fenômeno de <i>pool fire</i> , <i>jet fire</i> , <i>flash fire</i>); explosão; asfixia	Corrosão	0,034	0,031	0,042	0,44	0,060	0,050	0,042	1,26	0,088	0,095	0,211	17,50	0,291	0,794	0,101	232,49	0,115	0,303	0,128	44,62	0,412	0,196	0,274	220,71																				
					Vibração																																												
					Desgaste																																												
		MF2	Explosão	Danos humanos; Danos estruturais	Falha mecânica	0,033	0,032	0,035	0,37	0,039	0,038	0,041	0,62	0,081	0,115	0,224	21	0,250	0,258	0,194	124,88	0,138	0,110	0,103	15,60	0,455	0,446	0,373	757,36																				
					Fraca ventilação (acumulação de gases inflamáveis)																																												
					Fenômeno de Rollover																																												
			Faixa elétrica																																														
			Aumento da temperatura																																														

Tabela 8 - Aplicação da Análise FMEA-AHP

O Biodiesel/Diesel Sintético têm características químicas semelhantes ao MGO, o que torna o fator de risco associado a estes, igualmente semelhante e adequado para aplicação a bordo. Relativamente ao LOHC e aos hidretos metálicos, os principais riscos associados prendem-se às elevadas temperaturas de desidrogenação, cerca de 300°C. No entanto, o LOHC escolhido para análise apresenta um *flash-point* relativamente elevado, 115°C e a reação de libertação do hidrogénio ocorre apenas na presença de um catalisador. Já os hidretos metálicos realizam a sua reação de desidrogenação a 300°C e 20 bar, o que os torna mais suscetíveis a fugas do que o LOHC. No entanto, tanto o LOHC como os hidretos metálicos são tecnologias emergentes no armazenamento seguro de hidrogénio a bordo dos navios, com grande potencial de evolução.

Deste modo, são escolhidos para avaliação, o Biodiesel/Diesel Sintético; LOHC; Hidretos Metálicos e o Metanol.

3.3. Combinação de Opiniões dos *Experts*

A fim de incorporar a opinião de peritos na área e confirmar as conclusões retiradas, recorreu-se à Teoria de Dempster-Shafer. Como mencionado no capítulo 2.2., esta teoria é aplicada no tratamento da incerteza em ambientes de informação incompleta ou ambígua.

Para este fim, foram realizados dois tipos de inquéritos a quatro *experts* na área, por forma a quantificar a possibilidade de adoção de combustíveis alternativos, em unidades navais análogas às da Classe *Viana do Castelo*, num horizonte temporal de 10 a 20 anos. Nestes inquéritos, presentes no Apêndice G, foi permitida a colocação de conjuntos de soluções adicionais pelos peritos. É importante ressaltar, que a modificação de hipóteses ou soluções não apresenta obstáculos à aplicação da DST, visto que todas estas serão avaliadas e combinadas. A avaliação só terá de considerar quadros de discernimento compatíveis. As respostas aos inquéritos encontram-se apresentadas no Anexo D. Quanto a uma breve explicação dos diferentes questionários e dos elementos focais aplicados em cada um deles encontra-se no Apêndice F.

Resultou das análises anteriores, um conjunto de combustíveis alternativos, constituindo o quadro de discernimento, θ , que inclui também tecnologias emergentes e opções futuras, como a energia nuclear (Equação 21).

$$\theta = \left\{ \begin{array}{l} \text{Biodiesel / Diesel Sintético } (S_1) \\ \text{LOHC } (S_2) \\ \text{Hidretos Metálicos } (S_3) \\ \text{Metanol } (S_4) \\ \text{Energia Nuclear } (S_5) \\ \text{Outras opções futuras } (S_6) \end{array} \right\} \quad (21)$$

Os elementos focais que seguem para avaliação serão oito, que se encontram apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Elementos Focais para avaliação

Elementos Focais
$\{S_1, S_4\}$
$\{S_1, S_2\}$
$\{S_5\}$
$\{S_5, S_6\}$
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$

Os elementos focais compostos para os diversos combustíveis, como por exemplo, $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$, definem os potenciais combustíveis a utilizar em diferentes navios de tipologia NPO, não necessariamente no mesmo navio. No caso da solução $\{S_1, S_4\}$, consiste numa evolução da situação atual, eventualmente, numa configuração *dualfuel*. O elemento focal $\{S_1, S_2\}$ consiste numa abordagem *duafuel* entre hidrocarbonetos verdes e hidrogénio verde, armazenado de forma segura através de LOHC. A opção $\{S_5\}$ é a opção nuclear atual e futura; e $\{S_5, S_6\}$, corresponde a soluções futuras e atuais de energia nuclear e novas tecnologias emergentes. O conjunto $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ baseia-se num aposta mista em hidrocarbonetos verdes, hidrogénio verde

e metanol; $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ considera todas as anteriores, bem como, o nuclear; $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$, considera todas as anteriores e as tecnologias futuras; e $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ considera todas as anteriormente referidas, atuais e futuras.

A Tabela 9 apresenta as massas de probabilidade atribuídas pelos *experts* aos elementos focais enunciados.

Tabela 9 - Massas de probabilidade atribuídas pelos peritos aos elementos focais enunciados

Elementos Focais		m_i			
		E_1	E_2	E_3	E_4
$\{S_1, S_4\}$	Hidrocarbonetos verdes + Metanol	0,35	0,25	0,80	0,70
$\{S_1, S_2\}$	Hidrocarbonetos verdes + LOHC	0	0,15	0	0
$\{S_5\}$	Nuclear	0,05	0	0	0
$\{S_5, S_6\}$	Nuclear + Opções futuras	0	0,10	0	0
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	Hidrocarbonetos verdes + Metanol + H ₂	0,25	0,30	0,10	0,10
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	Hidrocarbonetos verdes + Metanol + H ₂ + Nuclear	0	0	0	0
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$	Hidrocarbonetos verdes + Metanol + H ₂ + Opções futuras	0	0	0,10	0,20
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$	Hidrocarbonetos verdes + Metanol + H ₂ + Nuclear + Opções futuras	0,35	0,20	0	0

Com recurso à Regra de Combinação de Dempster, foram combinadas as quatro opiniões, iniciando pela conjugação da $m_1 \oplus m_2$, seguida da conjugação da probabilidade resultante com a opinião do terceiro *expert*, $m_{12} \oplus m_3$, culminando na conjugação de todas as opiniões, $m_{123} \oplus m_4$ ou $m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4$. Da combinação das opiniões dos dois primeiros *experts*, obteve-se um novo conjunto focal, que inclui os elementos focais já enunciados, bem como os novos elementos, $\{S_1\}$ e $\{S_6\}$. Como a combinação de opiniões é comutativa, não existe nenhum problema associado a este

processo. As tabelas ilustrativas do método e cálculos referentes às conjugações anteriores estão disponíveis no Apêndice H. Os cálculos foram efetuados com recurso a um programa desenvolvido em MATLAB, presente no Apêndice I, que se baseia nos fundamentos teóricos da Teoria de Dempster-Shafer e nas Equações 10 e 11.

O valor de K foi determinado de acordo com o exposto na Equação 14, que corresponde à soma dos produtos cuja interseção é nula. Este passo é essencial para prevenir conflitos de informação entre corpos de evidência.

Após combinar os corpos de evidência, o passo final e crucial consiste no cálculo dos valores de Plausibilidade e Crença associados às massas de probabilidade resultantes da conjugação das opiniões dos quatro peritos. O cálculo do valor de Crença corresponde à soma das massas de probabilidade dos conjuntos cuja união é igual ao próprio conjunto. Relativamente à determinação do valor de Plausibilidade, esta consiste no cálculo da interseção do elemento focal com todas as outras proposições e verificação se esta operação resulta em conjuntos vazios. Caso a interseção seja não vazia, são somadas essas massas de probabilidade básica associadas a essas proposições.

4. Resultados e Discussão

O presente capítulo tem como principal objetivo a discussão e análise dos resultados obtidos, após a aplicação de todos os métodos propostos, como foco nos resultados derivados da aplicação da Teoria de Dempster-Shafer. Foram recolhidas as opiniões de quatro *experts*, com o objetivo de determinar qual a melhor opção para aplicação em navios militares, mais especificamente da tipologia NPO, num horizonte temporal de 10 a 20 anos.

Por forma a analisar as opiniões de cada *expert*, a Teoria de Dempster-Shafer foi aplicada, através de um programa em MATLAB, obtendo-se os valores de crença e plausibilidade associados a cada elemento focal. Inicialmente, a opinião de cada perito foi analisada de forma individual, considerando também os elementos focais com massa de probabilidade básica nula. A determinação dos valores de Crença e Plausibilidade permite uma análise, a considerar a incerteza dos julgamentos associada a esta temática. Como já referido, a Crença (*Bel*), corresponde a uma medida representativa da força da evidência perante um cenário ou proposição específica, isto é, uma medida do grau de confiança com o qual a proposição é apoiada pelas informações disponíveis. Assim quanto maior o valor de Crença, maior a confiança na validade da proposição. Já a função Plausibilidade (*Pl*), representa toda a evidência que não contradiz a hipótese ou cenário em questão. Por outras palavras, a Plausibilidade revela a falta de evidência que contradiz a opinião. Assim a combinação destas duas funções resulta num intervalo de massa de probabilidade que reflete a incerteza e o suporte para cada elemento focal.

Considerando os elementos até agora descritos e as massas de probabilidade atribuídas por cada *expert*, presentes na Tabela 9, torna-se claro que os peritos acreditam que 70 a 80% das aplicações futuras serão baseadas em hidrocarbonetos verdes e hidrogénio verde. Além disso, alguns deles consideram que a energia nuclear pode ser promissora, bem como, as tecnologias emergentes verdes.

As opiniões dos *experts* foram analisadas resultando nos valores de Crença e Plausibilidade apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Valores de Crença e Plausibilidade das opiniões dos *experts*

Elementos Focais	E_1		E_2		E_3		E_4	
	<i>Bel</i>	<i>Pl</i>	<i>Bel</i>	<i>Pl</i>	<i>Bel</i>	<i>Pl</i>	<i>Bel</i>	<i>Pl</i>
$\{S_1, S_4\}$	0,35	0,95	0,25	0,90	0,80	1,00	0,70	1,00
$\{S_1, S_2\}$	0	0,95	0,15	0,90	0	1,00	0	1,00
$\{S_5\}$	0,05	0,40	0	0,30	0	0	0	0
$\{S_5, S_6\}$	0,05	0,40	0,10	0,30	0	0,10	0	0,20
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	0,60	0,95	0,70	0,90	0,90	1,00	0,80	1,00
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	0,65	1,00	0,70	1,00	0,90	1,00	0,80	1,00
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$	0,60	0,95	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$\{S_1\}$	0	0,95	0	0,90	0	1,00	0	1,00
$\{S_2\}$	0	0,60	0	0,65	0	0,20	0	0,30
$\{S_3\}$	0	0,60	0	0,50	0	0,20	0	0,30
$\{S_4\}$	0	0,95	0	0,75	0	1,00	0	1,00
$\{S_6\}$	0	0,35	0	0,30	0	0,10	0	0,20

Os dados apresentados revelam que, segundo a opinião do *Expert 1*, existe crença e plausibilidade com valor igual a 1, que um conjunto de todas as soluções verdes, nucleares e futuras venham a existir em navios da tipologia NPO da Marinha Portuguesa. Esta solução derivou do elemento focal modificado, $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$. Além disso, o *Expert 1* apresenta também uma crença elevada, cerca de 0,60, em tecnologias verdes, como hidrocarbonetos, hidrogénio e metanol, bem como numa solução composta por estes combustíveis e outras opções futuras. A opção composta pelo biodiesel/diesel sintético, hidrogénio, metanol e nuclear apresenta também uma crença elevada de cerca de 0,65, o que indica que este conjunto pode ser uma solução para o futuro dos navios militares. Em termos de plausibilidade, o biodiesel/diesel sintético e o metanol são tecnologias promissoras, tanto individualmente como conjugadas, assim como o biodiesel/diesel sintético e o hidrogénio. Também o conjunto composto por todos estes com a energia nuclear ou opções futuras, apresenta valores de plausibilidade promissores.

Relativamente ao *Expert 2*, à semelhança do anterior, apresenta crença e plausibilidade máximas para o conjunto de todas as soluções verdes, nucleares e futuras. Conjuntos compostos por hidrocarbonetos verdes, hidrogénio e metanol têm valores de crença elevados, cerca de 0,70, bem como, estes combustíveis conjugados com outras opções futuras ou mesmo energia nuclear. Ao nível de plausibilidade, em concordância com o *Expert 1*, evidencia que o biodiesel/diesel sintético e o metanol são tecnologias promissoras, de forma conjunta ou isolada. Este também considera o conjunto de biodiesel/diesel sintético e o hidrogénio armazenado em LOHC, que se destaca neste caso particular, pois foi um dos elementos focais sugeridos pelo perito, apresentando um valor de crença não muito elevado, mas um valor de plausibilidade elevado, que indica estes combustíveis possam existir a bordo de navios militares, em configuração *dualfuel*, o que corrobora o evidenciado no Capítulo 1.

Segundo a opinião do *Expert 3*, existe crença e plausibilidade máximas, que um conjunto composto por hidrocarbonetos verdes, metanol, hidrogénio e outras opções futuras, possa vir a ser o futuro ao nível da propulsão na tipologia de navios militares em análise. Este destaca ainda a conjugação de biodiesel/diesel sintético com metanol, a qual tem associada uma elevada crença, o que sugere a sua convicção no papel promissor deste conjunto de combustíveis no futuro dos navios militares. A par deste conjunto também se encontra a conjugação de hidrocarbonetos verdes com hidrogénio e metanol, com valor de crença igual a 0,90. Ao nível da plausibilidade, destacam-se os hidrocarbonetos verdes e o metanol, que apresentam valor máximo de plausibilidade e valor nulo de crença, o que indica que o perito acredita no potencial destes combustíveis quando integrados noutros conjuntos, não de forma isolada. Esta mesma tendência é observada no conjunto de hidrocarbonetos verdes e hidrogénio armazenado em LOHC.

Por último, no que concerne à opinião do *Expert 4*, muito à semelhança do evidenciado no parágrafo acima, existe crença e plausibilidade com valor igual a 1, nos conjuntos $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ e $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$. Este destaca também o conjunto de hidrocarbonetos verdes com hidrogénio e metanol, bem como, a conjugação de hidrocarbonetos verdes com hidrogénio e metanol, com valores de crença de 0,70 e 0,80, respetivamente. Tal como o *Expert 3*, o *Expert 4* apresenta valores de crença e plausibilidade nulos para a energia nuclear, o que indica que ambos não consideram

viável a aplicação de energia nuclear nesta tipologia de navios. Ao nível da plausibilidade, os valores apresentados pelo *Expert 4* são os mesmos ou muito semelhantes aos do *Expert 3*, pelo que não há informações adicionais a serem acrescentadas nesse aspeto.

Por forma a conjugar as opiniões dos quatro *experts* e obter uma análise completa de qual a opção considerada como mais viável para aplicação militar em navios da tipologia NPO, utilizou-se a Regra de Combinação de Dempster. A Tabela 11 apresenta os valores de *bpa* referentes a cada uma das etapas da combinação de opiniões.

Tabela 11 – Resumo dos valores de combinação de opiniões

Elementos Focais	$m_1 \oplus m_2$	$m_1 \oplus m_2 \oplus m_3$	$m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4$
$\{S_1, S_4\}$	0,4558	0,7600	0,8116
$\{S_1\}$	0,0580	0,1450	0,1602
$\{S_1, S_2\}$	0,0995	0,0210	0,0063
$\{S_5\}$	0,0166	0	0
$\{S_5, S_6\}$	0,0387	0	0
$\{S_6\}$	0	0,0041	0,0008
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	0,2541	0,0617	0,0194
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	0	0	0
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$	0	0,0082	0,0016
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$	0,0773	0	0

Numa primeira análise, a combinação das opiniões dos *experts* dá uma elevada massa de probabilidade à solução de hidrocarbonetos verdes e metanol, seguida da aplicação isolada de biodiesel/diesel sintético. Opções como a energia nuclear e outras soluções futuras, possivelmente consideradas disruptivas, têm massas pequenas ou mesmo nulas.

A partir das massas de probabilidade resultantes da combinação podem extrair-se os valores de crença e de plausibilidade. Estes dados encontram-se presentes no Gráfico 2.

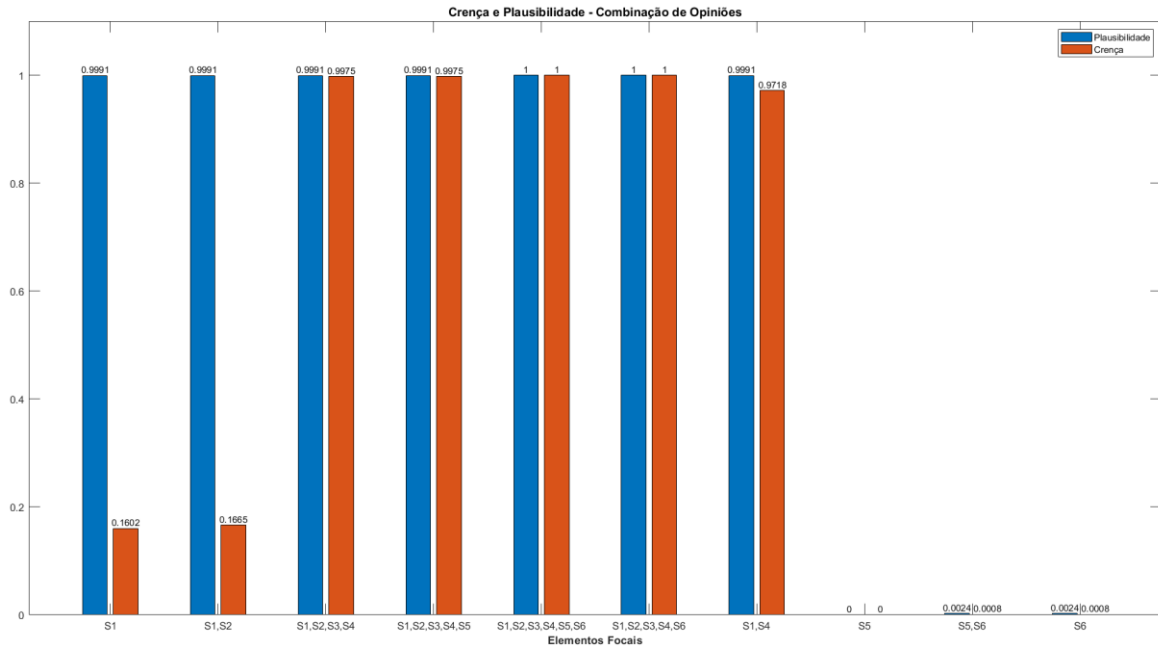


Gráfico 2 – Valores de Crença e Plausibilidade dos elementos focais em análise

Da análise do Gráfico 2, é de realçar uma elevada crença na solução composta por hidrocarbonetos verdes e metanol, que, numa perspetiva de facilidade de implementação a bordo, tem uma posição mais favorável em comparação com os restantes conjuntos, especialmente devido à sua compatibilidade com motores de combustão interna, sobretudo no caso do biodiesel/diesel sintético. Além disso, devido à sua semelhança em termos de propriedades com o MGO, estes combustíveis oferecem um nível aceitável de segurança, com poucas mudanças significativas necessárias, principalmente ao nível dos tanques. No caso do metanol, é importante destacar que a sua aplicação requer algumas medidas adicionais de segurança, que envolvem a implementação de sistemas de encanamentos duplos em compartimentos considerados de risco, assim como detetores de fuga. Por outro lado, a energia nuclear não é considerada viável para aplicação em navios de tais dimensões e tipologia de missões, de acordo com a opinião de dois peritos, o que resultou na inviabilidade desta alternativa no resultado da combinação, com crença nula.

Necessariamente as soluções que correspondem aos conjuntos $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$, $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$, $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ e $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ têm crenças muito elevadas, pois contêm os combustíveis nos quais os peritos têm mais confiança. O conjunto composto por todos os combustíveis verdes, isto é, biodiesel/diesel sintético, hidrogénio, metanol e outras opções futuras resulta em plausibilidade e crença máximas.

Isto ocorre devido à crença, ainda que baixa, no potencial das outras opções futuras, bem como, a crença elevada nos restantes combustíveis do conjunto. Embora com valores de crença atribuídos inferiores em comparação com os conjuntos mencionados anteriormente, os peritos acreditam no potencial de desenvolvimento da aplicação de hidrocarbonetos verdes isoladamente ou em conjunto com hidrogénio armazenado em LOHC. Estes valores estão alinhados com as vantagens em termos de segurança e com as reduzidas alterações nos sistemas de propulsão, o que reforça a viabilidade destas soluções. A maioria das soluções é caracterizada por uma elevada plausibilidade, sendo de realçar as de menor plausibilidade, como a energia nuclear, outras opções futuras, tanto isoladamente como em conjunto, além das soluções que envolvem o armazenamento isolado ou como solução conjunta de hidrogénio em LOHC e hidretos metálicos. Os dados reforçam as conclusões das análises anteriores, destacando que o hidrogénio requer avanços tecnológicos significativos, especialmente no que diz respeito à capacidade de armazenamento e, por sua vez, à demanda de massa e volume associadas, para atender às exigências de autonomia necessárias.

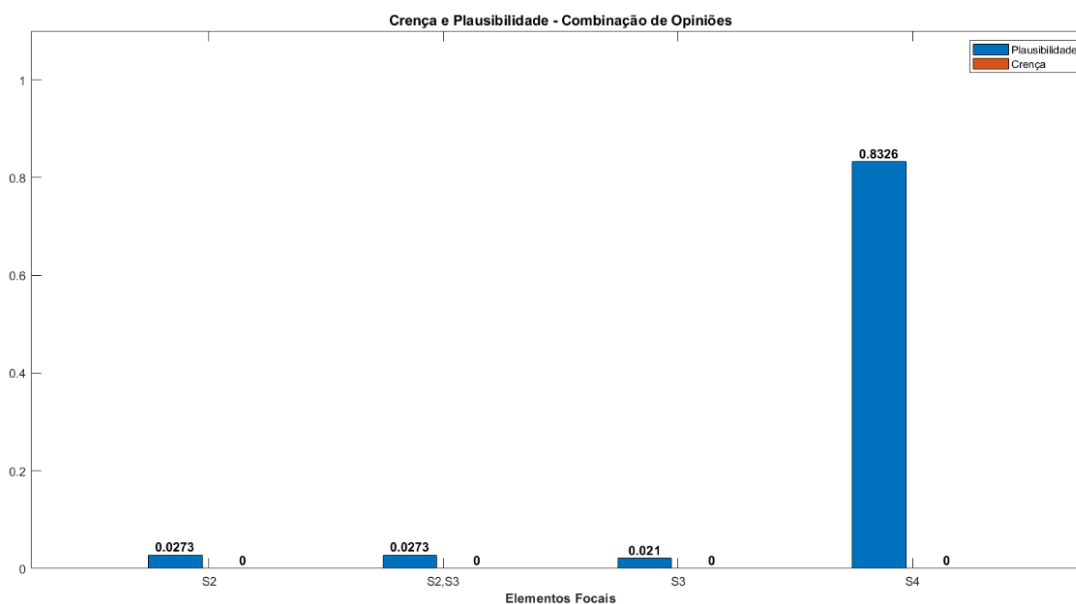


Gráfico 3 - Valores de Crença e Plausibilidade de outros elementos focais adicionais

Os resultados apresentados demonstram uma propensão para a confiança na utilização de hidrocarbonetos verdes em navios militares, numa configuração *dualfuel* com o metanol. Além disso, os dados indicam uma tendência para uma frota composta por diversos navios com sistemas de propulsão operados com diferentes combustíveis,

onde se incluem, os hidrocarbonetos verdes, hidrogénio, metanol e outras opções futuras. O primeiro conjunto é particularmente destacado pois, numa perspetiva de facilidade de transição energética, é altamente vantajoso, oferecendo requisitos de segurança comparáveis ao MGO, potenciando a rápida mitigação das emissões. Com um horizonte temporal de 10 a 20 anos em mente, os navios estariam preparados para a aplicação de metanol, mantendo sempre a redundância do MGO/hidrocarbonetos verdes, em linha com a disponibilidade logística destes combustíveis. O segundo conjunto apresenta opções que carecem de alguma maturidade tecnológica, como é o caso do LOHC e hidretos metálicos. No entanto, ressalva-se que o estudo analisa combustíveis com viabilidade de aplicação num horizonte temporal de 10 a 20 anos, existindo espaço para evolução, bem como para outras opções futuras aqui consideradas.

Ao comparar os resultados obtidos com outras soluções já existentes e aplicadas em navios de marinhas estrangeiras, torna-se evidente uma relação entre a combinação de biodiesel/diesel sintético e metanol, com os dados apresentados na revisão bibliográfica. Entre as soluções discutidas, o biodiesel e o metanol são os únicos aplicados nos sistemas de propulsão de navios de superfície. O biodiesel foi usado pela Marinha dos Estados Unidos em cerca de 40 navios de sua frota já em 2012. Atualmente, existe uma frota dedicada a este tipo de combustíveis, conhecida como *Great Green Fleet*, que incorpora o biodiesel nas suas missões regulares. No âmbito europeu, a Marinha Italiana testou o uso de biodiesel derivado de óleo de palma em vários navios da sua frota, tendo este cumprido com sucesso os testes no sistema de propulsão.

Quanto ao metanol, embora ainda não tenha sido amplamente adotado em aplicações militares, a Marinha Real Holandesa está atualmente a substituir a sua frota por oito novos navios, incluindo quatro embarcações de alto mar e quatro embarcações de apoio ao mergulho, todas equipadas com sistemas de propulsão *dualfuel* com possibilidade de aplicação de metanol. Esta estratégia destaca o potencial do metanol na descarbonização da navegação militar.

Outras alternativas, como o armazenamento de hidrogénio em hidretos metálicos, já foram aplicadas em contextos militares, mas, até o momento, a sua

aplicação tem-se limitado a submarinos. A sua viabilidade para navios de superfície ainda não é considerada adequada, principalmente devido às questões relacionadas com a potência necessária e a demanda de volume e massa. Isto coloca-as como opções que carecem de maturidade tecnológica e que demandam um considerável avanço, o que explica o mencionado anteriormente e a crença baixa atribuída a esta solução.

Conclusão

A descarbonização da navegação é um desafio à escala global, crucial para combater as crescentes emissões de poluentes atmosféricos de navios. Este desafio envolve metas ambiciosas, que carecem de uma reconfiguração dos sistemas de propulsão existentes, bem como, dos seus perfis de operação. Neste contexto, a presente dissertação explora sete opções de combustíveis alternativos com potencial aplicação para o setor naval, cada uma com vantagens, limitações e considerações técnicas.

Os navios militares enfrentam desafios adicionais, como assegurar a continuidade das missões, manter desempenhos e autonomia, para além de evitar riscos acrescidos que possam comprometer a vida humana. Para apoiar o processo de seleção, foi adotada uma metodologia, que inclui uma análise energética de todas as alternativas, seguida de uma análise de risco utilizando o Método FMEA-AHP e, por fim, a conjugação de opiniões de *experts* com recurso à Teoria de Dempster-Shafer. O escopo da dissertação concentrou-se em navios da tipologia NPO, tendo sido consideradas para efeitos de análise, as características da Classe *Viana do Castelo* e as suas missões, não excluindo a possibilidade de cenários de combate.

Inicialmente, foram excluídos *a priori* fluidos armazenados criogenicamente e em reservatórios sob pressão acima dos 50 bar, considerados como constrangimentos fundamentais para a mitigação de riscos a bordo, eliminando assim o hidrogénio líquido, gasoso e o GNL. A análise energética evidenciou a necessidade de aumento de volume de armazenamento, devido às densidades energéticas inferiores em comparação ao MGO. No entanto, a falta de dados reais de desempenho, limitou esta análise, especialmente devido à baixa maturidade tecnológica associada a muitos dos combustíveis, como o Amónio, Metanol e Hidrogénio. Esta análise levou à exclusão das baterias, numa abordagem 100% elétrica. No entanto, considera-se que, numa configuração híbrida, estas possam ser uma vantagem na mitigação parcial das emissões, numa fase de transição.

A análise de risco avaliou as principais características químicas dos combustíveis relacionadas com a segurança como, o ponto de inflamação, limites de inflamabilidade e toxicidade, levando também em consideração o risco associado aos diferentes modos de

armazenamento de cada combustível. No método FMEA-AHP, foram avaliados dois modos de falha, fuga e explosão, no armazenamento de combustível, através da conjugação de um processo sistemático de avaliação de modos de falha com a hierarquização dos parâmetros de avaliação. Da análise, concluiu-se que, tanto o Amoníaco como o GPL sintético, não cumpriam com os requisitos mínimos de segurança para aplicação a bordo de navios militares, o primeiro devido à sua elevada toxicidade e o segundo devido à sua explosividade e ocorrências do fenómeno BLEVE associadas.

Por forma a realizar uma análise completa e robusta, considerou-se também a opinião de *experts* na área, sobre qual o combustível ou conjunto de combustíveis, com maior potencial para aplicação em navios militares da tipologia NPO, na Marinha Portuguesa. Os resultados transparecem o culminar do processo de seleção e permitem associar o fator de incerteza, tão presente nesta temática inerente ao horizonte temporal pretendido, por meio da Teoria de Dempster-Shafer. Da análise final, conclui-se que as alternativas mais promissoras e viáveis para aplicação no setor naval correspondem ao conjunto constituído pelos hidrocarbonetos verdes, isto é, biodiesel/diesel sintético, conjuntamente com o metanol, com possibilidade de aplicação numa configuração *dualfuel*. Os hidrocarbonetos verdes, como combustíveis *drop-in* em motores de CI, com alguma maturidade tecnológica, facilitam o processo de transição energética gradual, podendo eventualmente ser misturados com MGO. No caso do metanol, apesar de promissor para aplicação naval dentro de 10 a 20 anos, com armazenamento a temperatura ambiente e pressão atmosférica, requer um maior desenvolvimento tecnológico. Existe também otimismo num cenário de uma frota diversificada com soluções de hidrocarbonetos verdes, hidrogénio, metanol e outras opções futuras. No entanto, o estudo não crê em soluções nucleares, para esta tipologia de navios, pois não se adequa à tipologia de missões nem às dimensões dos mesmos. A solução de hidrogénio com maior viabilidade baseia-se na aplicação de LOHC, que embora segura, ainda carece de desenvolvimento por forma a garantir as características de autonomia estabelecidas.

Para avançar nesta área, é crucial considerar uma série de iniciativas estratégicas. Primeiramente, recomenda-se a criação de uma linha de investigação

associada a hidrocarbonetos verdes, bem como, a condução de uma avaliação logística abrangente, para avaliar os custos associados a estes combustíveis ao longo do ciclo de vida do navio. Sugere-se também o desenvolvimento de estudos de projeto e dimensionamento específicos para os sistemas de propulsão associados a estes combustíveis. Por fim, uma análise de impacto ambiental a longo prazo pode ser uma área-chave de investigação, para garantir que a transição para estes combustíveis seja sustentável e alinhada com os objetivos de redução de emissões.

Referências Bibliográficas

- Abdalla, A. M., Hossain, S., Nisfindy, O. B., Azad, A. T., Dawood, M., & Azad, A. K. (2018). Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Conversion and Management*, 165, 602–627. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>
- Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E., & Popoola, O. M. (2019). Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(29), 15072–15086. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- Abohamzeh, E., Salehi, F., Sheikholeslami, M., Abbassi, R., & Khan, F. (2021). Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72, 104569. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104569>
- ABS. (2021). Hydrogen as Marine Fuel. *Sustainability Whitepaper*, 1–36. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/06/ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf>
- ABS. (2022). LNG as Marine Fuel. *Sustainability Whitepaper*, 1–24. <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/sustainability-whitepaper-lng-as-marine-fuel.pdf>
- ACGIH. (2020). *TLV Chemical Substances Introduction*. <https://www.acgih.org/science/tlv-bei-guidelines/tlv-chemical-substances-introduction/>. Acedido em 19 de abril de 2023.
- ACGIH. (2022). *Ammonia*. <https://www.acgih.org/ammonia/>. Acedido em 19 de abril de 2023.
- Agência Lusa. (2022, 29 de junho). Clima é “desafio decisivo” e NATO quer reduzir emissões a zero até 2050. *Observador*. <https://observador.pt/2022/06/28/clima-e-desafio-decisivo-e-nato-quer-reduzir-emissoes-a-zero-ate-2050/>

- Agência Portuguesa do Ambiente. (2021). *Protocolo de Quioto*. <https://apambiente.pt/clima/protocolo-de-quioto>. Acedido em 19 de abril de 2023.
- Air Products. (2014). *Safe handling of cryogenic liquids*. <http://www.airproducts.com/~media/files/pdf/company/safetygram-16.pdf>
- Ali, A., Khan, M. A., & Choi, H. (2022). Hydrogen Storage Prediction in Dibenzyltoluene as Liquid Organic Hydrogen Carrier Empowered with Weighted Federated Machine Learning. *Mathematics*, *10*(20), 3846. <https://doi.org/10.3390/math10203846>
- Alnes, O., Eriksen, S., & Vartdal, B.-J. (2017). Battery-Powered Ships: A Class Society Perspective. *IEEE Electrification Magazine*, *5*(3), 10–21. <https://doi.org/10.1109/mele.2017.2718823>
- Antunes, J. M. G. (2014). O Shipping, o Ambiente e a Poluição Atmosférica da Costa Portuguesa. *Revista de Marinha*, 1–14.
- Ash, N., & Scarbrough, T. (2019). Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonise international shipping? *Environmental Defense Fund*, 1–63.
- Atabani, A. E., El-Sheekh, M. M., Kumar, G., & Shobana, S. (2017). Edible and Nonedible Biodiesel Feedstocks. In *Clean Energy for Sustainable Development* (pp. 507–556). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805423-9.00017-X>
- Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M., Moore, M., & Nielsen, R. B. (2021). Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, *31*, 100668. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.100668>
- Aven, T. (2018). An Emerging New Risk Analysis Science: Foundations and Implications. *Risk Analysis*, *38*(5), 876–888. <https://doi.org/10.1111/risa.12899>
- Awasthi, A., & Chauhan, S. S. (2011). Using AHP and Dempster–Shafer theory for evaluating sustainable transport solutions. *Environmental Modelling & Software*, *26*(6), 787–796. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.11.010>

- Banawan, A. A., El Gohary, M. M., & Sadek, I. S. (2010). Environmental and economical benefits of changing from marine diesel oil to natural-gas fuel for short-voyage high-power passenger ships. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 224(2), 103–113. <https://doi.org/10.1243/14750902JEME181>
- Bayraktar, H. (2008). An experimental study on the performance parameters of an experimental CI engine fueled with diesel–methanol–dodecanol blends. *Fuel*, 87(2), 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.021>
- Belderrain, M. C. N., & Oliveira, C. A. de. (2008). Considerações sobre a obtenção de vetores de prioridades no AHP. *Sistemas Boscosos y Tecnologia*, 1–18.
- Benayoun, R., Roy, B., & Sussman, N. (1966). Manual de reference du programme electre. In *Note de Synthèse et Formation*. Direction Scientifique SEMA.
- Bennani, Y., Bennani, Y., Perl, A., Patil, A., van Someren, C. E. J., Heijne, L. J. M., van Steenis, M., Patil, A., van Someren, C. E. J., Heijne, L. J. M., & van Steenis, M. (2016). *Power-to-Ammonia: Rethinking the role of ammonia – from a value product to a flexible energy carrier*. https://research.hanze.nl/ws/portalfiles/portal/9488786/45.2516824_TESIS15001_FlexNH3_final_report.pdf
- BEPA Association. (2022). *The case for solid-state batteries*. BEPA Association. <https://bepassociation.eu/the-case-for-solid-state-batteries/>. Acedido em 8 de abril de 2023.
- Bertau, M., Offermanns, H., Plass, L., Schmidt, F., & Wernicke, H.-J. (2014). *Methanol: The Basic Chemical and Energy Feedstock of the Future* (M. Bertau, H. Offermanns, L. Plass, F. Schmidt, & H.-J. Wernicke (eds.)). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39709-7>
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2018a). Clean fuel options with hydrogen for sea transportation: A life cycle approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(2), 1179–1193. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.157>

- Bicer, Y., & Dincer, I. (2018b). Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(9), 4583–4596. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.110>
- Brander, M. (2012). GHGs, CO₂, CO₂e and Carbon What Do These Mean? *Ecometrica*, 2–4. <https://ecometrica.com/assets/GHGs-CO2-CO2e-and-Carbon-What-Do-These-Mean-v2.1.pdf>
- Brans, J. P. (1982). *L'ingénierie de la décision: l'élaboration d'instruments d'aide a la décision*. Université Laval, Faculté des sciences de l'administration.
- Brinks, H. W., & Chryssakis, C. (2017). LPG as a marine fuel. *DNV GL*, 1–32. <https://www.dnv.com/Publications/lpg-as-marine-fuel-95190>
- Bromberg, L., & Cheng, W. K. (2010). *Methanol as an alternative transportation fuel in the US*. https://afdc.energy.gov/files/pdfs/mit_methanol_white_paper.pdf
- Brynolf, S., Grahn, M., Hansson, J., Korberg, A. D., & Malmgren, E. (2022). Sustainable fuels for shipping. In *Sustainable Energy Systems on Ships* (pp. 403–428). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824471-5.00017-7>
- Buitendijk, M. (2022). *Dutch navy's new support vessels will sail on methanol*. SWZ MARITIME. <https://swzmaritime.nl/news/2022/06/23/dutch-navys-new-support-vessels-will-sail-on-methanol/>. Acedido em 23 de abril de 2023.
- Bula, A. J. (2012). Syngas for Methanol Production from Palm Oil Biomass Residues Gasification. *International Journal of Thermodynamics*, 15(3), 3630–3640. <https://doi.org/10.5541/ijot.401>
- Burel, F., Taccani, R., & Zuliani, N. (2013). Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion. *Energy*, 57, 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.05.002>
- BW LPG. (2015). *Annual Report 2015*.

- Calloway, B., McWhorter, S., & James, W. (2019). Advancements in hydrogen deployment. *Hydrogen Deployment*, 26–53. www.aiche.org/cep
- Carvalho, F., Müller-Casseres, E., Poggio, M., Nogueira, T., Fonte, C., Wei, H. K., Portugal-Pereira, J., Rochedo, P. R. R., Szklo, A., & Schaeffer, R. (2021). Prospects for carbon-neutral maritime fuels production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129385>
- CE Delft, & ECORYS. (2021). *Assessment of impacts from accelerating the uptake of sustainable alternative fuels in maritime transport Final report*. https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/11/CE_Delft_Ecorys_200249_Final_Report.pdf
- CertiTecnica. (2009). *Manual do Sistema de Combustível - NPO*.
- Cheddie, D. (2012). Ammonia as a Hydrogen Source for Fuel Cells: A Review. In *Hydrogen Energy - Challenges and Perspectives* (pp. 333–362). InTech. <https://doi.org/10.5772/47759>
- Cheliotis, M., Boulougouris, E., Trivyza, N. L., Theotokatos, G., Livanos, G., Mantalos, G., Stubos, A., Stamatakis, E., & Venetsanos, A. (2021). Review on the Safe Use of Ammonia Fuel Cells in the Maritime Industry. *Energies*, 14(11), 3023. <https://doi.org/10.3390/en14113023>
- Chi, J., & Yu, H. (2018). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis*, 39(3), 390–394. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(17)62949-8)
- Cho, R. (2018). *Can Removing Carbon From the Atmosphere Save Us From Climate Catastrophe?* Columbia Climate School. <https://news.climate.columbia.edu/2018/11/27/carbon-dioxide-removal-climate-change/>. Acedido em 28 de março de 2023.
- Concawe. (2019). *Effect of Fuel Octane on the Performance of Four Euro 5 and Euro 6 Gasoline Passenger Cars*. <https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Phase-2-Effect-of-Fuel-Octane-on-the-Performance-of-Four-Euro-5-and-Euro-6-Gasoline->

- Coralli, A., Sarruf, B. J. M., de Miranda, P. E. V., Luigi Osmieri, Specchia, S., & Minh, N. Q. (2019). Fuel Cells. In *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies* (pp. 39–122). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814251-6.00002-2>
- Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P., Eyring, V., & Lauer, A. (2007). Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment. *Environmental Science & Technology*, *41*(24), 8512–8518. <https://doi.org/10.1021/es071686z>
- d'Amore-Domenech, R., & Leo, T. J. (2019). Sustainable Hydrogen Production from Offshore Marine Renewable Farms: Techno-Energetic Insight on Seawater Electrolysis Technologies. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, *7*(9), 8006–8022. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06779>
- Datta, A., Ray, A., Bhattacharya, G., & Saha, H. (2011). Green energy sources (GES) selection based on multi-criteria decision analysis (MCDA). *International Journal of Energy Sector Management*, *5*(2), 271–286. <https://doi.org/10.1108/17506221111146020>
- de-Troya, J. J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C., & Carral, L. (2016). Analysing the possibilities of using fuel cells in ships. *International Journal of Hydrogen Energy*, *41*(4), 2853–2866. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.145>
- Dempster, A. P. (1966). Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. *The Annals of Mathematical Statistics*, 325–339.
- Dempster, A. P. (1968). A Generalization of Bayesian Inference. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, *30*(2), 205–247. <http://www.jstor.org/stable/2984504>
- Deniz, C., & Zincir, B. (2016). Environmental and economical assessment of alternative marine fuels. *Journal of Cleaner Production*, *113*, 438–449. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.089>

- Depken, J., Dyck, A., Roß, L., & Ehlers, S. (2022). Safety Considerations of Hydrogen Application in Shipping in Comparison to LNG. *Energies*, 15(9), 3250. <https://doi.org/10.3390/en15093250>
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2), 1954–1971. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
- DNV GL. (2015). *In Focus - The Future is Hybrid*. https://issuu.com/dnvgl/docs/in_focus-the_future_is_hybrid
- DNV GL. (2019). *Comparison of Alternative Marine Fuels*. https://sea-lng.org/wp-content/uploads/2020/04/Alternative-Marine-FuelsStudy_final_report_25.09.19.pdf
- DNV GL. (2020). Ammonia as a Marine Fuel. *Group Technology & Research, White Paper 2020*, 1–28. <https://www.dnv.com/Publications/ammonia-as-a-marine-fuel-191385>
- DNV GL. (2022). *Alternative Fuels For Naval Vessels*. 1–69. <https://www.dnv.com/maritime/publications/alt-fuels-navy.html>
- DNV GL. (2023). *Methanol as fuel heads for the mainstream in shipping*. *Maritime Impact*. <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Methanol-as-fuel-heads-for-the-mainstream-in-shipping.html>. Acedido em 28 de julho de 2023.
- Echandia. (2022). *Why is LTO an inherently safe battery?* <https://echandia.se/insights/article/why-is-lto-an-inherently-safe-battery/>. Acedido em 19 de abril de 2023.
- Edwards, W. (1977). How to Use Multiattribute Utility Measurement for Social Decisionmaking. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7(5), 326–340. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1977.4309720>
- El-Gohary, M. M. (2012). The future of natural gas as a fuel in marine gas turbine for LNG carriers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M*:

- Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 226(4), 371–377.
<https://doi.org/10.1177/1475090212441444>
- ELGAS. (2020). *A quick guide on LPG*. <https://www.elgas.com.au/blog/453-the-science-a-properties-of-lpg/>
- Elgohary, M. M., Seddiek, I. S., & Salem, A. M. (2015). Overview of alternative fuels with emphasis on the potential of liquefied natural gas as future marine fuel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 229(4), 365–375.
<https://doi.org/10.1177/1475090214522778>
- Ellis, J., & Tanneberger, K. (2015). Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping. In *SSPA Project Number: 20157412 SSPA*.
<https://eibip.eu/wp-content/uploads/2018/01/Study-on-the-use-of-ethyl-and-methyl-alcohol-as-alternative-fuels.pdf>
- EMSA, & DNV GL. (2020). Study on electrical energy storage for ships. In *Battery systems for maritime applications – technology, sustainability and safety*.
<http://www.emsa.europa.eu/sustainable-shipping/new-technologies/download/6186/4507/23.html>
- Energy Observer. (2021). *Our Vessel*. <https://www.energy-observer.org/about/vessel#batteries>. Acedido em 21 de março de 2023.
- Enerkem. (2023). *Promote a Circular Economy with Clean Fuels and Chemicals made from Waste*. <https://enerkem.com/process-technology/carbon-recycling/>
- Escola Naval. (n.d.). *Configurações de TG e tendências [PowerPoint Slides]*.
- European Commission. (2022). Union submission to the International Maritime Organization’s 11th Intersessional Working Group on Reduction of GHG Emissions from Ships on Updated Draft Lifecycle GHG and Carbon Intensity Guidelines for marine fuels. In *Comission Staff Working Document*.
<https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-5213-2022-INIT/en/pdf>

- European Environment Agency [EEA], & European Maritime Safety Agency [EMSA]. (2021). *European Maritime Transport Environmental Report 2021*. <https://doi.org/10.2800/3525>
- Eyring, V., Isaksen, I. S. A., Berntsen, T., Collins, W. J., Corbett, J. J., Endresen, O., Grainger, R. G., Moldanova, J., Schlager, H., & Stevenson, D. S. (2010). Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping. *Atmospheric Environment*, *44*(37), 4735–4771. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.04.059>
- Faizal, M., Chuah, L. S., Lee, C., Hameed, A., Lee, J., & Shankar, M. (2019). REVIEW OF HYDROGEN FUEL FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, *42*(3), 35–46. <https://doi.org/10.26480/jmerd.03.2019.35.46>
- Flash Battery. (2022). *Which chemistry is most suitable for the electricification of your vehicle? Let's discover the different types of batteries*. <https://www.flashbattery.tech/en/types-of-lithium-batteries-which-chemistry-use/>. Acedido em 8 de abril de 2023.
- Forman, E. H., & Selly, M. A. (2001). *Decision by Objectives* (World Scientific Books (ed.)). WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/4281>
- Franzinger, K. (2004). Environmental & safety. *Motion System Design*, *46*(12), 22–23. https://doi.org/10.1007/978-3-211-99683-6_6
- GE. (2017). *World 's First LPG Fueled Ferry Design to Use GE COmbined Gas turbine Electric and Steam System*. www.ge.com/marine. Acedido em 5 de maio de 2023.
- GE. (2022). *LM2500 Aeroderivative Gas Turbine*. https://www.ge.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/products/gas-turbines/lm2500-fact-sheet-product-specifications.pdf
- Gerpen, J. Van. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, *86*(10), 1097–1107. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.005>

- Giddey, S., Badwal, S. P. S., Munnings, C., & Dolan, M. (2017). Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 10231–10239. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b02219>
- Gissén, C., Prade, T., Kreuger, E., Nges, I. A., Rosenqvist, H., Svensson, S.-E., Lantz, M., Mattsson, J. E., Börjesson, P., & Björnsson, L. (2014). Comparing energy crops for biogas production – Yields, energy input and costs in cultivation using digestate and mineral fertilisation. *Biomass and Bioenergy*, 64, 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.061>
- Global Monitoring Laboratory. (2023). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Acedido em 28 de março de 2023.
- Goldmann, A., Sauter, W., Oettinger, M., Kluge, T., Schröder, U., Seume, J., Friedrichs, J., & Dinkelacker, F. (2018). A Study on Electrofuels in Aviation. *Energies*, 11(2), 392. <https://doi.org/10.3390/en11020392>
- Gomes Antunes, J. M., Mikalsen, R., & Roskilly, A. P. (2009). An experimental study of a direct injection compression ignition hydrogen engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(15), 6516–6522. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.05.142>
- Goodenough, J. B. (2012). Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3>
- Graetz, J. (2009). New approaches to hydrogen storage. *Chem. Soc. Rev.*, 38(1), 73–82. <https://doi.org/10.1039/B718842K>
- Guo, L. (2004). *Software quality and reliability prediction using Dempster -Shafer Theory* [West Virginia University]. https://researchrepository.wvu.edu/etd/2112/?utm_source=researchrepository.wvu.edu%2Fetd%2F2112&utm_medium=PDF&utm_campaign=PDFCoverPages
- Hamelinck, C. N., & Faaij, A. P. C. (2002). Future prospects for production of methanol

- and hydrogen from biomass. *Journal of Power Sources*, 111(1), 1–22.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(02\)00220-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(02)00220-3)
- Hansson, J., Fridell, E., & Brynolf, S. (2020). On the potential of ammonia as fuel for shipping. In *Lighthouse Reports*. www.lighthouse.nu
- Hansson, J., Månsson, S., Brynolf, S., & Grahn, M. (2019). Alternative marine fuels: Prospects based on multi-criteria decision analysis involving Swedish stakeholders. *Biomass and Bioenergy*, 126, 159–173.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.05.008>
- Harress, C. (2014). *Goodbye, Oil: US Navy Cracks New Renewable Energy Technology To Turn Seawater Into Fuel, Allowing Ships To Stay At Sea Longer*.
<https://www.ibtimes.com/goodbye-oil-us-navy-cracks-new-renewable-energy-technology-turn-seawater-fuel-allowing-1568455>. Acedido em 21 de março de 2023.
- Hasan, M. M., & Rahman, M. M. (2017). Performance and emission characteristics of biodiesel–diesel blend and environmental and economic impacts of biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 938–948.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.045>
- Herdzik, J. (2011). LNG as a marine fuel - possibilities and problem. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 18(2), 169–176.
- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2020). Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. *International Journal of Energy Research*, 44(6), 4110–4131. <https://doi.org/10.1002/er.4930>
- Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making* (1^a, Vol. 186). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Hydrocarbon Processing. (2020, 7 de setembro). World’s largest green hydrogen project will supply 650 tons per day of carbon-free hydrogen for transportation globally. *Hydrocarbon Processing*.
<https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2020/07/world-s-largest-green->

hydrogen-project-will-supply-650-tons-per-day-of-carbon-free-hydrogen-for-transportation-globally

IEA. (2012). *Liquefied Petroleum Gas*. https://iea-amf.org/content/fuel_information/lpg.
Acedido em 7 de abril de 2023.

IEA. (2019). The Future of Hydrogen. In *The Future of Hydrogen*. OECD.
<https://doi.org/10.1787/1e0514c4-en>

IEA. (2023). *Methanol*. https://iea-amf.org/content/fuel_information/methanol. Acedido em 9 de abril de 2023.

IMO. (2008). Resolution MEPC.176(58). *Revised MARPOL Annex VI*, 46.

IMO. (2009). *Resolution MSC.285(86)* (Vol. 11).
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.285\(86\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.285(86).pdf)

IMO. (2011a). *Resolution MEPC.203(62)*. 203.

IMO. (2011b). IMO and the Environment. In *IMO*.
[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/IMO and the Environment 2011.pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/IMO%20and%20the%20Environment%202011.pdf)

IMO. (2016). Annex 18 - Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk. *RESOLUTION MSC.420(97)*. <https://edocs.imo.org/Final>

IMO. (2019). *Special Areas under MARPOL*.
<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Special-Areas-Marpol.aspx>

IMO. (2020). Fourth IMO Greenhouse Gas Study: Executive Summary. *IMO Greenhouse Gas Study*, 4, 46.

IMO. (2022). *Marine Environment Protection Committee (MEPC) – 79th session*.
<https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-79th-session.aspx>

- IMO. (2023a). *Brief History of IMO*.
<https://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>
- IMO. (2023b). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*.
[https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
- Innovation & Technology Network of WLPGA. (2021). *LPG for Marine Engines*. 1–152.
<https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2018/02/LPG-for-Marine-Engines-2017-.pdf>
- International Energy Agency [IEA]. (2022). *Global CO₂ emissions in transport by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2070*.
<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-in-transport-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2070>
- International Group of Liquefied Natural Gas Importers. (2019). *Basic Properties of LNG*.
https://giignl.org/sites/default/files/PUBLIC_AREA/About_LNG/4_LNG_Basics/giignl2019_infopapers1.pdf
- International Registries. (2021). *World's First Fleet of Dual-Fuel LPG Powered Ships*.
<https://www.register-iri.com/blog/worlds-first-fleet-of-dual-fuel-lpg-powered-ships/>. Acedido em 7 de abril de 2023.
- IPCC. (2007). *IPCC Fourth Assessment Report (AR4)*.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr.pdf
- IRENA, & Methanol Institute. (2021). Innovation Outlook: Renewable Methanol. *International Renewable Energy Agency*, 1–124.
- ISO. (1985). *ISO 5807-1985 - Information Processing*.
- ISO. (2018). *ISO 4264:2018 Petroleum products — Calculation of cetane index of middle-distillate fuels by the four variable equation*.
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:4264:ed-3:v1:en>

- ISO. (2019). *ISO 14687:2019 Hydrogen fuel quality — Product specification*.
- Istrate, I., Iribarren, D., Dufour, J., Ortiz Cebolla, R., Arrigoni, A., Moretto, P., & Dolci, F. (2022). Quantifying Emissions in the European Maritime Sector - A review on life cycle assessments of maritime systems combined with an analysis of the THETIS-MRV portal. In *JRC Technical Report*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2760/496363>
- Jääskeläinen, H. (2007). *Fuel Property Testing: Ignition Quality*. https://dieselnet.com/tech/fuel_diesel_ignition.php. Acedido em 6 de maio de 2023.
- Jaichandar, S., & Annamalai, K. (2011). The Status of Biodiesel as an Alternative Fuel for Diesel Engine – An Overview. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 2, 71–75.
- Kabir, S., & Papadopoulos, Y. (2018). A review of applications of fuzzy sets to safety and reliability engineering. *International Journal of Approximate Reasoning*, 100, 29–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2018.05.005>
- Kalghatgi, G. T. (2001). Fuel Anti-Knock Quality - Part I. Engine Studies. *SAE Technical Papers*, 1–14. <https://doi.org/10.4271/2001-01-3584>
- Kass, M. D., Abdullah, Z., Bidy, M. J., Drennan, C., Haq, Z., Hawkins, T., Jones, S., Holliday, J., Longman, D. E., Menter, S., Newes, E., Theiss, T. J., Thompson, T., & Wang, M. (2018). Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping. In *Oak Ridge National Laboratory*. <https://doi.org/10.2172/1490575>
- Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with Multiple Objectives*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139174084>
- Kjartansson, S. (2011). *A Feasibility Study on LPG as Marine Fuel*. 48. <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/158299.pdf>
- Klevstrand, A. (2023). *World's first hydrogen ferry gears up for operation this spring, but will it be in Norway or the US?*

<https://www.hydrogeninsight.com/transport/world-s-first-hydrogen-ferry-gears-up-for-operation-this-spring-but-will-it-be-in-norway-or-the-us-/2-1-1420765>.

Acedido em 21 de março de 2023.

- Lack, D. A., & Corbett, J. J. (2012). Black carbon from ships: a review of the effects of ship speed, fuel quality and exhaust gas scrubbing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(9), 3985–4000. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3985-2012>
- Lammel, G., & Graßl, H. (1995). Greenhouse effect of NOX. *Environmental Science and Pollution Research*, 2(1), 40–45. <https://doi.org/10.1007/BF02987512>
- Le Fevre, C. (2018). *A review of demand prospects for LNG as a marine transport fuel*. <https://doi.org/10.26889/9781784671143>
- Leffler, W. L. (2015). Natural gas liquids: a nontechnical guide. *Choice Reviews Online*, 52(08), 52-4234-52-4234. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.188142>
- Lehmann, A., Knudsen, P., Bentzen, K., & Laugesen, M. S. (2014). *Biodiesel Application for Freight Transport*. http://www2.htk.dk/Teknik_og_miljoecenter/HTK-going-green/Going-Green-dokumenter/5-7-3-Biodiesel.pdf
- Leite, P. P. (2020). *Estado da Arte e Análise Comparativa de Sistemas de Propulsão de Emissões RED*.
- Levasseur, S. (2017). *Insights into NMC degradation processes for high energy systems: How far can we push?* http://cii-resource.com/cet/AABE-03-17/Presentations/BTMT/Levasseur_Stephane.pdf
- Li, H., Mehmood, D., Thorin, E., & Yu, Z. (2017). Biomethane Production Via Anaerobic Digestion and Biomass Gasification. *Energy Procedia*, 105, 1172–1177. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.490>
- Lin, L., Cunshan, Z., Vittayapadung, S., Xiangqian, S., & Mingdong, D. (2011). Opportunities and challenges for biodiesel fuel. *Applied Energy*, 88(4), 1020–1031. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.029>

- Lindstad, E., Lagemann, B., Riialand, A., Gamlem, G. M., & Valland, A. (2021). Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 101, 103075. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075>
- Liquid Gas Europe. (2021). *BIOGPL - Uma via renovável para 2050*. 1–15. https://www.apetro.pt/folder/galeria/ficheiro/22_biolpg_mlt5y5tel7.pdf
- Liu, H.-C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Loginow, A. W. (1989). *Stress Corrosion Cracking of Steel in Liquefied Ammonia Service - A Recapitulation*. NBBI. <https://www.nationalboard.org/PrintPage.aspx?pageID=182>
- Ludwig, E. E. (1999). Process Safety and Pressure-Relieving Devices. In E. E. Ludwig (Ed.), *Applied Process Design for Chemical & Petrochemical Plants* (Volume 1, pp. 399–546). [https://doi.org/10.1016/S1874-8635\(99\)80008-9](https://doi.org/10.1016/S1874-8635(99)80008-9)
- Luning Prak, D., Cooke, J., Dickerson, T., McDaniel, A., & Cowart, J. (2021). Cetane number, derived cetane number, and cetane index: When correlations fail to predict combustibility. *Fuel*, 289, 119963. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119963>
- MAN B&W. (2016). *The ME-LGI Concept. Liquid Gas Injection Engine*. https://marine.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/me-lgi-engines.pdf?sfvrsn=ce48ac0e_2
- MAN Energy Solutions. (2022a). Alternative fuels [PowerPoint Slides]. *Technical Update Seminar*.
- MAN Energy Solutions. (2022b). *Methanol in shipping*. <https://www.man-es.com/campaigns/download-Q3-2023/Download/methanol-in-shipping/d8358bd6-c66e-4dce-8656-4237259c5338/Methanol-Paper-SF>
- Mao, X., & Rutherford, D. (2018). *Delineating a Chinese emission control area*.

September, 27. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16200.16640>

Marie-Rose, S. C., Chornet, E., Lynch, D., & Lavoie, J.-M. (2011). From biomass-rich residues into fuels and green chemicals via gasification and catalytic synthesis. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 143, 123–132. <https://doi.org/10.2495/ESUS110111>

Marina Militare. (2018). *Biofuels – Green Diesel*. https://www.marina.difesa.it/EN/facts/greenfleet/Pagine/Alternative_fuels.aspx.
Acedido em 16 de março de 2023.

Marine Environment Protection Committee [MEPC]. (2009). *Guidelines for Voluntary Use of the Ship Energy Efficiency Operational Indicator (EEOI)*. 1–12.

Marinha Portuguesa. (n.d.). *Relatório Provas de Mar SAT-STR 238.04.01 - Instalação Propulsora*.

Marinha Portuguesa. (2007). *Requisitos Operacionais do Navio Patrulha Oceânico* (Vol. 5).

Marinha Portuguesa. (2020). *Manual de Manobra das Unidades Navais da Classe Viana do Castelo*.

Marinha Portuguesa. (2023). *NRP Setúbal*. https://www.marinha.pt/pt/os_meios/patruhaseceanicos/Paginas/nrp-setubal.aspx.
Acedido em 5 de junho de 2023.

Matthias, V., Bewersdorff, I., Aulinger, A., & Quante, M. (2010). The contribution of ship emissions to air pollution in the North Sea regions. *Environmental Pollution*, 158(6), 2241–2250. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.02.013>

McDermott, R. E., Mikulak, R. J., & Beauregard, M. R. (2008). *The Basics of FMEA* (2^a). CRC Press.

Mckinlay, C. J., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2020). *A Comparison of Hydrogen and Ammonia for Future Long Distance Shipping Fuels*.

- Measurement Canada. (2017). *Volume Correction Factors to 15°C for Methanol (Methyl Alcohol Anhydrous)*. [https://www.competitionbureau.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/vwapj/VCF-FCV_CAS-67-56-1.pdf/\\$file/VCF-FCV_CAS-67-56-1.pdf](https://www.competitionbureau.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/vwapj/VCF-FCV_CAS-67-56-1.pdf/$file/VCF-FCV_CAS-67-56-1.pdf)
- Melcher, B. U., George, M., & Paetz, C. (2021). Liquid Organic Hydrogen Carriers - A technology to overcome common risks of hydrogen storage. *Hydrogenious LOHC Technologies GmbH*, 1–7. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095495615000546?via%3Dihub>
- MEPC. (2018). MEPC.304(72) - Initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. *IMO Publication*, 1–11. <http://www.imo.org>
- MEPC. (2021). Annex 1: Resolution MPEEC.328(76). *IMO Publication*, 1–88.
- Methanol Institute. (2017). *Methanol Safe Handling Manual - Health and Safety Module (4^a)*. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2017/03/Safe-Handling-Manual.pdf>
- Ming, L., & Li, C. (2021). Methanol as a Marine Fuel - Availability and Sea Trial Considerations. *Nanyang Technological University*, 1–36. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/SG-NTU-methanol-marine-report-Jan-2021.pdf>
- Ministério da Defesa Nacional. (2020). Despacho n° 10276-A/2020. *Diário Da República, 2.^a Série, N° 207, de 23 de Outubro de 2020, 3, 629-(3)-629-(4)*. <https://dre.pt/dre/detalhe/despacho/10276-a-2020-146244093>
- Miola, A., Ciuffo, B., Giovine, E., & Marra, M. (2010). Regulating Air Emissions from Ships: The State of the Art on Methodologies , Technologies and Policy Options. In *JRC Reference Reports*. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.2788/4171>
- Mohd Noor, C. W., Noor, M. M., & Mamat, R. (2018). Biodiesel as alternative fuel for marine diesel engine applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94*, 127–142. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.031>

- Moirangthem, K. (2016). Alternative Fuels for Marine and Inland Waterways. In *European Commission - Joint Research Centre Technical Reports*. <https://doi.org/10.2790/227559>
- Moita, M. (2023). *BLEVE vs HIT*. Matérias Perigosas. <https://intervir.pt/2023/02/09/bleve-vs-hit/>. Acedido em 7 de abril de 2023.
- Murillo, S., Míguez, J. L., Porteiro, J., Granada, E., & Morán, J. C. (2007). Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines. *Fuel*, 86(12–13), 1765–1771. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.031>
- Nakagawa, H., Sakai, M., Harada, T., Ichinose, T., Takeno, K., Matsumoto, S., Kobayashi, M., Matsumoto, K., & Yakushido, K. (2011). Biomethanol Production from Forage Grasses, Trees, and Crop Residues. In *Biofuel's Engineering Process Technology* (pp. 715–732). InTech. <https://doi.org/10.5772/18168>
- National Center for Biotechnology Information. (2023). *Methanol*. PubChem. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methanol#section=Density>. Acedido em 15 de abril de 2023.
- New Jersey Health Department. (2015). Hazardous Safety Data Sheet: Propane. In *Hazardous Substance Fact Sheet*.
- Niaz, S., Manzoor, T., & Pandith, A. H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 457–469. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011>
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597–611. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- NIOSH. (2019). *Ammonia*. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0028.html>. Acedido em 26 de março de 2023.
- Nogueira, C., Gano, A. J., & Rangel, C. M. (2021). Baterias de Ião-Lítio - Materiais , Componentes , Integração e Desafios. *Unidade de Materiais Para a Energia*, 1–8.

- Noureldin, M. M. B., Elbashir, N. O., Gabriel, K. J., & El-Halwagi, M. M. (2015). A Process Integration Approach to the Assessment of CO₂ Fixation through Dry Reforming. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(4), 625–636. <https://doi.org/10.1021/sc5007736>
- NRL. (2023). *Liquefied Petroleum Gas (LPG)*. <https://www.nrl.co.in/upload/nrlLPG-Specifications.pdf>
- Nuchturee, C., Li, T., & Xia, H. (2020). 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>
- Office of Response and Restoration. (2022). *Threshold Limit Values (TLVs)*. NORA. <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/resources/threshold-limit-values-tlvs.html>. Acedido em 19 de abril de 2023.
- Ogunkunle, O., & Ahmed, N. A. (2020). Exhaust emissions and engine performance analysis of a marine diesel engine fuelled with Parinari polyandra biodiesel–diesel blends. *Energy Reports*, 6, 2999–3007. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.10.070>
- Olah, G. A. (2005). *Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy* (3^a, Vol. 44, Issue 18). Wiley. <https://doi.org/10.1002/anie.200462121>
- Oloruntobi, O., Chuah, L. F., Mokhtar, K., Gohari, A., Onigbara, V., Chung, J. X., Mubashir, M., Asif, S., Show, P. L., & Han, N. (2023). Assessing methanol potential as a cleaner marine fuel: An analysis of its implications on emissions and regulation compliance. *Cleaner Engineering and Technology*, 14, 100639. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100639>
- Öner, C., & Altun, Ş. (2009). Biodiesel production from inedible animal tallow and an experimental investigation of its use as alternative fuel in a direct injection diesel engine. *Applied Energy*, 86(10), 2114–2120. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.005>
- Onorati, A., Payri, R., Vaglieco, B., Agarwal, A., Bae, C., Bruneaux, G., Canakci, M., Gavaises, M., Günthner, M., Hasse, C., Kokjohn, S., Kong, S.-C., Moriyoshi, Y.,

- Novella, R., Pesyridis, A., Reitz, R., Ryan, T., Wagner, R., & Zhao, H. (2022). The role of hydrogen for future internal combustion engines. *International Journal of Engine Research*, 23(4), 529–540. <https://doi.org/10.1177/14680874221081947>
- Overstreet, R., & Giauque, W. F. (1937). Ammonia. The Heat Capacity and Vapor Pressure of Solid and Liquid. Heat of Vaporization. The Entropy Values from Thermal and Spectroscopic Data. *Journal of the American Chemical Society*, 59(2), 254–259. <https://doi.org/10.1021/ja01281a008>
- Patel, N. K., & Shah, S. N. (2015). Biodiesel from Plant Oils. In *Food, Energy, and Water* (pp. 277–307). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800211-7.00011-9>
- Patrício, P., Baptista, J. dos S., & Bateira, C. (2010). BLEVE of a road tanker LPG - A Short Review. *International Symposium on Occupational Safety Hygiene*, 433–437. <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/67387/2/70397.pdf>
- Peng Wu, & Richard Bucknall. (2016). Marine propulsion using battery power. *Shipping in Changing Climates Conference 2016*, 1–10.
- Pereira, T. C., Amaro, A., Borges, M., Silva, R., Seabra, T., & Canaveira, P. (2022). National Inventory Report Portugal. In *Agência Portuguesa do Ambiente*. https://apambiente.pt/sites/default/files/_Clima/Inventarios/20221025NIR2022JulyCorrigendum.pdf
- Peters, J. F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., & Weil, M. (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 491–506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>
- PGW. (2015). *Safety Data Sheet: Liquefied Natural Gas (LNG)*. <https://www.pgworks.com/uploads/pdfs/LNGSafetyData.pdf>
- Pothaar, M. R. J., Geertsma, R. D., & Reurings, J. . (2022). Energy transition for the replacement Air Defense and Command Frigate. *Proceedings of the International Naval Engineering Conference*, 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.24868/10655>

- PUMA Energy. (2013). Safety Data Sheet - Biodiesel. In *Material Safety Data Sheet*.
https://us.vwr.com/assetsvc/asset/en_US/id/16490607/contents
- Putzig, M., Gonzalez, J., Moriarty, K., Bennett, J., Brown, A., & Rahill, M. (2021). Fuel Properties Comparison. *Alternative Fuels Data Center*, 100(c), 1–3.
https://www.researchgate.net/publication/228787542_Energy_and_greenhouse_gas_emissions_impacts_of_fuel_ethanol
- Randall, C. (2021). *First ship fitted with ZES battery containers hits the water*. Electrive.Com. <https://www.electrive.com/2021/09/08/first-inland-vessel-fitted-with-zes-battery-containers-hits-the-water/>. Acedido em 8 de abril de 2023.
- Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršienė, N., & Starevičius, M. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 513–525. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.052>
- Rata, V., Gasparotti, C., & Rusu, L. (2017). The Importance of the Reduction of Air Pollution in the Black Sea Basin. *Mechanical Testing and Diagnosis*, 2, 2017. <https://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/mtd/article/view/2238>
- Reiter, A. J., & Kong, S.-C. (2008). Demonstration of Compression-Ignition Engine Combustion Using Ammonia in Reducing Greenhouse Gas Emissions. *Energy & Fuels*, 22(5), 2963–2971. <https://doi.org/10.1021/ef800140f>
- Reiter, A. J., & Kong, S.-C. (2011). Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel. *Fuel*, 90(1), 87–97. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.055>
- Ren, J., & Liang, H. (2017). Measuring the sustainability of marine fuels: A fuzzy group multi-criteria decision making approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.05.004>
- Ren, J., & Lützen, M. (2017). Selection of sustainable alternative energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1003–1019.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.057>

- Rivard, E., Trudeau, M., & Zaghbi, K. (2019). Hydrogen Storage for Mobility: A Review. *Materials*, 12(12), 1973. <https://doi.org/10.3390/ma12121973>
- Rodrigue, J.-P. (2020). The Geography of Transport Systems. In *The Geography of Transport Systems* (5^a). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429346323>
- Rose, H. (2022). *Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (NCA) in Lithium-Ion Battery Applications*. Nanografi. <https://nanografi.com/blog/lithium-nickel-cobalt-aluminum-oxide-nca-in-lithiumion-battery-applications/>. Acedido em 18 de abril de 2023.
- Roskilly, A. P., Nanda, S. K., Wang, Y. D., & Chirkowski, J. (2008). The performance and the gaseous emissions of two small marine craft diesel engines fuelled with biodiesel. *Applied Thermal Engineering*, 28(8–9), 872–880. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.07.007>
- Saaty, R. W. (1987a). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, R. W. (1987b). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-1)
- Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, 145(1), 85–91. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8)
- Saaty, T. L. (2004). Decisio Making - The Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35.

<https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>

Saaty, T. L., & Kearns, K. P. (1985). Analytical Planning. In *The Journal of the Operational Research Society* (1^a, Vol. 7, Issue 10). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/C2013-0-03782-6>

Sachitanad, R. (2021). *LFP or NMC batteries – which solution is better for maritime?* Echandia. <https://echandia.se/insights/article/lfp-nmc-batteries/>. Acedido em 8 de abril de 2023.

Safari, F., & Dincer, I. (2020). A review and comparative evaluation of thermochemical water splitting cycles for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*, 205(October 2019), 112182.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112182>

Saffers, J.-B., & Molkov, V. V. (2014). Hydrogen safety engineering framework and elementary design safety tools. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(11), 6268–6285. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.06.060>

Sajjadi, B., Raman, A. A. A., & Arandiyan, H. (2016). A comprehensive review on properties of edible and non-edible vegetable oil-based biodiesel: Composition, specifications and prediction models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 63, 62–92. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.035>

Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., & Hirscher, M. (2007). Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(9), 1121–1140. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.11.022>

Saleh, H. E. (2008). Effect of variation in LPG composition on emissions and performance in a dual fuel diesel engine. *Fuel*, 87(13–14), 3031–3039.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.007>

Santos, N. A. A. M. P. (2022). *Qual o futuro do hidrogénio na Marinha?* (pp. 1–73).

Schipper, F., Erickson, E. M., Erk, C., Shin, J.-Y., Chesneau, F. F., & Aurbach, D. (2017). Review—Recent Advances and Remaining Challenges for Lithium Ion

- Battery Cathodes. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(1), A6220–A6228.
<https://doi.org/10.1149/2.0351701jes>
- Schlapbach, L., & Züttel, A. (2010). Hydrogen-storage materials for mobile applications. In *Materials for Sustainable Energy* (Vol. 414, pp. 265–270). Co-Published with Macmillan Publishers Ltd, UK.
https://doi.org/10.1142/9789814317665_0038
- Schröder, J., Müller-Langer, F., Aakko-Saksa, P., Winther, K., Baumgarten, W., & Lindgren, M. (2020). *Methanol as Motor Fuel*. https://www.iea-amf.org/app/webroot/files/file/Annex%0AReports/AMF_Annex_56.pdf
- Scipioni, A., Saccarola, G., Centazzo, A., & Arena, F. (2002). FMEA methodology design, implementation and integration with HACCP system in a food company. *Food Control*, 13(8), 495–501. [https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(02\)00029-4](https://doi.org/10.1016/S0956-7135(02)00029-4)
- Sentz, K., & Ferson, S. (2002). Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory. In *Sandia National Laboratories*. <https://doi.org/10.2172/800792>
- SGS. (2020). *Methanol: Properties*. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/SGS-INSPIRE-Methanol-Properties-and-Uses-Technical-Report.pdf>
- Shafer, G. (1976). *A Mathematical Theory of Evidence* (1st ed.). Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv10vm1qb>
- Shahid, E. M., & Jamal, Y. (2011). Production of biodiesel: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4732–4745.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.079>
- Sharma, D. C. (2006). Ports in a storm. *Environmental Health Perspectives*, 114, 1–10.
<http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203>
- Ship Technology. (2010). *Viking Lady Offshore Supply Vessel*. Ship Technology. <https://www.ship-technology.com/projects/viking-lady/>. Acedido em 29 de março de 2023.

- Skybrary. (2021). *Auto-ignition Temperature*. <https://skybrary.aero/articles/auto-ignition-temperature>. Acedido em 28 de março de 2023.
- Smith, A. ., & Klosek, J. (2001). A review of air separation technologies and their integration with energy conversion processes. *Fuel Processing Technology*, 70(2), 115–134. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00131-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00131-X)
- Song, R., Liu, J., Wang, L., & Liu, S. (2008). Performance and Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Methanol. *Energy & Fuels*, 22(6), 3883–3888. <https://doi.org/10.1021/ef800492r>
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA From Theory to Execution (2ª)*. ASQ Quality Press.
- Stauffer, E., Dolan, J. A., & Newman, R. (2008a). Chemistry and Physics of Fire and Liquid Fuels. In *Fire Debris Analysis* (pp. 85–129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012663971-1.50008-7>
- Stauffer, E., Dolan, J. A., & Newman, R. (2008b). Flammable and Combustible Liquids. In *Fire Debris Analysis* (pp. 199–233). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012663971-1.50011-7>
- Stępień, Z. (2021). A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges. *Energies*, 14(20), 6504. <https://doi.org/10.3390/en14206504>
- Stolark, J. (2016, 22 de janeiro). U.S. Navy Deploys ‘Great Green Fleet’ in Bid to Reduce Military Energy Use. *EESI*. <https://www.eesi.org/articles/view/u.s.-navy-deploys-great-green-fleet-in-bid-to-reduce-military-energy-use>
- Stöppler, M. C. (n.d.). *Definition of Toxicity*. RxList. Retrieved April 10, 2023, from <https://www.rxlist.com/toxicity/definition.htm>
- Strande, R., & Johnsson, T. (2013). Completing the LNG value chain. *Wärtsilä Technical Journal*, 32–41. <https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/ogi/lng-solutions/article-id-2013-01-lng-value-chain.pdf>

- Svanberg, M., Ellis, J., Lundgren, J., & Landälv, I. (2018). Renewable methanol as a fuel for the shipping industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *94*, 1217–1228. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.058>
- Taherdoost, H., & Madanchian, M. (2023). Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. *Encyclopedia*, *3*(1), 77–87. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010006>
- Tornatore, C., Marchitto, L., Sabia, P., & De Joannon, M. (2022). Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. *Frontiers in Mechanical Engineering*, *8*, 1–16. <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.944201>
- Tosh, J. D., Moulton, D. S., & Moses, C. A. (1992). Navy Fuel Specification Standardization. In *Interim Report BFLRF No.225*.
- Tunér, M., Aakko-Saksa, P., & Molander, P. (2018). *Engine Technology, Research, and Development for Methanol in Internal Combustion Engines*. <https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2018/05/SUMMETH-3-Engine-Technology.pdf>
- Tvete, H. A. (2021). *Are solid-state batteries the holy grail for 2030?* DNV. <https://www.dnv.com/to2030/technology/are-solid-state-batteries-the-holy-grail-for-2030.html>. Acedido em 18 de abril de 2023.
- Ulvestad, A. (2018). *A Brief Review of Current Lithium Ion Battery Technology and Potential Solid State Battery Technologies*. 1–17. <http://arxiv.org/abs/1803.04317>
- UNFCCC. (n.d.). *Conference of the Parties (COP)*. Retrieved March 7, 2023, from <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>. Acedido em 7 de março de 2023.
- United Nations Publications. (2020). *Review of Maritime Transport*. https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2020_en.pdf
- Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I. F., & Bowen, P. J. (2018).

- Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 63–102. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
- VALERO. (2014). *Safety data sheet - Marine Gas Oil*. <https://www.valero.com/sites/default/files/valero-documents/Marine-Gas-Oil-US-English-913951.pdf>
- Van Hoecke, L., Laffineur, L., Campe, R., Perreault, P., Verbruggen, S. W., & Lenaerts, S. (2021). Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. *Energy & Environmental Science*, 14(2), 815–843. <https://doi.org/10.1039/D0EE01545H>
- Vandebroek, L., & Berghmans, J. (2012). Safety Aspects of the use of LNG for Marine Propulsion. *Procedia Engineering*, 45, 21–26. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.114>
- Verhelst, S., Turner, J. W., Sileghem, L., & Vancoillie, J. (2019). Methanol as a fuel for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 70, 43–88. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.10.001>
- Vogt, K. A., Andreu, M. G., Vogt, D. J., Sigurdardottir, R., Edmonds, R. L., Schiess, P., & Hodgson, K. (2005). Societal values and economic return added for forest owners by linking forests to bioenergy production. *Journal of Forestry*, 103(1), 21–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1093/jof/103.1.21>
- Vries, N. (2019). *Ammonia as marine fuel*. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Abe8cbe0a-28ec-4bd9-8ad0-648de04649b8>
- Wang, Y., & Wright, L. A. (2021). A Comparative Review of Alternative Fuels for the Maritime Sector: Economic, Technology, and Policy Challenges for Clean Energy Implementation. *World*, 2(4), 456–481. <https://doi.org/10.3390/world2040029>
- Wang, Y., Yang, J.-B., & Xu, D.-L. (2006). Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach. *European Journal of Operational Research*, 174(3), 1885–1913. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.09.059>

- Wärtsilä Corporation. (n.d.). *Offshore references*.
<https://www.wartsila.com/marine/customer-segments/references/offshore/viking-lady>. Acedido em 8 de abril de 2023.
- Wärtsilä Corporation. (2020). *What does an ammonia-ready vessel look like?* Wärtsilä.
<https://www.wartsila.com/media/news/01-12-2020-what-does-an-ammonia-ready-vessel-look-like--2825961>. Acedido em 22 de março de 2023.
- Wärtsilä Corporation. (2022). *WÄRTSILÄ 34SG-LPG*.
https://www.wartsila.com/docs/default-source/energy-docs/technology-products/product-leaflets/wartsila-34sg-lpg.pdf?sfvrsn=77d8144_17.
- Wärtsilä Corporation. (2023). *The Wärtsilä 32 Methanol Engine*.
<https://cdn.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/Wartsila-32-Methanol-leaflet.pdf>
- Wee, J.-H. (2007). Applications of proton exchange membrane fuel cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(8), 1720–1738.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.01.005>
- Wingrove, M. (2021). *Singapore leads the way with LNG-powered tugs*. Riviera.
<https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/singapore-leads-the-way-with-lng-powered-tugs-63320>. Acedido em 29 de março de 2023.
- WLPGA. (2017). *Guide to LPG Use in Waterborne Vessels*.
<https://www.wlpga.org/wp-content/uploads/2017/02/Guide-to-LPG-Use-in-Water-Borne-Vessels-20171.pdf>
- Yang, C.-J., & Jackson, R. B. (2012). China's growing methanol economy and its implications for energy and the environment. *Energy Policy*, 41, 878–884.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.037>
- Yartys, V. A., Lototsky, M. V., Akiba, E., Albert, R., Antonov, V. E., Ares, J. R., Baricco, M., Bourgeois, N., Buckley, C. E., Bellosta von Colbe, J. M., Crivello, J.-C., Cuevas, F., Denys, R. V., Dornheim, M., Felderhoff, M., Grant, D. M., Hauback, B. C., Humphries, T. D., Jacob, I., ... Zhu, M. (2019). Magnesium based

- materials for hydrogen based energy storage: Past, present and future. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(15), 7809–7859. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.212>
- Yeo, S.-J., Kim, J., & Lee, W.-J. (2022). Potential economic and environmental advantages of liquid petroleum gas as a marine fuel through analysis of registered ships in South Korea. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129955. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129955>
- Yoe, C. (2019). *Principles of Risk Analysis* (2^a). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429021121>
- Yu, C., Ganapathy, S., Eck, E. R. H. van, Wang, H., Basak, S., Li, Z., & Wagemaker, M. (2017). Accessing the bottleneck in all-solid state batteries, lithium-ion transport over the solid-electrolyte-electrode interface. *Nature Communications*, 8(1), 1086. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01187-y>
- Yusop, A. F., Mamat, R., Sudrajad, A., & Yasin, M. H. M. (2013). Characteristic of Particulate Matter (PM) of Diesel Engine Using Palm Oil Methyl Ester (PME) Fuel. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 7(4), 464–467. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2013.1347>
- Zeng, K., & Zhang, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 307–326. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>

Apêndices

Apêndice A – Processos de Produção dos Combustíveis em Análise

Biodiesel/Diesel Sintético

As matérias-primas utilizadas para a produção de Biodiesel consistem em óleos e gorduras de origem vegetal e animal, podendo estas ser classificadas em quatro grupos: óleos vegetais comestíveis; óleos vegetais não comestíveis; óleos usados e reciclados; e ainda gorduras animais (Atabani et al., 2017).

Estes óleos são ésteres de ácidos gordos quimicamente complexos, com elevado peso molecular e viscosidade, propriedades associadas a problemas na pulverização e injeção em motores diesel. Por forma a superar esta incompatibilidade, é necessária a divisão das moléculas em estruturas mais simples, obtendo um fluido com viscosidade semelhante ao MGO. A divisão pode ocorrer através de diversos processos, como a diluição, pirólise, micro-emulsão e transesterificação. Este último é o mais comum na produção de Biodiesel, pelo que será o único abordado no presente trabalho (Jaichandar & Annamalai, 2011).

O processo de transesterificação envolve diversas reações químicas reversíveis e consecutivas, entre as gorduras vegetais ou animais, um álcool, como o metanol ou etanol e ainda um catalisador (Gerpen, 2005; Shahid & Jamal, 2011). Este processo converte sucessivamente os triglicerídeos em ésteres e glicerol (Figura 17). Os ésteres são produtos da reação correspondendo ao biodiesel. O glicerol é um subproduto com elevada aplicação na indústria farmacêutica e cosmética.

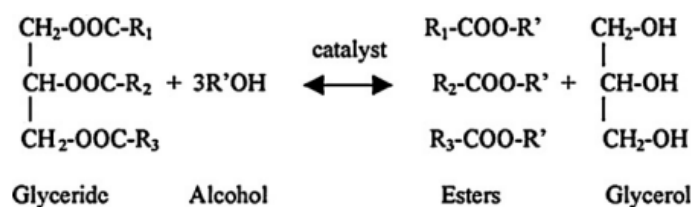


Figura 17 . Processo de Transesterificação (Shahid & Jamal, 2011)

Relativamente à produção de Diesel Sintético, esta baseia-se no processo de *Fischer-Tropsch* (FT). Este consiste num processo químico para obter hidrocarbonetos líquidos através de um gás de síntese (mistura de CO e H₂), como apresentado na Figura 18. O CO₂ renovável pode ser proveniente de um *Direct Air Capture* (DAC) ou de biomassa, enquanto o hidrogénio verde é produzido através de tecnologias como a eletrólise da água. Uma desvantagem significativa do diesel sintético é a sua atual falta de desenvolvimento e oferta no mercado. A produção em larga escala ainda é incipiente, tornando-o menos acessível (Pothaar et al., 2022).

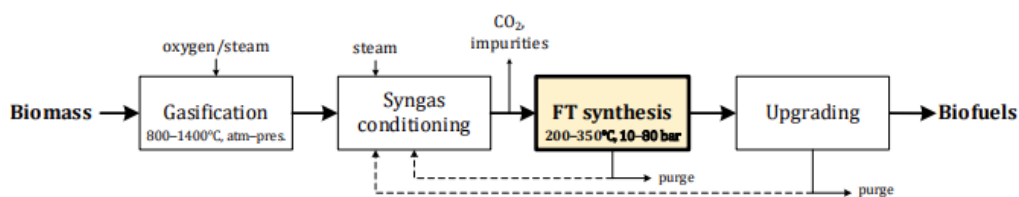


Figura 18 – Processo Fischer-Tropsch (Brynolf et al., 2022)

Hidrogénio

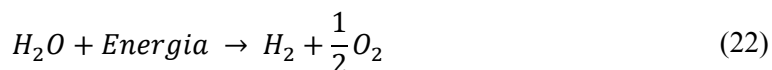
Apesar de se encontrar facilmente disponível no meio ambiente, o hidrogénio não se encontra na sua forma pura na natureza, pelo que deve ser separado dos outros elementos, através de diversos processos. Este pode ser produzido através de compostos que o contenham, como, a água, combustíveis fósseis e biomassa (Faizal et al., 2019). O hidrogénio pode classificar-se em hidrogénio cinzento, azul e verde, de acordo com a matéria-prima e os processos associados à sua produção. O Quadro 4 sintetiza alguns dos processos químicos, térmicos e biológicos associados à produção das três tipologias de hidrogénio supramencionadas. Dentre eles, a produção de hidrogénio verde será abordada com mais detalhe, pois se alinha com o âmbito do presente estudo.

Tipologia	Origem	Método	
Hidrogénio Cinzento	Hidrocarbonetos (gás natural)	Reforma a vapor de metano (SMR)	
		Oxidação parcial (POX)	
		Reforma autotérmica (ATR)	
	Carvão	Gaseificação	
Oxidação Parcial			
Hidrogénio Azul	Gás Natural	Reforma a seco	
Hidrogénio Verde	Biomassa	Termoquímico	Combustão
			Pirólise
			Gaseificação
		Biológico	Gaseificação em água supercrítica
			Biofotólise Direta e Indireta
			Fotofermentação
	Água	Fermentação Escura	
		Eletrólise	
		Fotólise	
		Termólise	
		Bioquímico	

Quadro 4 - Síntese de alguns dos métodos de produção de hidrogénio (adaptado de Abdalla et al., 2018; Dincer, 2012; Noureldin et al., 2015; Santos, 2022)

Mais de 95% do hidrogénio produzido a nível mundial provém de combustíveis fósseis, com cerca de 70% proveniente do gás natural (Safari & Dincer, 2020). Este valor está associado a uma elevada eficiência do processo e a uma produção com baixos custos. No entanto, é possível utilizar água e excesso de energia renovável (solar ou eólica) para produção de hidrogénio (Van Hoecke et al., 2021).

A eletrólise é um método viável, porém relativamente caro, para produzir hidrogénio a partir de energia. Atualmente, o rendimento associado a este processo ronda os 59 a 70%, o que o torna num dos mais apelativos (Chi & Yu, 2018). Este baseia-se numa reação de oxidação-redução, endotérmica, que divide a molécula de água, tendo como subprodutos o oxigénio e hidrogénio, como se verifica na Equação 22 (Van Hoecke et al., 2021).



O sistema básico utilizado para a reação da eletrólise da água consiste num ânodo, um cátodo, um eletrólito e alimentação elétrica, de acordo com a Figura 19. O ânodo é o eletrodo positivo, onde ocorre a reação de oxidação e o cátodo, o eletrodo negativo, onde ocorre a reação de redução. Uma corrente contínua é aplicada, o que permite um fluxo de elétrons do terminal negativo para o cátodo, onde os elétrons são consumidos pelos iões de hidrogénio (protões), originando o H₂ (Equação 23). Por sua vez, os iões de hidróxido (aniões) são transferidos através da solução eletrolítica até ao ânodo, onde os elétrons são libertados e regressam ao terminal positivo da fonte energia (Equação 24). Devido à utilização de um diafragma, os recetores de gás conseguem recolher o hidrogénio e oxigénio que se formam no cátodo e no ânodo (Zeng & Zhang, 2010). Existem diversos processos de eletrólise da água, como, a eletrólise de água alcalina (AWE), membrana de troca de protões (PEM), membrana de troca de aniões alcalinos (AEM) e eletrólise de água de óxido sólido (SOE), onde diferentes materiais e condições são aplicadas, no entanto os princípios base são os mesmos (Chi & Yu, 2018).

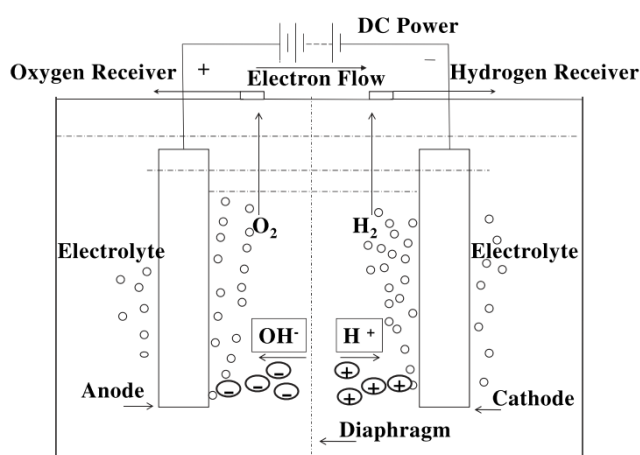
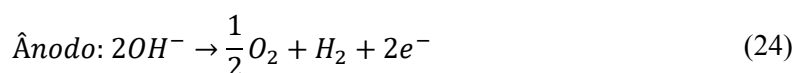


Figura 19 - Esquema de unidade básica de Eletrólise da Água (Zeng & Zhang, 2010)

Amoníaco

Atualmente o principal método de produção do amoníaco baseia-se no processo de *Haber-Bosch*, desenvolvido no início do século XX, que consiste na reação direta de hidrogénio elementar com azoto elementar, o que requer a utilização de um catalisador, de uma pressão de cerca de 200 atm e uma temperatura de 450 °C (Equação 25). Por norma, o catalisador é um material composto por ferro, como por exemplo, o óxido de ferro (Bicer & Dincer, 2018b).



O que difere entre a produção de amoníaco verde, ou “e-amoníaco” quando produzido através de hidrogénio proveniente da eletrólise da água com recurso a energias renováveis, e amoníaco proveniente de combustíveis fósseis, baseia-se na origem e produção do hidrogénio. Como verificado no subcapítulo anterior, referente ao Hidrogénio, existem diversas fontes de produção deste combustível, incluindo os combustíveis fósseis, como o carvão e metano, até fontes renováveis como a produção através da eletrólise da água, com recurso a energia eólica e solar, ou a reforma de biogás. O azoto é geralmente produzido através de uma unidade de separação de ar, existindo algumas tecnologias já estabelecidas, como, a destilação criogénica, separação por membrana de polímero e adsorção com modulação de pressão (PSA). Atualmente a tecnologia mais desenvolvida é a destilação criogénica, que constitui cerca de 90% da produção comercial de azoto (Bennani et al., 2016). Devido à necessidade de azoto com elevado grau de pureza para o processo de *Haber-Bosch*, esta tecnologia é a mais indicada. As unidades criogénicas de separação de ar (ASU), separam o ar nos seus componentes primários, azoto e oxigénio, primeiramente, através da compressão e limpeza do ar, ao que se segue o seu arrefecimento, com recurso a um fluxo de água ou gás. Por sua vez, as várias frações de ar frio condensam a diferentes níveis da coluna de destilação, o que permite a extração do oxigénio e azoto, como líquido criogénico ou como gás (Smith & Klosek, 2001). A Figura 20 sintetiza o processo *Haber-Bosch*, abordado acima.

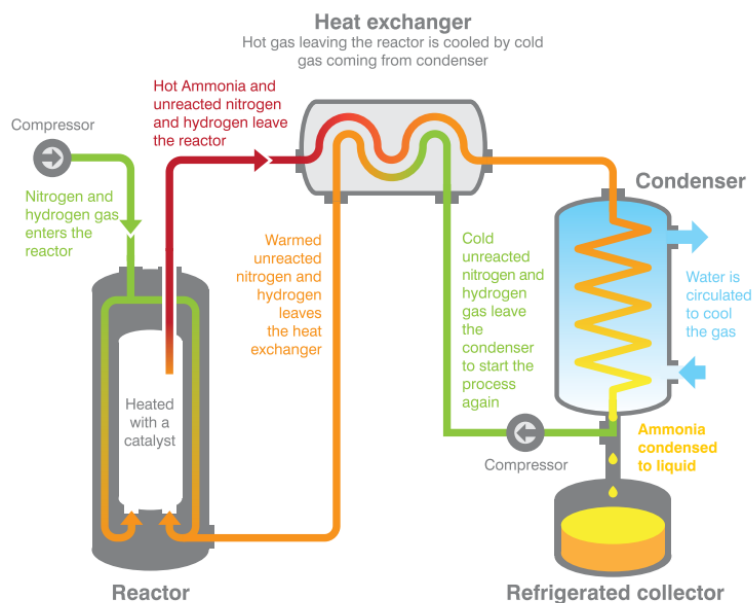


Figura 20 - Diagrama do processo Haber-Bosch (Ash & Scarbrough, 2019)

A nível mundial estão a ser desenvolvidos projetos que visam a produção de amoníaco verde, com menor impacto ambiental, destacando-se o projeto de construção de uma unidade de produção de amoníaco verde em Pilbara, Austrália Ocidental, pela Yara, com uma capacidade de produção de 80 ton/dia (Calloway et al., 2019). Uma das mais recentes e maiores unidades de produção de amoníaco à base de hidrogénio verde, através da utilização de fontes de energia renováveis, com capacidade de produção de 650 ton/dia está projetada para a Arábia Saudita, liderada pela *Air Products*, *ACWA Power* e *NEOM* (Hydrocarbon Processing, 2020).

Metanol

Em termos percentuais cerca de 65% da produção de metanol baseia-se no processo de reforma de gás natural, o que corresponde ao metanol cinzento, sendo que o restante se baseia no processo de gaseificação do carvão (metanol castanho). Neste momento, apenas 0,2% do metanol provém de fontes renováveis, o que dá origem ao metanol verde (IRENA & Methanol Institute, 2021). A Figura 21 sintetiza os processos de produção dos quatro tipos de metanol, pelo que no presente estudo apenas serão abordados os referentes à produção de metanol verde.

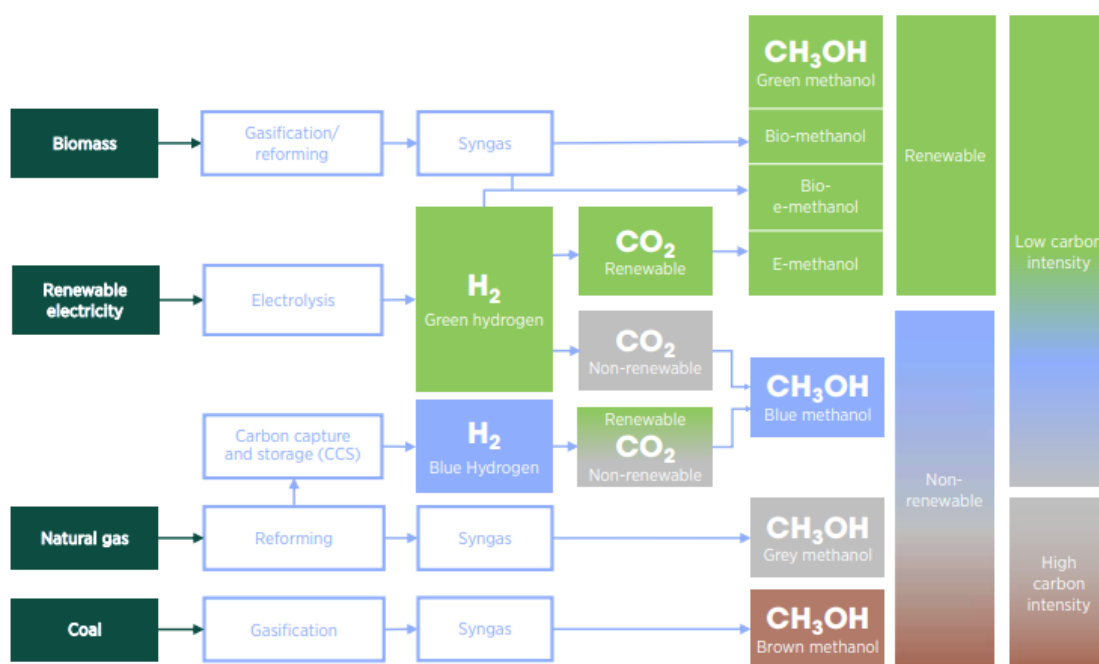
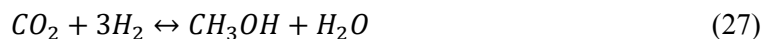


Figura 21 - Classificação do Metanol segundo as diferentes fontes de produção (IRENA & Methanol Institute, 2021)

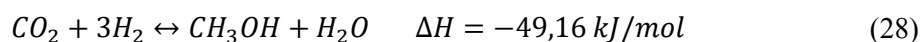
A produção de metanol pode ser dividida em três etapas fundamentais, produção de gás de síntese; síntese do metanol; e purificação do produto. O gás de síntese, que corresponde a uma mistura de H₂, CO₂ e CO, obtém-se a partir de diversas matérias-primas, desde os já referidos combustíveis fósseis, até fontes renováveis como a biomassa, como resíduos florestais e agrícolas, esgotos, biogás, resíduos sólidos urbanos e ainda licor negro, proveniente da indústria do papel, sendo este designado por “bio-metanol”(Ming & Li, 2021; Schröder et al., 2020).

Relativamente ao fabricado a partir de CO₂ e hidrogénio verde produzido a partir de fontes de energia renovável, designa-se por “e-metanol”. No caso da produção de “bio-metanol” através da biomassa, o processo consiste na decomposição térmica desta matéria-prima num gás de síntese. Este processo inicia-se com a secagem da biomassa e posterior divisão em pequenas partes, ao que se segue a gaseificação destes materiais a uma temperatura de cerca 900-1 000°C com vapor e oxigénio. Nesta etapa todos os hidratos de carbono são transformados em H₂, CO, CO₂ e vapor de água, pelo que a mistura resultante pode ser diretamente utilizada para a produção de energia (Equações 26 e 27). No caso da produção de bio-metanol, a mistura de gases é

transformada através de uma reação termoquímica sob pressão com recurso a um catalisador à base de Cu/Zn (Nakagawa et al., 2011).



Em termos de eficiência de conversão de biomassa em metanol, esta varia de acordo com a matéria-prima, sendo de 40% a 50% no caso da lignocelulose (Nakagawa et al., 2011), 45% a 57% na madeira (Hamelinck & Faaij, 2002; Vogt et al., 2005), e até 44% no caso de resíduos de óleo de palma (Bula, 2012). Outra fonte de produção renovável de metanol consiste na captação direta do ar, isto é, no uso de processos físicos e químicos por forma a extrair CO₂ diretamente do ar. Este consiste num processo de hidrogenação do CO₂ de acordo com a Equação 28.



No entanto, a concentração de CO₂ no ar é muito baixa, de cerca de 420 ppm, segundo o registado em fevereiro de 2023 no Observatório de Mauna Loa, Hawaii (Global Monitoring Laboratory, 2023). Este fator aliado com a elevada necessidade de energia, torna-o num processo com custos elevados por cada tonelada de CO₂ produzida (Cho, 2018). Esta via de produção poderá vir a ser promissora em aplicações *offshore* com utilização de energia eólica para produção de energia.

Como referido acima, o metanol também pode ser produzido através da conversão termoquímica de resíduos sólidos urbanos. Este modo de produção já está a ser aplicado pela empresa canadiana *Enerkem*, a qual converte cerca de 300 toneladas/dia de resíduos secos, após reciclagem e compostagem, em metanol e etanol. A tecnologia utilizada consiste na decomposição do material seco triturado nas suas moléculas constituintes com recurso a um leito fluidizado borbulhante (BFB). Estas moléculas no interior da caldeira, com vapor e sob condições de temperatura de cerca de 700 °C, dão origem a um gás de síntese. Por sua vez, este gás é convertido através de catalisadores em metanol líquido (Enerkem, 2023; Marie-Rose et al., 2011).

Gás Natural Liquefeito (GNL)

O gás natural pode provir de fontes fósseis, isto é, da decomposição de restos orgânicos, como plantas e animais, submetidos a elevadas pressões e temperaturas, libertando gases como o metano, etano e propano; ou de biomassa, denominando-se, neste caso, “bio-metano”. No caso do GNL de origem fóssil, este é obtido através da extração do gás natural dos reservatórios naturais no subsolo, através de poços de exploração. Posteriormente, o gás é processado por forma a remover impurezas, sendo depois arrefecido, transitando para o estado líquido. O “bio-metano” é um gás renovável, produzido a partir da biomassa, que pode ser obtido a partir de diferentes matérias-primas, como, resíduos orgânicos, resíduos agrícolas, lamas de esgoto, resíduos agropecuários, que sofrem um processo de digestão anaeróbia (DA) ou de gaseificação. Este combustível renovável tem propriedades semelhantes ao gás natural de origem fóssil, excetuando o “bio-metano” produzido através do processo de digestão anaeróbia que possui um elevado teor de CO₂ e de enxofre, pelo que deve ser purificado antes de ser liquefeito e aplicado como combustível marítimo. No entanto, os custos deste processo são relativamente elevados, pelo que este é um dos principais obstáculos à produção generalizada do “bio-metano” (Gissén et al., 2014; Li et al., 2017).

Gás de Petróleo Liquefeito (GPL)

No que concerne à produção deste combustível alternativo existem duas fontes dominantes, como subproduto da refinação do petróleo ou como subproduto do gás natural, sendo que em 2015, cerca de 60% da produção de GPL provinha do processamento de gás natural (BW LPG, 2015; Leffler, 2015). Como verificado no subcapítulo acima, o gás natural é extraído da terra, como uma mistura de vários gases e líquidos, dependendo da fonte de extração, principalmente composto por metano, mas constituído também por outros compostos como o etano, propano e butano. A produção de GPL segundo este método, resulta da separação do propano e butano, dos restantes constituintes do gás natural, normalmente através de processos de refrigeração seguidos de destilação (Innovation & Technology Network of WLPGA, 2021).

Já a produção de GPL como um subproduto do petróleo, resulta da destilação atmosférica, reformação e “*cracking*”, correspondendo a um rendimento de cerca de 1 a

4% do petróleo bruto processado. Por sua vez, este rendimento depende do tipo de petróleo bruto, bem como, do nível de sofisticação da refinaria (Brinks & Chryssakis, 2017). Atualmente é também possível produzir GPL de origem renovável, denominado de “bioGPL”, através de diversos processos, como por exemplo, como um subproduto do processo de óleo vegetal hidrogenado (HVO), no qual as gorduras vegetais são tratadas com hidrogénio por forma a produzir biodiesel, ou mesmo, através da utilização da glicerina, produto do processo de transesterificação de óleos, que quando misturada com hidrogénio origina “bioGPL” e água. Outros processos como a gaseificação térmica da biomassa, síntese de metanol a partir de gás de síntese e a pirólise podem também ser utilizados na produção de “bioGPL”, no entanto, encontram-se em fase de investigação ou desenvolvimento e apresentam rendimentos potenciais de produção inferiores a 20%. Neste momento o único método a ser utilizado ao nível comercial é o que utiliza o processo de produção de HVO, conjuntamente com hidrogénio (Liquid Gas Europe, 2021).

Apêndice B – Cálculos Análise Energética

De acordo com os dados referentes ao navio em análise, expostos no capítulo 3.1., foi realizada a análise energética dos combustíveis alternativos.

Inicialmente, para calcular a energia necessária contida em cada um dos combustíveis analisados para cumprir a autonomia desejada, recorreu-se ao valor de eficiência dos sistemas de propulsão associada a cada aplicação e à energia requerida para cumprir a velocidade de 15 nós, conforme a Equação 29.

$$E_{total\ combustível}[MJ] = \frac{E_{total\ requerida}[MJ]}{\eta} \quad (29)$$

De seguida, obteve-se o valor da massa de combustível correspondente a essa energia, através do rácio entre $E_{total\ requerida}$ e o valor de densidade energética gravimétrica de cada um dos combustíveis (Equação 30).

$$m_{combustível}[ton] = \frac{E_{total\ combustível}[MJ]}{LHV \left[\frac{MJ}{kg} \right] \times 1000} \quad (30)$$

Por sua vez, calculou-se o volume correspondente a essa massa com recurso à densidade dos combustíveis, conforme indicado na Equação 31. Para avaliar o aumento de deslocamento no navio (1838 ton com MGO) conforme a aplicação de cada um dos combustíveis, aplicou-se a Equação 32.

$$V_{combustível}[m^3] = \frac{m_{combustível}[ton] \times 1000}{\rho_{combustível} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} \quad (31)$$

$$Deslocamento_{total}[ton] = 1838 - m_{MGO}[ton] + m_{combustível}[ton] \quad (32)$$

Por fim foram comparados os volumes referentes ao MGO e aos combustíveis alternativos através do rácio presente na Equação 33.

$$Rácio_V = \frac{V_{combustível}[m^3]}{V_{MGO}[m^3]} \quad (33)$$

Apêndice C – Cálculo de K_1

A Equação 20 surge da necessidade do cálculo do efeito do aumento do deslocamento de um navio na potência necessária para cumprir com a velocidade imposta (Escola Naval, n.d.). A presente expressão possibilita um método simplificado para estimar o aumento da potência requerida à instalação propulsora, consequência do aumento do deslocamento do navio. No presente caso, o aumento do deslocamento do navio advém do aumento da capacidade de armazenamento de combustível, necessário para atingir a autonomia desejada.

A expressão utilizada possui algumas constantes que podem ser determinadas através da análise de dados históricos, de diferentes potências, em função de diferentes velocidades e deslocamentos. Através da análise desses dados, é possível identificar padrões e tendências. No entanto, no caso em questão, os dados existentes são todos referentes ao mesmo deslocamento, pelo que a resolução de sistemas de equações para determinar as constantes existentes se torna impossível. Por forma a contornar esta limitação, assumiu-se um valor fixo para o parâmetro $\alpha = 0,99$, sendo que segundo a fonte consultada, este parâmetro pode variar entre 0,8 e 1,0. Deste modo, considerou-se o valor de α que fazia cumprir com o intervalo de valores estipulado pela fonte para K_1 que pode variar entre 0,0025 e 0,0030.

Para o cálculo da constante K_1 utilizaram-se alguns dos dados provenientes das provas de mar dos NPO, representados no Gráfico 4 do Anexo C e a Equação 34. A Tabela 12 apresenta os dados e os resultados obtidos para o valor de cada K_1 , correspondente à potência e velocidade analisadas. Por forma a reunir todos estes valores, considerou-se como valor final a média de todos os K_1 determinados.

$$\begin{aligned} Pot [kW] &= K_1 \times m[ton]^\alpha \times V[m/s]^3 \\ K_1 &= \frac{Pot [kW]}{m[ton]^\alpha \times V[m/s]^3} \end{aligned} \quad (34)$$

Tabela 12 - Cálculo do parâmetro K_1

Carga [%]	P [kW]	V [m/s]	m [ton]	α	K_1
50	602	5,4	1838	0,99	0,00224
65	1953	7,72	1838	0,99	0,00249
75	3170	8,7	1838	0,99	0,00282
90	5279	9,88	1838	0,99	0,00321
100	6708	10,49	1838	0,99	0,00341
				Média	0,0028

Apêndice D– Método da Média dos Valores Normalizados

O método aplicado no cálculo do vetor próprio e do valor próprio de cada matriz paritária baseia-se no método da média dos valores normalizados (Belderrain & Oliveira, 2008). Este consiste nos seguintes passos:

1. Normalização dos valores através da divisão de cada elemento pela soma dos elementos da respectiva coluna, segundo a Equação 35.

$$W_i(M_j) = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad j = 1, \dots, n \quad (35)$$

$$W_i(M_j) = \begin{vmatrix} 3/9 & 3/9 & 3/9 \\ 5/9 & 5/9 & 5/9 \\ 1/9 & 1/9 & 1/9 \end{vmatrix} \quad (36)$$

2. Cálculo do Vetor Próprio através do somatório dos elementos de cada linha normalizada, a dividir pela ordem da matriz, n (Equação 37).

$$W_i(M_j) = \sum_{j=1}^m W_i(M_j) / n, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (37)$$

3. Cálculo do valor próprio associado ao vetor próprio calculado (Equação 38).

$$MW = \lambda_{m\acute{a}x} \times W$$
$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[MW]_i}{w_i} \quad (38)$$

Apêndice E– Matrizes de Comparação Paritária

Ocorrência - MF1							VP	Severidade - MF1							VP	Detetabilidade - MF1							VP
	A1	A2	A3	A4	A5	A6			A1	A2	A3	A4	A5	A6			A1	A2	A3	A4	A5	A6	
A1	1	1/3	1/3	1/7	1/4	1/7	0,034	A1	1	1/2	1/4	1/9	1/6	1/6	0,031	A1	1	1/5	1/4	1/3	1/5	0,042	
A2	3	1	1/3	1/4	1/2	1/7	0,060	A2	2	1	1/3	1/8	1/5	1/4	0,050	A2	1	1/5	1/4	1/3	1/5	0,042	
A3	3	3	1	1/5	1/2	1/5	0,088	A3	4	3	1	1/7	1/4	1/3	0,095	A3	5	5	1	3	3	1/2	0,211
A4	7	7	5	1	4	1/3	0,291	A4	9	8	7	1	6	6	0,794	A4	4	4	1/3	1	1/3	1/4	0,101
A5	4	2	2	1/3	1	1/4	0,115	A5	6	5	4	1/6	1	2	0,303	A5	3	3	1/3	3	1	1/3	0,128
A6	7	7	5	3	4	1	0,412	A6	6	4	3	1/6	1/2	1	0,196	A6	5	5	2	4	3	1	0,274
							RC 0,087								RC 0,0928								RC 0,064
Ocorrência - MF2							VP	Severidade - MF2							VP	Detetabilidade - MF2							VP
	A1	A2	A3	A4	A5	A6			A1	A2	A3	A4	A5	A6			A1	A2	A3	A4	A5	A6	
A1	1	1	1/3	1/7	1/5	1/8	0,036	A1	1	1	1/5	1/7	1/5	1/8	0,035	A1	1	1/6	1/6	1/4	1/8	0,036	
A2	1	1	1/3	1/6	1/4	1/7	0,039	A2	1	1	1/4	1/6	1/4	1/7	0,038	A2	1	1/5	1/5	1/4	1/6	0,041	
A3	3	3	1	1/4	1/3	1/6	0,081	A3	5	4	1	1/4	1	1/5	0,115	A3	6	5	1	1	4	1/2	0,224
A4	7	6	4	1	4	1/4	0,250	A4	7	6	4	1	4	1/3	0,258	A4	6	5	1	1	3	1/3	0,194
A5	5	4	3	1/4	1	1/5	0,138	A5	5	4	1	1/4	1	1/7	0,110	A5	4	4	1/4	1/3	1	1/5	0,103
A6	8	7	6	4	5	1	0,455	A6	8	7	5	3	7	1	0,446	A6	8	6	2	3	5	1	0,373
							RC 0,072								RC 0,0646								RC 0,042

Figura 22 - Matrizes de comparação paritária para cada modo de falha e o correspondente critério de FMEA avaliado

Apêndice F– Seleção de Elementos Focais para Aplicação da DST

Como referido foram realizados dois tipos de inquéritos a peritos da área, por forma a mensurar a possibilidade de aplicação de combustíveis alternativos em navios análogos aos da Classe *Viana do Castelo*, num horizonte temporal de 10 a 20 anos.

O primeiro inquérito considerava o Biodiesel/Diesel Sintético $\{S_1\}$, LOHC $\{S_2\}$, Hidretos Metálicos $\{S_3\}$, Metanol $\{S_4\}$, Nuclear $\{S_5\}$, e outras opções futuras $\{S_6\}$, incluindo novas formas de nuclear. Neste questionário, os elementos focais propostos foram o conjunto $\{S_1, S_4\}$, considerando uma evolução da situação atual, eventualmente, numa configuração *dualfuel*; $\{S_5\}$, energia nuclear de baixa potência; $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$, uma aposta mista em hidrocarbonetos verdes, hidrogénio verde e metanol; $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$, considera todas as anteriores, bem como, o nuclear de baixa potência e $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ considera todas as anteriormente referidas, e adiciona outras opções emergentes ou futuras atualmente desconhecidas incluindo o nuclear. Este último conjunto foi claramente definido por um dos peritos como contendo a energia nuclear.

Relativamente ao segundo inquérito, este considerava Biodiesel/Diesel Sintético $\{S_1\}$, LOHC $\{S_2\}$, Hidretos Metálicos $\{S_3\}$, Metanol $\{S_4\}$, e outras opções futuras $\{S_5\}$, incluindo novas formas de energia nuclear. Assim, os elementos focais propostos neste inquérito baseavam-se no conjunto $\{S_1, S_4\}$, já mencionado; $\{S_1, S_2\}$, proposto por um dos peritos, consistindo numa aposta mista de hidrocarbonetos verdes e hidrogénio verde armazenado em LOHC; $\{S_5\}$; $\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$; e $\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$, todas as soluções anteriores e opções futuras incluindo o nuclear.

A compatibilização dos elementos focais tem de considerar os núcleos de cada um dos inquéritos, pelo que, o conjunto de discernimento, ou núcleo, terá a solução $\{S_5\}$, como energia nuclear atual e futura; e $\{S_6\}$ como todas as outras tecnologias emergentes ou futuras, sem a opção nuclear. Assim, o quadro de discernimento será constituído por Biodiesel/Diesel Sintético $\{S_1\}$, LOHC $\{S_2\}$, Hidretos Metálicos $\{S_3\}$, Metanol $\{S_4\}$, Nuclear $\{S_5\}$, e outras opções futuras $\{S_6\}$, excluindo a energia nuclear.

O Quadro 5 enumera os elementos focais propostos para o estudo em cada um dos inquéritos, bem como, os elementos focais resultantes das opiniões e sugestões de cada perito.

Quadro 5 –Elementos focais propostos para o estudo em contraste com os sugeridos pelos peritos

Inquérito 1 (Elementos Focais Propostos)	Novos Elementos Focais	Inquérito 2 (Elementos Focais Propostos)	Novos Elementos Focais
$\{S_1, S_4\}$	$\{S_1, S_4\}$	$\{S_1, S_4\}$	$\{S_1, S_4\}$
$\{S_5\}$	$\{S_5\}$	$\{S_5\}$	$\{S_5, S_6\}$
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$	-	$\{S_1, S_2\}$
-	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$	-	

Apêndice G – Inquéritos

Inquérito Versão 1

1. De acordo com o exposto no *Executive Summary*, concorda com as conclusões obtidas no estudo efetuado? A escolha de combustíveis parece-lhe adequada?
2. As opiniões dos peritos serão conjugadas utilizando a Teoria de Dempster-Shafer. Para os elementos focais definidos propõe-se que atribua massas de probabilidade (m_i) com valores entre 0 e 1, de modo que o somatório das massas de probabilidade seja unitária. Caso não concorde com algumas soluções, coloque $m_i=0$; se julgar necessário adicione outras soluções, sendo de interesse que possam ser intersectadas com as existentes de modo a evitar um elevado valor de conflito (K).

Tabela 13 – Elementos Focais

Elementos Focais	m_i
$\{S_1, S_4\}$	
$\{S_5\}$	
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$	
$\sum m_i$	1,00

Inquérito Versão 2

1. De acordo com o exposto no *Executive Summary*, concorda com as conclusões obtidas no estudo efetuado? A escolha de combustíveis parece-lhe adequada?
2. As opiniões dos peritos serão conjugadas utilizando a Teoria de Dempster-Shafer. Para os elementos focais definidos propõe-se que atribua massas de probabilidade (m_i) com valores entre 0 e 1, de modo que o somatório das massas de probabilidade seja unitária. Caso não concorde com algumas soluções, coloque $m_i=0$; se julgar necessário adicione outras soluções, sendo de interesse que possam ser intersectadas com as existentes de modo a evitar um elevado valor de conflito (K).

Tabela 14 – Elementos Focais

Elementos Focais	m_i
$\{S_1, S_4\}$	
$\{S_5\}$	
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ ⁸	
$\sum m_i$	1,00

⁸ A solução S_5 corresponde a todas as opções futuras inclusive nuclear

Apêndice H – Cálculos de Combinação de Corpos de Evidência

Tabela 15 - Combinação das opiniões dos peritos ($m_1 \oplus m_2$)

$m_1 \oplus m_2$	$m_1(\{S_1, S_4\}) = 0,35$	$m_1(\{S_1, S_2\}) = 0$	$m_1(\{S_5\}) = 0,05$	$m_1(\{S_5, S_6\}) = 0$	$m_1(\{S_1, S_2, S_3, S_4\}) = 0,25$	$m_1(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}) = 0$	$m_1(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}) = 0$	$m_1(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}) = 0,35$
$m_2(\{S_1, S_4\}) = 0,25$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0,25 \times 0,35 = 0,0875$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1\}$ $0,25 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0,25 \times 0,05 = 0,0125$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0,25 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0,25 \times 0,25 = 0,0625$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_4\}$ $0,25 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_4\}$ $0,25 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_4\}$ $0,25 \times 0,35 = 0,0875$
$m_2(\{S_1, S_2\}) = 0,15$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1\}$ $0,15 \times 0,35 = 0,0525$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0,15 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0,15 \times 0,05 = 0,0075$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0,15 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2\}$ $0,15 \times 0,25 = 0,0375$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2\}$ $0,15 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2\}$ $0,15 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2\}$ $0,15 \times 0,35 = 0,0525$
$m_2(\{S_5\}) = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_4\} = \emptyset$ $0 \times 0,35 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2\} = \emptyset$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_5\} = \{S_5\}$ $0 \times 0,05 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \emptyset$ $0 \times 0,25 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \emptyset$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_5\}$ $0 \times 0,35 = 0$
$m_2(\{S_5, S_6\}) = 0,10$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \emptyset$ $0,10 \times 0,35 = 0,035$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \emptyset$ $0,10 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_5\} = \{S_5\}$ $0,10 \times 0,05 = 0,005$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0,10 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \emptyset$ $0,10 \times 0,25 = 0,025$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_5\}$ $0,10 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0,10 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0,10 \times 0,35 = 0,035$
$m_2(\{S_1, S_2, S_3, S_4\}) = 0,30$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0,30 \times 0,35 = 0,105$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0,30 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0,30 \times 0,05 = 0,015$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0,30 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,30 \times 0,25 = 0,075$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,30 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,30 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,30 \times 0,35 = 0,105$
$m_2(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}) = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0 \times 0,35 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_5\} = \{S_5\}$ $0 \times 0,05 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0,25 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0,35 = 0$
$m_2(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}) = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0 \times 0,35 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0 \times 0,05 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0,25 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ $0 \times 0,35 = 0$
$m_2(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}) = 0,20$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0,20 \times 0,35 = 0,07$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0,20 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_5\} = \{S_5\}$ $0,20 \times 0,05 = 0,01$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0,20 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,20 \times 0,25 = 0,05$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0,20 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ $0,20 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ $0,20 \times 0,35 = 0,07$

$$K = 0 + 0,035 + 0 + 0 + 0,0125 + 0,0075 + 0,015 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,025 + 0 = 0,095 \quad (39)$$

Tabela 16 - Cálculos da combinação ($m_1 \oplus m_2$)

Elementos Focais	$m_1 \oplus m_2$	Correção com K
$m_{12}(\{S_1, S_4\})$	$0,0875 + 0,105 + 0 + 0 + 0,07 + 0,0625 + 0 + 0 + 0,0875 = 0,4125$	$\frac{0,4125}{1 - 0,095} = 0,45580$
$m_{12}(\{S_1\})$	$0,0525 + 0 + 0 = 0,0525$	$\frac{0,0525}{1 - 0,095} = 0,05801$
$m_{12}(\{S_1, S_2\})$	$0 + 0 + 0 + 0 + 0,0375 + 0 + 0 + 0 + 0,0525 = 0,09$	$\frac{0,09}{1 - 0,095} = 0,09945$
$m_{12}(\{S_5\})$	$0 + 0,005 + 0 + 0,01 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0,015$	$\frac{0,015}{1 - 0,095} = 0,01657$
$m_{12}(\{S_5, S_6\})$	$0 + 0 + 0,035 = 0,035$	$\frac{0,035}{1 - 0,095} = 0,03867$
$m_{12}(\{S_6\})$	0	0
$m_{12}(\{S_1, S_2, S_3, S_4\})$	$0,075 + 0 + 0,05 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,105 = 0,23$	$\frac{0,23}{1 - 0,095} = 0,25414$
$m_{12}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\})$	0	0
$m_{12}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\})$	0	0
$m_{12}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\})$	0,07	$\frac{0,07}{1 - 0,095} = 0,07735$

Tabela 17 - Combinação das opiniões dos peritos ($m_1 \oplus m_2 \oplus m_3$)

$m_{12} \oplus m_3$	$m_2(\{S_1, S_4\}) = 0,80$	$m_2(\{S_1, S_2\}) = 0$	$m_2(\{S_5\}) = 0$	$m_2(\{S_5, S_6\}) = 0$	$m_2(\{S_1, S_2, S_3, S_4\}) = 0,10$	$m_2(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}) = 0$	$m_2(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}) = 0,10$	$m_2(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}) = 0$
$m_{12}(\{S_1, S_4\}) = 0,45580$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0,45580 \times 0,80 = 0,3646$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1\}$ $0,45580 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0,45580 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0,45580 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0,45580 \times 0,10 = 0,04558$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_4\}$ $0,45580 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_4\}$ $0,45580 \times 0,10 = 0,04558$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_4\}$ $0,45580 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_1\}) = 0,05801$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1\}$ $0,05801 \times 0,80 = 0,04641$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1\}$ $0,05801 \times 0 = 0$	$\{S_1\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0,05801 \times 0 = 0$	$\{S_1\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0,05801 \times 0 = 0$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1\}$ $0,05801 \times 0,10 = 0,005801$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1\}$ $0,05801 \times 0 = 0$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1\}$ $0,05801 \times 0,10 = 0,005801$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1\}$ $0,05801 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_1, S_2\}) = 0,09945$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1\}$ $0,09945 \times 0,80 = 0,07956$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0,09945 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0,09945 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0,09945 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2\}$ $0,09945 \times 0,10 = 0,009945$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2\}$ $0,09945 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2\}$ $0,09945 \times 0,10 = 0,009945$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2\}$ $0,09945 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_5\}) = 0,01657$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_4\} = \emptyset$ $0,01657 \times 0,80 = 0,01326$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2\} = \emptyset$ $0,01657 \times 0 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_5\} = \{S_5\}$ $0,01657 \times 0 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5\}$ $0,01657 \times 0 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \emptyset$ $0,01657 \times 0,10 = 0,001657$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_5\}$ $0,01657 \times 0 = 0$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \emptyset$ $0,01657 \times 0,10 = 0,001657$	$\{S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_5\}$ $0,01657 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_5, S_6\}) = 0,03867$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \emptyset$ $0,03867 \times 0,80 = 0,03094$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \emptyset$ $0,03867 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_5\} = \{S_5\}$ $0,03867 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0,03867 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \emptyset$ $0,03867 \times 0,10 = 0,003867$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_5, S_6\}$ $0,03867 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0,03867 \times 0,10 = 0,003867$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0,03867 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_6\}) = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \emptyset$ $0 \times 0,80 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \emptyset$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \emptyset$ $0 \times 0,10 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \emptyset$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_6\}$ $0 \times 0,10 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_6\}$ $0 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_1, S_2, S_3, S_4\}) = 0,25414$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0,25414 \times 0,80 = 0,2033$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0,25414 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0,25414 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0,25414 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,25414 \times 0,10 = 0,02541$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,25414 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,25414 \times 0,10 = 0,02541$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,25414 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}) = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0 \times 0,80 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_5\} = \{S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0,10 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0,10 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}) = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0 \times 0,80 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_5\} = \emptyset$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0,10 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ $0 \times 0,10 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$
$m_{12}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}) = 0,07735$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0,07735 \times 0,80 = 0,06188$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0,07735 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_5\} = \{S_5\}$ $0,07735 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0,07735 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0,07735 \times 0,10 = 0,007735$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ $0,07735 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ $0,07735 \times 0,10 = 0,007735$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ $0,07735 \times 0 = 0$

$$K = 0,01326 + 0,03094 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,001657 + 0,003867 + 0 + 0 + 0,001657 = 0,051381 \quad (40)$$

Tabela 18 - Cálculos da combinação ($m_1 \oplus m_2 \oplus m_3$)

Elementos Focais	$m_{12} \oplus m_3$	Correção com K
$m_{123}(\{S_1, S_4\})$	$0,3646 + 0,2033 + 0 + 0$ $+ 0,06188 + 0,04558 + 0$ $+ 0,04558 + 0 = 0,72094$	$\frac{0,72094}{1 - 0,0514} = 0,76004$
$m_{123}(\{S_1\})$	$0,04641 + 0,07956 + 0 + 0$ $+ 0 + 0,005801 + 0$ $+ 0,005801 + 0 = 0,13757$	$\frac{0,13757}{1 - 0,0514} = 0,14502$
$m_{123}(\{S_1, S_2\})$	$0 + 0 + 0 + 0 + 0,009945$ $+ 0 + 0,009945 + 0$ $= 0,01989$	$\frac{0,01989}{1 - 0,0514} = 0,02097$
$m_{123}(\{S_5\})$	0	0
$m_{123}(\{S_5, S_6\})$	0	0
$m_{123}(\{S_6\})$	$0 + 0 + 0,003867 + 0 + 0$ $= 0,003867$	$\frac{0,003867}{1 - 0,0514} = 0,00408$
$m_{123}(\{S_1, S_2, S_3, S_4\})$	$0,02541 + 0 + 0$ $+ 0,007735 + 0 + 0$ $+ 0,02541 + 0 + 0$ $= 0,058555$	$\frac{0,058555}{1 - 0,0514} = 0,06173$
$m_{123}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\})$	0	0
$m_{123}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\})$	$0 + 0,007735 = 0,007735$	$\frac{0,007735}{1 - 0,0514} = 0,00815$
$m_{123}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\})$	0	0

Tabela 19 - Combinação das opiniões dos peritos ($m_1 \oplus m_2 \oplus m_3 \oplus m_4$)

$m_{123} \oplus m_4$	$m_4(\{S_1, S_4\}) = 0.70$	$m_4(\{S_1, S_2\}) = 0$	$m_4(\{S_3\}) = 0$	$m_4(\{S_5, S_6\}) = 0$	$m_4(\{S_1, S_2, S_3, S_4\}) = 0.10$	$m_4(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}) = 0$	$m_4(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}) = 0.20$	$m_4(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}) = 0$
$m_{123}(\{S_1, S_4\}) = 0.76004$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0.76004 \times 0.70 = 0.53203$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1\}$ $0.76004 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_3\} = \emptyset$ $0.76004 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0.76004 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_4\}$ $0.76004 \times 0.10 = 0.07600$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_4\}$ $0.76004 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_4\}$ $0.76004 \times 0.20 = 0.15201$	$\{S_1, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_4\}$ $0.76004 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_1\}) = 0.14502$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1\}$ $0.14502 \times 0.70 = 0.10151$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1\}$ $0.14502 \times 0 = 0$	$\{S_1\} \cap \{S_3\} = \emptyset$ $0.14502 \times 0 = 0$	$\{S_1\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0.14502 \times 0 = 0$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1\}$ $0.14502 \times 0.10 = 0.01450$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1\}$ $0.14502 \times 0 = 0$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1\}$ $0.14502 \times 0.20 = 0.02900$	$\{S_1\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1\}$ $0.14502 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_1, S_2\}) = 0.02097$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1\}$ $0.02097 \times 0.70 = 0.01468$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0.02097 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_3\} = \emptyset$ $0.02097 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0.02097 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2\}$ $0.02097 \times 0.10 = 0.002097$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2\}$ $0.02097 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2\}$ $0.02097 \times 0.20 = 0.004194$	$\{S_1, S_2\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2\}$ $0.02097 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_3\}) = 0$	$\{S_3\} \cap \{S_1, S_4\} = \emptyset$ $0 \times 0.70 = 0$	$\{S_3\} \cap \{S_1, S_2\} = \emptyset$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_3\} \cap \{S_3\} = \{S_3\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_3\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_3\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_3\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \emptyset$ $0 \times 0.10 = 0$	$\{S_3\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_3\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_3\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \emptyset$ $0 \times 0.20 = 0$	$\{S_3\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_3\}$ $0 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_5, S_6\}) = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \emptyset$ $0 \times 0.70 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \emptyset$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_3\} = \{S_5, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \emptyset$ $0 \times 0.10 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_5, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_6\}$ $0 \times 0.20 = 0$	$\{S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_6\}) = 0.00408$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \emptyset$ $0.00408 \times 0.70 = 0.002856$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \emptyset$ $0.00408 \times 0 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_3\} = \emptyset$ $0.00408 \times 0 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_6\}$ $0.00408 \times 0 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \emptyset$ $0.00408 \times 0.10 = 0.000408$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \emptyset$ $0.00408 \times 0 = 0$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_6\}$ $0.00408 \times 0.20 = 0.000816$	$\{S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_6\}$ $0.00408 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_1, S_2, S_3, S_4\}) = 0.06173$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0.06173 \times 0.70 = 0.04321$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0.06173 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_3\} = \emptyset$ $0.06173 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_5, S_6\} = \emptyset$ $0.06173 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0.06173 \times 0.10 = 0.006173$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0.06173 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0.06173 \times 0.20 = 0.01235$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0.06173 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}) = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0.70 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_3\} = \{S_3\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0.10 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0.20 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}) = 0.00815$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0.00815 \times 0.70 = 0.005705$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0.00815 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_3\} = \emptyset$ $0.00815 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_6\}$ $0.00815 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0.00815 \times 0.10 = 0.000815$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0.00815 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ $0.00815 \times 0.20 = 0.00163$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ $0.00815 \times 0 = 0$
$m_{123}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}) = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0.70 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2\} = \{S_1, S_2\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_3\} = \{S_3\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_5, S_6\} = \{S_5, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ $0 \times 0.10 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ $0 \times 0 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ $0 \times 0.20 = 0$	$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} \cap \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\} = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\}$ $0 \times 0 = 0$

$$K = 0,002856 + 0,000408 = 0,003264 \quad (41)$$

Tabela 20 - Cálculos das Combinações de Opiniões

Elementos Focais	$m_{123} \oplus m_4$	Correção com K
$m_{1234}(\{S_1, S_4\})$	$0,53203 + 0,04321 + 0$ $+ 0,005705 + 0 + 0,07600$ $+ 0 + 0,15201 + 0$ $= 0,80896$	$\frac{0,80896}{1 - 0,0033} = 0,8116$
$m_{1234}(\{S_1\})$	$0,10151 + 0,01468 + 0 + 0$ $+ 0 + 0,01450 + 0$ $+ 0,02900 + 0 = 0,15969$	$\frac{0,15969}{1 - 0,0033} = 0,1602$
$m_{1234}(\{S_1, S_2\})$	$0 + 0 + 0 + 0 + 0,002097$ $+ 0 + 0,004194 + 0$ $= 0,006291$	$\frac{0,006291}{1 - 0,0033} = 0,0063$
$m_{1234}(\{S_5\})$	0	0
$m_{1234}(\{S_5, S_6\})$	0	0
$m_{1234}(\{S_6\})$	$0 + 0 + 0 + 0,000816$ $= 0,000816$	$\frac{0,000816}{1 - 0,0033} = 0,00082$
$m_{1234}(\{S_1, S_2, S_3, S_4\})$	$0,006173 + 0 + 0,00082$ $+ 0 + 0 + 0 + 0,01235 + 0$ $+ 0 = 0,019343$	$\frac{0,019343}{1 - 0,0033} = 0,0194$
$m_{1234}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\})$	0	0
$m_{1234}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\})$	$0 + 0,00163 = 0,00163$	$\frac{0,00163}{1 - 0,0033} = 0,0016$
$m_{1234}(\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6\})$	0	0

Apêndice I – Programa de Combinação e Análise de Opiniões

```
%Programa Principal DS Teory
% Cria uma estrutura de dados e calcula a Plausabilidade e Crença
% Plausability - Pl e Belief - Bl
%
clc; clear all

% criar a estrutura de dados e o conjunto

set=struct;
set(1).set={'S1', 'S4'};
set(2).set={'S1'};
set(3).set={'S1', 'S2'};
set(4).set={'S5'};
set(5).set={'S5', 'S6'};
set(6).set={'S6'};
set(7).set={'S1', 'S2', 'S3', 'S4'};
set(8).set={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S5'};
set(9).set={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S6'};
set(10).set={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S5', 'S6'};

%massas resultantes da combinação já normalizadas

massa_1=0.8116;
massa_2=0.1602;
massa_3=0.0063;
massa_4=0;
massa_5=0;
massa_6=0.0008;
massa_7=0.0194;
massa_8=0;
massa_9=0.0016;
massa_10=0;

% massas de BPA
mass=[massa_1 massa_2 massa_3 massa_4 massa_5 massa_6 massa_7 massa_8 massa_9
massa_10];

% dimensao do conjunto
L=length(mass);
%
% Plausabilidade e Crenca - Plausability, Belief
% funcao de calculo de Pl e Bl
% set é uma estrutura de conjuntos
% mass é um vector de BPA e L a sua dimensao
[Pl, Bel] = DSsetsmass(set,mass, L);

%Gráfico Valores Bel e Pl
%
x=categorical({'S1,S4', 'S1', 'S1,S2', 'S5', 'S5,S6', 'S6', 'S1,S2,S3,S4', 'S1,S2,S3
,S4,S5', 'S1,S2,S3,S4,S6', 'S1,S2,S3,S4,S5,S6'});
y=[Pl;Bel];
y=transpose(y);
b=bar(x,y);
legend({'Plausibilidade', 'Crença'});
```

```

title('Crença e Plausibilidade - Combinação de Opiniões','FontSize',12,
'FontWeight','bold','FontSmoothing','on');
xlabel('Elementos Focais','FontSize',11,'FontWeight','bold');
ylim([0,1.1])

%
% %legenda no topo
xleg1=b(1).XEndPoints;
yleg1=b(1).YEndPoints;
labels1=string(b(1).YData);
text(xleg1,yleg1,labels1,'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','
bottom','FontSize',9,'FontWeight','normal');

xleg2=b(2).XEndPoints;
yleg2=b(2).YEndPoints;
labels2=string(b(2).YData);
text(xleg2,yleg2,labels2,'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','
bottom','FontSize',9,'FontWeight','normal');
%
% fim do programa

% Função Crença
% A Crença de cada acontecimento corresponde à soma das massas cuja união
% dos conjuntos (elementos focais) é igual ao próprio elemento focal

function Bel = Belief(DSsetmass)
L=length(DSsetmass);
Bel(1:L)=0;
    for i=1:L
        for j=1:L
            U=union( DSsetmass(i).set,DSsetmass(j).set);
            if isequal(DSsetmass(i).set,U)
                Bel(i)=Bel(i)+DSsetmass(j).mass;
            else
                Bel(i)=Bel(i);
            end
        end
    end
end
end

```

```

% Função Plausibilidade
%A Pl de cada acontecimento é equivalente à soma das massas de
%probabilidade cuja interseção dos conjuntos (elementos focais) é não vazia

```

```

function Pl = Plausability(DSsetmass)
L=length(DSsetmass);
Pl(1:L)=0;
    for i=1:L
        for j=1:L
            U=intersect( DSsetmass(i).set,DSsetmass(j).set);
            if ~isempty (U)
                Pl(i)=Pl(i)+DSsetmass(j).mass;
            else
                Pl(i)=Pl(i);
            end
        end
    end
end
end

```

```

% Função para calcular Plausabilidade e Crença - Plausability Belief
% Pl - Plausability; Bel - Belief
% Cria uma estrutura de dados para permitir operações com conjuntos
%
function [Pl, Bel] = DSsetsmass(set,mass, L)
% Estrutura de dados DSsetmass - elementos focais e BPA
%
DSsetmass = struct
DSsetmass.set=set(1).set; DSsetmass.mass=mass(1);
for i=2:L
DSsetmass(i).set=set(i).set; DSsetmass(i).mass=mass(i);
end
%
% Cálculo da Pl e Bel
Pl=Plausability(DSsetmass)
Bel=Belief(DSsetmass)

```

```

% Programa de combinação de evidencias
% Das estruturas A e B
% Conjuntos elementos focais e massas de probabilidade
clc; clear all;
%
%Opinião E1
setA=struct;
setA(1).foc={'S1', 'S4'};setA(1).mass=0.35;
setA(2).foc={'S1', 'S2'};setA(2).mass=0;
setA(3).foc={'S5'};setA(3).mass=0.05;
setA(4).foc={'S5', 'S6'};setA(4).mass=0;
setA(5).foc={'S1', 'S2', 'S3', 'S4'};setA(5).mass=0.25;
setA(6).foc={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S5'};setA(6).mass=0;
setA(7).foc={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S6'};setA(7).mass=0;
setA(8).foc={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S5', 'S6'};setA(8).mass=0.35;
%
% Opinião E1
setB=struct;
setB(1).foc={'S1', 'S4'};setB(1).mass=0.25;
setB(2).foc={'S1', 'S2'};setB(2).mass=0.15;
setB(3).foc={'S5'};setB(3).mass=0;
setB(4).foc={'S5', 'S6'};setB(4).mass=0.10;
setB(5).foc={'S1', 'S2', 'S3', 'S4'};setB(5).mass=0.30;
setB(6).foc={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S5'};setB(6).mass=0;
setB(7).foc={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S6'};setB(7).mass=0;
setB(8).foc={'S1', 'S2', 'S3', 'S4', 'S5', 'S6'};setB(8).mass=0.20;

%
% Combinação de A e B em AXB e depois em CombAB linear
[CombAB,LALB] = CombineAB(setA,setB);
%
% Elementos focais de intersecção nula
[Ktot, nillindex] = SumFocNill(CombAB,LALB);
%
% Remoção dos elementos focais vazios
CombAB = Delrowstruct(CombAB,nillindex);
%
% Soma de elementos focais iguais
LALB=LALB-length(nillindex);%
CombAB = SumEqualFoc(CombAB,LALB);
%
% Massas BPA conjuntas de AxB
CombAB = MassAB(CombAB, Ktot);

```

```

% Função CombineAB - produto de setAxsetB
% SetA SetB estruturas a serem combinadas
%
%
function [CombAB,LALB] = CombineAB(setA,setB)
% Dimensões das estruturas A e B
LA=length (setA);LB=length (setB);
% CombAB é a estrutura linear combinada de A com B
CombAB=struct
%
LALB=0 % dimensão da estrutura final
for i=1:LA
    for j=1:LB
        LALB=LALB+1;
        CombAB(LALB).foc=intersect(setA(i).foc,setB(j).foc)
        CombAB(LALB).mass=setA(i).mass*setB(j).mass
    end
end
end

```

```

% Função Delrowstruct para eliminar linhas de uma estrutura struct
% Estrutura CombAB
% Linhas a eliminar em Delindex
%
function CombAB = Delrowstruct(CombAB,Delindex)
%
Delindex=unique(Delindex);
%
CombAB(Delindex)=[];

```

```

% Funcao MassAB de calculo das BPA de A com B
% Estructura CombAB que entra e sai com massa corrigida
% por Ktotal em funcao dos elementos vazios
%
function CombAB = MassAB(CombAB, Ktot)
% dimensão de CombAB
k=length(CombAB);
% Divisao das massas por 1-k (1-interseccao vazia)
for i=1:k
    CombAB(i).mass=(CombAB(i).mass)/Ktot;
end
end

```

```

% Função SumEqualFocStruct para soma de BPA de iguais elementos focais
% Estrutura CombAB que entra e sai com massa alteradas
% k - length de CombAB em formato linear
%
function CombAB = SumEqualFoc(CombAB,k)
%
% Soma de massas de elementos focais iguais
r=1
for i=1:k-1
    for j=i+1:k
if isequal(CombAB(i).foc,CombAB(j).foc)
        CombAB(i).mass=CombAB(i).mass+CombAB(j).mass
        CombAB(j).mass=0
        Delindex(r)=j; r=r+1; %Linhas a eliminar em Delindex
end
    end
end
%
% Eliminação de linhas iguais
% Linhas a eliminar em Delindex
CombAB = Delrowstruct(CombAB,Delindex)

```

```

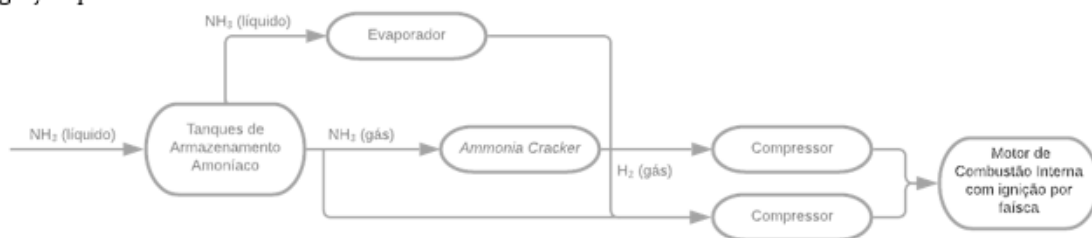
% Função SumFocNill para soma de BPA elementos focais vazios
% Estrutura CombAB que entra
% LALB Dimensão de CombAB
% kmass - somas dos BPA de elementos focais vazios
%
function [Ktot, nill] = SumFocNill(CombAB,LALB)
kmass=0
r=0
for i=1:LALB
    if isempty(CombAB(i).foc)
        kmass=kmass+CombAB(i).mass;
        r=r+1; nill(r)=i;
    end
end
Ktot=1-kmass;

```

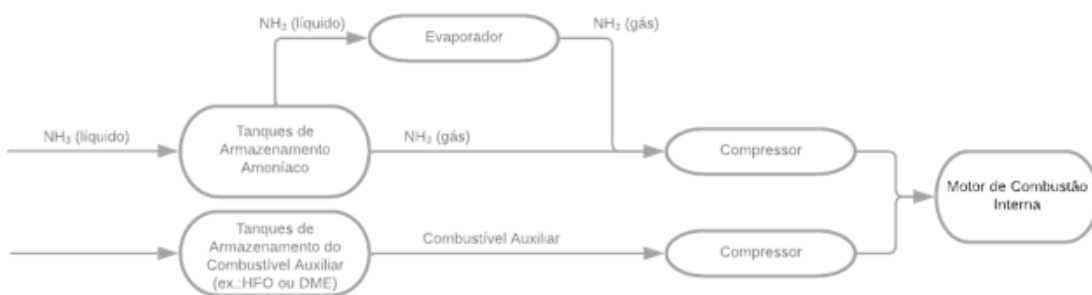
Anexos

Anexo A – Potenciais Configurações de Sistemas de Propulsão a Amoníaco

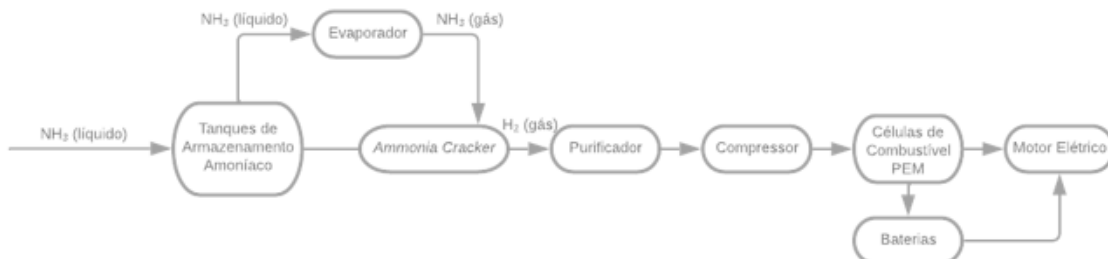
a) Sistema de propulsão a amoníaco constituído por um Motor de Combustão Interna com ignição por faísca



b) Sistema de propulsão a amoníaco constituído por um Motor de Combustão Interna



c) Sistema de propulsão a amoníaco constituído por Células de Combustível PEM



d) Sistema de propulsão a amoníaco constituído por Células de Combustível SO

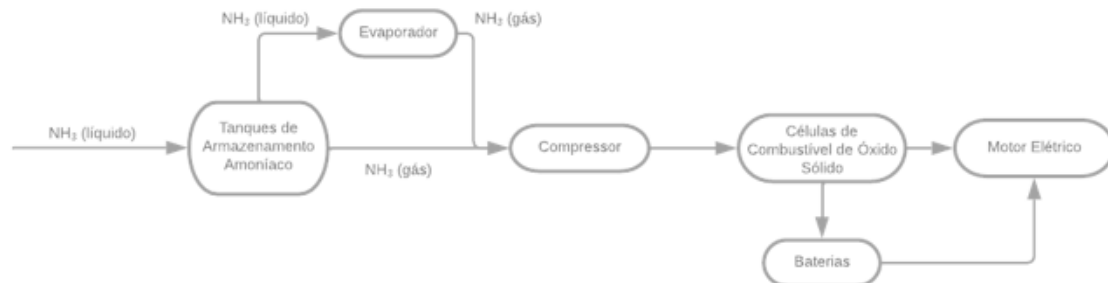


Figura 23 - Síntese de possíveis sistemas de propulsão alimentados a amoníaco (de Vries, 2019; Giddey et al., 2017; adaptado de Hansson et al., 2020; MAN Energy Solutions, 2019)

Anexo B – Escalas Rank FMEA

Quadro 6 - Escala referente ao parâmetro Ocorrência (O) (adaptado de Kabir & Papadopoulos, 2018; Liu et al., 2013)

<i>FMEA Rank</i>	Ocorrência	Probabilidade de falha
10	Probabilidade muito alta	$\geq 1/2$
9	Probabilidade alta	1/3 - 1/8
7	Probabilidade moderada	1/20 - 1/80
5	Probabilidade baixa	1/400 - 1/2000
3	Probabilidade muito baixa	1/15 000 - 1/150 000
1	Probabilidade remota	1/1 500 000

Quadro 7 - Escala referente ao parâmetro Severidade (S) (adaptado de Kabir & Papadopoulos, 2018; Liu et al., 2013)

<i>FMEA Rank</i>	Severidade	Descrição
10	Fatal	Impacto fatal no sistema, resultando em perda de vidas humanas e/ou danos irreparáveis ao meio ambiente. Plataforma inoperacional
9	Elevada	Impacto elevado no sistema com efeitos graves para a segurança, saúde ou meio ambiente. Operacionalidade restrita
7	Moderada	O sistema fica inoperacional com perda da funcionalidade primária com efeitos prejudiciais para a segurança, saúde ou meio ambiente. Operacionalidade limitada
5	Baixa	O sistema sofre ligeiros danos com ligeiros efeitos prejudiciais para a segurança, saúde ou meio ambiente. Operacionalidade razoável
3	Muito baixa	O sistema sofre ligeiros danos não perdendo a funcionalidade primária sem efeitos prejudiciais para a segurança, saúde ou meio ambiente. Operacionalidade garantida
1	Nenhuma	Não representa riscos para o desempenho do sistema, segurança, saúde ou meio ambiente. Operacionalidade garantida

Quadro 8 - Escala referente ao parâmetro Detetabilidade (D) (adaptado de Kabir & Papadopoulos, 2018; Liu et al., 2013)

<i>FMEA Rank</i>	Detetabilidade	Descrição
10	Incerteza absoluta	Não é possível detetar a causa potencial de falha ou o modo de falha consequente
9	Muito remota	Probabilidade muito remota da deteção da causa potencial de falha ou do modo de falha
7	Reduzida	Probabilidade reduzida da deteção da causa potencial de falha ou do modo de falha
5	Moderada	Probabilidade moderada da deteção da causa potencial de falha ou do modo de falha
3	Elevada	Probabilidade elevada da deteção da causa potencial de falha ou do modo de falha
1	Quase certa	A causa potencial de falha ou o modo de falha serão detetados quase certamente

Anexo C – Dados para o Cálculo da Autonomia

Tabela 21 - Dados de Consumo vs. Velocidade dos NPO (adaptado de Marinha Portuguesa, 2020)

2 MD's		
	Consumo (l/h)	Velocidade (nós)
10%	120	1,7
15%	130	2,9
20%	140	4,2
25%	150	5,4
30%	160	6,5
35%	170	7,6
40%	180	8,7
45%	190	9,8
50%	240	10,5
55%	340	12
60%	480	13,3
65%	620	15
70%	790	15,8
75%	990	16,9
80%	1180	17,8
85%	1390	18,5
90%	1550	19
95%	1660	19,8
100%	1720	20,4

Legenda
Dados Provas de Mar
Dados Estimados

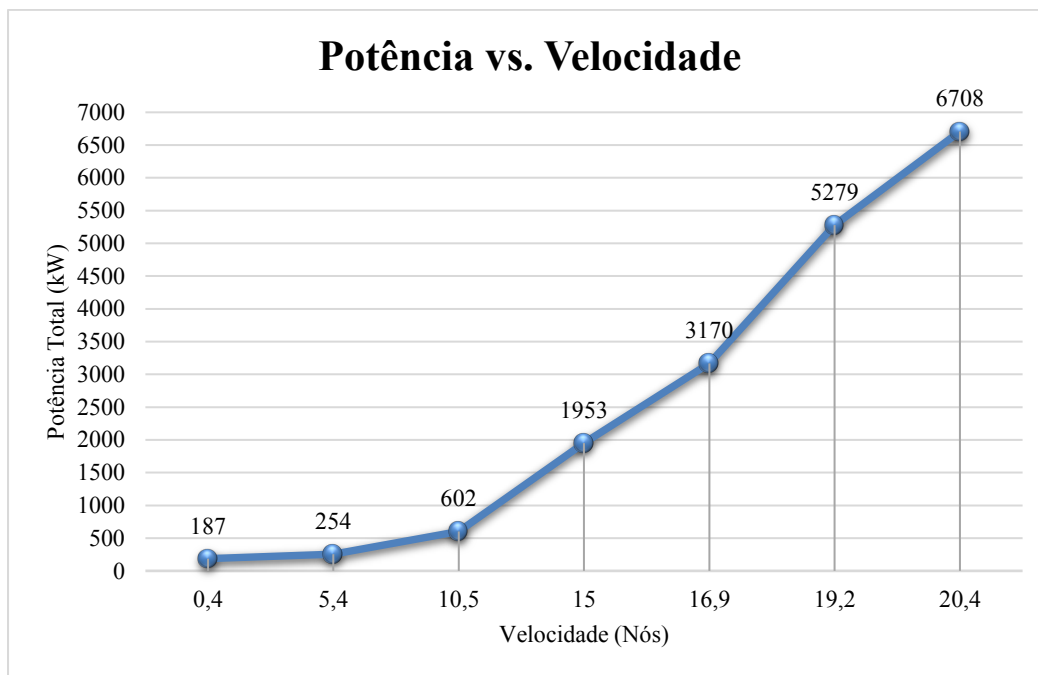


Gráfico 4 - Gráfico Potência vs. Velocidade, dados provenientes de Provas de Mar (Leite, 2020; Marinha Portuguesa, n.d.)

Anexo D – Respostas aos Inquéritos

Resposta *Expert 1*

1. De acordo com o exposto no *Executive Summary*, concorda com as conclusões obtidas no estudo efetuado? A escolha de combustíveis parece-lhe adequada?

As conclusões expressas no *Executive Summary* apresentado são claras e pragmáticas face ao objetivo do estudo. De igual forma o modelo de enquadramento e os pressupostos considerados. A combinação dos desenvolvimentos técnicos nesta área dos combustíveis e a inovação são fatores determinantes para aquilo que são as soluções a médio e a longo prazo. As soluções técnicas deste âmbito para uso militar (avaliação em contexto militar), como aliás é considerado, carecem naturalmente de elementos adicionais de contingência. Por outro lado, no ambiente de transição energética em curso, as envolventes consideradas adequadas para os fins pré-estabelecidos, condicionam e em simultâneo aceleram os desenvolvimentos tecnológicos.

Sim. O conjunto dos combustíveis equacionados possibilitam um amplo campo de análise que se ajusta àquilo que são os atuais desenvolvimentos técnicos e mesmo industriais neste âmbito, nomeadamente nas tecnologias emergentes e combustíveis alternativos. Face aos pressupostos aqui evidenciados pela objetividade do trabalho, e ao acréscimo de algumas limitações estruturais colocadas, tal não condiciona a existência de mecanismos e de previsíveis novas soluções que poderão sempre complementar as propostas existentes. Existem atualmente casos de aplicações de combustíveis marítimos (alguns ainda em fase e de natureza experimental) que se traduzirão certamente em avanços reais nesta matéria. Qualquer *design* aplicativo para energias de propulsão futuras deverá possibilitar sistemas energéticos modulares com possibilidades de *upgrade* para novas/diferenciadas tipologias energéticas. As diferentes possibilidades (propulsão e combustão) em conjugação com o processo de descarbonização jogam neste casos, com a necessária evidência da maturidade tecnológica adquirida.

2. As opiniões dos peritos serão conjugadas utilizando a Teoria de Dempster-Shafer. Para os elementos focais definidos propõe-se que atribua massas de probabilidade (m_i) com valores entre 0 e 1, de modo que o somatório das massas de probabilidade seja unitária. Caso não concorde com algumas soluções, coloque $m_i=0$; se julgar necessário adicione outras soluções, sendo de interesse que possam ser intersectadas com as existentes de modo a evitar um elevado valor de conflito (K).

Tabela 22 – Elementos focais e respetivas massas propostas pelo *Expert 1*

Elementos Focais	m_i
$\{S_1, S_4\}$	0,35
$\{S_5\}$	0,05
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	0,25
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$ ⁹	0,35
$\sum m_i$	1,00

⁹ Contendo a solução S_5

Resposta *Expert 2*

1. De acordo com o exposto no *Executive Summary*, concorda com as conclusões obtidas no estudo efetuado? A escolha de combustíveis parece-lhe adequada?

Face ao que está exposto no *Executive Summary* e dentro das minhas limitações, afigura-se adequada a forma como foi orientado o estudo, escolhidos os combustíveis e selecionadas as opções de acordo com as limitações indicadas.

2. As opiniões dos peritos serão conjugadas utilizando a Teoria de Dempster-Shafer. Para os elementos focais definidos propõe-se que atribua massas de probabilidade (m_i) com valores entre 0 e 1, de modo que o somatório das massas de probabilidade seja unitária. Caso não concorde com algumas soluções, coloque $m_i=0$; se julgar necessário adicione outras soluções, sendo de interesse que possam ser intersectadas com as existentes de modo a evitar um elevado valor de conflito (K).

Tabela 23 - Elementos focais e respetivas massas propostas pelo *Expert 2*

Elementos Focais	m_i
$\{S_1, S_4\}$	0,25
$\{S_5\}$	0,10
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	0,30
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	0,20
$\{S_1, S_2\}$	0,15
$\sum m_i$	1,00

Resposta *Expert 3*

1. De acordo com o exposto no *Executive Summary*, concorda com as conclusões obtidas no estudo efetuado? A escolha de combustíveis parece-lhe adequada?

Sim, a escolha de combustíveis parece-me adequada, embora sugira que se aborde, a par do biodiesel, a possibilidade de aplicação do diesel sintético. De salientar que os valores de rendimento associados a cada aplicação ou sistema de propulsor tem efeitos significativos nas demandas de volume e massa, especialmente. quando se compara tecnologias como as células de combustível e baterias, com motores de combustão interna.

2. As opiniões dos peritos serão conjugadas utilizando a Teoria de Dempster-Shafer. Para os elementos focais definidos propõe-se que atribua massas de probabilidade (m_i) com valores entre 0 e 1, de modo que o somatório das massas de probabilidade seja unitária. Caso não concorde com algumas soluções, coloque $m_i=0$; se julgar necessário adicione outras soluções, sendo de interesse que possam ser intersectadas com as existentes de modo a evitar um elevado valor de conflito (K).

Tabela 24 - Elementos focais e respetivas massas propostas pelo *Expert 3*

Elementos Focais	m_i
$\{S_1, S_4\}$	0,80
$\{S_5\}$	0,00
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	0,10
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	0,00
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$	0,10
$\sum m_i$	1,00

Resposta *Expert 4*

1. De acordo com o exposto no *Executive Summary*, concorda com as conclusões obtidas no estudo efetuado? A escolha de combustíveis parece-lhe adequada?

Concordo com as conclusões obtidas no estudo efetuado. A escolha dos combustíveis parece-me adequado, no entanto seria interessante a inclusão do diesel sintético.

2. As opiniões dos peritos serão conjugadas utilizando a Teoria de Dempster-Shafer. Para os elementos focais definidos propõe-se que atribua massas de probabilidade (m_i) com valores entre 0 e 1, de modo que o somatório das massas de probabilidade seja unitária. Caso não concorde com algumas soluções, coloque $m_i=0$; se julgar necessário adicione outras soluções, sendo de interesse que possam ser intersectadas com as existentes de modo a evitar um elevado valor de conflito (K).

Tabela 25 - Elementos focais e respetivas massas propostas pelo *Expert 4*

Elementos Focais	m_i
$\{S_1, S_4\}$	0,70
$\{S_5\}$	0,00
$\{S_1, S_2, S_3, S_4\}$	0,10
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$	0,00
$\{S_1, S_2, S_3, S_4, S_6\}$	0,20
$\sum m_i$	1,00

