

**INSTITUTO UNIVERSITÁRIO MILITAR
DEPARTAMENTO DE ESTUDOS PÓS-GRADUADOS
CURSO PROMOÇÃO A OFICIAL SUPERIOR – MARINHA
2021/2022 – 1.ª EDIÇÃO**



TRABALHO DE INVESTIGAÇÃO INDIVIDUAL

QUAL O FUTURO DO HIDROGÉNIO NA MARINHA?

O TEXTO CORRESPONDE A TRABALHO FEITO DURANTE A FREQUÊNCIA DO CURSO NO IUM SENDO DA RESPONSABILIDADE DO SEU AUTOR, NÃO CONSTITUINDO ASSIM DOCTRINA OFICIAL DAS FORÇAS ARMADAS PORTUGUESAS OU DA GUARDA NACIONAL REPUBLICANA.

**Nuno Alexandre Antunes Martins Pessanha Santos
PRIMEIRO-TENENTE, ENGENHEIRO NAVAL – RAMO
ARMAS E ELETRÓNICA**



INSTITUTO UNIVERSITÁRIO MILITAR
DEPARTAMENTO DE ESTUDOS PÓS-GRADUADOS
QUAL O FUTURO DO HIDROGÉNIO NA MARINHA?

**PRIMEIRO-TENENTE, ENGENHEIRO NAVAL – RAMO ARMAS
E ELETRÓNICA Nuno Alexandre Antunes Martins Pessanha Santos**

Trabalho de Investigação Individual do CPOS-M 2021/2022 – 1.ª Edição

Pedrouços 2022



INSTITUTO UNIVERSITÁRIO MILITAR
DEPARTAMENTO DE ESTUDOS PÓS-GRADUADOS
QUAL O FUTURO DO HIDROGÉNIO NA MARINHA?

**PRIMEIRO-TENENTE, ENGENHEIRO NAVAL – RAMO ARMAS
E ELETRÓNICA Nuno Alexandre Antunes Martins Pessanha Santos**

Trabalho de Investigação Individual do CPOS-M 2021/2022 – 1.^a Edição

Orientador: CAPITÃO-TENENTE, MARINHA Dinis Filipe Vargas Cabrita

Pedrouços 2022



Declaração de compromisso Antiplágio

Eu, **Nuno Alexandre Antunes Martins Pessanha Santos**, declaro por minha honra que o documento intitulado *Qual o futuro do Hidrogénio na Marinha?* corresponde ao resultado da investigação por mim desenvolvida, enquanto auditor do **Curso de Promoção a Oficial Superior 2021/2022 – 1.ª Edição** no Instituto Universitário Militar, e que é um trabalho original, em que todos os contributos estão corretamente identificados em citações e nas respetivas referências bibliográficas.

Tenho consciência que a utilização de elementos alheios não identificados constitui grave falta ética, moral, legal e disciplinar.

Pedrouços, **25 de janeiro de 2022**

Nuno Alexandre Antunes Martins Pessanha Santos
Primeiro-tenente, Engenheiro Naval – Ramo Armas e Eletrónica



Agradecimentos

Neste espaço, vou agradecer a todos aqueles que considero que tiveram um contributo essencial para a elaboração deste trabalho. Não vou agradecer por ordem de importância, porque para mim, todos foram importantes de alguma forma – todas as peças de um puzzle são essenciais para o conseguir terminar.

Queria começar por agradecer a todos os entrevistados que prontamente aceitaram participar, tendo dado contributos valiosos para o desenvolvimento e sustentação da estratégia proposta neste trabalho de investigação. Manifesto assim o meu profundo agradecimento ao Vice-Almirante Edgar Bastos Ribeiro, Vice-Almirante Jorge Novo Palma, Capitão-de-mar-e-guerra Francisco Rebocho Antunes, Capitão-tenente Francisco Cunha Gomes e Marcelo Amaral da empresa PRF.

Apesar de já ter agradecido anteriormente como elemento entrevistado, quero deixar um agradecimento especial ao Capitão-tenente Francisco Cunha Gomes por todo o apoio prestado numa fase inicial de definição do tema (entrevista exploratória) e por estar sempre disponível para ajudar. É visível o entusiasmo com que aborda estas temáticas, o que certamente muito contribui no desempenho das suas funções.

Ao Capitão-tenente Dinis Vargas Cabrita por todo o apoio demonstrado e pela orientação deste trabalho, sendo sem dúvida fundamental durante toda a sua elaboração. Fica aqui um sentido muito obrigado e votos de enorme sucesso pessoal e profissional.

Nuno Pessanha Santos, Lisboa, 25 de janeiro de 2022



Índice

1. Introdução	1
2. Enquadramento teórico e concetual	4
2.1 Revisão de literatura	4
2.1.1 Produção.....	4
2.1.2 Armazenamento	5
2.1.3 Aplicações Gerais.....	6
2.1.4 Aplicações no domínio marítimo	7
2.2 Modelo de análise	8
3. Metodologia e Método.....	10
3.1 Metodologia.....	10
3.2 Método.....	11
3.2.1 Participantes e procedimentos.....	11
3.2.2 Instrumentos de recolha de dados	12
3.2.3 Técnicas de tratamento de dados.....	12
4. Apresentação dos dados e discussão dos resultados.....	13
4.1 Sistemas de produção de hidrogénio	13
4.1.1 Hidrogénio verde.....	13
4.1.2 Hidrogénio verde na Marinha	15
4.1.3 Síntese conclusiva	15
4.2 Sistemas de hidrogénio atualmente existentes.....	16
4.2.1 Aplicabilidade no domínio marítimo	17
4.2.2 Aplicabilidade na Marinha Portuguesa	18
4.2.3 Síntese conclusiva	18
4.3 Sistemas de hidrogénio na Marinha.....	19
4.3.1 Produção.....	19
4.3.2 Utilização	20
4.3.3 Síntese conclusiva	24
4.4 Estratégia para o uso de hidrogénio na Marinha.....	25
4.4.1 Análise SWOT	25



4.4.2	Estratégia proposta	27
4.4.2.1	Curto prazo	27
4.4.2.2	Médio prazo.....	27
4.4.2.3	Longo prazo.....	28
4.4.3	Síntese conclusiva	28
5.	Conclusões.....	30
	Referências bibliográficas	33

Índice de Apêndices

Apêndice A	– Corpo de conceitos.....	Apd A - 1
Apêndice B	– Guião padrão da entrevista semiestruturada	Apd B - 1
Apêndice C	– Entrevista ao Superintendente do Material.....	Apd C - 1
Apêndice D	– Vice-Chefe do Estado-Maior da Armada	Apd D - 1
Apêndice E	– Divisão de Material do Estado-Maior da Armada	Apd E - 1
Apêndice F	– Entrevista à empresa PRF	Apd F - 1
Apêndice G	– Análise quantitativa das entrevistas (simplificada).....	Apd G - 1

Índice de Figuras

Figura 1	– Cronograma da legislação aplicável.....	2
Figura 2	– Relações entre OE e QD	10
Figura 3	– Percorso metodológico.....	11
Figura 4	–Áreas na BNL para painéis solares, produção e armazenamento	19
Figura 5	– Sistema de hidrogénio – Armazenamento e Geração de energia.....	20
Figura 6	– Fases de implementação de um projeto de hidrogénio marítimo.....	21
Figura 7	– NRP <i>Guadiana</i> : Representação (<i>esquerda</i>) e desenho (<i>direita</i>).....	22
Figura 8	– UAM <i>Zêzere</i> : Representação (<i>esquerda</i>) e desenho (<i>direita</i>).....	22
Figura 9	– Perceção das entrevistas (<i>word cloud</i> simplificada)	25
Figura 10	– Estratégia proposta a curto, médio e longo prazo	28
Figura 11	– Entrevistas (<i>word cloud</i>)	Apd G - 1



Índice de Tabelas

Quadro 1 – Métodos de produção de hidrogénio	5
Quadro 2 – Métodos de armazenamento de hidrogénio – Vantagens vs. Desvantagens	6
Quadro 3 – Hidrogénio como combustível marítimo – Benefícios e Desafios	7
Quadro 4 – Descrição do projeto <i>FLAGSHIPS</i>	8
Quadro 5 – Descrição do projeto <i>HySHIP</i>	8
Quadro 6 – Eletrolisador PEM – Vantagens vs. Desvantagens.....	8
Quadro 7 – Modelo de análise.....	9
Quadro 8 – Resumo da metodologia	10
Quadro 9 – Especialistas entrevistados - Marinha.....	11
Quadro 10 – Especialista entrevistado - Indústria	12
Quadro 11 – Sistemas de produção de hidrogénio	14
Quadro 12 – Energia eólica – Vantagens & Desvantagens	14
Quadro 13 – Energia solar – Vantagens & Desvantagens.....	14
Quadro 14 – Comparação entre o hidrogénio e outros combustíveis existentes	16
Quadro 15 – Especificações gerais para navios a hidrogénio	21
Quadro 16 – Projeto de adaptação para hidrogénio do NRP <i>Guadiana</i>	22
Quadro 17 – Projeto de adaptação para hidrogénio do UAM <i>Zêzere</i>	22
Quadro 18 – Análise ao risco de incêndio - Requisitos da convenção SOLAS	23
Quadro 19 – Proposta de análise SWOT na abordagem do hidrogénio na Marinha.....	26
Quadro 20 – Análise de conteúdo - Superintendente do Material.....	Apd C - 1
Quadro 21 – Análise de conteúdo - Vice-Chefe do Estado-Maior da Armada	Apd D - 1
Quadro 22 – Análise de conteúdo - Divisão de Material	Apd E - 1
Quadro 23 – Análise de conteúdo - Empresa PRF	Apd F - 1
Quadro 24 – Unidades de registo com maiores ocorrências	Apd G - 1



Resumo

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma estratégia para o uso de sistemas de hidrogénio (produção, armazenamento e utilização) na Marinha, procurando assim uma análise de como deverá ser o futuro. Os sistemas de hidrogénio no domínio marítimo ainda se encontram em desenvolvimento, não existindo atualmente soluções e alternativas comerciais. No que respeita à produção, já existem algumas soluções a nível europeu, mas Portugal ainda se encontra numa fase exploratória. Para atingir o objetivo proposto, foi adotado um desenho de pesquisa de estudo de caso, seguindo uma metodologia de raciocínio indutivo, baseada numa estratégia qualitativa reforçada com dados quantitativos. A aquisição de dados foi efetuada através de análise documental e entrevistas com especialistas na Marinha e indústria. Através de uma análise *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats* (SWOT), foi possível identificar como principais limitações atuais os custos associados, a falta de maturidade tecnológica e a falta de conhecimento existente na organização. A estratégia proposta a curto, médio e longo prazo deverá incidir na autonomia de produção, no uso de painéis solares e aerogeradores (aquisição de energia no arco diurno e noturno), na utilização para transporte de passageiros, reconversão de meios navais e numa última fase na aquisição de novo equipamento.

Palavras-chave:

Energia; Hidrogénio; Estratégia; Sustentabilidade; Marinha.



Abstract

This work aims to propose a strategy for using hydrogen systems (production, storage and utilization) in the Navy, thus looking for an analysis of the future. The hydrogen systems in the maritime domain are still under development, and there are currently no commercial solutions and alternatives. There are already some solutions at the European level regarding production, but Portugal is still in an exploratory phase. A case study research design was adopted, following an inductive methodology, based on a qualitative strategy reinforced with quantitative data to achieve the proposed objective. The data acquisition was made by document analysis and interviews with experts in the Navy and industry. Through a Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (SWOT) analysis, the main identified limitations are the associated costs, the lack of technological maturity, and the lack of existing knowledge in the organization. The short, medium and long term proposed strategy should focus on production autonomy, solar panels and wind turbines utilization (daytime and nighttime arc energy acquisition), passenger transport, reconversion of naval platforms, and in the last phase in the acquisition of new equipment.

Keywords:

Energy; Hydrogen; Strategy; Sustainability; Navy.



Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

A

ABC *Anglo Belgian Corporation*

B

BNL Base Naval de Lisboa

C

CMB *Company Maritime Belge*

CO₂ Dióxido de Carbono

D

DADN Diretiva Ambiental para a Defesa Nacional

DEM Diretiva Estratégica de Marinha

DNV *Det Norske Veritas*

E

EMA Estado-Maior da Armada

EUA Estados Unidos da América

H

H Hidrogénio

HC Hidrocarbonetos

L

LOHC *Liquid Organic Hydrogen Carriers*

M

MARPOL *Marine Pollution*

MP Marinha Portuguesa

N

NRP Navio da República Portuguesa

NO_x Óxido de Nitrogénio

O

OE Objetivos Específicos

OG Objetivo Geral

P

PADADN Plano de Ação da Diretiva Ambiental para a Defesa Nacional

PEM *Proton Exchange Membrane*

PISAmb Programa Intersectorial para a Sustentabilidade Ambiental



PNEC 2030	Plano Nacional Energia e Clima 2030
Q	
QC	Questão Central
QD	Questões Derivadas
R	
RNC 2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
S	
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SOLAS	<i>Safety Of Life At Sea</i>
SWOT	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats</i>
T	
TII	Trabalho de Investigação Individual
U	
UAM	Unidade Auxiliar da Marinha



1. Introdução

Tudo o que somos é resultado do que pensamos.

Gautama Buddha

O impacto da poluição causada pelo ser humano no meio ambiente tem sido um tópico de elevado interesse mundial e por consequência académico (Goudie, 2018; Lade et al., 2020). Como resultado direto do aumento da poluição mundial, tem-se verificado diminuição da biodiversidade animal (Pievani, 2014; Su et al., 2021), aumento do número de doenças respiratórias (Bălă et al., 2021; Kumar et al., 2019), aumento dos elementos tóxicos existentes no solo (S. Khan et al., 2021; Saha et al., 2017), aumento de microplásticos nos oceanos e rios (Mani et al., 2019; Zhang et al., 2020), aumento de pesticidas na água potável (Syafudin et al., 2021), entre muitos outros efeitos nefastos.

A preocupação mundial com a poluição existente, ainda que por vezes sem consequências práticas, levou à criação de legislação própria sendo que no domínio marítimo a mais importante será a convenção internacional para a prevenção da poluição por navios – *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships* designada por *Marine Pollution* (MARPOL) 73/78 (International Maritime Organization [IMO], 2019).

Tirando os acidentes que podem ocorrer por via marítima e as descargas de substâncias diretamente na água, a grande preocupação atual será a prevenção da poluição do ar por navios (Russo et al., 2018; Tichavska & Tovar, 2017). Grande parte das emissões poluentes são originadas por óxidos de nitrogénio NO_x , dióxido de carbono CO_2 , dióxido de enxofre SO_2 e gases hidrocarbonetos HC (Saxe & Larsen, 2004; Whall et al., 2002). Além da poluição com consequências nocivas para o planeta terra, o CO_2 é um gás que contribui diretamente para o efeito estufa (Mikhaylov et al., 2020).

Durante as cimeiras de Lima (*Lima Call for Climate Action*) em 2014 (Europeu, 2014) e Paris (Organização das Nações Unidas [ONU], 2015) em 2015, foi acordada uma diminuição até 2030 de pelo menos 40% das emissões de gases de efeito estufa (comparando com os valores de 1990) por forma a limitar o aumento da temperatura global em 2° C até 2100.

Portugal assume claramente este compromisso através da estratégia definida no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050) em 2019 (Presidência do Conselho de Ministros [PCM], 2019), originando o Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC



2030) em 2020. Este descreve a visão estratégica do país até 2030, por forma a alcançar a neutralidade carbónica em 2050 (PCM, 2020) permitindo assim perspetivar o futuro com algum otimismo.

No seguimento da estratégia adotada por Portugal no âmbito da defesa, é criada a Diretiva Ambiental para a Defesa Nacional (DADN) em 2020 (Gabinete do Ministro da Defesa Nacional, 2020) originando o Plano de Ação da Diretiva Ambiental para a Defesa Nacional (PADADN), que define as medidas, indicadores e metas a aplicar. No âmbito específico da Marinha Portuguesa (MP), é definida a Diretiva Estratégica de Marinha (DEM) onde está incluído o Programa Intersectorial para a Sustentabilidade Ambiental (PISAmb) (Marinha Portuguesa [MP], 2020). Este define os objetivos ambientais a cumprir até 2024 (MP, 2018). Um cronograma da legislação aplicável, encontra-se representado na Figura 1.

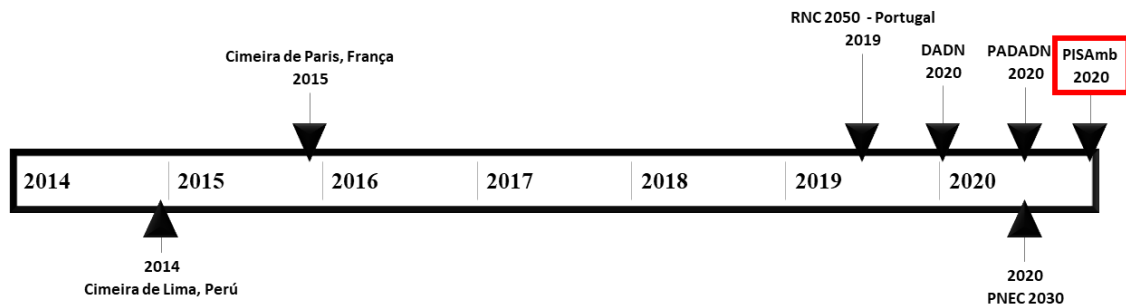


Figura 1 – Cronograma da legislação aplicável

Por forma a conseguir cumprir com o objetivo nacional de obter neutralidade carbónica, este Trabalho de Investigação Individual (TII) abordará o hidrogénio como forma de geração de energia, na Marinha, considerando um horizonte temporal de 1998 a 2022. O primeiro submarino convencional (não nuclear) movido a hidrogénio denominado *type 212* foi desenvolvido pela Alemanha em 1998, o que constituiu o início da utilização desta tecnologia para geração de energia em plataformas navais (Hawser, 2017). O conteúdo abordado será baseado na produção, armazenamento e utilização de hidrogénio.

Tendo também como base o previsto no PISAmb, e que está devidamente alinhado com os objetivos estratégicos definidos para a defesa, pretende-se como Objetivo Geral (OG) deste trabalho *propor uma estratégia para o uso do hidrogénio na MP*. Por forma a atingir o OG, foram definidos os seguintes Objetivos Específicos (OE):

- (OE1) Analisar os sistemas de produção de hidrogénio atualmente existentes;
- (OE2) Analisar os sistemas de hidrogénio existentes noutras marinhas;
- (OE3) Avaliar os sistemas de hidrogénio que devem ser utilizados.



No final das ações expostas anteriormente, deverá ser possível propor uma estratégia para o uso de hidrogénio na Marinha e responder à Questão Central (QC) *qual a melhor estratégia para o uso de hidrogénio na Marinha?* Esta estratégia deve ser ajustada à realidade existente tendo em conta a maturidade da tecnologia e os custos associados.

Este TII insere-se no contexto das ciências militares, no domínio dos elementos nucleares das ciências naturais e mais concretamente na área de investigação e técnicas e tecnologias militares na subárea de engenharias de aplicação militar (Academia de Ciência de Lisboa [ACL], 2011).

Estruturalmente, este TII encontra-se dividido em cinco capítulos incluindo a presente introdução. No segundo capítulo, efetua-se uma revisão da literatura, apresentando-se o modelo de análise utilizado. No terceiro capítulo, aborda-se a metodologia e o método aplicado. No quarto capítulo, apresenta-se os dados e efetua-se a sua discussão. E finalmente, no quinto capítulo, apresenta-se as conclusões da investigação.



2. Enquadramento teórico e concetual

O que eu ouço, eu esqueço.

O que eu vejo, eu lembro.

O que eu faço, eu entendo.

Confúcio

Neste capítulo apresenta-se a revisão de literatura (Subcapítulo 2.1) e descreve-se o modelo de análise (Subcapítulo 2.2) utilizado na elaboração deste TII.

2.1 Revisão de literatura

No mundo em que vivemos, os recursos energéticos e o seu custo de produção devem ser cuidadosamente analisados. Os custos de produção a ter em conta não são só os financeiros, mas também os ambientais, procurando assim criar sustentabilidade ambiental num planeta cada vez mais poluído, especialmente pela utilização de combustíveis fósseis (Casper, 2010; Lelieveld et al., 2019). A sustentabilidade ambiental é atingida quando a sociedade consegue satisfazer as suas necessidades sem comprometer os ecossistemas e a diversidade biológica (Morelli, 2011). Qualquer fonte de energia sustentável (*vide* corpo de conceitos descrito no Apêndice A) deve ser segura, com nenhuma ou poucas emissões de dióxido de carbono (gás de efeito estufa) e deve ser suportada por uma economia robusta garantindo preços competitivos e uma elevada disponibilidade (Edwards et al., 2007).

Na busca por fontes de energia (vetores de energia) com impacto nulo ou baixo no ambiente surge o hidrogénio H que é um elemento abundante, com elevada volatilidade, leve e simples, pois é apenas composto por um protão e um eletrão (O'hayre et al., 2016). Este subcapítulo irá explorar os constituintes de um sistema de hidrogénio, que comporta a produção, armazenamento e utilização (Uchida & R.Harada, 2019).

2.1.1 Produção

A produção de hidrogénio é obtida pela separação de materiais recorrendo a processos térmicos, químicos e biológicos (Larminie et al., 2003), podendo ter diversas origens conforme descrito no Quadro 1. Deve ser garantida uma produção de hidrogénio recorrendo a fontes de energia sustentáveis – hidrogénio verde – estando esta designação normalmente associada à produção de hidrogénio quando obtido através da eletrólise da água usando energia fotovoltaica (Dincer, 2012). Atualmente a China é o maior produtor mundial de hidrogénio. A sua obtenção é efetuada através de reforma a vapor (usando outros



combustíveis como o etanol ou propano), através do desperdício proveniente da indústria (durante a produção de cloro é produzido hidrogénio como desperdício) e através do processo de eletrólise (Abdalla et al., 2018; Nikolaidis & Poullikkas, 2017). No caso dos submarinos, é apontada a reforma a vapor utilizando metanol como o futuro da produção de hidrogénio diretamente a bordo (Krummrich & Hammerschmidt, 2016; Krummrich & Llabrés, 2015).

Quadro 1 – Métodos de produção de hidrogénio

Tipo	Origem	Método	
Combustíveis Fósseis	Reforma de hidrocarbonetos	Vapor	
		Oxidação parcial	
		Reforma autotérmica	
	Pirólise de hidrocarbonetos		
Fontes Renováveis	Biomassa	Processo Biológico	Biofotólise
			Fermentação escura
			Fotofermentação
		Processo Químico	Pirólise
			Gaseificação
			Combustão
	Água	Liquefação	
		Eletrólise	
		Termólise	
		Fotólise	

Fonte: Adaptado a partir de Abdalla et al. (2018); Nikolaidis and Poullikkas (2017); Singla et al. (2021); Yue et al. (2021).

2.1.2 Armazenamento

Os métodos de armazenamento estão em constante evolução, sendo que os mais comumente utilizados são gás comprimido, líquido, composto orgânico líquido (reação química que permite absorção/libertação de hidrogénio), nanofibras geralmente de carbono ativado (funciona por adsorção/adesão das moléculas à superfície sólida), microesferas usualmente de vidro (elevada permeabilidade a altas temperaturas e impermeabilidade a baixas temperaturas) e hidretos metálicos (certos metais conseguem criar elementos estáveis através de ligações aos átomos de hidrogénio). As vantagens e desvantagens dos métodos de armazenamento foram analisadas e encontram-se descritas no Quadro 2. Nos dias de hoje, em grande parte dos submarinos com propulsão utilizando hidrogénio, são utilizados tanques de hidretos metálicos (Krummrich & Hammerschmidt, 2016; Krummrich & Llabrés, 2015), procurando assim um armazenamento seguro e massa volúmica elevada.



Quadro 2 – Métodos de armazenamento de hidrogénio – Vantagens vs. Desvantagens

Método	Vantagens	Desvantagens
Gás comprimido	<ul style="list-style-type: none"> • Simples • Sem desafio tecnológico • Sem limite de tempo de armazenamento • Pressões > 70 MPa a massa volúmica é semelhante à do hidrogénio líquido 	<ul style="list-style-type: none"> • Atinge maior temperatura comprimido, o que ao carregar um cilindro diminui a densidade de armazenamento • Altas pressões de armazenamento podem ser catastróficas em caso de rutura • Massa volúmica limitada, não incrementa proporcionalmente com o aumento de pressão
Líquido	<ul style="list-style-type: none"> • Elevada massa volúmica a baixas pressões 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessário manter o reservatório a temperaturas baixas < - 253°C (criogénicos) • Existência de perdas por evaporação
Composto orgânico líquido	<ul style="list-style-type: none"> • Armazenamento seguro • Utilização da infraestrutura de combustível • A hidrogenação e deshidrogenação são efetuadas à mesma temperatura • Possível efetuar reaproveitamento de energia e.g. gases de combustão 	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo de hidrogenação e deshidrogenação
Nanofibras	<ul style="list-style-type: none"> • Armazenamento seguro • Adsorção efetuada à temperatura ambiente • Baixo custo quando gerado industrialmente 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia em desenvolvimento
Microesferas	<ul style="list-style-type: none"> • Armazenamento seguro • As microesferas adaptam-se ao espaço de armazenamento • Resistentes à contaminação por gases atmosféricos 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa massa volúmica de armazenamento • Pode existir perda à temperatura ambiente (lenta) • Tecnologia em desenvolvimento
Hidretos Metálicos	<ul style="list-style-type: none"> • Atingem massa volúmica semelhante ao líquido e gasoso • Armazenamento seguro • Elevado grau de pureza • Reação exotérmica na absorção e endotérmica na dessorção 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessário um elevado grau de pureza • Tempo de absorção e dessorção • Elevadas temperaturas para dessorção

Fonte: Adaptado a partir de Abdalla et al. (2018); Abe et al. (2019); Di et al. (2009); Larminie et al. (2003); Markiewicz et al. (2015); Modisha et al. (2019); Niaz et al. (2015); Riis et al. (2005); Spiegel (2007); Züttel (2004).

2.1.3 Aplicações Gerais

Apesar de o hidrogénio poder ser utilizado como único combustível ou combinado com outros diretamente em motores diesel ou a gás (Dimitriou & Tsujimura, 2017; Shipping, 2021; Van Hoecke et al., 2021), tipicamente são usadas pilhas de combustível para gerar energia. A mais utilizada nos dias de hoje é a *Proton Exchange Membrane* (PEM) inventada em meados de 1960, tendo tipicamente uma eficiência máxima de 60% (Hacker & Mitsushima, 2018; Shekhawat et al., 2011; Spiegel, 2007; Yue et al., 2021).

O hidrogénio é um reagente utilizado em muitos setores da indústria, sendo que a maior aplicação direta será certamente como motor de foguete utilizado pela indústria espacial (Ventura et al., 2007). Combinado com pilhas de combustível para conseguir



produzir energia elétrica, as suas aplicações têm sido as mais variadas destacando-se camiões e carrinhas (Kast et al., 2018), autocarros (Logan et al., 2020; Turoń, 2020), comboios (Logan et al., 2021; Piraino et al., 2021), veículos de utilização pessoal (Manoharan et al., 2019), bicicletas (Alparone et al., 2018), entre outras.

2.1.4 Aplicações no domínio marítimo

O transporte marítimo, devido à sua escala global, contribui significativamente para a poluição do ar, sendo consideráveis os gases de efeito estufa libertados (Balcombe et al., 2019; Miola & Ciuffo, 2011). O uso de hidrogénio como combustível marítimo pode aqui apresentar alguns benefícios e desafios, conforme se encontra descrito no Quadro 3. A falta de experiência existente constitui, por si só, um dos maiores desafios, o que certamente irá atrasar a implementação da tecnologia neste domínio (Shipping, 2021). O uso de hidrogénio a bordo também pode constituir perigo acrescido, devendo ser tomadas medidas adicionais durante a fase de projeto por forma a minimizar os riscos existentes (Blaylock et al., 2018; Mao et al., 2021; Pratt & Klebanoff, 2018).

Quadro 3 – Hidrogénio como combustível marítimo – Benefícios e Desafios

Benefícios	Desafios
<ul style="list-style-type: none">• Livre de carbono e enxofre• Pode ser produzido utilizando fontes de energia sustentáveis• Pode ser armazenado e transportado em forma líquida ou gasosa• Ao utilizar pilhas de combustível não existe libertação de gases de efeito estufa• Dispersa rapidamente, não criando facilmente atmosferas explosivas	<ul style="list-style-type: none">• Sem produção e distribuição de hidrogénio em larga escala• Em processo de desenvolvimento – falta de experiência no uso marítimo• Disponibilidade de hidrogénio produzido através de energias renováveis• Em espaços confinados podem ser criadas atmosferas explosivas• Armazenamento líquido necessita de reservatórios criogénicos a baixa temperatura• Material – E.g. reservatórios• Libertação de óxidos de nitrogénio quando utilizado diretamente como combustível

Fonte: Adaptado a partir de Shipping (2021).

A nível europeu têm surgido alguns projetos de uso de hidrogénio no domínio marítimo, sendo os mais significativos o *FLAGSHIPS* (Quadro 4) e o *HySHIP* (Quadro 5) cujo comissionamento previsto é início de 2022 e 2024. Não é de estranhar a participação da Noruega em ambos os projetos, pois um dos maiores fabricantes de eletrolisadores do mundo (*NEL Hydrogen*) encontra-se lá sediado (Pagliaro, 2020). Os eletrolisadores permitem a conversão de água em hidrogénio, sendo que os mais utilizados são do tipo PEM (Spiegel, 2007). As suas vantagens e desvantagens encontram-se descritas no Quadro 6.



Quadro 4 – Descrição do projeto *FLAGSHIPS*

Projeto	Descrição sumária	
<i>FLAGSHIPS</i>	Comissionamento	Início de 2022
	Localização	França e Noruega
	Nº de Unidades	Dois navios comerciais
	Fonte de energia	Hidrogénio em gás comprimido
	Geração de energia	Pilha de combustível (PEM)
	Orçamento	Sete milhões de euros
	Parceiros	Onze - França, Finlândia e Noruega

Fonte: Adaptado a partir de Mikkola (2019); Torvanger (2021).

Quadro 5 – Descrição do projeto *HySHIP*

Projeto	Descrição sumária	
<i>HySHIP</i>	Comissionamento	2024
	Localização	Noruega
	Nº de Unidades	Um cargueiro
	Fonte de energia	Hidrogénio líquido
	Geração de energia	Pilha de combustível (PEM)
	Orçamento	Oito milhões de euros (Incluindo estrutura produção/distribuição Hidrogénio)
	Parceiros	Catorze – Noruega e Suíça

Fonte: Adaptado a partir de CleanTech (2021); Torvanger (2021).

Quadro 6 – Eletrolisador PEM – Vantagens vs. Desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Elevada eficiência 80% a 90%	Elevado custo – Membrana e elétrodo
Compacto	
Tempo de resposta rápido	
Funciona à temperatura ambiente	
Permite variações na alimentação elétrica	
Hidrogénio produzido com elevada pureza	

Fonte: Adaptado a partir de Larminie et al. (2003); Spiegel (2007); Varkarakis et al. (2003).

2.2 Modelo de análise

Definir o modelo de análise é essencial, pois agrega o domínio concetual ao metodológico. Este TII foi desenvolvido tendo por base o modelo de análise descrito no Quadro 7, de acordo com o definido para as Questões Derivadas (QD), QC, OE e OG.



Quadro 7 – Modelo de análise

Objetivo Geral (OG)		Propor uma estratégia para o uso de hidrogénio na Marinha			
Objetivos Específicos (OE)	Questão Central (QC)	Qual a estratégia para o uso de hidrogénio na Marinha?			
	Questões Derivadas (QD)	Conceito	Dimensão	Indicadores	Recolha de dados
Analisar os sistemas de produção de hidrogénio atualmente existentes (OE1)	De que forma os métodos de produção de hidrogénio verde teriam aplicabilidade na Marinha? (QD1)	Produção de hidrogénio	Utilização Características Capacidades	Especificações	Análise Documental
				Implementações	
				Tipologias	
				Financeiros	
Analisar os sistemas de hidrogénio existentes noutras marinhas (OE2)	De que forma os sistemas de hidrogénio utilizados por outras marinhas teriam aplicabilidade na Marinha Portuguesa? (QD2)	Sistemas de hidrogénio	Utilização Características Capacidades	Especificações	Análise Documental
				Implementações	
				Tipologias	
Avaliar os sistemas de hidrogénio que devem ser utilizados (OE3)	Como podemos utilizar sistemas de hidrogénio na Marinha? (QD3)	Sistemas de hidrogénio	Utilização Características Capacidades	Implementações	Análise Documental + Entrevistas (semiestruturadas) Marinha e Indústria
				Tipologias	
				Especificações	
				Financeiros	



3. Metodologia e Método

Quem nunca errou, nunca experimentou nada novo.

Albert Einstein

Neste capítulo descreve-se a metodologia (Subcapítulo 3.1) e o método (Subcapítulo 3.2) utilizado na elaboração deste TII.

3.1 Metodologia

Para a elaboração deste TII foi adotado um raciocínio indutivo. Os sistemas de hidrogénio foram observados sendo estabelecidas generalizações por forma a propor uma estratégia para o uso de hidrogénio na Marinha a curto, médio (3 a 5 anos) e longo (10 a 12 anos) prazo (Santos et al., 2019).

A investigação foi desenvolvida utilizando uma estratégia qualitativa reforçada com dados quantitativos e o desenho de pesquisa adotado foi o estudo de caso. O estudo de caso foi baseado numa investigação aprofundada sobre a melhor estratégia para utilização de sistemas de hidrogénio (tópico específico), num cenário da vida real que é a Marinha (Saunders et al., 2019). Um resumo da metodologia encontra-se representado no Quadro 8.

Quadro 8 – Resumo da metodologia

Raciocínio	Indutivo
Estratégia	Qualitativa + Reforço Quantitativo
Desenho de pesquisa	Estudo de caso

Tendo por base o descrito no Subcapítulo 2.2, a resposta às QD é essencial por forma a conseguir cumprir com os OE definidos (Figura 2).

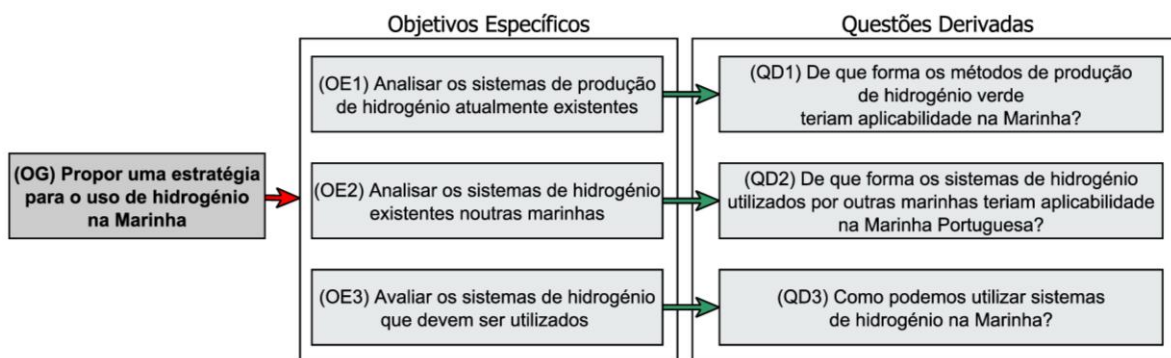


Figura 2 – Relações entre OE e QD

O percurso metodológico (Figura 3) iniciou-se com a recolha de dados, seguindo-se a sua análise e a conseqüente elaboração de sínteses conclusivas. Do conhecimento adquirido, foi possível a formulação de hipóteses. Destas hipóteses, e através de uma verificação mais rigorosa, foi possível estabelecer generalizações e propor uma estratégia para o uso do hidrogénio na Marinha que pode ser aplicada noutras marinhas - lei ou teoria.

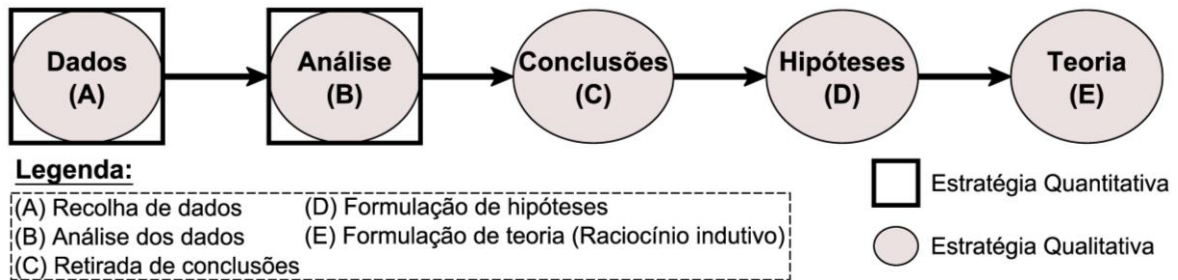


Figura 3 – Percurso metodológico
 Fonte: Adaptado a partir de Newman et al. (1998).

3.2 Método

Torna-se essencial definir o método utilizado, nomeadamente os participantes e procedimentos (Secção 3.2.1), os instrumentos de recolha de dados (Secção 3.2.2) e as técnicas de tratamento de dados adotadas (Secção 3.2.3).

3.2.1 Participantes e procedimentos

A seleção dos participantes na Marinha recaiu sobre as entidades com responsabilidades organizacionais na área do material e na definição das estratégias ambientais a implementar na organização (Quadro 9). A seleção do participante da indústria, e dada a situação embrionária que o país se encontra neste tópico, incidiu sobre a empresa responsável pela instalação da única estação de reabastecimento de hidrogénio para veículos do país (Bento, 2021), conforme Quadro 10.

Quadro 9 – Especialistas entrevistados - Marinha

Cargo	Especialista	Análise de conteúdo
Superintendente do Material	Vice-Almirante Marinha Edgar Marcos de Bastos Ribeiro	Apêndice C
Vice-Chefe do Estado-Maior da Armada (EMA)	Vice-Almirante Marinha Jorge Manuel Novo Palma	Apêndice D
EMA – Chefe da Divisão de Material	Capitão-de-mar-e-guerra Engenheiro Naval ramo Mecânica Francisco Guilherme Belo de Matos Rebocho Antunes	Apêndice E
EMA – Chefe da Secção de Ambiente e Gestão de Configuração de Capacidades	Capitão-tenente Engenheiro Naval ramo Mecânica Francisco José Cunha Gomes	



Quadro 10 – Especialista entrevistado - Indústria

Empresa / Localização	Cargo	Especialista	Análise de conteúdo
PRF / Leiria, Portugal	Unidade de negócio de Hidrogénio (<i>Hydrogen Business Unit</i>)	Marcelo Amaral	Apêndice F

O procedimento de recolha foi baseado numa observação estruturada não participante (sem interferência do autor), através de entrevistas semiestruturadas com um guião com tópicos a abordar (Gubrium et al., 2012), de acordo com o descrito no Apêndice B. Estas foram efetuadas por videoconferência e *email*, entre os meses de novembro e dezembro de 2021.

3.2.2 Instrumentos de recolha de dados

A recolha de dados de dados foi efetuada através de análise documental e entrevistas semiestruturadas com especialistas na Marinha e indústria obtendo assim o seu contributo.

A análise documental incidiu maioritariamente em artigos científicos, livros, informação técnica disponibilizada pelos fabricantes *online* e legislação por forma a conseguir cumprir com os OE descritos no Subcapítulo 3.1.

No que respeita às entrevistas, foi elaborado um guião com três secções (Apêndice B):

- Na primeira secção, o objetivo é obter um contributo para as estratégias de produção, armazenamento e utilização do hidrogénio a curto, médio (3 a 5 anos) e longo (10 a 12 anos) prazo;
- Na segunda secção, o objetivo principal é a contribuição para uma análise *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats* (SWOT) (Hofrichter, 2021; Sarsby, 2016). Esta análise permite um entendimento da organização e possibilita a potenciação do seu desenvolvimento;
- Na terceira secção, são pedidos contributos adicionais que sejam considerados relevantes para o desenvolvimento do tópico em estudo.

3.2.3 Técnicas de tratamento de dados

A análise das entrevistas foi feita através de uma separação em unidades de contexto, que são segmentos de texto que fixam limites contextuais para facilitar a interpretação (Bardin, 2011). A partir das unidades de contexto foram criadas unidades de registo (segmentos específicos), por forma a compor uma amostra quantificável (*vide* exemplo descrito no Apêndice G), possibilitando assim a sua interpretação (Bardin, 2011; Santos et al., 2019). Esta interpretação é fundamental, pois possibilita a obtenção de um contributo essencial para a definição da melhor estratégia a adotar para o uso do hidrogénio na Marinha.



4. Apresentação dos dados e discussão dos resultados

*Creio que um dia água será empregue como combustível,
que o hidrogénio e o oxigénio que a compõem,
utilizados isolada ou simultaneamente,
fornecerão uma fonte de calor e luz inesgotáveis.*

Júlio Verne

Neste capítulo analisa-se os sistemas de produção de hidrogénio (Subcapítulo 4.1), os sistemas de hidrogénio existentes noutras Marinhas (Subcapítulo 4.2) e avalia-se os sistemas de hidrogénio que devem ser utilizados (Subcapítulo 4.3), propondo-se uma estratégia para uso de hidrogénio na Marinha (Subcapítulo 4.4).

4.1 Sistemas de produção de hidrogénio

Atualmente, e tendo em conta o exposto no PISAmb (MP, 2018), uma das grandes prioridades da Marinha é a implementação de produção, armazenamento e utilização de hidrogénio verde na Base Naval de Lisboa (BNL). Para uma melhor abordagem, é necessário analisar os sistemas de produção de hidrogénio verde atualmente existentes, possibilitando assim a resposta à QD1 (Subcapítulo 2.2).

4.1.1 Hidrogénio verde

A primeira estação de produção e distribuição de hidrogénio verde da Europa, localizada em Berlim, iniciou a sua construção em 2014, possibilitando a conversão de energia eólica em hidrogénio utilizando um eletrolisador alcalino (Carmo et al., 2013; focus, 2014; McPhy, 2014). Este sistema é utilizado para reabastecimento de viaturas e para injeção na rede de gás natural (Congress, 2014). Na Alemanha temos também o *Energiepark* em Mainz, inaugurado em 2015, que utiliza a energia do vento em excesso para criar hidrogénio através de eletrólise, sendo este posteriormente utilizado também na criação de energia quando a energia do vento não é suficiente (Kopp et al., 2017). Existem também alguns projetos para produção de hidrogénio diretamente de plataformas no mar (*offshore*), onde pode ser utilizada diretamente água do mar e energia eólica ou solar (Baraniuk, 2021; Gondal, 2019). Como exemplo desta aplicação, temos o projeto *PosHYdon* que consiste numa plataforma em que é utilizada energia eólica e um eletrolisador PEM para gerar hidrogénio (PosHYdon, 2021).



Por outro lado, também existem algumas aplicações para geração de hidrogénio verde que utilizam energia solar. Em 2020 foi inaugurado no Dubai uma central que permite a produção de hidrogénio através de energia solar e eletrólise (Intelligence, 2021). Também existem aplicações que combinam fontes de geração de energia, como é o caso de um eletrolisador alcalino instalado no Japão que combina energia solar e eólica para geração de hidrogénio (Verkehrswesen, 2020). Um resumo dos métodos descritos encontra-se representado no Quadro 11.

Quadro 11 – Sistemas de produção de hidrogénio

Nome	Fonte de energia	Eletrolisador	Potência	Produção	Localização
<i>H2Ber</i>	Eólica	Alcalino	0,5 MW	200 kg/dia	Berlim, Alemanha
<i>Energiepark</i>	Eólica	PEM	3×1,25 MW	1500 kg/dia	Mainz, Alemanha
<i>PosHYdon</i>	Eólica	PEM	1,0 MW	400 kg/dia	13 km de Scheveningen, Holanda
<i>AED50m</i>	Solar	PEM	1,25 MW	490 kg/dia	Dubai
<i>Aqualizer</i>	Solar & Eólica	Alcalino	10,0 MW	2 400 kg/dia	Furushima, Japão

Fonte: Adaptado a partir de Congress (2014); Intelligence (2021); Kopp et al. (2017); PosHYdon (2021); Verkehrswesen (2020).

Todos os modos de geração de energia têm as suas vantagens e limitações, conforme descrito no Quadro 12 e Quadro 13. Existe uma diferença de eficiência clara entre os dois tipos de geração de energia dependendo da tecnologia utilizada, sendo de 4% a 22% no caso dos painéis solares e entre 24% a 54% no caso das turbinas eólicas (Evans et al., 2009).

Quadro 12 – Energia eólica – Vantagens & Desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Fiabilidade e alta disponibilidade	Ruído
Baixo custo de operação e manutenção	Relatos de interferência em sinais de televisão e rádio
Energia limpa	Relatos de interferência em pássaros migratórios
Sem impacto no ambiente	Localização imitada – Baixa aceitação pública
Pode operar no período diurno e noturno	Elevado investimento inicial
Mais eficientes que os painéis solares	Depende da evolução da tecnologia

Fonte: Adaptado a partir de Evans et al. (2009); Fetter (2000); Musial and Ram (2010).

Quadro 13 – Energia solar – Vantagens & Desvantagens

Vantagens	Desvantagens
Fiabilidade e alta disponibilidade	Limitações na disponibilidade de mercado
Baixo custo de operação e manutenção	Depende da localização geográfica (irradiação)
Energia limpa	Elevado investimento inicial
Sem impacto no ambiente	Precisa de uma grande área para instalação
Sem emissão de ruído	Depende da evolução da tecnologia

Fonte: Adaptado a partir de Hosenuzzaman et al. (2015); Mundo-Hernández et al. (2014); Silveira et al. (2013).



Adicionalmente, é também preciso ter em consideração que os painéis solares perdem entre 0,5% a 0,8% de eficiência a cada ano devido a degradação (Jordan & Kurtz, 2013). A limpeza é também outra preocupação, pois quanto maior o número de partículas no ar maior será o depósito nos painéis. A título de exemplo, no Qatar a perda média de eficiência diária está situada nos 0,55% (Javed et al., 2016).

Existem diversos estudos e propostas para uma rede de distribuição europeia, mas com um horizonte temporal de 2030 a 2040 (Chatzimarkakis et al., 2021; Wang et al., 2020). Apesar dos investimentos existentes em Portugal no que concerne às energias renováveis (Murray et al., 2007; Pikuła et al., 2016), em que garantiram aproximadamente 59% (hidroelétrica 25%, eólica 25%, biomassa 7% e fotovoltaica 2,6%) do consumo nacional de eletricidade em 2020 (Redes Energéticas Nacionais [REN], 2021), ainda não existe uma rede de produção e distribuição de hidrogénio implementada. Esta debilidade, pode dar força à edificação de capacidade de produção de hidrogénio próprio na Marinha, conforme referido como objetivo no PISAmb (MP, 2018).

4.1.2 Hidrogénio verde na Marinha

Sem dúvida que ter capacidade de produção própria é essencial, por forma a não dependermos de terceiros e garantirmos fornecimento constante. As grandes áreas disponíveis na BNL, proporcionam o espaço necessário tanto para instalação de turbinas eólicas como de painéis solares. Podemos também, e dada a localização da BNL, apostar no fornecimento de hidrogénio para a comunidade local tendo assim um possível meio de recuperação do investimento. A única estação de abastecimento de hidrogénio para veículos movidos a hidrogénio do país foi instalada em Cascais em agosto de 2021 (Bento, 2021), o que demonstra a fase embrionária em que o país se encontra relativamente a este tópico.

Está previsto para o início do ano de 2022 a primeira experiência com hidrogénio em Portugal, em que se vai misturar gás natural com hidrogénio procurando assim ter entre 10% a 15% de hidrogénio na mistura (Lusa, 2021; Mar, 2021). Este poderia também ser um dos destinos do hidrogénio produzido, a mistura na rede de gás natural que alimenta os edifícios da BNL por forma a diminuir as emissões de dióxido de carbono.

Teremos também como produto indireto, a produção de oxigénio que poderá ser utilizado para os submarinos e para uma rede de distribuição na BNL, por forma a acautelar possíveis necessidades e.g. uso médico.

4.1.3 Síntese conclusiva

A localização privilegiada da BNL com largas áreas disponíveis e com acesso direto à



água do rio, disponibiliza todas as condições para uma estratégia de produção de hidrogénio ambiciosa e ajustada ao que se pretende de futuro. Uma das soluções numa fase inicial, poderá ser a de receção e armazenamento de hidrogénio produzido por terceiros.

A geração de energia utilizando painéis solares apresenta um baixo rendimento quando comparado com a utilização de turbinas eólicas, sendo que estas também permitem a geração de energia durante o arco noturno, apesar do elevado investimento inicial necessário. Dada a situação embrionária em Portugal e os custos elevados da tecnologia de produção de hidrogénio atualmente existente, poderá ser equacionado a curto prazo a utilização direta de painéis solares ou turbinas eólicas como fonte de energia elétrica. Esta utilização procuraria assim amortizar o investimento inicial até que a tecnologia atingisse a maturidade necessária e os custos decrescessem para valores considerados aceitáveis.

4.2 Sistemas de hidrogénio atualmente existentes

O hidrogénio tem aproximadamente 2,5 vezes mais poder calorífico do que a gasolina, metano, propano, entre outros (Shekhawat et al., 2011; Spiegel, 2007). É o menos denso dos combustíveis utilizados hoje em dia, tendo um ponto de ebulição muito baixo (aproximadamente -253°C) dificultando assim a sua liquefação e armazenamento quando comparado com os outros combustíveis. Apesar da dificuldade de liquefação e custos de armazenamento, no estado líquido o seu volume é cerca de 700 vezes menor que no estado gasoso, sendo aproximadamente 14,40 vezes mais denso que o ar (Shekhawat et al., 2011; Spiegel, 2007). A não produção de dióxido de carbono (Quadro 14) é claramente uma grande vantagem pois não existe pegada de carbono (Mikhaylov et al., 2020), sendo um vetor de energia com um enorme potencial, tornando-se assim essencial analisar os sistemas de hidrogénio atuais, possibilitando assim a resposta à QD2 (Subcapítulo 2.2).

Quadro 14 – Comparação entre o hidrogénio e outros combustíveis existentes

Propriedade	Hidrogénio	Metano	Metanol	Etanol	Propano	Gasolina
Massa molecular (g/mol)	2,02	16,05	32,04	46,06	44,10	107,00
Densidade (kg/m ³) 20°C e 1 atmosfera	0,08	0,67	791,00	789,00	1,87	751,00
Ponto de ebulição normal (°C)	- 252,80	- 161,50	64,50	78,50	- 42,10	27-225
Ponto de inflamação (°C)	< - 253,00	- 188,00	11,00	13,00	- 104,00	- 43,00
Produção de CO ₂ por unidade de energia	0,00	1,00	1,50	-	-	1,80
Temperatura de autoignição no ar (°C)	585,00	540,00	385,00	423,00	490,00	230-480
Poder calorífico Mínimo (MJ/kg)	120,00	50,00	20,10	27,00	46,30	44,00
Poder calorífico Máximo (MJ/kg)	142,00	55,00	22,90	29,80	50,20	47,30

Fonte: Adaptado de Spiegel (2007).



4.2.1 Aplicabilidade no domínio marítimo

Atualmente, o uso de hidrogénio como fonte de energia no domínio marítimo ainda não se encontra massificado, ao contrário do que acontece com os navios elétricos movidos a baterias (Pagliaro, 2020; Skjong et al., 2016). Como referido anteriormente, a tecnologia utilizada nas células de combustível já se encontra bem estabelecida neste domínio sendo utilizada em submarinos desde 1998 (Hawser, 2017; Siemens, 2016; Tronstad et al., 2017).

Apesar de associarmos normalmente o uso de hidrogénio a células de combustível, este elemento químico pode ser utilizado como único combustível ou combinado diretamente em motores diesel ou a gás (Dimitriou & Tsujimura, 2017; Shipping, 2021; Van Hoecke et al., 2021). A grande vantagem da sua utilização para combustão direta é a não necessidade de um elevado grau de pureza como acontece no caso do uso de pilhas de combustível (Antunes, 2020). O maior desafio estará na produção em larga escala de hidrogénio, utilizando fontes de energia sustentáveis a um baixo custo (Pagliaro, 2020).

O primeiro navio do mundo a gerar, armazenar e a utilizar hidrogénio em gás foi batizado *Energy Observer* e foi lançado à água em 2017, sendo utilizado como plataforma para prova de conceito (Observer, 2021). Através de testes efetuados, foi possível verificar que o hidrogénio gerado diretamente através da purificação de água do mar tem qualidade compatível com a *Hydrogen fuel quality – Product specification* (International Organization for Standardization [ISO], 2019). Esta norma define as características mínimas do hidrogénio para poder ser utilizado em aplicações veiculares e estacionárias (Bacquart et al., 2021; ISO, 2019).

Pode ser utilizada a tecnologia das pilhas de combustível para efetuar eletrólise (eletrolisador), sendo que neste caso é fornecida energia elétrica para possibilitar a produção de hidrogénio (Shiva Kumar & Himabindu, 2019). A utilização de água salgada diretamente no processo de eletrólise, em detrimento da sua purificação, diminui o tempo de vida útil do eletrolisador devido às impurezas e características da água que muda sazonalmente (e.g. sais minerais), não sendo economicamente vantajoso (Bacquart et al., 2021; Driess et al., 2021).

O primeiro navio a armazenar e utilizar hidrogénio líquido do mundo batizado *Suiso Frontier* foi lançado à água em 2019 no Japão, tendo sido também utilizado como plataforma para prova de conceito (Clifton, 2020; Kawasaki, 2021). A necessidade de garantir o armazenamento a temperaturas criogénicas (inferiores a -253°C) envolve custos adicionais, energia adicional (cerca de 30% da energia armazenada no hidrogénio) e constitui



um desafio tecnológico dados os requisitos necessários para implementação em segurança (Antunes, 2020).

4.2.2 Aplicabilidade na Marinha Portuguesa

Apesar de não existir muita informação disponível relativamente a navios de guerra, em 2014 a Marinha dos Estados Unidos da América (EUA), declarou como um dos seus grandes objetivos a utilização de navios que possibilitem a transformação da água do mar em hidrogénio, aumentando assim a sua autonomia e eliminando a logística necessária para reabastecimento (Harress, 2014). A água doce (não congelada) representa menos de 1% da água do planeta, enquanto que a água salgada representa 96,5% (Driess et al., 2021), o que é claramente um indicador da relevância da aposta neste tipo de tecnologia. Por forma a conseguir cumprir com os elevados níveis de pureza necessários para efetuar a eletrólise da água do mar, é preciso previamente retirar as suas impurezas e dessalinizar a água usando e.g. osmose inversa (Farràs et al., 2021; M. Khan et al., 2021).

A implementação de sistemas que possibilitem efetuar a purificação da água, eletrólise e armazenamento de hidrogénio para posterior uso pode ter um custo elevado se implementado nas plataformas existentes, sendo que deve ser devidamente incorporado em futuros projetos ou aquisições.

A nível militar, o uso desta tecnologia em detrimento de grupos eletrogéneos permite uma operação mais silenciosa minimizando a sua assinatura acústica, mas ainda não é possível ter uma noção real de como estes navios se comportariam em combate. Podemos aceitar por vezes uma diminuição de autonomia, mas não de desempenho, e neste momento com a tecnologia existente ainda não será possível garantir isso. Este terá certamente de ser um compromisso a ter em conta neste tipo de aplicações.

4.2.3 Síntese conclusiva

Existem neste momento alguns navios para prova de conceito, mas muito longe de termos uma implementação a nível global.

A falta de aplicações existentes em navios militares faz com que não se consiga efetuar uma comparação direta nem aprender diretamente com outras marinhas tecnologicamente mais evoluídas. Deve ser explorada a tecnologia existente, e sempre que o risco for considerado desnecessário esperar que a tecnologia atinja a maturidade necessária e o seu custo decresça para valores considerados aceitáveis. A nível mais imediato, afigura-se como mais adequado o uso de hidrogénio para aplicações de transporte de passageiros em que é necessário uma baixa autonomia e desempenho, sendo a reconversão mais simples.



4.3 Sistemas de hidrogénio na Marinha

É importante avaliar os sistemas de hidrogénio que devem ser utilizados, por forma a tentar alcançar sustentabilidade ambiental sem perda de autonomia e desempenho, possibilitando assim a resposta à QD3 (Subcapítulo 2.2). Sendo que o único meio naval atualmente existente na MP que utiliza hidrogénio são os submarinos (Siemens, 2016).

Devido à existência de recursos financeiros limitados, terão de ser avaliadas parcerias com empresas privadas por forma a captar fundos externos aproveitando assim o interesse que atualmente se verifica nesta temática (E. Ribeiro, entrevista por videoconferência, 17 de dezembro de 2021; J. Palma, entrevista por videoconferência, 07 de dezembro de 2021).

4.3.1 Produção

Está previsto para início de 2022 a instalação de painéis solares na BNL (Figura 4), com um custo aproximado de 800 000 euros, 1MW de potência nominal e capacidade de produção aproximada de 4 MWh/dia (F. Antunes, entrevista por videoconferência, 12 de novembro de 2021; F. Gomes, entrevista por *email*, 23 de novembro de 2021). Utilizando um eletrolisador do tipo PEM de 1 MW, e comparando com os sistemas de produção de hidrogénio descritos no Quadro 11, teríamos uma produção aproximada de 67 kg/dia utilizando painéis solares (4 MWh/dia) e de 400kg/dia quando alimentado durante 24 horas. Esta poderia ser uma solução inicial de produção de hidrogénio verde (painéis solares combinado com eletrolisador), mas a capacidade teria de ser aumentada à medida que a necessidade dos consumidores fosse crescendo. A proximidade a uma fonte de água (rio), é também uma das vantagens da localização da BNL.



Figura 4 –Áreas na BNL para painéis solares, produção e armazenamento
Fonte: Adaptado a partir de Google (2021).



Após iniciar a produção, o armazenamento é outra das preocupações pois deverá ser garantida uma correta análise do risco. O risco pode ser decomposto na análise da probabilidade de acidente e na análise da sua consequência (Crowl & Louvar, 2002; Gye et al., 2019). Sendo que o hidrogénio apresenta um perigo e risco maior face ao metano ou gasolina, devido aos seus limites de inflamabilidade mais amplos, necessidade de menor energia de ignição e maior índice de deflagração (Crowl & Jo, 2007). No caso de utilização de armazenamento de hidrogénio em gás (F. Antunes, *op. cit.*; F. Gomes, *op. cit.*), as fugas no compressor são as principais razões de risco sendo que as medidas de mitigação de risco devem incidir primordialmente sobre este (Zhiyong et al., 2010).

4.3.2 Utilização

A nível mais imediato, poderíamos ter unidades contentorizadas com capacidade de armazenamento e produção de hidrogénio que seriam instaladas a bordo dos navios e forneceriam energia elétrica para a sua operação. Como é o caso do contentor ilustrado na Figura 5, que armazena 75 kg de hidrogénio em gás comprimido e permite consumos de 100 kW a 240 VAC, com uma autonomia de aproximadamente oito horas à carga máxima (Pratt & Chan, 2017). A água seria produzida pelo sistema de osmose inversa que seria purificada (caso apresentasse impurezas), sendo depois reencaminhada para esta unidade contentorizada. Este poderia ser utilizado em navios com baixas necessidades energéticas como é o caso do Navio da República Portuguesa (NRP) *Sagres*, em que não existem equipamentos dedicados para combate.



Figura 5 – Sistema de hidrogénio – Armazenamento e Geração de energia

Fonte: Pratt and Chan (2017).

Mesmo em novas aquisições, é preciso ter em consideração toda a fase de desenho e projeto onde é necessário verificar se o pretendido é tecnicamente e economicamente viável (Figura 6). No seguimento da necessidade de diminuir as emissões de carbono e o crescente interesse no uso do hidrogénio, a sociedade classificadora *Det Norske Veritas* (DNV) lançou



o seu primeiro manual com uma compilação de regras e normas que devem ser cumpridas em novas construções utilizando hidrogénio (Det Norske Veritas [DNV], 2021). Algumas das especificações gerais previstas pela DNV foram analisadas, e encontram-se descritas no Quadro 15. Basicamente, deve ser garantido o nível de segurança existente num navio convencional.

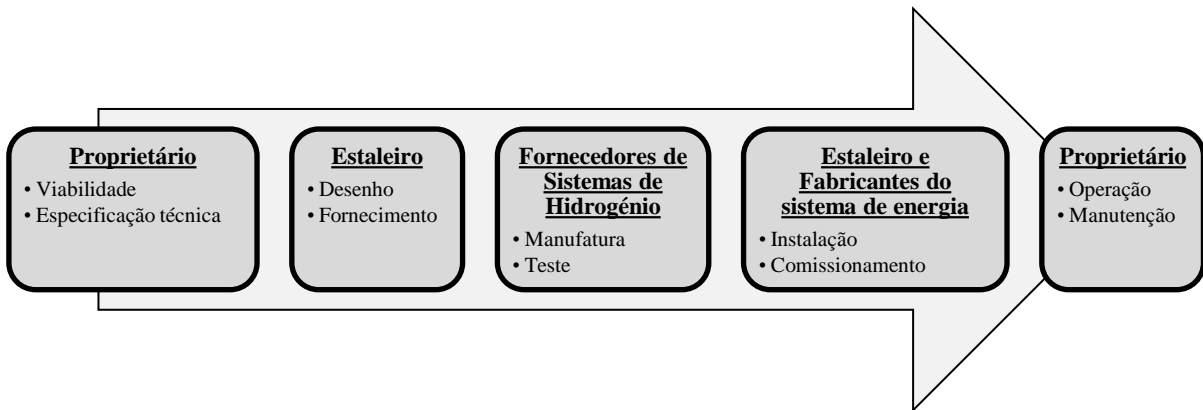


Figura 6 – Fases de implementação de um projeto de hidrogénio marítimo

Fonte: Adaptado a partir de DNV (2021).

Quadro 15 – Especificações gerais para navios a hidrogénio

Redundância	Deve ser garantida continuidade de serviço Sistemas independentes de armazenamento e produção de energia
Segurança	Segurança e fiabilidade como nos navios convencionais Falha de energia não afeta as funções críticas do navio Falha crítica única nos módulos críticos não deve comprometer integridade
Segregação	Espaço das pilhas de combustível deve ser apropriado para manutenção Os espaços perto dos tanques de armazenamento devem ser seguros
Sistemas de hidrogénio a bordo	Devem ser robustos e resistentes à degradação em meio marítimo De fácil manutenção e com componentes a preços razoáveis Deve existir monitorização dos seus parâmetros de funcionamento Sistemas de segurança que garantam o controlo da operação
Armazenamento Hidrogénio	Reservatórios devem ter válvulas de segurança Sistema de ventilação permanente e sensores de deteção de fugas Sistemas de proteção e combate contra incêndio

Fonte: Adaptado a partir de DNV (2021).

Apesar de ser mais utilizado como modo de armazenamento no estado gasoso e líquido, estes apresentam elevados requisitos de segurança derivado da alta pressão e baixa temperatura necessária respetivamente. Adicionalmente, quando este é armazenado em estado líquido temos uma perda de 0,3 a 3% (Niermann et al., 2019).

Encontram-se em curso alguns projetos, embora em fase embrionária, que visam a reconversão de unidades navais existentes na MP para o uso de hidrogénio gasoso. Estes projetos destinam-se ao NRP *Guadiana* (Figura 7) para patrulha e à Unidade Auxiliar da



Marinha (UAM) *Zêzere* (Figura 8) para transporte de passageiros (Antunes, 2021). As principais características de cada adaptação encontram-se representadas no Quadro 16 e Quadro 17.

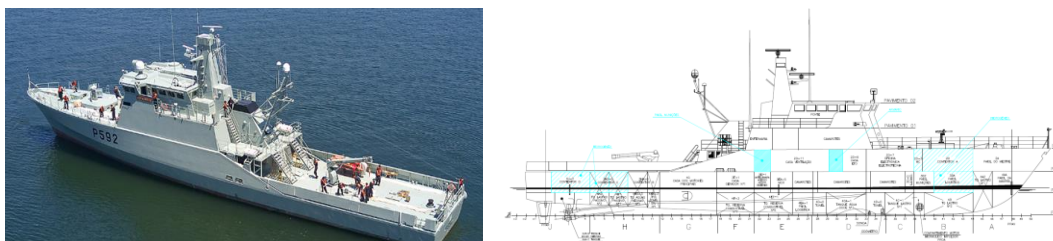


Figura 7 – NRP *Guadiana*: Representação (esquerda) e desenho (direita)

Fonte: Adaptado a partir de Antunes (2021).

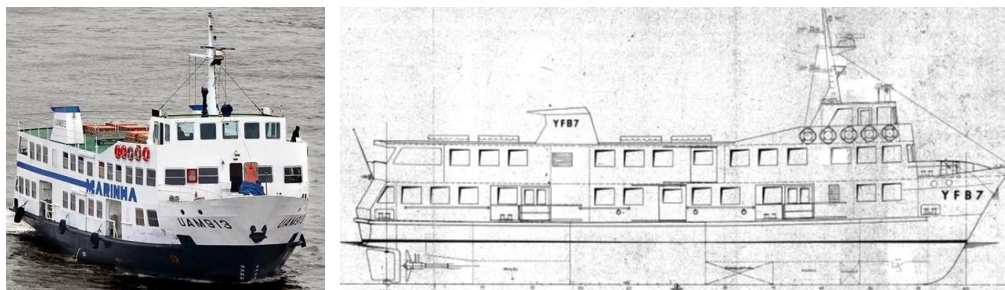


Figura 8 – UAM *Zêzere*: Representação (esquerda) e desenho (direita)

Fonte: Adaptado a partir de Antunes (2021).

Quadro 16 – Projeto de adaptação para hidrogénio do NRP *Guadiana*

Produção de energia	Pilha de combustível de 1,5 MW Grupo eletrogéneo (alternativa)
Propulsão	Elétrica e Turbina a Gás
Autonomia	Elétrica (Hidrogénio) – 600 NM a 10 nós Elétrica (Hidrogénio) – 300 NM a 14 nós Turbina a Gás (Diesel) – 1200 NM a 14 nós
Armazenamento	Hidrogénio (gás comprimido) – 1463 kg Diesel (alternativo)
Custo expectável	4,5 M€ - Adaptação sistema de propulsão 3 M€ - Grande manutenção e alterações 4,5 M€ - Engenharia e apoio logístico

Fonte: Adaptado a partir de Antunes (2021).

Quadro 17 – Projeto de adaptação para hidrogénio do UAM *Zêzere*

Produção de energia	Pilha de combustível de 0,5 MW Grupo eletrogéneo (alternativa)
Propulsão	Elétrica
Autonomia	Elétrica (Hidrogénio) – 100 NM a 9 nós
Armazenamento	Hidrogénio (gás comprimido) – 220 kg Diesel (alternativo)
Custo expectável	2 M€ - Adaptação sistema de propulsão 1,3 M€ - Grande manutenção e alterações 0,8 M€ - Engenharia e apoio logístico

Fonte: Adaptado a partir de Antunes (2021).



Devido à simplicidade de implementação, a escolha principal nas reconversões é baseada na utilização de hidrogénio gasoso e pilhas de combustível. É possível também verificar uma grande diminuição de autonomia devido à utilização de hidrogénio (Quadro 16 e Quadro 17), sendo que esta poderia ser colmatada pela utilização de outro modo de armazenamento que não tivesse gastos energéticos complementares.

O uso de hidretos metálicos também se poderá apresentar como solução válida a longo prazo (M. Amaral, entrevista por *email*, 06 de dezembro de 2021), pois apresenta atualmente algumas desvantagens como o tempo de absorção/dessorção e as elevadas necessidades energéticas que precisam de evolução tecnológica por forma a aumentar o seu rendimento (Di et al., 2009). Não se afigurando como solução eficiente para a maioria das plataformas navais, tirando o caso dos submarinos em que já se encontram em uso (Krummrich & Hammerschmidt, 2016; Krummrich & Llabrés, 2015).

Baseado na convenção internacional *Safety Of Life At Sea* (SOLAS), onde são estabelecidos os padrões mínimos de segurança (livre de riscos inaceitáveis) para navios mercantes, podemos analisar algumas das medidas necessárias para evitar risco de incêndio (Joseph & Dalaklis, 2021; IMO, 2018). A convenção SOLAS está muito centrada na segurança dos líquidos transportados por navios-tanque, conforme ilustrado no Quadro 18. Através da análise destes requisitos, podemos adotar medidas para aumentar a segurança de futuras implementações.

Quadro 18 – Análise ao risco de incêndio - Requisitos da convenção SOLAS

Estado	Descrição	Risco de incêndio
Líquido	Temperatura de inflamação > 60° C	Baixo
	Vapores a uma pressão > 1,013 bar Temperatura de 37,8° C	Médio
	Derramamento ou vazamento não pode cair em superfícies aquecidas	Elevado

Fonte: Adaptado a partir de IMO (2018).

Os compostos orgânicos líquidos (Quadro 2) – *Liquid Organic Hydrogen Carriers* (LOHC) – englobam todos os compostos orgânicos que quando armazenam hidrogénio mantêm o seu estado líquido. Estes são baseados num processo de hidrogenação (exotérmico) e desidrogenação (endotérmico) à mesma temperatura (entre 200° C e 450° C), sendo baratos, seguros e fáceis de manter (Naseem et al., 2021; Niermann et al., 2019). Esta solução apresenta-se como uma solução adequada pois no seu estado líquido apenas liberta



o seu hidrogénio a temperaturas superiores a 200° C, muito acima dos 60° C (Quadro 18) definidos pela convenção SOLAS (IMO, 2018). A possibilidade de reaproveitamento de energia, uso de tanques de armazenamento de líquido comuns e a capacidade de armazenamento por um longo período de tempo são fatores chave que dão força a esta utilização (Niermann et al., 2019). É mais difícil de implementar numa reconversão de um navio já existente devido ao seu custo elevado e modificações estruturais necessárias, mas poderá ser equacionado em futuras aquisições e projetos.

Existe atualmente uma preferência global pela utilização de pilhas de combustível, sendo esta uma tecnologia já largamente conhecida. Mas não podemos descurar a possibilidade de utilização de motores bicombustível (F. Rebocho, *op. cit.*), que combinam hidrogénio diretamente com outro combustível diminuindo assim as emissões de carbono ou mesmo a utilização de motores que operem unicamente a hidrogénio. No início de 2020, as empresas *Belgas Company Maritime Belge (CMB)* e *Anglo Belgian Corporation (ABC)* lançaram um empreendimento conjunto denominado *BEH₂YDRO*, onde desenvolvem motores bicombustível (75% hidrogénio e 25% diesel) e a hidrogénio para aplicações marítimas (BEH₂YDRO, 2021; Snyder, 2020). Esta apresenta soluções de motores a hidrogénio com uma potência máxima de 2670 kW, o que é muito equivalente aos motores MTU 12V 1163 TB82 com 2680 kW que equipam as fragatas da classe *Vasco da Gama* (BEH₂YDRO, 2021; Services, 2021). Esta gama de potências ainda é muito inferior a uma turbina a gás LM2500 (classe *Vasco da Gama*) que apresenta uma potência de 46 123 kW (Electric, 2021), mas poderão surgir novas soluções tecnológicas num futuro próximo.

4.3.3 Síntese conclusiva

Existem atualmente alguns projetos de reconversão na MP, mas apostando na simplicidade do armazenamento gasoso e na tecnologia de pilhas de combustível com um elevado nível de maturidade. Esta reconversão faria com que fosse possível a utilização de hidrogénio, mas diminuiria largamente a autonomia das unidades navais consideradas.

Logicamente, nas novas aquisições existirá maior margem de manobra na escolha da solução tecnológica a adotar, podendo assim investir noutro modo de armazenamento por forma a conseguir maior densidade energética ou a utilização de motores que utilizem diretamente hidrogénio. As soluções atuais ainda não permitem o desempenho de uma turbina a gás, mas a aposta poderá ser a de manter uma combinação entre modos de propulsão (meio de propulsão a hidrogénio combinado com um modo alternativo que permita um maior desempenho).



financiamento, diminuição dos custos em energia, sustentabilidade ambiental e potenciação da economia. As ameaças encontram-se focadas na baixa maturidade tecnológica, risco no investimento e o fato de o hidrogénio poder não se afirmar como fonte de energia pelo surgimento de uma alternativa mais viável.

Quadro 19 – Proposta de análise SWOT na abordagem do hidrogénio na Marinha

	FATORES POSITIVOS	FATORES NEGATIVOS
	FORÇAS	FRAQUEZAS
FATORES INTERNOS	<ul style="list-style-type: none"> • Inovação tecnológica • Aumento do prestígio interno • Alinhamento com os valores da organização • Capacidade de desenvolvimento do conhecimento interno • Existência de um consumidor direto • Área disponível na Base Naval de Lisboa • Autonomia de produção • Capacidade de armazenamento próprio • Capacidade de desenvolvimento do conhecimento e capacitação dos Engenheiros Navais • Prestação de serviço à comunidade local • Abundância do hidrogénio pois é o elemento mais abundante do universo • Armazenamento de energia de alta densidade • Armazenamento de energia com poucas perdas • Fonte de energia verde 	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilidade de longo curso • Elevado custo • Pouco conhecimento técnico atual • Risco tecnológico • Necessidade de investimento e acesso a capital para investimento • Necessidade de parcerias que facilitem o acesso ao Plano de Recuperação e Resiliência Português • Segurança na utilização • Baixo rendimento e disponibilidade de eletrolisadores de pequenas dimensões • Necessidade de desenvolvimento e adaptação de navios e outros meios
	OPORTUNIDADES	AMEAÇAS
FATORES EXTERNOS	<ul style="list-style-type: none"> • Acesso a fontes de financiamento • Sustentabilidade ambiental • Diminuição dos custos em energia • Parcerias com empresas na área do hidrogénio • Alinhamento da estratégia da Marinha com a sociedade • Contribuição para os fatores políticos, económicos e sociais • Injeção de hidrogénio na rede de gás natural • Contributo para a descarbonização da economia • Comunicação e sensibilização para a descarbonização • Polo de hidrogénio na margem sul do Tejo com potencial de crescimento • Potenciação da economia • Potenciação do conhecimento sobre hidrogénio • Retorno do investimento inicial através da comercialização 	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia em desenvolvimento • Custo-benefício do investimento • Risco no investimento • O hidrogénio não se afirmar como fonte de energia • Incrementação de utilizadores • Legislação e normas ainda não estão bem definidas a nível nacional • Mercado ainda não está bem definido

Fonte: Adaptado a partir de E. Ribeiro (*op. cit.*); J. Palma (*op. cit.*); F. Antunes (*op. cit.*); F. Gomes (*op. cit.*); M. Amaral (*op. cit.*).



4.4.2 Estratégia proposta

Nesta secção, e tendo em conta o descrito anteriormente, vai-se formular a estratégia a adotar para o uso do hidrogénio na Marinha a curto, médio (3 a 5 anos) e longo prazo (10 a 12 anos). Um resumo das estratégias encontra-se representado na Figura 10.

4.4.2.1 Curto prazo

O uso da tecnologia no domínio marítimo (Secção 4.2.1) encontra-se numa fase embrionária, não existindo uma rede de distribuição nacional edificada (Secção 4.1.1). A curto prazo, e após a aquisição de painéis solares como fonte de energia renovável (Secção 4.3.1), e caso se pretenda edificar a capacidade de produção a curto prazo, deverá ser adquirido um eletrolisador do tipo alcalino (Secção 4.1.1). Esta tecnologia apresenta atualmente algum grau de maturidade e custo inferior aos do tipo PEM (M. Amaral, *op. cit.*).

O armazenamento a curto prazo deverá ser efetuado em reservatórios de gás comprimido (Secção 2.1.2), pois é um método seguro e existe espaço disponível na BNL para o efeito (M. Amaral, *op. cit.*; F. Antunes, *op. cit.*; F. Gomes, *op. cit.*).

A utilização a curto prazo, deverá ser baseada na utilização de pilhas de combustível (Secção 4.3.2), na injeção na rede de gás natural (Secção 4.1.2), na venda à comunidade por forma a conseguir recuperar o investimento inicial e na utilização nos submarinos (M. Amaral, *op. cit.*; F. Antunes, *op. cit.*; F. Gomes, *op. cit.*).

4.4.2.2 Médio prazo

A médio prazo, a produção deverá ser baseada em eletrolisadores do tipo PEM (Secção 4.1.1), sendo expectável um decréscimo do seu custo decorrente da natural evolução tecnológica. Os eletrolisadores do tipo PEM (Quadro 6) são mais compactos, necessitam de menos manutenção e operam a pressões mais elevadas quando comparados com os alcalinos (M. Amaral, *op. cit.*), mas tudo dependerá do investimento que já tenha sido efetuado a curto prazo.

No que concerne ao armazenamento, e assumindo um incremento significativo de utilizadores, a aposta deve recair em tecnologias que permitam uma maior densidade energética (Secção 2.1.2). O hidrogénio em estado líquido possibilita maior densidade energética, mas requer armazenamento a temperaturas criogénicas (Secção 2.1.2), o que poderá inviabilizar a sua utilização. Poderá então ser equacionada a utilização de LOHC (Secção 4.3.2), procurando assim ultrapassar as desvantagens apresentadas pelo armazenamento de hidrogénio líquido (M. Amaral, *op. cit.*).

A nível de utilização, deverá ser avaliada a utilização de motores bicompostível

(Secção 4.3.2), a edificação de uma rede de autocarros, a reconversão de uma vedeta (Secção 4.3.2), aquisição de bicicletas e a reconfiguração de outros meios existentes (M. Amaral, *op. cit.*; F. Antunes, *op. cit.*; F. Gomes, *op. cit.*).

4.4.2.3 Longo prazo

A longo prazo, no que concerne à produção deverá ser equacionado a instalação de aerogeradores (F. Antunes, *op. cit.*; F. Gomes, *op. cit.*) por forma a conseguir obter energia renovável em arco noturno (Secção 4.1.1) e a instalação de eletrolisadores que operem a altas temperaturas (Küngas, 2020; Ye & Xie, 2021). Estes encontram-se atualmente em desenvolvimento por forma a se tornarem viáveis, podendo ser usados para conversão eletroquímica direta de vapor de água e dióxido de carbono em hidrogénio, monóxido de carbono ou gás de síntese (M. Amaral, *op. cit.*).

A nível de armazenamento, deverá ser analisado o nível de maturidade tecnológica dos hidretos metálicos (Secção 2.1.2), verificando se esta tecnologia já será mais viável que as consideradas anteriormente (M. Amaral, *op. cit.*).

No que concerne à utilização, deverá ser equacionada a aquisição de novos meios navais avaliando a utilização de LOHC (Secção 4.3.2) e a produção de outros combustíveis gerados através de hidrogénio verde como o diesel sintético ou a amónia verde (M. Amaral, *op. cit.*; F. Antunes, *op. cit.*; F. Gomes, *op. cit.*).

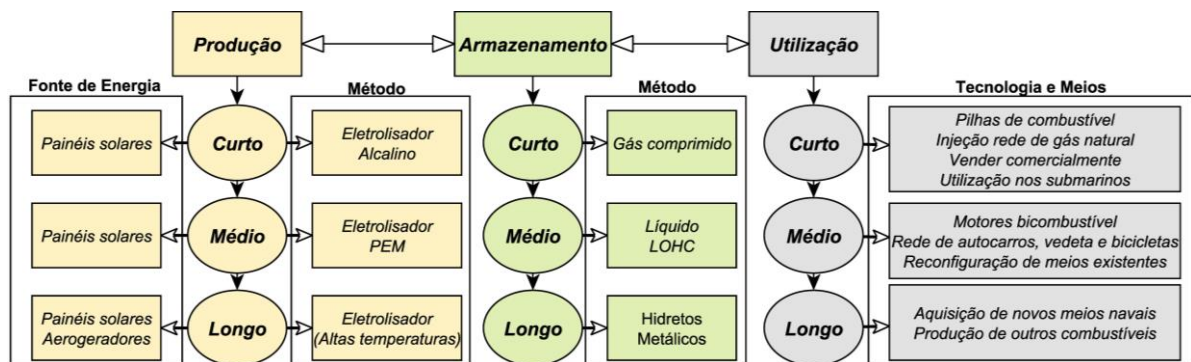


Figura 10 – Estratégia proposta a curto, médio e longo prazo

4.4.3 Síntese conclusiva

A análise SWOT possibilitou um entendimento geral da organização tendo em conta as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. Devido à evolução natural do ambiente, esta análise rapidamente tende a ficar desatualizada devendo ser revista caso se verifiquem alterações significativas. Neste momento, as principais fraquezas e ameaças identificadas são os custos associados, a falta de maturidade tecnológica e a falta de conhecimento



existente na organização sobre sistemas de hidrogénio. Devendo-se, assim que possível, tomar ações para mitigar as fraquezas e as ameaças identificadas potenciando as forças e oportunidades.

A estratégia a adotar a curto prazo encontra-se bem definida caso se pretenda optar pela autonomia de produção, devendo as estratégias a médio e longo prazo ser adaptadas de acordo com a evolução da tecnologia e os respetivos custos associados. Existe sempre o risco da tecnologia de hidrogénio não se afirmar como fonte de energia do futuro pelo surgimento de uma alternativa mais viável, devendo ser analisada a viabilidade de cada investimento.



5. Conclusões

Se puderes olhar, vê. Se puderes ver, repara.

José Saramago

Como resultado da legislação atualmente existente, o interesse no hidrogénio floresceu e encontra-se em larga expansão apesar de em Portugal ainda se encontrar num estado muito embrionário. Tendo por base este interesse, tornou-se essencial formular uma estratégia a adotar para o uso de sistemas de hidrogénio (produção, armazenamento e utilização) na Marinha a curto, médio (3 a 5 anos) e longo (10 a 12 anos) prazo.

Por forma a conseguir cumprir com este objetivo, o procedimento metodológico adotado teve como base um raciocínio indutivo, assente numa estratégia qualitativa reforçada com dados quantitativos e num desenho de pesquisa do tipo estudo de caso. Para a recolha de dados recorreu-se a análise documental e a entrevistas semiestruturadas com especialistas na Marinha e na indústria.

Ao abordar a QD1 *de que forma os métodos de produção de hidrogénio verde teriam aplicabilidade na Marinha?*, e cumprindo com o estabelecido para o OE1, foi possível verificar que em termos de produção, a aposta deverá recair na produção própria pois permite uma total independência do mercado. A localização e áreas disponíveis na BNL também disponibilizam todas as condições para esta aposta. Ao utilizar uma conjugação de energias renováveis (aquisição de energia no arco diurno e noturno), conseguimos produzir hidrogénio verde durante 24 horas e ainda fornecer à rede em caso de excesso de produção ou incapacidade de armazenamento de hidrogénio.

Relativamente à QD2 *de que forma os sistemas de hidrogénio utilizados teriam aplicabilidade na Marinha Portuguesa?*, e cumprindo com o estabelecido para o OE2, foi possível averiguar que a nível global no domínio marítimo apenas existem alguns projetos em curso e navios de prova de conceito. Sendo que a falta de implementações noutras marinhas impossibilita uma aprendizagem por comparação, não sendo de descurar a possibilidade de aguardar por um maior desenvolvimento da tecnologia por forma a minimizar o custo e risco de investimento. A inexistência de aplicações noutras Marinhas de Guerra também origina alguma incerteza de como estas aplicações tenderão a evoluir.

No que concerne à QD3 *como podemos utilizar sistemas de hidrogénio na Marinha?*, e cumprindo com o estabelecido para o OE3, foi possível aferir que algumas das



reconversões em fase de projeto na Marinha (NRP *Guadiana* e UAM *Zêzere*) apostam na simplicidade do armazenamento gasoso e na tecnologia de pilhas de combustível, diminuindo largamente a autonomia das unidades navais consideradas. O transporte de passageiros afigura-se como uma solução mais imediata, pois é aceitável perda de autonomia e desempenho. Estas reconversões, por outro lado, podem trazer-nos a experiência e conhecimento necessário para apostar futuramente em novas aquisições, aumentando assim o conhecimento interno.

A resposta à QC *qual a melhor estratégia para o uso do hidrogénio na Marinha?*, e cumprindo com o estabelecido para o OG, foi conseguida através do cumprimento dos OE definidos recorrendo a análise documental e entrevistas, criando assim um corpo de conhecimentos que permitiu a proposta de uma análise SWOT e a proposta de uma estratégia de utilização de hidrogénio a curto, médio e longo prazo. A elaboração de uma estratégia ajustada à realidade existente, tendo em conta a maturidade da tecnologia e os custos associados constitui por si só o grande contributo para o conhecimento dado por este trabalho, especialmente tendo em conta o estado embrionário em que a exploração desta tecnologia se encontra.

A análise SWOT proposta deverá ser continuamente atualizada, tendo em conta a evolução natural do ambiente e o acesso a novas fontes de informação. Através da sua análise, é possível verificar que as principais fraquezas e ameaças identificadas são os custos associados, a falta de maturidade tecnológica e a falta de conhecimento existente na organização. Devendo tomar ações para mitigar as fraquezas e as ameaças identificadas.

No caso da estratégia a curto prazo, a Marinha deve investir na aquisição de um eletrolisador alcalino e efetuar o respetivo armazenamento em reservatório de gás comprimido. A utilização deverá ser baseada na utilização de pilhas de combustível, injeção na rede de gás natural, venda comercial e utilização nos submarinos.

A médio prazo, a produção deverá ser baseada em eletrolisadores do tipo PEM, mas tudo dependerá do investimento que tiver sido efetuado a curto prazo. No respeitante ao armazenamento, e assumindo um aumento de utilizadores, o hidrogénio deverá ser armazenado utilizando métodos que permitam maior densidade energética (líquido ou LOHC). A utilização deverá ser baseada em motores bicompostível, edificação de uma rede de transportes e na reconversão de meios existentes.

A longo prazo, a estratégia deverá ser baseada na instalação de aerogeradores por forma a conseguir obter energia renovável no período diurno e noturno, com a utilização de



eletrolisadores que operem a altas temperaturas (conversão eletroquímica direta). No armazenamento, deverá ser avaliado o grau de maturidade dos hidretos metálicos, por forma a verificar se será uma opção mais viável. Na utilização, a aposta deverá ser em novos meios e na produção de outros combustíveis (e.g. diesel sintético ou amónia verde).

O uso de hidrogénio verde como forma de conseguir atingir neutralidade carbónica em unidades navais será uma linha de ação, mas não será suficiente. Os navios devem ser otimizados, nomeadamente a eficiência do casco, do veio, entre outros fatores.

Ao nível das limitações encontradas durante a elaboração deste trabalho, foi verificado que a pouca informação publicamente disponível limitou a análise documental, muito derivado do estado embrionário em que a tecnologia se encontra principalmente no domínio marítimo. Esta escassez de aplicações no domínio marítimo, e principalmente no domínio militar, impossibilitou a análise e a respetiva aprendizagem por comparação.

Por forma a complementar este trabalho, e como sugestões de trabalho futuro, sugere-se:

- Estudar a viabilidade de instalação de novas fontes de energia renovável, por forma a conseguir captar energia durante o arco diurno e noturno;
- Efetuar uma análise custo-benefício da centralização ou descentralização (possivelmente com menores capacidades) da captação de energia renovável;
- Verificar como o investimento efetuado em energias renováveis pode ser recuperado através da injeção de energia na rede elétrica ou mesmo através da venda de hidrogénio, caso fosse edificada a capacidade de produção própria;
- Abordar a aquisição de novos meios cujo projeto inclua já a utilização de hidrogénio, comparando o custo estimado com o associado à reconversão de unidades já existentes. Desta forma, conseguiríamos garantir o cumprimento dos requisitos operacionais definidos e edificar a capacidade de utilização de hidrogénio.

Por fim, salienta-se que existe a possibilidade de o hidrogénio não se afirmar como combustível do futuro pelo surgimento ou desenvolvimento de outra fonte de energia, sendo que toda a aposta deverá ser efetuada acautelando os devidos estudos de viabilidade e a possibilidade de recuperação de investimento.



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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>
- Abdin, Z., Zafaranloo, A., Rafiee, A., Mérida, W., Lipiński, W., & Khalilpour, K. R. (2020). Hydrogen as an energy vector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *120*, 109620. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109620>
- 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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.068>
- Alparone, M., Minutillo, M., Migliaccio, M., Jannelli, E., & Massarotti, N. (2018). Hydrogen-based hybrid power unit for light vehicles: Assessment of energy performance and radiated electromagnetic emissions. *Il nuovo cimento C*, *41*(6). doi: <http://dx.doi.org/10.1393/ncc/i2018-18225-2>
- Antunes, F. R. (2021, 4 de novembro de 2021). *Programa Intersetorial para a Sustentabilidade Ambiental (PISAmb)* [PowerPoint slides]. Academia de Marinha.
- Antunes, J. M. G. (2020). *Marine Mobility and the Dilemma of Low Carbon Emissions. A technical and societal impact review* Transition to Low Carbon Mobility, Thuwal, Arábia Saudita. <https://www.tecnoveritas.net/wp-content/uploads/2020/03/Paper-Conference-Marine-Mobility-and-the-Dilemma-of-Low-Carbon-Emissions.pdf>
- Armada, E. M. d. (2021). *Processo Estratégico de Marinha* (PAA34, Issue.
- Bacquart, T., Moore, N., Wilmot, R., Bartlett, S., Morris, A. S. O., Olden, J., Becker, H., Aarhaug, T. A., Germe, S., Riot, P., Murugan, A., & Mattelaer, V. (2021). Hydrogen for Maritime Application—Quality of Hydrogen Generated Onboard Ship by Electrolysis of Purified Seawater. *Processes*, *9*(7), 1252. doi: <https://doi.org/10.3390/pr9071252>
- Bălă, G.-P., Râjnoveanu, R.-M., Tudorache, E., Motișan, R., & Oancea, C. (2021). Air pollution exposure—the (in) visible risk factor for respiratory diseases. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13208-x>



- Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy Conversion and Management*, 182, 72-88. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080>
- Baraniuk, C. (2021). *The global race to produce hydrogen offshore*. BBC News [Página online]. Retirado de <https://www.bbc.com/news/business-55763356>
- Bardin, L. (2011). *Análise de Conteúdo* (L. A. Reto & A. Pinheiro, Trans.). Edições 70.
- Baykara, S. Z. (2004). Experimental solar water thermolysis. *International journal of hydrogen energy*, 29(14), 1459-1469. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.011>
- BEH2YDRO. (2021). *BEH2YDRO Joint Venture*. BEH2YDRO [Página online]. Retirado de <https://www.behydro.be/en/home.html>
- Bento, C. (2021, 19 de agosto de 2021). Tem um veículo movido a hidrogénio? Já existe um posto de abastecimento em Portugal. *ECO*. <https://eco.sapo.pt/2021/08/19/tem-um-veiculo-movido-a-hidrogenio-ja-existe-um-posto-de-abastecimento-em-portugal/>
- Blaylock, M., Pratt, J., Bran-Anleau, G., & Proctor, C. (2018). *Informing hazardous zones for on-board maritime hydrogen liquid and gas systems*. <https://maritime.dot.gov/sites/marad.dot.gov/files/docs/innovation/meta/9831/sfbreeze-optimization-study-cfd-analysis.pdf>
- Busby, R. L. (2005). *Hydrogen and fuel cells: A comprehensive guide* (1st ed.). PennWell Corporation.
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolten, D. (2013). A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International journal of hydrogen energy*, 38(12), 4901-4934. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- Casper, J. K. (2010). *Fossil fuels and pollution: the future of air quality*. Facts on File.
- Chatzimarkakis, J., Levoyannis, C., van Wijk, A., & Wouters, F. (2021). Hydrogen Act Towards the creation of the European Hydrogen Economy.em <https://www.h2knowledgecentre.com/content/policypaper1717>
- CleanTech, N. M. (2021). *HySHIP – Hydrogen cargo vessel*. [Página online]. Retirado de <https://maritimecleantech.no/project/hyship-hydrogen-cargo-vessel/>
- Clifton, A. (2020, Outubro de 2021). World first for liquid hydrogen transportation. *Horizons. Connecting tomorrow's thinking to the challenges of today.*, 55.



https://www.anemoimarine.com/wp-content/uploads/2020/11/LR_Horizons_October_2020-2.pdf

- Congress, G. C. (2014). *New green hydrogen refueling facility at Berlin-Schönefeld in multi-energy fueling station*. Green Car Congress - Energy, technologies, issues and policies for sustainable mobility [Página online]. Retirado de <https://www.greencarcongress.com/2014/05/new-green-hydrogen-refueling-facility-at-berlin-sch%C3%B6nefeld-in-multi-energy-fueling-station20140526-h2ber.html>
- Crowl, D. A., & Jo, Y.-D. (2007). The hazards and risks of hydrogen. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 20(2), 158-164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2007.02.002>
- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2002). *Chemical process safety: fundamentals with applications*. Prentice-Hall.
- Di, P., Arca, S., Rossi, F., & Filippini, M. (2009). Comparison of hydrogen hydrates with existing hydrogen storage technologies: Energetic and economic evaluations. *International journal of hydrogen energy*, 34(22), 9173-9180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.056>
- Dimitriou, P., & Tsujimura, T. (2017). A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International journal of hydrogen energy*, 42(38), 24470-24486. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>
- Dincer, I. (2012). Green methods for hydrogen production. *International journal of hydrogen energy*, 37(2), 1954-1971. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.173>
- Driess, M., Hausmann, J. N., Schlögl, R., & Menezes, P. W. (2021). Is Direct Seawater Splitting Economically Meaningful? *Energy & Environmental Science*(14), 3679-3685. doi: <https://doi.org/10.1039/D0EE03659E>
- Dunlap, R. A. (2018). *Sustainable Energy* (2nd, Ed.). Cengage Learning.
- Edwards, P. P., Kuznetsov, V., & David, W. I. (2007). Hydrogen energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1853), 1043-1056. doi: <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1965>
- Electric, G. (2021). *Building on a Marine Power Legacy*. General Electric. <https://www.geaviation.com/sites/default/files/ge-experience.pdf>



- Europeu, C. (2014). Conselho Europeu (23 e 24 de outubro de 2014) - Conclusões. Consultado em 11 de setembro de 2021. Disponível em <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-169-2014-INIT/pt/pdf>
- Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2009). Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1082-1088. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008>
- Farràs, P., Strasser, P., & Cowan, A. J. (2021). Water electrolysis: Direct from the sea or not to be? *Joule*, 5(8), 1921-1923. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.07.014>
- Fetter, S. (2000). Energy 2050. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 56(4), 28-38. doi: <https://doi.org/10.2968/056004010>
- focus, R. e. (2014). *Green hydrogen facility opens at Berlin airport, with first refueling of fuel cell vehicle*. Renewable energy focus [Página online]. Retirado de <http://www.renewableenergyfocus.com/view/38624/green-hydrogen-facility-opens-at-berlin-airport-with-first-refueling-of-fuel-cell-vehicle/>
- Gondal, I. A. (2019). Offshore renewable energy resources and their potential in a green hydrogen supply chain through power-to-gas. *Sustainable Energy & Fuels*, 3(6), 1468-1489. doi: <https://doi.org/10.1039/C8SE00544C>
- Google. (2021). *Base Naval de Lisboa*. Google [Página online]. Retirado de <https://www.google.com/maps/@38.6714142,-9.1506783,209m/data=!3m1!1e3>
- Goudie, A. S. (2018). *Human impact on the natural environment* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Gubrium, J. F., Holstein, J. A., Marvasti, A. B., & McKinney, K. D. (2012). *The SAGE handbook of interview research: The complexity of the craft*. Sage Publications.
- Gye, H.-R., Seo, S.-K., Bach, Q.-V., Ha, D., & Lee, C.-J. (2019). Quantitative risk assessment of an urban hydrogen refueling station. *International journal of hydrogen energy*, 44(2), 1288-1298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.035>
- Hacker, V., & Mitsushima, S. (2018). *Fuel cells and hydrogen: from fundamentals to applied research*. Elsevier.
- Harress, C. (2014). Goodbye, Oil: US Navy Cracks New Renewable Energy Technology To Turn Seawater Into Fuel, Allowing Ships To Stay At Sea Longer. *International Business Times*. Consultado em 2021. Disponível em <https://www.ibtimes.com/goodbye-oil-us-navy-cracks-new-renewable-energy-technology-turn-seawater-fuel-1568455>



- Hawser, A. (2017). *Germany is investing in anti-submarine warfare to address modern-day hybrid threats and provide a limited land strike capability*. [Página online]. Retirado de <https://www.defenceprocurementinternational.com/features/maritime/german-navys-u212a-submarine>
- Hofrichter, M. (2021). *Análise SWOT: Quando usar e como fazer*. Simplíssimo Livros Ltda.
- Hosenuzzaman, M., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Hasanuzzaman, M., Malek, A. B. M. A., & Nahar, A. (2015). Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 284-297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.046>
- Intelligence, M. E. B. (2021). *Dubai inaugurates green hydrogen plant*. Middle East Business Intelligence [Página online]. Retirado de <https://www.power-technology.com/comment/dubai-hydrogen-plant/>
- Javed, W., Guo, B., Wubulikasimu, Y., & Figgis, B. W. (2016, 21-23 Oct. 2016). Photovoltaic performance degradation due to soiling and characterization of the accumulated dust. 2016 IEEE International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE),
- Jordan, D. C., & Kurtz, S. R. (2013). Photovoltaic Degradation Rates—an Analytical Review. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 21(1), 12-29. doi: <https://doi.org/10.1002/pip.1182>
- Joseph, A., & Dalaklis, D. (2021). The international convention for the safety of life at sea: highlighting interrelations of measures towards effective risk mitigation. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 5(1), 1-11. doi: <https://doi.org/10.1080/25725084.2021.1880766>
- Kast, J., Morrison, G., Gangloff Jr, J. J., Vijayagopal, R., & Marcinkoski, J. (2018). Designing hydrogen fuel cell electric trucks in a diverse medium and heavy duty market. *Research in Transportation Economics*, 70, 139-147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.07.006>
- Kawasaki. (2021). *World's First Liquefied Hydrogen Carrier SUIISO FRONTIER Launches Building an International Hydrogen Energy Supply Chain Aimed at Carbon-free Society*. [Página online]. Retirado de https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487



- Khan, M., Al-Attas, T., Roy, S., Rahman, M. M., Ghaffour, N., Thangadurai, V., Larter, S., Hu, J., Ajayan, P. M., & Kibria, M. G. (2021). Seawater electrolysis for hydrogen production: a solution looking for a problem? *Energy & Environmental Science*, *14*(9), 4831-4839. doi: <https://doi.org/10.1039/D1EE00870F>
- Khan, S., Naushad, M., Lima, E. C., Zhang, S., Shaheen, S. M., & Rinklebe, J. (2021). Global soil pollution by toxic elements: Current status and future perspectives on the risk assessment and remediation strategies—A review. *Journal of Hazardous Materials*, *417*, 126039. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126039>
- Kopp, M., Coleman, D., Stiller, C., Scheffer, K., Aichinger, J., & Scheppat, B. (2017). Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis. *International journal of hydrogen energy*, *42*(19), 13311-13320. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.145>
- Krummrich, S., & Hammerschmidt, A. (2016). Hydrogen and fuel cells in submarines. *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*, 991-1010. doi: <https://doi.org/10.1002/9783527674268>
- Krummrich, S., & Llabrés, J. (2015). Methanol reformer—The next milestone for fuel cell powered submarines. *International journal of hydrogen energy*, *40*(15), 5482-5486. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.179>
- Kucera, J. (2015). *Reverse osmosis: Industrial processes and applications* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Kumar, P., Druckman, A., Gallagher, J., Gatersleben, B., Allison, S., Eisenman, T. S., Hoang, U., Hama, S., Tiwari, A., & Sharma, A. (2019). The nexus between air pollution, green infrastructure and human health. *Environment International*, *133*, 105181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105181>
- Küngas, R. (2020). Review—Electrochemical CO₂ Reduction for CO Production: Comparison of Low- and High-Temperature Electrolysis Technologies. *Journal of The Electrochemical Society*, *167*(4). doi: <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab7099>
- Lade, S. J., Steffen, W., De Vries, W., Carpenter, S. R., Donges, J. F., Gerten, D., Hoff, H., Newbold, T., Richardson, K., & Rockström, J. (2020). Human impacts on planetary boundaries amplified by Earth system interactions. *Nature Sustainability*, *3*(2), 119-128. doi: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0454-4>
- Larminie, J., Dicks, A., & McDonald, M. S. (2003). *Fuel cell systems explained* (Vol. 2). J. Wiley Chichester, UK.



- Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R., Haines, A., & Ramanathan, V. (2019). Effects of fossil fuel and total anthropogenic emission removal on public health and climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7192-7197. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>
- Lipman, T. E., & Weber, A. Z. (2019). *Fuel cells and hydrogen production: A volume in the Encyclopedia of sustainability science and technology*. Springer.
- Lisboa, A. d. C. d. (2011). Ciências Militares. Consultado em 25 de setembro de 2021. Disponível em https://academiamilitar.pt/images/site_images/Avaliacao_e_Qualidade/Legisla%C3%A7%C3%A3o_Geral_do_Ensino_Superior/1_INFORMA%C3%87%C3%83O_D_A_ACADEMIA_DE_CI%C3%84NCIAS_DE_LISBOA_ACERCA_DA_%C3%81REA_CIENT%C3%84FICA_DE_CI%C3%84NCIAS_MILITARES.pdf
- Logan, K. G., Nelson, J. D., & Hastings, A. (2020). Electric and hydrogen buses: Shifting from conventionally fuelled cars in the UK. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85, 102350. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102350>
- Logan, K. G., Nelson, J. D., McLellan, B. C., & Hastings, A. (2021). Japan and the UK: Emission predictions of electric and hydrogen trains to 2050. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 10, 100344. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100344>
- Łukajtis, R., Hołowacz, I., Kucharska, K., Glinka, M., Rybarczyk, P., Przyjazny, A., & Kamiński, M. (2018). Hydrogen production from biomass using dark fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 665-694. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.043>
- Lusa. (2021). Hidrogénio. A primeira experiência com gás natural vai começar. *Diário de Notícias*. <https://www.dn.pt/sociedade/hidrogenio-a-primeira-experiencia-com-gas-natural-vai-comecar--13533303.html>
- Mani, T., Primpke, S., Lorenz, C., Gerdt, G., & Burkhardt-Holm, P. (2019). Microplastic pollution in benthic midstream sediments of the Rhine River. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 6053-6062. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01363>
- Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, H., Senior, B. T. F., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen fuel cell vehicles; current status and future prospect. *Applied Sciences*, 9(11), 2296. doi: <https://doi.org/10.3390/app9112296>



- Mao, X., Ying, R., Yuan, Y., Li, F., & Shen, B. (2021). Simulation and analysis of hydrogen leakage and explosion behaviors in various compartments on a hydrogen fuel cell ship. *International journal of hydrogen energy*, 46(9), 6857-6872. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.158>
- Mar, D. d. (2021). Hidrogénio verde injetado na rede de gás natural em projeto pioneiro em Portugal. *Jornal de Negócios*. <https://www.jornaldenegocios.pt/empresas/energia/detalhe/galp-injeta-hidrogenio-verde-na-rede-de-gas-natural-em-projeto-pioneiro-em-portugal>
- Markiewicz, M., Zhang, Y. Q., Bösmann, A., Brückner, N., Thöming, J., Wasserscheid, P., & Stolte, S. (2015). Environmental and health impact assessment of Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) systems – challenges and preliminary results. *Energy & Environmental Science*, 8(3). doi: <https://doi.org/10.1039/C4EE03528C>
- McPhy. (2014). *On-site hydrogen production for the first Total hydrogen station in Europe*. McPhy - Driving clean energy forward [Página online]. Retirado de <https://mcphy.com/en/achievements/power-to-gas-en/h2ber/>
- Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897. doi: [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
- Mikkola, J. (2019). *Raising the readiness of zero-emission waterborne transport*. FLAGSHIPS [Página online]. Retirado de <https://flagships.eu/about/>
- Ministros, P. d. C. d. (2019). Aprovação do Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050. *n.º 123/2019*(Série I de 2019-07-01), 3208 - 3299. Consultado em 11 de setembro de 2021. Disponível em <https://data.dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/122777644/details/maximized>
- Ministros, P. d. C. d. (2020). Plano Nacional Energia e Clima 2030 (PNEC 2030). Consultado em 11 de setembro de 2021. Disponível em <https://data.dre.pt/web/guest/pesquisa/-/search/137618093/details/maximized>
- Miola, A., & Ciuffo, B. (2011). Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modelling approaches and available data sources. *Atmospheric environment*, 45(13), 2242-2251. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.046>
- Modisha, P. M., Ouma, C. N. M., Garidzirai, R., Wasserscheid, P., & Bessarabov, D. (2019). The Prospect of Hydrogen Storage Using Liquid Organic Hydrogen Carriers. *Energy & Fuels*, 33(4), 2778-2796. doi: [10.1021/acs.energyfuels.9b00296](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00296)



- Morelli, J. (2011). Environmental sustainability: A definition for environmental professionals. *Journal of environmental sustainability*, 1(1), 10. doi: <https://doi.org/10.14448/jes.01.0002>
- Mundo-Hernández, J., de Celis Alonso, B., Hernández-Álvarez, J., & de Celis-Carrillo, B. (2014). An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 639-649. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.029>
- Murray, M. L., Seymour, E. H., & Pimenta, R. (2007). Towards a hydrogen economy in Portugal. *International journal of hydrogen energy*, 32(15). doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.02.027>
- Musial, W., & Ram, B. (2010). *Large-scale offshore wind power in the United States: Assessment of opportunities and barriers*.
- Nacionais, R. E. (2021). *REN com Resultado Líquido de 109,2M€ em 2020*. [Página online]. Retirado de https://www.ren.pt/pt-PT/media/comunicados/detalhe/ren_com_resultado_liquido_de_1092m__em_2020_2
- Nacional, G. d. M. d. D. (2020). Diretiva Ambiental para a Defesa Nacional. (Série II de 2020-01-07), 46 - 51. Consultado em 11 de setembro de 2021. Disponível em <https://dre.pt/home/-/dre/127811898/details/maximized>
- Naseem, M., Usman, M., & Lee, S. (2021). A parametric study of dehydrogenation of various Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC) materials and its application to methanation process. *International journal of hydrogen energy*, 46(5), 4100-4115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.188>
- Newman, I., Benz, C. R., & Ridenour, C. S. (1998). *Qualitative-quantitative research methodology: Exploring the interactive continuum*. Southern Illinois University Press.
- Niaz, S., Manzoor, T., & Pandith, A. H. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 457-469. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.011>
- Niermann, M., Drünert, S., Kaltschmitt, M., & Bonhoff, K. (2019). Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs) – techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain. *Energy & Environmental Science*, 12(1). doi: <https://doi.org/10.1039/C8EE02700E>



- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 597-611. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016). *Fuel Cell Fundamentals* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Observer, E. (2021). *Our Vessel*. [Página online]. Retirado de <https://www.energy-observer.org/about/vessel>
- Organization, I. M. (2018). *SOLAS 2018: Consolidated text of the international convention for the safety of life at sea, 1974, as amended*. IMO Publishing.
- Organization, I. M. (2019). *International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)*. [Página online]. Retirado de [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)
- Pagliari, M. (2020). 18 - Hydrogen-powered boats and ships. In A. Iulianelli & A. Basile (Eds.), *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes* (pp. 411-419). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817384-8.00018-2>
- Pievani, T. (2014). The sixth mass extinction: Anthropocene and the human impact on biodiversity. *Rendiconti Lincei*, 25(1), 85-93. doi: <https://doi.org/10.1007/s12210-013-0258-9>
- Pikuła, D., Rocha, M. S., & Cichoń, E. (2016). Review of selected renewable energies in Portugal. Environmental Protection and Energy Conference at Silesian University of Technology, Gliwice.
- Piraino, F., Genovese, M., & Fragiaco, P. (2021). Towards a new mobility concept for regional trains and hydrogen infrastructure. *Energy Conversion and Management*, 228, 113650. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113650>
- Portuguesa, M. (2018). *Diretiva Setorial do Material*. M. Portuguesa.
- Portuguesa, M. (2020). *Diretiva Estratégica da Marinha 2018 - Revisão de 2021*. M. Portuguesa.
- PosHYdon. (2021). *PosHYdon - Process*. PosHYdon [Página online]. Retirado de <https://poshydon.com/en/home-en/process/>
- Pratt, J. W., & Chan, S. H. (2017). *Maritime fuel cell generator project*. <https://www.osti.gov/biblio/1481261>



- Pratt, J. W., & Klebanoff, L. E. (2018). *Optimization of Zero Emission Hydrogen Fuel Cell Ferry Design With Comparisons to the SF-BREEZE*. <https://www.osti.gov/biblio/1513454>
- Riis, T., Sandrock, G., Ulleberg, Ø., & Vie, P. J. (2005). Hydrogen storage—gaps and priorities. *HIA HCG storage paper*, 1-12. <https://zdocs.pub/doc/hydrogen-production-gaps-and-priorities-07p4k0gmv36j>
- Russo, M., Leitão, J., Gama, C., Ferreira, J., & Monteiro, A. (2018). Shipping emissions over Europe: a state-of-the-art and comparative analysis. *Atmospheric environment*, 177, 187-194. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.025>
- Saha, J. K., Selladurai, R., Coumar, M. V., Dotaniya, M., Kundu, S., & Patra, A. K. (2017). *Soil pollution-an emerging threat to agriculture* (Vol. 10). Springer.
- Santos, L. A. B. d., Lima, J. M. M. d. V., Garcia, F. M. G. P. P., Monteiro, F. T., Silva, N. M. P. d., Silva, J. C. d. V. F. d., Santos, R. J. R. P. d., Afonso, C. F. N. L. D., & Piedade, J. C. L. d. (2019). *Orientações metodológicas para a elaboração de trabalhos de investigação* (2.^a ed., revista e atualizada ed.). Instituto Universitário Militar.
- Sarsby, A. (2016). *SWOT Analysis - A guide to SWOT for business studies students*. Leadership Library.
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). *Research methods for Business Students* (8th ed.). Pearson.
- Saxe, H., & Larsen, T. (2004). Air pollution from ships in three Danish ports. *Atmospheric environment*, 38(24), 4057-4067. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.055>
- Schaschke, C. (2014). *A dictionary of chemical engineering*. Oxford University Press.
- Services, I. M. (2021). *MTU 1163*. Industrial & Marine Services [Página online]. Retirado de <https://ims-germany.com/mtu-1163/?lang=en>
- Shekhawat, D., Spivey, J. J., & Berry, D. A. (2011). *Fuel cells: technologies for fuel processing*. Elsevier.
- Sherif, S. A., Goswami, D. Y., Stefanakos, E. L., & Steinfeld, A. (2014). *Handbook of hydrogen energy*. CRC Press.
- Shipping, A. B. o. (2021). *Sustainability whitepaper - Hydrogen as marine fuel*. A. B. o. Shipping. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2021/06/ABS-hydrogen-as-marine-fuel.pdf>



- Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442-454. doi: <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>
- Siemens. (2016). SINAVY PEM Fuel Cells for Submarines. Consultado em 18 de setembro de 2021. Disponível em <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/public.1535009488.28615cde70250d0e81b68ba466bd77d7f5c68c73.sinavy-pem-fuel-cells.pdf>
- Silveira, J. L., Tuna, C. E., & Lamas, W. d. Q. (2013). The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 133-141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.054>
- Singla, M. K., Nijhawan, P., & Oberoi, A. S. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(13), 15607-15626. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12231-8>
- Skjong, E., Volden, R., Rødskar, E., Molinas, M., Johansen, T. A., & Cunningham, J. (2016). Past, Present, and Future Challenges of the Marine Vessel's Electrical Power System. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2(4), 522-537. doi: <https://doi.org/10.1109/TTE.2016.2552720>
- Snyder, J. (2020). *New dual-fuel hydrogen engine will advance shipping's decarbonisation*. Riviera Maritime Media [Página online]. Retirado de <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/new-dual-fuel-hydrogen-engine-will-advance-shippingsquos-decarbonisation-60945>
- Spiegel, C. (2007). *Designing and building fuel cells*. McGraw-Hill Professional.
- Standardization, I. O. f. (2019). Hydrogen fuel quality — Product specification. In (Vol. 14687:2019).
- Su, G., Logez, M., Xu, J., Tao, S., Villéger, S., & Brosse, S. (2021). Human impacts on global freshwater fish biodiversity. *Science*, 371(6531), 835-838. doi: <https://doi.org/10.1126/science.abd3369>
- Syafrudin, M., Kristanti, R. A., Yuniarto, A., Hadibarata, T., Rhee, J., Al-Onazi, W. A., Algarni, T. S., Almarri, A. H., & Al-Mohaimed, A. M. (2021). Pesticides in drinking water—a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 468. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18020468>



- Tichavska, M., & Tovar, B. (2017). External costs from vessel emissions at port: a review of the methodological and empirical state of the art. *Transport Reviews*, 37(3), 383-402. doi: <https://doi.org/10.1080/01441647.2017.1279694>
- Torvanger, A. (2021). *Hydrogen for shipping—Opportunities for Norway* (2021:04). (CICERO Report, Issue. C. f. I. C. Research. <https://hdl.handle.net/11250/2755909>
- Trefil, J. S. (2001). *Encyclopedia of science and technology*. Routledge.
- Tronstad, T., Åstrand, H. H., Haugom, G. P., & Langfeldt, L. (2017). *Study on the use of fuel cells in shipping* (European Maritime Safety Agency (EMSA), Issue. <http://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/2016%20EMSA%20Study%20on%20the%20use%20of%20Fuel%20Cells%20in%20Shipping.pdf>
- Turoń, K. (2020). Hydrogen-powered vehicles in urban transport systems—current state and development. *Transportation Research Procedia*, 45, 835-841. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.086>
- Uchida, H., & R. Harada, M. (2019). Hydrogen Storage and Transport Technologies. In P. E. V. de Miranda (Ed.), *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies* (pp. 221-228). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814251-6.00010-1>
- Unidas, O. d. N. (2015). Paris Agreement. Consultado em 11 de setembro de 2021. Disponível em https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.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. doi: <https://doi.org/10.1039/D0EE01545H>
- Varkaraki, E., Lymberopoulos, N., & Zachariou, A. (2003). Hydrogen based emergency back-up system for telecommunication applications. *Journal of Power Sources*, 118(1-2), 14-22. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00056-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00056-9)
- Ventura, M., Wernimont, E., Heister, S., & Yuan, S. (2007). Rocket grade hydrogen peroxide (RGHP) for use in propulsion and power devices-historical discussion of hazards. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit,
- Veritas, D. N. (2021). *Handbook For Hydrogen-Fuelled Vessels* (M. J. D. Project, Ed. 1st ed.) https://www.iims.org.uk/wp-content/uploads/2021/07/Handbook_for_hydrogen-fuelled_vessels.pdf
- Verkehrswesen, I. (2020). *World's largest single-stack alkaline-water electrolysis system*. Internationales Verkehrswesen [Página online]. Retirado de



<https://www.internationales-verkehrswesen.de/worlds-largest-single-stack-alkaline-water-electrolysis-system/>

- Wang, A., van der Leun, K., Peters, D., & Buseman, M. (2020). European hydrogen backbone: How a dedicated hydrogen infrastructure can be created. doi: https://gasforclimate2050.eu/?smd_process_download=1&download_id=471
- Whall, C., Cooper, D., Archer, K., Twigger, L., Thurston, N., Ockwell, D., McIntyre, A., & Ritchie, A. (2002). Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community. *Report for the European Commission. Entec UK Limited, Northwich, Great Britain.* doi: https://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter1_ship_emissions.pdf
- Ye, L., & Xie, K. (2021). High-temperature electrocatalysis and key materials in solid oxide electrolysis cells. *Journal of Energy Chemistry, 54*, 736-745. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2020.06.050>
- Yue, M., Lambert, H., Pahon, E., Roche, R., Jemei, S., & Hissel, D. (2021). Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 146*, 111180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111180>
- Zhang, D., Liu, X., Huang, W., Li, J., Wang, C., Zhang, D., & Zhang, C. (2020). Microplastic pollution in deep-sea sediments and organisms of the Western Pacific Ocean. *Environmental Pollution, 259*, 113948. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.08.013>
- Zhiyong, L., Xiangmin, P., & Jianxin, M. (2010). Quantitative risk assessment on a gaseous hydrogen refueling station in Shanghai. *International journal of hydrogen energy, 35*(13), 6822-6829. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.04.031>
- Zohuri, B. (2019). *Hydrogen Energy: Challenges and Solutions for a Cleaner Future* (1st ed.). Springer. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-93461-7>
- Züttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften, 91*(4), 157-172. doi: <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>



Apêndice A – Corpo de conceitos

Adsorção: A adesão de moléculas à superfície de sólidos ou líquidos e.g. a adesão de gás de hidrogénio a materiais cerâmicos porosos (Busby, 2005).

Autoignição: Quando as condições de pressão e temperatura são tais que o gás entra em combustão de forma espontânea (Sherif et al., 2014).

Biofotólise: Utilização de e.g. algas verdes para realizar biofotólise usando a enzima hidrogenase para reduzir a água a hidrogénio (Spiegel, 2007).

Biomassa: É chamada biomassa ao material orgânico proveniente de vários tipos e.g. plantas não comestíveis ou resíduos agrícolas (Busby, 2005).

Combustão: É o processo de queima, que é também designado por oxidação. Dá-se quando um combustível é combinado com um comburente nas proporções adequadas e existe a presença de uma faísca ou fonte de calor (energia de ativação) (Busby, 2005).

Combustíveis Fósseis: Combustíveis formados por processos naturais possuindo alta quantidade de carbono e.g. carvão, gás natural e o petróleo (O'hayre et al., 2016),

Criogénico: Temperaturas muito baixas, geralmente aquelas em que os gases mudam para a sua forma líquida (Busby, 2005). Para manter o hidrogénio no seu estado líquido é necessário garantir temperaturas inferiores a -253°C (Spiegel, 2007).

Deflagração: É um tipo de explosão subsónica (onda de choque chega antes que a reação de combustão esteja concluída) resultante de uma combustão proveniente de uma reação química (Schaschke, 2014)

Densidade: Massa por densidade de volume (kg/m^3), variando com a pressão e temperatura (Busby, 2005).

Desidrogenação: Reação química envolvendo a remoção de hidrogénio de um composto. Em moléculas orgânicas (e.g. hidrocarbonetos) as ligações carbono-carbono simples são convertidas em ligações duplas pela remoção dos átomos de hidrogénio (Schaschke, 2014).

Dessalinizar: Retirada do excesso de sal e outros minerais da água (Farràs et al., 2021; M. Khan et al., 2021).

Dióxido de carbono: É um gás incolor e inodoro produzido pela combustão de combustíveis baseados em hidrocarbonetos, contribuindo de forma direta para o efeito estufa (Busby, 2005).

Diretiva Estratégica de Marinha: Traduz a visão do Chefe do Estado Maior da Armada (CEMA) para o seu mandato de 3 a 5 anos, definindo os objetivos genéticos (gerar ou criar novos meios), estruturais (compor, organizar ou articular os meios disponíveis) e operacionais (utilização dos meios) assentando numa análise ao ambiente externo e interno (Armada, 2021).

Dessorção: Libertação das moléculas de hidrogénio que se encontram na superfície de sólidos ou líquidos e.g. a adesão de gás de hidrogénio a materiais cerâmicos porosos (Busby, 2005).

Eficiência: É uma medida normalmente expressa entre a quantidade de energia ou potência entregue e a energia ou potência total fornecida (Schaschke, 2014).

Eletrolisador: Permitem a conversão de água e energia (preferencialmente renovável para originar hidrogénio verde) em oxigénio e hidrogénio (Spiegel, 2007).

Eletrólise: É um processo eletroquímico, em que uma corrente passa por um eletrólito (condutores carregados de um eletrodo para outro) causando uma reação química. Sendo que a eletrólise, divide moléculas de água em hidrogénio e oxigénio (Busby, 2005).

Energia renovável: Energia derivada de recursos naturais, que se renovam pela natureza em pouco tempo (virtualmente ilimitados) como e.g. energia solar, eólica ou hidroelétrica (Busby, 2005).

Energia limpa: Energia gerada utilizando meios que não comprometam o meio ambiente e.g. eólica, solar, hidroelétrica, fotovoltaica, entre outras (Shekhawat et al., 2011).

Energia sustentável: Fonte de energia que tem em consideração fatores tecnológicos, económicos, sociais, políticos, o impacto ambiental e a capacidade de integrar a tecnologia existente e a futura (Dunlap, 2018).

Eletrolisador: Dispositivo utilizada para efetuar eletrólise (Busby, 2005).

Eletrolisador do tipo PEM: É caracterizado por utilizar um polímero sólido como eletrólito (Carmo et al., 2013).

Eletrolisador do tipo Alcalino: É caracterizado por ter dois eletrodos imersos num eletrólito líquido alcalino separados por um diafragma. Este diafragma tem como função manter os gases dos produtos separados, por uma questão de eficiência e segurança (Carmo et al., 2013).

Fermentação escura: Utilização de micro-organismos anaeróbicos (estrictos ou facultativos), para conversão de substratos ricos em carboidratos e.g. biomassa em gás hidrogénio e dióxido de carbono (Łukajtis et al., 2018).

Fotofermentação: Produção de hidrogénio por ação de bactérias fotossintéticas utilizando a enzima nitrogenase (Sherif et al., 2014).

Fotólise: O processo de eletrólise é efetuado através do efeito da luz ou radiação ultravioleta (Busby, 2005).

Gaseificação: O combustível e.g. carvão ou biomassa é aquecido até ao estado gasoso, sendo então misturado com vapor na presença de um catalisador para produzir gás de síntese (mistura combustível de gases produzida



por gaseificação). Este gás pode então ser processado para extrair hidrogénio e outros produtos químicos (Spiegel, 2007).

Hidretos metálicos: Composto criado quando um metal ou liga absorve hidrogénio gasosos, ocupando assim os espaços na estrutura cristalina do metal (Busby, 2005).

Hidrocarbonetos: Combustível orgânico que contém hidrogénio e carbono isoladamente ou em combinação com outros elementos e.g. carvão, gasolina, petróleo, metano, entre outros (Busby, 2005).

Hidrogenação: Processo envolvendo uma reação heterogénea de adição de hidrogénio a moléculas contendo carbono e.g. óleos insaturados de origem animal ou vegetal (Schaschke, 2014).

Hidrogénio verde: Hidrogénio produzido a partir de fontes de energia limpas e renováveis (Busby, 2005).

Liquefação: Processo de conversão de um gás em líquido (Trefil, 2001).

Massa volúmica ou Densidade absoluta: Massa por unidade de volume de uma substância (kg/m^3), sendo a densidade atual da substância não incluindo nenhum espaço livre entre as partículas (Schaschke, 2014).

Microesferas: Tipicamente constituídas por esferas de vidro oco que possibilitam o armazenamento de hidrogénio. Estas esferas apresentam elevada permeabilidade ao hidrogénio a altas temperaturas e impermeabilidade a baixas temperaturas (Zohuri, 2019).

Nanofibras: Tipicamente constituídas por nanofibras de carbono que possibilitam o armazenamento de hidrogénio. Estas permitem o armazenamento por adsorção/dessorção (Zohuri, 2019).

Navio-tanque: É um navio de carga utilizado para o transporte de cargas líquidas de natureza inflamável (IMO, 2018).

Osmose inversa: Técnica de desmineralização baseada numa membrana, que é utilizada para separar sólidos dissolvidos (iões) de uma solução (normalmente soluções à base de água) (Kucera, 2015).

Oxidação parcial: É um tipo de reação de reforma no qual a matéria-prima é queimada como combustível para gerar o calor necessário para as reações subsequentes, sendo a combustão extinta antes de ser concluída (Busby, 2005).

Óxidos de nitrogénio: Compostos criados a altas temperaturas durante a combustão, contribuindo para a poluição urbana e.g. chuvas ácidas (Busby, 2005).

Pilhas de combustível: São dispositivos eletroquímicos que convertem energia química de determinados reagentes em eletricidade e calor com alta eficiência (Spiegel, 2007). Misturam um combustível e.g. hidrogénio e um oxidante e.g. ar para gerar eletricidade (Shekhawet et al., 2011).

Pilha de combustível do tipo PEM: É um tipo de pilha de combustível de baixa temperatura que usa um polímero sólido (camada fina de plástico) como eletrólito e elétrodos de carbono poroso contendo um catalisador de um metal nobre e.g. platina (Busby, 2005; Spiegel, 2007).

Pirólise: Processo de aquecimento de hidrocarbonetos na ausência de ar, sendo decomposto em hidrogénio e carbono sólido (Spiegel, 2007).

Poder calorífico: Quantidade de energia produzida pela combustão de um combustível (Busby, 2005).

Poluentes: Substância que tem uma influência local ou global no meio ambiente (Lipman & Weber, 2019).

Ponto de ebulição: Temperatura de transição na qual ocorre a passagem do estado líquido para o gasoso (Schaschke, 2014).

Ponto de inflamação: A temperatura mais baixa na qual um líquido volátil produz uma quantidade de vapor suficiente para se inflamar no ar a uma determinada pressão (Schaschke, 2014).

Processos biológicos: Os processos biológicos para produção de hidrogénio são baseados em fermentação, digestão anaeróbia e técnicas de processamento metabólico (Spiegel, 2007).

Processos químicos: Conversão química de reagentes em outros produtos que envolvem a quebra ou formação de novas ligações químicas (Schaschke, 2014).

Reação Endotérmica: Reação que requer calor para acontecer (Busby, 2005).

Reação exotérmica: Reação que emite calor quando acontece (Busby, 2005).

Reforma: Processo químico que usa vapor e um catalisador para converter combustíveis de hidrocarbonetos ou matérias-primas em um gás de hidrogénio e monóxido de carbono, a partir do qual o hidrogénio é separado e purificado (Busby, 2005).

Reforma autotérmica: Combinação de reforma a vapor com oxidação parcial, sendo que a reforma a vapor requer calor e a oxidação parcial emite calor. Ao combinar os dois, o processo é originado por uma reação autotérmica minimizando assim as necessidades energéticas (Busby, 2005).

Reforma de hidrocarbonetos: A reforma de hidrocarbonetos pode ser feita por reforma a vapor, oxidação parcial ou reforma autotérmica (Abdin et al., 2020).

Termólise: Reação química originada por aquecimento, que origina a decomposição das moléculas de água (Baykara, 2004).

Vetor de energia: É uma substância rica em energia que permite o transporte de e.g. hidrogénio gasoso ou líquido, com a intenção de ser usado num instante de tempo posterior e/ou num espaço diferente do local de produção principal (Abdin et al., 2020).



Apêndice B – Guião padrão da entrevista semiestruturada

PRODUÇÃO, ARMAZENAMENTO E UTILIZAÇÃO DE HIDROGÉNIO

1. PRODUÇÃO

- a) Dado o estado da tecnologia atualmente existente e custos associados (ou outro fator que considere importante), qual considera ser a melhor estratégia atual para produção de hidrogénio verde a implementar na Base Naval de Lisboa?
- b) Numa estratégia a médio prazo (3 a 5 anos), o que mudava/alterava considerando a produção de hidrogénio verde na Base Naval de Lisboa?
- c) Numa estratégia a longo prazo (10 a 12 anos), o que mudava/alterava considerando a produção de hidrogénio verde na Base Naval de Lisboa?

2. ARMAZENAMENTO

- a) Dado o estado da tecnologia atualmente existente e custos associados (ou outro fator que considere importante), qual considera ser a melhor estratégia atual para armazenamento de hidrogénio verde a implementar na Base Naval de Lisboa?
- b) Numa estratégia a médio prazo (3 a 5 anos), o que mudava/alterava considerando o armazenamento de hidrogénio verde na Base Naval de Lisboa?
- c) Numa estratégia a longo prazo (10 a 12 anos), o que mudava/alterava considerando o armazenamento de hidrogénio verde na Base Naval de Lisboa?

3. UTILIZAÇÃO

- a) Dado o estado da tecnologia atualmente existente e custos associados (ou outro fator que considere importante), qual considera ser a melhor estratégia atual para utilização de hidrogénio verde na Marinha? Exemplos de outras Marinhas?
- b) Numa estratégia a médio prazo (3 a 5 anos), o que mudava/alterava considerando a utilização de hidrogénio verde na Marinha? Exemplos de outras Marinhas?
- c) Numa estratégia a longo prazo (10 a 12 anos), o que mudava/alterava considerando a utilização de hidrogénio verde na Marinha? Exemplos de outras Marinhas?

SWOT – STRENGTHS, WEAKNESSES, OPPORTUNITIES AND THREATS

- a) Quais considera serem as forças quando se fala numa utilização de hidrogénio na Marinha Portuguesa (fatores internos)?
- b) Quais considera serem as fraquezas quando se fala numa utilização de hidrogénio na Marinha Portuguesa (fatores internos)?
- c) Quais considera serem as oportunidades quando se fala numa utilização de hidrogénio tendo em conta os fatores externos (mercado, concorrentes, fornecedores, políticos, económicos, sociais, culturais, entre outros)?
- d) Quais considera serem as ameaças quando se fala numa utilização de hidrogénio tendo em conta os fatores externos (mercado, concorrentes, fornecedores, políticos, económicos, sociais, culturais, entre outros)?

CONTRIBUTOS ADICIONAIS

Face às questões apresentadas anteriormente, existem algumas notas sobre a temática dos sistemas de hidrogénio e a sua exploração pela Marinha que pretenda fazer?

**Apêndice C – Entrevista ao Superintendente do Material****Entrevistado / Posto / Classe:** Edgar Marcos de Bastos Ribeiro / Vice-almirante / Marinha**Cargo:** Superintendente do Material**Meio da entrevista / Data / Duração da entrevista:** Videoconferência / 17 de dezembro de 2021 / 60 minutos**Quadro 20 – Análise de conteúdo - Superintendente do Material**

Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
2. Análise SWOT	Opinião sobre a análise SWOT atual	Forças	<ul style="list-style-type: none"> • Inovação tecnológica • Aumento do prestígio interno • Alinhamento com os valores da organização • Desenvolvimento do conhecimento interno • Existência de um consumidor direto • Área disponível na Base Naval de Lisboa 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aposta em inovação tecnológica que contribui para a descarbonização ✓ O aumento do prestígio interno torna a organização mais atrativa pela aposta na sustentabilidade ambiental ✓ O alinhamento com os valores da organização torna-a coerente ✓ O desenvolvimento do conhecimento interno possibilita a consolidação e formação de técnicos dentro da organização, aumentando assim o valor agregado do capital humano ✓ A existência de um consumidor direto (submarinos) permite aumentar a disponibilidade, desempenho, horas de treino e operação. ✓ A área disponível na Base Naval de Lisboa possibilita uma fácil implementação de sistemas de hidrogénio
		Fraquezas	<ul style="list-style-type: none"> • Mobilidade de longo curso • Elevado custo • Pouco conhecimento técnico 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A autonomia na mobilidade de longo curso ainda é uma limitação enquanto não existir uma rede nacional de reabastecimento ✓ O elevado custo é uma limitação atual que deve ser mitigada ✓ O pouco conhecimento técnico ainda é um desafio sendo justificado pelo pouco tempo de exploração da tecnologia
		Oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> • Acesso a fontes de financiamento • Sustentabilidade ambiental • Diminuição dos custos em energia • Parcerias com empresas na área do hidrogénio • Alinhar a estratégia da Marinha com o que se pretende para a sociedade 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ É difícil para a Marinha aceder a projetos por ser <i>defesa</i>, sendo que o aumento do interesse no hidrogénio pode <i>ajudar</i> o acesso a fontes de financiamento ✓ É fundamental alinhar a organização com as necessidades e medidas de sustentabilidade ambiental definidas até 2050 pelo país ✓ Usando fontes de energia renovável pode levar à diminuição dos custos em energia ✓ Estabelecer parcerias com empresas na área do hidrogénio pode aumentar o conhecimento e o acesso a tecnologia (valor acrescentado) ✓ Ao alinhar a estratégia da Marinha com o que se pretende para a sociedade é possível contribuir diretamente para atingir neutralidade carbónica
		Ameaças	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia em desenvolvimento 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ É uma tecnologia em desenvolvimento e apresenta um baixo grau de maturidade, especialmente no transporte marítimo



Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
			<ul style="list-style-type: none"> • Custo-benefício do investimento • Risco no investimento 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Existe risco no investimento principalmente pela ausência atual de soluções tecnológicas para a mobilidade terrestre e marítima
<p style="text-align: center;">3. Contributos adicionais</p>	<p style="text-align: center;">Opinião pessoal sobre o tópico Sistemas de Hidrogénio</p>	<p style="text-align: center;">Marinha</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Importância de atingir a meta carbono zero em 2050 • Na mobilidade terrestre a tecnologia de baterias está disseminada • Custo elevado por unidade de energia • Produção de hidrogénio verde é viável • Essencial a existência de financiamento externo • Principal aposta em painéis solares • Essencial a aposta na mobilidade urbana • Hidrogénio produzido iria abastecer a sociedade civil • A solução ideal seria baseada em painéis solares e baterias • Pilhas de combustível de grande potência ainda estão em evolução • A não existência de postos de abastecimento é uma clara limitação • A médio prazo a aposta deverá ser numa vedeta para transporte de passageiros • A conversão de outros navios dependerá da capacidade de produção própria • A utilização de energias alternativas acarreta elevado custo e perda de desempenho e autonomia • Marinha muito ativa na inovação • Existência de poucos projetos no domínio marítimo • O principal foco será o transporte de passageiros • Neste momento a Marinha já se encontra a investir em veículos elétricos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ O grande fator de mobilização para a utilização de vetores de energia alternativos é a importância de atingir a meta carbono zero em 2050 ✓ Na mobilidade terrestre a tecnologia de baterias está disseminada sendo que o hidrogénio terá de se constituir como uma alternativa viável ✓ Com o custo de produção de uma unidade de hidrogénio seria possível a produção de $\cong 1,3$ unidades de outro combustível tendo assim um custo elevado por unidade de energia ✓ A produção de hidrogénio verde é viável pois compensa os custos de produção através da utilização de energias renováveis ✓ É essencial a existência de financiamento externo pois permitiria uma aposta sólida sendo o investimento recuperado pela diminuição dos custos de operação ✓ É essencial a aposta na mobilidade urbana de longo curso, faltando para isso estações de reabastecimento ✓ A solução ideal seria baseada em painéis solares e baterias procurando atingir autonomia no ciclo diurno e noturno ✓ Apesar da sua aplicabilidade (e.g. mobilidade terrestre) as pilhas de combustível de grande potência ainda estão em evolução ✓ A não existência de postos de abastecimento é uma clara limitação, colocando em causa qualquer reabastecimento fora da Base Naval de Lisboa ✓ Após instalação de uma central de abastecimento na Base Naval de Lisboa a médio prazo a aposta deverá ser numa vedeta para transporte de passageiros ✓ A conversão de outros navios dependerá da capacidade de produção própria, devendo garantir a edificação prévia da capacidade ✓ A existência de poucos projetos no domínio marítimo no mercado, limitam a rápida edificação da capacidade ✓ Devido à diminuição de autonomia e desempenho o principal foco será o transporte de passageiros ✓ Neste momento a Marinha já se encontra a investir em veículos elétricos, mas o custo elevado do investimento inicial ainda é uma limitação

**Apêndice D – Vice-Chefe do Estado-Maior da Armada****Entrevistado/Posto/Classe/Cargo:** Jorge Manuel Novo Palma / Vice-almirante / Marinha /**Cargo:** Estado-Maior da Armada – Vice-Chefe do Estado-Maior da Armada**Meio da entrevista/Data/Duração:** Videoconferência / 07 de dezembro de 2021 / 90 minutos**Quadro 21 – Análise de conteúdo - Vice-Chefe do Estado-Maior da Armada**

Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
2. Análise SWOT	Opinião sobre a análise SWOT atual	Forças	<ul style="list-style-type: none"> • Inovação tecnológica • Aumento do prestígio interno • Alinhamento com os valores da organização • Desenvolvimento do conhecimento interno • Autonomia de produção • Existência de um consumidor direto • Capacidade de armazenamento próprio • Conhecimento e capacitação dos Engenheiros Navais 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A inovação tecnológica deve estar presente para que estejamos numa organização que aposta na descarbonização ✓ O aumento do prestígio interno faz com que a organização se torne mais atrativa procurando a preservação do ambiente e oceanos ✓ O alinhamento com os valores da organização torna-a coerente ✓ O desenvolvimento do conhecimento interno possibilita a consolidação e formação de técnicos dentro da organização (valores intangíveis) ✓ Ao garantir autonomia de produção de hidrogénio é possível aumentar a disponibilidade, desempenho, horas de treino e operação dos submarinos ✓ A autonomia de produção permite independência de fornecedores externos ✓ O incremento do conhecimento e capacitação dos Engenheiros Navais é essencial para o futuro da organização
		Fraquezas	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo • Risco tecnológico • Pouco conhecimento técnico 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ O elevado custo por kW é uma limitação atual, sendo que com o evoluir da tecnologia certamente será ultrapassado ✓ Existe um risco tecnológico dada a maturidade da tecnologia o que pode levar a um risco no investimento, mas que se conseguirá mitigar ✓ Existe pouco conhecimento técnico na Marinha sobre utilização e manutenção de sistemas de hidrogénio
		Oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> • Acesso a fontes de financiamento • Contribuição para os fatores políticos, económicos e sociais • Alinhar a estratégia da Marinha com o que se pretende para a sociedade 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ O acesso a fontes de financiamento que não sejam diretamente para a defesa pode estar facilitado através de parcerias externas ✓ Dada a meta da neutralidade carbónica para o país, existe uma contribuição para os fatores políticos, económicos e sociais ✓ O alinhar a estratégia da Marinha com o que se pretende para a sociedade é essencial para o futuro da organização
		Ameaças	<ul style="list-style-type: none"> • Hidrogénio não se afirmar como fonte de energia 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Existe a possibilidade do hidrogénio não se afirmar como fonte de energia com a abrangência e amplitude que se perspetiva.



Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
3. Contributos adicionais	Opinião pessoal sobre o tópico Sistemas de Hidrogénio	Marinha	<ul style="list-style-type: none">• Custo-benefício do investimento• Meta carbono zero em 2050• Utilização de energia renovável combinada com energia da rede verde• Painéis solares podem ser utilizados para produção de hidrogénio verde• Armazenar energia em <i>águas quentes</i>• Uso de <i>águas quentes</i> permite harmonizar consumos• Não é viável a utilização de aerogeradores• Existência de depósitos de hidrogénio• Existe atualmente mobilidade urbana a hidrogénio• A Marinha é a principal consumidora de energia da margem sul do Tejo• É importante ter capacidade de produção e armazenamento• A plataforma dos navios da Marinha tem um ciclo de vida longo• Não existiu evolução na plataforma dos navios da Marinha• Os navios propulsados a combustíveis fósseis vão coexistir mesmo após 2050• Entrada em portos com restrições ambientais• Aposta no hidrogénio faz sentido pois a Marinha tem os submarinos• Existem atualmente limitações ao nível da autonomia com energias renováveis• Em tempo de guerra não podemos comprometer o desempenho• Em tempo de paz posso assumir perda de autonomia e desempenho• Perda de autonomia e desempenho não pode comprometer a inovação	<ul style="list-style-type: none">✓ A meta carbono zero em 2050 deve ser conseguida através do contributo geral de todos conseguindo assim ter sucesso neste objetivo✓ A utilização de energia renovável combinada com energia da rede verde permite produção de hidrogénio verde✓ Ao armazenar energia em <i>águas quentes</i> durante o dia podemos assim ter utilizações domésticas e algumas industriais e de serviços✓ O uso de <i>águas quentes</i> permite harmonizar consumos no arco diurno✓ Devido à localização da Base Naval de Lisboa, e de acordo com testes de viabilidade efetuados, não é viável a utilização de aerogeradores✓ A existência de depósitos de hidrogénio garantia resiliência face ao mercado✓ Existe atualmente mobilidade urbana a hidrogénio na Europa, diminuindo assim a pegada de carbono✓ A Marinha é a principal consumidora de energia da margem sul do Tejo, tendo aqui uma oportunidade única de utilização de uma fonte de energia neutra em carbono✓ A plataforma dos navios da Marinha tem um ciclo de vida longo tendo normalmente 30 anos de vida✓ A obsolescência operacional é mais rapidamente atingida nas áreas das armas e da eletrónica e não existiu evolução na plataforma dos navios da Marinha✓ Os navios propulsados a combustíveis fósseis vão coexistir mesmo após 2050, no entanto a Marinha vai continuar a apostar em fontes de energia sem carbono✓ A utilização de hidrogénio também permite resolver o problema da entrada em portos com restrições ambientais✓ Aposta no hidrogénio faz sentido pois a Marinha tem os submarinos da classe <i>Tridente</i> desde 2010, tendo um ciclo de vida de pelo menos mais 20 anos✓ Em tempo de guerra não podemos comprometer o desempenho podendo instalar meios de propulsão alternativos na mesma unidade naval para garantir isso✓ Em tempo de paz posso assumir perda de autonomia e desempenho mas estas devem ser adequadas a uma atuação eficaz em caso de emergência e.g. desastre natural✓ A perda de autonomia e desempenho não pode comprometer a inovação e as ações a tomar para atingir a meta carbono zero em 2050



Apêndice E – Divisão de Material do Estado-Maior da Armada

Entrevistado/Posto/Classe: Francisco Guilherme Belo de Matos Rebocho Antunes / Capitão-de-mar-e-guerra / Engenheiro Naval ramo Mecânica

Cargo: Estado-Maior da Armada – Chefe da Divisão de Material

Meio da entrevista/Data/ Duração da entrevista: Videoconferência / 12 de novembro de 2021 / 120 minutos

Entrevistado/Posto/Classe: Francisco José Cunha Gomes / Capitão-tenente / Engenheiro Naval ramo Mecânica

Cargo: Estado-Maior da Armada – Divisão de Material – Chefe da secção de Ambiente e Gestão de Configuração de Capacidades

Meio da entrevista/Data: Email / 23 de novembro de 2021

Quadro 22 – Análise de conteúdo - Divisão de Material

Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
1. Sistemas de Hidrogénio	Produção	Estratégia curto prazo	<ul style="list-style-type: none"> • Painéis solares de 1 MW • Instalação de uma estação de abastecimento • Instalação de: osmose inversa, filtragem, eletrolisador e purificador 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Em curso aquisição de painéis solares de 1 MW ✓ Produção aproximada de 4 MWh/dia ✓ Instalação inicial de painéis solares para injeção na rede ✓ Com painéis solares de 7 MW conseguíamos que o excesso fosse para a rede ✓ Enquanto não existir produção própria apostar no abastecimento ✓ Podemos comprar hidrogénio numa fase inicial ✓ Instalação de uma estação de abastecimento por forma a conseguir também o fornecimento à comunidade local ✓ Apostar na produção própria utilizando um eletrolisador 1 MW ✓ Instalação de: osmose inversa, filtragem, eletrolisador e purificador por forma a edificar a capacidade de produção
		Estratégia médio prazo (3 a 5 anos)	<ul style="list-style-type: none"> • Aquisição de eletrolisador de 1 MW • Utilização de água do rio 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aquisição de eletrolisador de 1 MW, utilizando energia dos painéis solares ✓ Utilização de energia verde certificada durante a noite ✓ Produção máxima de 400 kg/dia de hidrogénio ✓ Produção de 60 kg/dia utilizando os painéis solares ✓ Rendimento do eletrolisador 60% a 70% ✓ Utilização de água do rio purificada com gerador de osmose inversa ✓ Possibilidade de utilizar eletrolisador que permita utilização de água diretamente do rio (salgada e turva)
		Estratégia longo prazo (10 a 12 anos)	<ul style="list-style-type: none"> • Painéis solares e aerogeradores • Instalação de baterias para absorver variações bruscas de energia 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ciclo completo de produção plenamente estabelecido com painéis solares e aerogeradores ✓ A instalação de baterias para absorver variações bruscas de energia proveniente dos painéis solares



Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
	Armazenamento	Estratégia curto prazo	<ul style="list-style-type: none"> Reservatório gás comprimido 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reservatório gás comprimido abastecido comercialmente ou por produção própria ✓ Armazenamento de 70 a 100 bar ✓ Existe muito espaço disponível na BNL para os reservatórios ✓ Armazenamento de 1500 kg de hidrogénio ✓ Hidrogénio é seguro e semelhante ao gás natural ✓ Sem incidentes graves relatados na Europa ✓ Hidrogénio não explode, é leve e expande rapidamente no ar ✓ Hidrogénio arde numa chama invisível e quente
		Estratégia médio prazo (3 a 5 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Reservatório gás comprimido 	-----
		Estratégia longo prazo (10 a 12 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Reservatório gás comprimido 	-----
	Utilização	Estratégia curto prazo	<ul style="list-style-type: none"> Pilhas de combustível Injeção na Rede de gás natural Vender comercialmente Utilização nos submarinos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Conversão de navios para utilizar hidrogénio através de pilhas de combustível ✓ Meios elétricos e utilizando hidrogénio vão coexistir numa fase inicial ✓ Parceria com empresas por forma a conseguir vender comercialmente ✓ Estabelecer protocolo com empresa de transporte de passageiros ✓ A necessidade de utilização dos submarinos reforça a necessidade de investimento ✓ Possibilidade de injeção na rede de gás natural 10% a 15%
		Estratégia médio prazo (3 a 5 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Motores bicombustível Pilhas de combustível Rede de autocarros da Marinha Vedetas a hidrogénio Bicicletas a hidrogénio Reconfiguração de meios existentes ou em fim de vida 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilização de motores bicombustível térmicos a funcionar com hidrogénio ✓ Rede de autocarros da Marinha poderia ser todo carbono zero (hidrogénio) ✓ Na edificação da rede de autocarros da Marinha a hidrogénio deve-se explorar a possibilidade de apoio externo (programas de financiamento) ✓ Utilização de bicicletas a hidrogénio para mobilidade interna na BNL ✓ Reconfiguração de meios existentes ou em fim de vida para possibilitar a utilização de hidrogénio
		Estratégia longo prazo (10 a 12 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Reconfiguração de meios existentes ou em fim de vida Aquisição de novos meios navais 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A aquisição de novos meios navais será baseada em navios patrulha costeiros, serviços de transporte fluvial ou na edificação de serviços portuários



Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
			<ul style="list-style-type: none">• Produção de outros combustíveis a partir do hidrogénio verde	<ul style="list-style-type: none">✓ Perspetiva-se evolução do hidrogénio em detrimento dos compostos petrolíferos✓ Perspetiva-se que o hidrogénio seja o petróleo do futuro sendo a matéria-prima para produção de outros combustíveis a partir do hidrogénio verde✓ Possibilidade de combinação com outros combustíveis produzidos através de hidrogénio verde (e.g. diesel sintético ou amónia verde)
2. Análise SWOT	Opinião sobre a análise SWOT atual	Forças	<ul style="list-style-type: none">• Autonomia de produção• Capacidade de armazenamento próprio• Serviço à comunidade local• Fonte de energia verde• Existência de um consumidor direto	<ul style="list-style-type: none">✓ A autonomia de produção permite independência de fornecedores externos✓ Serviço à comunidade local através da venda e patrocínio de uma fonte de energia verde✓ Fonte de energia verde que contribui para a meta de carbono zero em 2050✓ Ao garantir autonomia na produção de hidrogénio é possível aumentar a disponibilidade, desempenho, horas de treino e operação dos submarinos✓ A existência de um consumidor direto para o hidrogénio produzido faz com que exista uma contribuição direta para manutenção dos padrões de prontidão operacionais (submarinos)
		Fraquezas	<ul style="list-style-type: none">• Necessidade de investimento e acesso a capital para investimento• Necessidade de parcerias que facilitem o acesso ao Plano de Recuperação e Resiliência Português• Segurança na utilização• Pouco conhecimento técnico	<ul style="list-style-type: none">✓ Necessidade de parcerias que facilitem o acesso ao Plano de Recuperação e Resiliência Português pois em regra não são atribuídos para a defesa✓ Segurança na utilização pois o risco associado à utilização de hidrogénio é baixo✓ Existe pouco conhecimento técnico na Marinha sobre utilização e manutenção de sistemas de hidrogénio
		Oportunidades	<ul style="list-style-type: none">• Parcerias com empresas na área do hidrogénio• Injeção de hidrogénio na rede de gás natural• Contributo para a descarbonização da economia• Comunicação e sensibilização para a descarbonização• Polo de hidrogénio na margem sul do Tejo com potencial de crescimento• Potenciação da economia• Potenciação do conhecimento sobre hidrogénio• Custo-benefício da exploração após investimento inicial	<ul style="list-style-type: none">✓ Estabelecer parcerias com empresas na área do hidrogénio permitiria a venda e consequentemente a recuperação do investimento✓ Injeção de hidrogénio na rede de gás natural 10% a 15% sendo esta uma tarefa de fácil execução✓ Comunicação e sensibilização para a descarbonização da economia virada para o futuro✓ Polo de hidrogénio na margem sul do Tejo com potencial de crescimento o que pode permitir a potenciação da economia✓ Potenciação do conhecimento sobre hidrogénio através de investigação e desenvolvimento envolvendo a academia



Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
		Ameaças	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia em desenvolvimento • Incrementação de utilizadores • Custo-benefício e investimento 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tecnologia em desenvolvimento que necessita de ganhar maturidade tecnológica ✓ Incrementar de utilizadores para e.g. autocarros, veículos e meios navais
3. Contributos adicionais	Opinião pessoal sobre o tópico Sistemas de Hidrogénio	Marinha	<ul style="list-style-type: none"> • Produção de hidrogénio verde na BNL • Dispensadores de hidrogénio • Infraestrutura própria • Utilização de energia renovável combinada com energia da rede verde • Perspetiva de utilizar aerogerador para produção de energia em arco noturno • Necessidade de estudo dos custos associados ao processo • Utilização inicial de meios adaptados aplicando pilhas de combustível • O custo atual com o hidrogénio para os submarinos é elevado • É importante considerar o ecologicamente verde e não só o economicamente verde • Aposta em projetos de conversão de meios existentes • Posto de hidrogénio na BNL • Montar um posto de hidrogénio na BNL com acesso exterior • Utilização de motores bicombustível • É necessária purificação para a utilização de eletrolisadores com água diretamente do rio • A energia nuclear é a melhor opção para navios militares • Podemos aceitar perda de autonomia mas não perda de desempenho • Podemos produzir diesel a partir de dióxido de carbono e hidrogénio 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A produção de hidrogénio verde na BNL permite o aproveitamento de energias renováveis para consumo interno (e.g. submarinos ou frota de veículos) ✓ Parceria com uma empresa externa para fornecimento de dispensadores de hidrogénio por forma a permitir a sua disponibilização (incluindo a comunidade local) ✓ A médio prazo deverá ser efetuado investimento em infraestrutura própria ✓ A utilização de energia renovável combinada com energia da rede verde permite a produção de hidrogénio verde ✓ Existe a necessidade de estudo dos custos associados ao processo sendo que seria economicamente viável a produção em 4 a 6 anos ✓ Conversão de meios existentes para utilização de hidrogénio utilizando parcerias com a academia e indústria nacional ✓ Utilização inicial de meios adaptados aplicando pilhas de combustível e hidrogénio gasoso armazenado a 350 bar ✓ Os meios convertidos inicialmente seriam o NRP Mondego e UAM Zêzere ✓ Ao montar um posto de hidrogénio na BNL com acesso exterior iria permitir o acesso à comunidade local ✓ O posto de hidrogénio na BNL seria instalado mesmo sem produção própria ✓ Os motores bicombustíveis permitem a utilização de hidrogénio menos puro com um rendimento típico de 30% a 40% ✓ As pilhas de combustível necessitam de hidrogénio com 99,999% de pureza para não existir diminuição no rendimento ✓ É necessária purificação para a utilização de eletrolisadores com água diretamente do rio recorrendo e.g. a osmose inversa ✓ A energia nuclear é a melhor opção para navios militares pois permite manter a performance e autonomia sendo uma fonte de energia livre de carbono ✓ Nas conversões de navios já existentes podemos aceitar perda de autonomia mas não perda de desempenho ✓ Na conversão de navios militares já existentes deve-se manter a possibilidade de utilização de meios de propulsão (alternativos) que permitam manter o desempenho em caso de necessidade

**Apêndice F – Entrevista à empresa PRF****Entrevistado:** Marcelo Amaral**Cargo:** Unidade de negócios de Hidrogénio - *Hydrogen Business Unit***Meio da entrevista/Data:** Email / 06 de dezembro de 2021**Descrição da empresa:** A empresa *PRF* é uma empresa Nacional com sede em Leiria, que opera no mercado desde 1991 procurando novas soluções, novos produtos e tecnologias estando atualmente na vanguarda da tecnologia e de conhecimento na área dos gases combustíveis. Foi responsável pela instalação do primeiro posto de abastecimento de hidrogénio para veículos em Portugal.**Quadro 23 – Análise de conteúdo - Empresa PRF**

Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
1. Sistemas de Hidrogénio	Produção	Estratégia curto prazo	<ul style="list-style-type: none"> Eletrolisadores do tipo alcalino Utilização de energia elétrica da rede proveniente de energias renováveis 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Os eletrolisadores do tipo alcalino estão no mercado há bastante tempo sendo uma tecnologia madura ✓ Os eletrolisadores do tipo alcalino têm um custo mais baixo em relação aos PEM e apresentam um elevado tempo de vida útil ✓ Os eletrolisadores do tipo alcalino necessitam de um maior espaço físico e de manutenção periódica (eletrólito corrosivo – NaOH e KPH) comparado com os PEM ✓ As necessidades adicionais dos eletrolisadores do tipo alcalino face aos PEM não apresentam problema de utilização na Marinha ✓ A utilização de energia elétrica da rede proveniente de energias renováveis com garantias de origem devidamente certificadas pela Entidade Emissora de Garantias de Origem
		Estratégia médio prazo (3 a 5 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Eletrolisadores do tipo PEM Investimento na tecnologia PEM irá diminuir o seu custo Eletrolisadores PEM são mais compactos Eletrolisadores PEM necessitam menos manutenção Eletrolisadores PEM operam a pressões mais elevadas 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Têm sido feitos investimentos para o desenvolvimento de eletrolisadores do tipo PEM o que tem acarretado uma diminuição considerável no seu custo ✓ Os eletrolisadores do tipo PEM são mais compactos, com menos manutenção e operam a pressões mais elevadas quando comparado com os alcalinos ✓ Os eletrolisadores do tipo PEM respondem mais rápido às necessidades do sistema e serão com certeza a aposta a médio prazo
		Estratégia longo prazo (10 a 12 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Eletrolisadores que operam a altas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Os eletrolisadores que operam a altas temperaturas estão em desenvolvimento por formam a conseguirem desempenho e durabilidade



Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
				✓ Os eletrolisadores que operam a altas temperaturas podem ser usados para conversão eletroquímica direta de vapor de água e dióxido de carbono em hidrogénio, monóxido de carbono ou gás de síntese (hidrogénio + monóxido de carbono)
	Armazenamento	Estratégia curto prazo	<ul style="list-style-type: none"> Reservatório gás comprimido 	✓ Armazenamento em reservatório gás comprimido (e.g. aço, polímeros ou fibra) permite armazenamento em segurança
		Estratégia médio prazo (3 a 5 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Reservatório no estado líquido Utilização de compostos orgânicos líquidos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ao armazenar num reservatório no estado líquido permite uma maior densidade energética ✓ Ao armazenar num reservatório no estado líquido são necessários evaporadores para conversão para o estado gasoso ✓ A utilização de compostos orgânicos líquidos elimina a necessidade de temperaturas criogénicas diminuindo assim o gasto energético
		Estratégia longo prazo (10 a 12 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Hidretos metálicos 	✓ Com a evolução da tecnologia de hidretos metálicos esta poderá apresentar-se como a melhor solução de armazenamento
	Utilização	Estratégia curto prazo	<ul style="list-style-type: none"> Injeção na Rede de gás natural 	✓ Injeção na rede de gás natural de pequenos volumes de hidrogénio (10%) por forma a reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa
		Estratégia médio prazo (3 a 5 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Utilização em geradores adaptados que permitam a utilização de hidrogénio 	✓ A utilização em geradores adaptados que permitam a utilização de hidrogénio permitindo assim energia de socorro em caso de falha no fornecimento de energia elétrica
		Estratégia longo prazo (10 a 12 anos)	<ul style="list-style-type: none"> Pilhas de combustível Combinação de pilhas de combustível + motores elétricos com motores bicombustível Utilização de compostos orgânicos líquidos em navios Utilização de amoníaco verde em alternativa 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilização de pilhas de combustível a hidrogénio já deverá ser usual por forma alimentar motores elétricos ✓ Manter a combinação de pilhas de combustível + motores elétricos com motores bicombustível
2. Análise SWOT	Opinião sobre a análise SWOT atual	Forças	<ul style="list-style-type: none"> Hidrogénio é o elemento mais abundante do universo Armazenamento de energia de alta densidade Armazenamento de energia com poucas perdas 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ O hidrogénio é o elemento mais abundante do universo sendo não poluente ao ser oxidado ✓ O hidrogénio apresenta potencial para armazenamento de energia de alta densidade ✓ Capacidade de produção através de energias renováveis sendo uma fonte de energia verde



Qual o futuro do Hidrogénio na Marinha?

Tema	Categorias	Subcategorias	Unidades de Registo	Unidades de Contexto
			<ul style="list-style-type: none">• Fonte de energia verde• Desenvolvimento do conhecimento interno	<ul style="list-style-type: none">✓ Ao lidar com uma nova tecnologia possibilita o desenvolvimento do conhecimento interno
		Fraquezas	<ul style="list-style-type: none">• Elevado custo• Risco tecnológico• Eletrolisadores de pequenas dimensões• Pouco conhecimento técnico• Necessidade de desenvolvimento e adaptação de navios	<ul style="list-style-type: none">✓ É uma tecnologia de elevado custo que necessita de um alto investimento✓ A tecnologia dos sistemas de hidrogénio ainda não atingiu a maturidade total o que apresenta por si só um risco tecnológico✓ Os eletrolisadores de pequenas dimensões apresentam pouca disponibilidade no mercado, um alto custo e um baixo rendimento✓ Pouco conhecimento técnico por falta de experiência na operação de sistemas de hidrogénio✓ A necessidade de desenvolvimento e adaptação de navios levam a necessidades tecnológicas complexas e elevados custos
		Oportunidades	<ul style="list-style-type: none">• Acesso a fontes de financiamento• Parcerias com empresas na área do hidrogénio• Sustentabilidade ambiental• Alinhar a estratégia da Marinha com o que se pretende para a sociedade	<ul style="list-style-type: none">✓ Acesso a fontes de financiamento de projetos por parte da União Europeia e Nacional✓ Parcerias com empresas na área do hidrogénio pode aumentar o conhecimento e possibilitar o acesso a tecnologia aumentando assim o valor acrescentado✓ É fundamental alinhar a organização com as necessidades e medidas de sustentabilidade ambiental definidas até 2050 pelo país✓ Alinhar a estratégia da Marinha com o que se pretende para a sociedade é essencial para o futuro da organização
		Ameaças	<ul style="list-style-type: none">• Legislação e normas ainda não estão bem definidas a nível nacional• Custo-benefício do investimento• Mercado ainda não está bem definido	<ul style="list-style-type: none">✓ A legislação e normas ainda não estão bem definidas a nível nacional o que pode levar a que existam instalações com baixa segurança (sem os requisitos necessários)✓ O custo-benefício do investimento quando comprado com os combustíveis fósseis ainda é um obstáculo✓ O mercado ainda não está bem definido, existindo atualmente uma ausência de soluções e alternativas comerciais
3. Contributos adicionais	Opinião pessoal sobre o tópico Sistemas de Hidrogénio	Marinha	<ul style="list-style-type: none">• Autotanque• Conjunto de reservatórios cilíndricos transportável (<i>bundle</i> de cilindros)• Infraestrutura própria	<ul style="list-style-type: none">✓ Numa fase inicial o autotanque seria a melhor solução para distribuição✓ A utilização de um conjunto de reservatórios cilíndricos transportável (<i>bundle</i> de cilindros) tornaria desnecessária a existência de um autotanque✓ Com a evolução da utilização de hidrogénio justifica a instalação de infraestrutura própria (e.g. tubos de polietileno de alta densidade)

