



Tecnologias de Produção de Hidrogénio Verde - Estudo Energético e Viabilidade Económica

LEONARDO MARTINS BASTOS MONTEIRO

Julho de 2021

TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE

ESTUDO ENERGÉTICO E VIABILIDADE ECONÓMICA

Leonardo Martins Bastos Monteiro



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Eléctricos de Energia

2021

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE
- Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Leonardo Martins Bastos Monteiro, Nº 1180368, 1180368@isep.ipp.pt

Orientação científica: Teresa Alexandra Nogueira, tan@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2021

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha professora e orientadora Teresa Alexandra Nogueira por toda a disponibilidade e ajuda na supervisão desta tese de dissertação, permitindo-me enriquecer e aprofundar os meus conhecimentos sobre o tema em questão.

Não queria deixar de agradecer ao Eng^o José Beleza Carvalho, coordenador do curso, a todos os professores e engenheiros das unidades curriculares do mesmo, assim como a alguns colegas, Sara Moreira Ferreira, Bernardo Silva, José Cabral e Rodrigo Cruz.

Por fim, gostaria de expressar a minha satisfação em ter concluído o mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Resumo

Os eletrolisadores têm como função produzir hidrogénio, como produto final, separando a molécula de água através da corrente elétrica. Neste caso, a produção de hidrogénio tem de ser realizada com base em fontes de energia renovável, tornando assim o hidrogénio “verde”. O presente trabalho tem como principal objetivo estudar e comparar duas tecnologias de eletrolisadores, de modo a analisar a viabilidade económica de cada um deles, realizando uma orçamentação através de dois *softwares* de custos. O processo separa-se em cinco fases, com cinco custos, associados a cada uma com o intuito de verificar qual a tecnologia mais rentável.

Primeiramente, foi colocada água num tanque específico, interligando o eletrolisador, previamente conectado com o conjunto do transformador/retificador. De seguida foi necessário comprimir o hidrogénio para o armazenar em tanques apropriados. Os valores técnicos foram calculados através de um simulador para cada uma das tecnologias, obtendo resultados díspares sobretudo a nível de pressão e de volume. No processo alcalino, esse volume, que é necessário no armazenamento de hidrogénio, é muito mais baixo do que o volume armazenado através do eletrolisador PEM. Posteriormente, utilizou-se uma ferramenta de cálculo que permite, através dos valores encontrados no simulador, calcular os cinco custos para cada uma das duas tecnologias (trabalho, energia/água, componentes, edifício e manutenção) até chegar a uma importância final. O custo total de fabricação do eletrolisador alcalino e seus constituintes foi de 316 786 €/ano e do eletrolisador PEM foi de 317 658 €/ano. Apesar destes valores não serem muito distintos, o que realmente fez diferença foi o custo por metro cúbico de cada um deles, em que a fabricação do processo alcalino acaba por ser bastante mais dispendiosa em relação ao processo do eletrolisador PEM.

Palavras-chave

Hidrogénio Verde, Alcalino, PEM, eletrolisador, tanque, análise de custo.

Abstract

The function of electrolyzers is to produce hydrogen, as a final product, by separating the water molecule through electric current. In this case, this hydrogen production must be performed based on renewable energy sources, thus making hydrogen "green". The main goal of the present work is to study and compare two electrolyzer technologies to analyze the economic viability of each of them, making a budgeting through two cost software. The process is separated into five phases with five costs associated with each to verify which technology is more profitable.

First, the water was placed in a tank, to then interconnect with the electrolyzer, previously connected with the transformer/rectifier set. Next it was necessary to compress the hydrogen, to store it in appropriate tanks. The technical values were calculated through a simulator for each of the technologies, obtaining disparate results especially in terms of pressure and volume. In the alkaline process, that volume, that is required in hydrogen storage, is much lower than the volume stored using the PEM electrolyzer. Subsequently, a calculation tool was used, through the values found in the simulator, to calculate the five costs for each of the two technologies (labor, energy/water, components, building and maintenance) until arriving at a final price: the total manufacturing cost of the alkaline electrolyzer and its constituents was 316,786 €/year and the PEM electrolyzer was 317,658 €/year. Although these values are not very distinct, what really made the difference was the cost per cubic meter of each one, where the manufacturing of the alkaline process ends up being much more expensive in relation to the PEM electrolyzer process.

Keywords

Green Hydrogen, Alkaline, PEM, electrolyzer, tank, cost analysis.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Organização do Documento	3
2. Indústria do Hidrogénio.....	5
2.1. Descarbonização da Economia em Portugal	5
2.2. Tipos de Eletrolisadores.....	8
2.3. Tipos de Hidrogénio	9
2.4. Terminologia Automóvel	12
2.5. Transporte e Armazenamento do Hidrogénio Puro	14
2.6. Associação do Hidrogénio com as Energias Renováveis	16
3. Caracterização das Variáveis no Processo de Produção de Hidrogénio Verde.....	19
3.1. Contextualização do Estudo	20
3.2. Seleção do Processo Geral da Produção de Hidrogénio.....	21
3.3. <i>Inputs</i> Gerais e Específicos da Ferramenta de Cálculo	22
3.4. Tipos de Espaços Temporais Utilizados na Ferramenta de Cálculo.....	24
3.5. Custos Fixos e Variáveis	24
4. Implementação da Ferramenta de Cálculo	27
4.1. Eletrolisador Alcalino: Cálculo dos Custos	28
4.2. Eletrolisador PEM: Cálculo dos Custos	43

4.3.	Ferramenta <i>Excel</i> VS. Simulador <i>HyJack</i>	57
5.	Análise de Resultados.....	59
5.1.	Análise dos Custos de Cada Fase do Processo Alcalino.....	59
5.2.	Análise dos Custos de Cada Fase do Processo PEM	63
5.3.	Processo Alcalino VS. Processo PEM	68
6.	Conclusão.....	71
6.1.	Análise Conclusiva.....	71
6.2.	Trabalhos Futuros	72
	Bibliografia.....	73

Índice de figuras

Figura 1 - Problemas, causas e possíveis soluções.....	2
Figura 2 - Esquema da Descarbonização da Economia pelo H ₂ (Ministros, 2020).....	6
Figura 3 - Esquema da cadeia de hidrogénio (Ministros, 2020).....	7
Figura 4 - Metas de energia e do clima de Portugal para 2030 (Ministros, 2020).....	8
Figura 5 - Esquema do eletrolisador alcalino (Merit Bodner, 2014).....	8
Figura 6 - Esquema do eletrolisador PEM (Ángel Hernández-Gómez, 2020).....	9
Figura 7 - Gráfico comparativo das duas tecnologias (PEM e Alcalina) (HyJack, 2021). 11	
Figura 8 - Gráfico comparativo das duas tecnologias (Real Engineering, 2018).....	13
Figura 9 - Fotografia de três tanques de hidrogénio (Storengy, 2019).....	16
Figura 10 - Diagrama da produção de hidrogénio através de um aerogerador. (Ayodele & Munda, 2019).....	18
Figura 11 – Fases para a realização da ferramenta.....	19
Figura 12 - Imagem 3D do eletrolisador alcalino (Nel, Atmospheric Alkaline Electrolyser, 2021).....	20
Figura 13 - Imagem 3D do eletrolisador PEM (Nel, Containerized PEM Electrolyser, 2021).....	20
Figura 14 - Fases do processo do hidrogénio verde.....	21
Figura 15 - <i>Printscreen</i> de um exemplo de uma fórmula do <i>Excel</i>	23
Figura 16 - Linha de utilização temporal em 24 horas.....	24
Figura 17 - Gráfico da relação entre potência, eficiência e consumo específico (HyJack, 2021).....	32
Figura 18 – <i>Printscreen</i> dos valores do simulador <i>HyJack</i> no eletrolisador alcalino (HyJack, 2021).....	33
Figura 19 - Gráfico da relação entre a potência nominal e o custo unitário (HyJack, 2021).....	35
Figura 20 - <i>Printscreen</i> dos valores do simulador <i>HyJack</i> no compressor do eletrolisador alcalino (HyJack, 2021).....	36
Figura 21 - Distribuição do volume em percentagem (HyJack, 2021).....	39
Figura 22 - Gráfico que relaciona pressão com custo unitário.....	40

Figura 23 - <i>Printscreen</i> dos valores do simulador <i>HyJack</i> no tanque do eletrolisador alcalino (HyJack, 2021)	41
Figura 24 - Gráfico da relação entre potência, eficiência e consumo específico (HyJack, 2021).....	46
Figura 25 - <i>Printscreen</i> dos valores do simulador <i>HyJack</i> no eletrolisador PEM (HyJack, 2021).....	47
Figura 26 - Gráfico da relação entre a potência nominal e o custo unitário (HyJack, 2021)	50
Figura 27 - <i>Printscreen</i> dos valores do simulador <i>HyJack</i> no compressor do eletrolisador PEM (HyJack, 2021)	51
Figura 28 - Distribuição do volume em percentagem (HyJack, 2021).....	53
Figura 29 - Gráfico que relaciona pressão com custo unitário (HyJack, 2021)	54
Figura 30 - <i>Printscreen</i> dos valores do simulador <i>HyJack</i> no tanque do eletrolisador PEM (HyJack, 2021).....	55
Figura 31 – Gráfico circular dos custos por metro cúbico do tanque de água no processo alcalino.....	59
Figura 32 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do transformador e do retificador no processo alcalino	60
Figura 33 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do eletrolisador alcalino	61
Figura 34 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do compressor do sistema alcalino.....	61
Figura 35 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do tanque de hidrogénio no processo alcalino	62
Figura 36 - Custos totais do processo alcalino (€/m ³)	63
Figura 37 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do tanque de água no processo PEM.....	64
Figura 38 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do conjunto transformador/retificador no processo PEM	64
Figura 39 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do sistema do eletrolisador PEM	65
Figura 40 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do compressor no sistema PEM	66

Figura 41 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do tanque de H ₂ no processo PEM.....	67
Figura 42 - Custos totais do processo PEM (€/m ³)	67
Figura 43 - Custos por metro cúbico do processo alcalino	68
Figura 44 - Custos por metro cúbico do processo PEM	69
Figura 45 - Custos totais por tipo de custo das tecnologias alcalina e PEM	69
Figura 46 - Custos totais por fase do processo das tecnologias alcalina e PEM	70

Índice de tabelas

Tabela 1 - Comparação entre a compressão e a criogenia.	15
Tabela 2 - Inputs gerais.....	23
Tabela 3 - Inputs específicos.....	23
Tabela 4 – Valores equivalentes das principais fases nas duas tecnologias estudadas.	27
Tabela 5 - Custos da fase 1 no eletrolisador alcalino	29
Tabela 6 - Custos a fase 2 no eletrolisador alcalino	31
Tabela 7 - Valores simulados no eletrolisador alcalino	33
Tabela 8 - Custos da fase 3 no eletrolisador alcalino	34
Tabela 9 - Valores simulados no compressor do eletrolisador alcalino.....	36
Tabela 10 - Custos da fase 4 no eletrolisador alcalino	38
Tabela 11 - Valores simulados no tanque de hidrogénio através do método alcalino..	40
Tabela 12 - Custos da fase 5 no eletrolisador alcalino	42
Tabela 13 - Custos totais da fábrica do eletrolisador alcalino	42
Tabela 14 - Custos da fase 1 no eletrolisador PEM	44
Tabela 15 - Custos a fase 2 no eletrolisador alcalino	45
Tabela 16 - Valores simulados no eletrolisador PEM	47
Tabela 17 - Custos da fase 3 no eletrolisador PEM	49
Tabela 18 - Valores simulados no compressor do eletrolisador PEM.....	50
Tabela 19 - Custos da fase 4 no eletrolisador PEM	52
Tabela 20 - Valores simulados no tanque de hidrogénio através do eletrolisador PEM	54
Tabela 21 - Custos da fase 5 no eletrolisador PEM	56
Tabela 22 - Custos totais da fábrica do eletrolisador PEM	56

Acrónimos e Siglas

AEM - *Anion Exchange Membrane*

BEV – *Battery Electric Vehicle*

C.C – Corrente continua

C.A – Corrente alternada

ER – Energias Renováveis

EUA – Estados Unidos da América

FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle*

HV – Hidrogénio Verde

HVV – *Higher Heating Value*

PGTO - *Primitive Gaussian Type Orbital*

PEM – *Polymer Electrolyte Membrane*

TRL – *Technology Readiness Level*

1. Introdução

O Hidrogénio Verde é um dos muitos recursos que permite mitigar e combater as alterações climáticas, em que a temperatura global da Terra continua, ano após ano, a aumentar devido à degradação da camada de ozono, provocada pelos gases provenientes dos combustíveis fósseis.

Hoje em dia, alternativas como a produção de energia através de fontes renováveis (sol, vento, água, biomassa, etc.) são muito comuns. Para reforçar a penetração de eletricidade “limpa” na nossa rede elétrica, é ainda mais eficiente poder introduzir outras tecnologias, como o hidrogénio, que, ligado a fontes de energia renovável torna-se assim “verde”, como se irá analisar no capítulo 2.

Nesta dissertação pretende-se realizar uma análise económica e energética de duas diferentes tecnologias de obtenção do Hidrogénio Verde, de modo a compará-las, chegando assim ao produto final: o armazenamento do mesmo.

O hidrogénio (H₂) verde é obtido através da eletrólise da água, com recurso a eletrolisadores alimentados eletricamente por fontes de energia renovável, como é o caso das instalações solares e eólicas. Com preços cada vez mais baixos de implementação, as fontes de energia renovável constituem a componente chave para a viabilização dos projetos de hidrogénio verde.

Assim, assume-se que o dispêndio económico da produção do H₂ está diretamente relacionado à quantidade produzida de energia elétrica proveniente de fontes renováveis e ao custo do eletrolisador com a respetiva gestão técnica do sistema associado.

Como se pode constatar pela [Figura 1](#), são enviadas para a atmosfera 830 milhões de toneladas de dióxido de carbono (IEA, 2019), provocando que a temperatura global mundial aumente significativamente, estando aqui identificado o problema principal. Este número deve-se aos dois tipos de hidrogénio poluentes, existentes no nosso planeta: hidrogénio azul e hidrogénio cinzento, que irão ser aprofundados no capítulo 2. Assim, o hidrogénio verde encontra-se como uma das soluções, pelo facto de ser proveniente de energias renováveis. Porém, este apresenta também certos problemas de custo devido à ineficiência da tecnologia. Para solucionar este problema é necessário otimizar o processo da eletrólise, estudar qual a melhor fonte de energia renovável,

analisar os custos associados e realizar uma listagem de consumíveis e de não consumíveis. A Figura 1 mostra os problemas, causas e possíveis soluções.

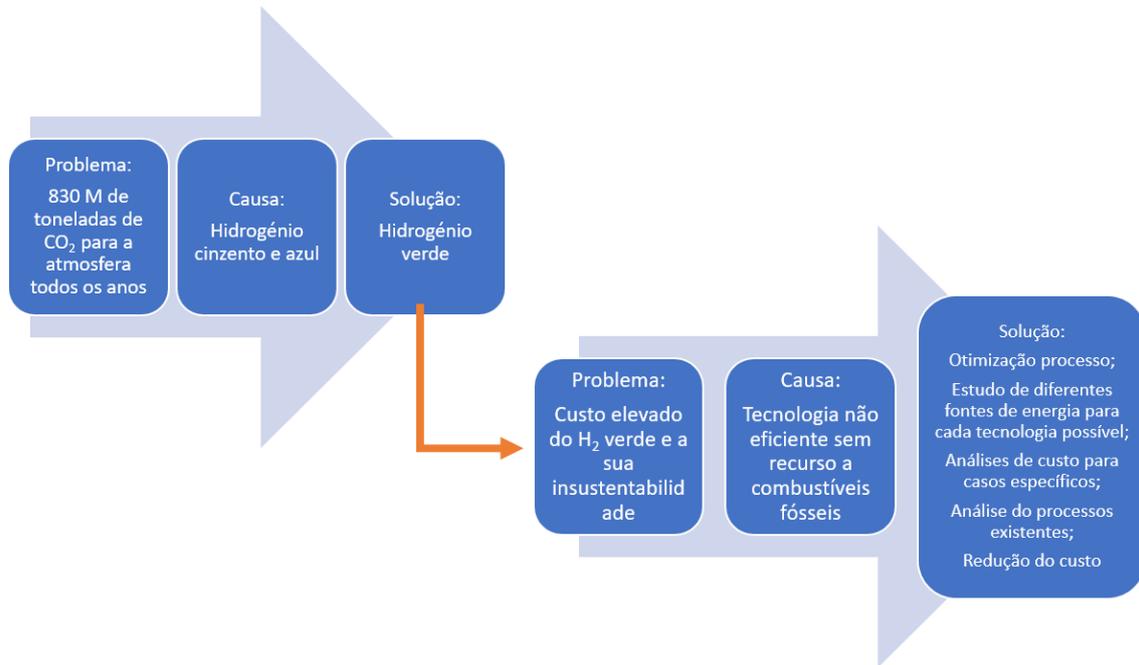


Figura 1 - Problemas, causas e possíveis soluções.

Sendo assim, as soluções encontradas acabam por ter em conta os objetivos da dissertação, que irão ser descritos na secção seguinte.

1.1. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho está na especificação do custo de produção do hidrogénio verde e, como tal, na determinação das variáveis envolvidas ao longo do seu processo de produção. O cumprimento desta meta passa pelas seguintes etapas:

- Pesquisa bibliográfica sobre o estado da arte da indústria do hidrogénio nos países mais desenvolvidos;
- Estudo das variáveis envolvidas no processo de produção de hidrogénio verde:
 - Preço da energia elétrica que alimenta o módulo de produção de hidrogénio;
 - Influência da intermitência das fontes renováveis;
 - Despesas de capital necessárias à aquisição do eletrolisador;
 - Despesas operacionais inerentes ao funcionamento do eletrolisador: eletricidade, água e os custos de manutenção;

- Período de vida útil do eletrolisador, imprescindível para determinar o momento ótimo para substituição;
- Eficiência produtiva do processo, uma vez quanto maior for a margem de eficiência, menores serão os custos operacionais associados.
- Desenvolvimento de uma metodologia de *pricing*, função das diferentes variáveis envolvidas na produção, de modo a obter o custo final associado à produção de 1 kg ou 1 m³ de H₂ verde;
- Desenvolvimento de ferramenta automática de cálculo para análise da viabilidade técnico-económica da construção de um módulo de produção de hidrogénio verde.

1.2. Organização do Documento

No presente capítulo foi realizada uma breve Introdução acerca do tema, de modo a demonstrar ao leitor qual o problema em questão, o que se pretende resolver e quais são os objetivos deste estudo. No capítulo 2, é abordado o estado da arte acerca da Indústria do Hidrogénio Verde, para se perceber a teoria e o que já foi estudado e comprovado. O capítulo 3 (Desenvolvimento da Ferramenta de Cálculo) permite analisar a ferramenta *Excel*, definir os valores do mesmo e interligar com o capítulo 4 (Implementação). Este último tem como base ferramentas de cálculo financeiro e energético para permitirem obter resultados acerca das duas tecnologias comparadas nesta dissertação, para depois serem analisadas economicamente no capítulo 5: Análise de Resultados. Por fim, na Conclusão (capítulo 6), é finalizado o trabalho com uma reflexão de todo o estudo realizado.

2. Indústria do Hidrogénio

O Hidrogénio Verde é uma tecnologia com capacidade de ligação ao sistema elétrico nacional, de acordo com os padrões de consumo existentes nos dias de hoje, principalmente nas redes de eletricidade e de gás natural.

2.1. Descarbonização da Economia em Portugal

A energia produzida pelo hidrogénio garante assim a transição para uma economia descarbonizada, ou seja, uma economia em que o cuidado com as emissões poluentes e a utilização de fontes renováveis está presente. Nos próximos 10 anos, prevê-se investimentos nesta tecnologia, dando oportunidade para aumentar também o investimento e a empregabilidade, “tirando partido dos nossos recursos endógenos, naturais e humanos, e substituindo importações”. (Conselho de Ministros, 2020)

Na indústria da energia, o hidrogénio pode ser armazenado para gerar eletricidade sob forma líquida ou gasosa em tanques específicos. Estes tanques têm uma eficiência de 99% (IEA, 2019) e o seu transporte pode ser bastante caro. Para combater este fator, é necessário comprimir o gás para que se reduza o seu volume, fazendo com que seja menos dispendiosa financeiramente a transmissão e a distribuição de energia a partir deste hidrogénio. O custo total da distribuição de H₂ depende da infraestrutura disponível, da distância de transmissão e distribuição, do método de transporte e da procura do consumidor.

O setor dos transportes representa 26% das emissões de gases de efeito de estufa (Ministros, 2020). Aqui, combustíveis produzidos a partir de hidrogénio irão permitir a descarbonização nos transportes e a mobilidade rodoviária poderá superar a atual realidade das baterias neste contexto. Quanto ao transporte marítimo, existem somente ideias, devido à falta de avanço tecnológico até ao momento, de constituir soluções a médio prazo.

Devido a estas possíveis alterações nos transportes, as cidades e o setor doméstico também poderão sofrer alterações no que diz respeito ao tipo de consumo de energia, substituindo assim o gás natural pelo hidrogénio, sempre com o complemento da energia elétrica, transformando assim as cidades que poderão ser totalmente renovadas e renováveis.

No setor industrial, que representa cerca de 11% das emissões dos gases com efeito de estufa (Ministros, 2020), o hidrogénio pode fazer com que haja soluções que contribuam para a descarbonização como se pode constatar na Figura 2. Assim, é possível ser usado para a produção de calor de elevadas temperaturas e diretamente como matéria-prima, tal como o metanol, que combinado com o CO₂, é uma alternativa fiável e de curto/médio prazo para a descarbonização industrial sem perder a eficiência.

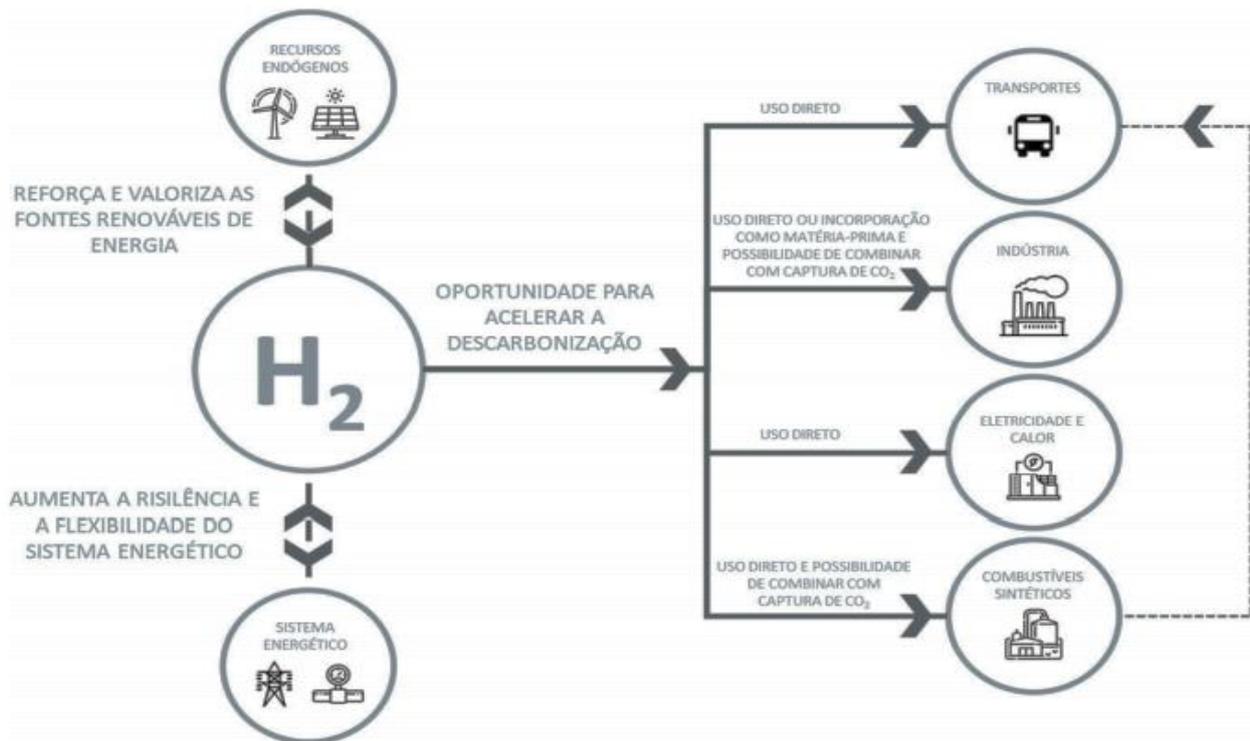


Figura 2 - Esquema da Descarbonização da Economia pelo H₂ (Ministros, 2020)

Uma cadeia de valor é o resultado de um conjunto de várias atividades desempenhadas. No caso do hidrogénio, as cadeias de valor sofrem inúmeras alterações devido à evolução da tecnologia e dos recentes investimentos de que esta está sujeita, existindo margem para inovar e investigar, considerando também a maturidade da tecnologia, através do *Technology Readiness Level* (TRL) que é o Nível de Maturidade Tecnológico. (Undertaking, 2017)

Sendo assim, a cadeia de valor do hidrogénio possui cinco fases, esquematizada na Figura 3:

- Produção de hidrogénio, existindo assim a produção centralizada, de grande escala e a produção descentralizada, de pequena e média escala;
- Armazenamento, de modo subterrâneo, por liquefação ou compressão;
- Distribuição, que pode ser feita em redes de gás e pelo transporte rodoviário ou marítimo;
- Abastecimento, em estado líquido e em estado gasoso, dependendo do transporte e do local abastecido;
- Utilização, nos setores dos transportes e da indústria.

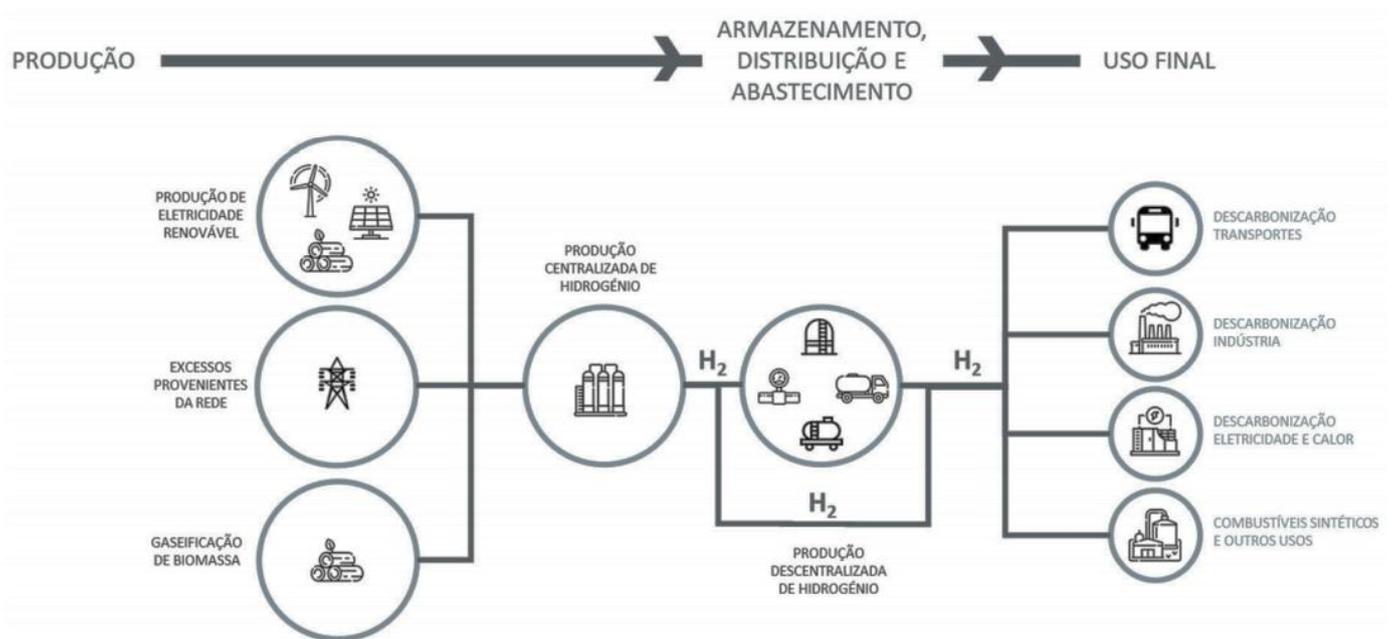


Figura 3 - Esquema da cadeia de hidrogénio (Ministros, 2020)

Portugal comprometeu-se até 2030 a cumprir várias metas, ilustradas na Figura 4, que visam a neutralidade carbónica em 2050. O governo aprovou em 2020 percentagens de hidrogénio verde na indústria dos transportes e nas atuais redes de gás natural. (SIC Notícias, 2021)

Uma das metas é a injeção de 10 a 15% de HV nas redes de gás natural nos próximos 10 anos, permitindo atingir em 2030, com 80% da eletricidade consumida através das ER. Vão ser instalados 2,5 GW à custa de eletrolisadores num total de 40 GW que a

comissão europeia vai apoiar e disponibilizar para a produção de 10 milhões de toneladas de hidrogénio verde por ano.

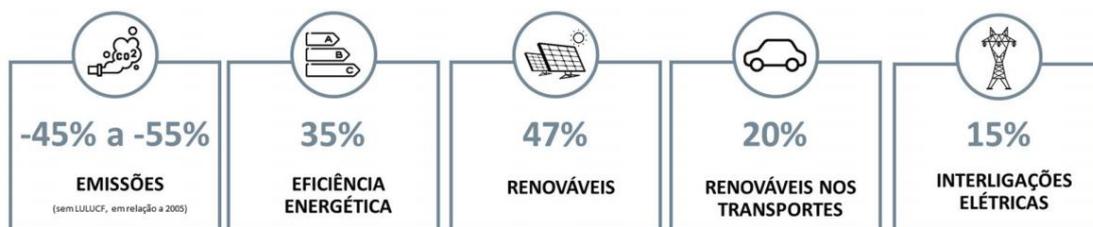


Figura 4 - Metas de energia e do clima de Portugal para 2030 (Ministros, 2020)

Se compararmos o preço do hidrogénio, produzido em eletrolisadores com o gás natural, proveniente da Argélia temos uma razão de 1:8, em que esse mesmo gás natural consegue ser oito vezes mais barato do que o hidrogénio eletrolítico. Mesmo assim o governo português irá apoiar com uma quantia de 550 milhões de euros na produção de HV. (SIC Notícias, 2021)

2.2. Tipos de Eletrolisadores

Irão ser abordados dois tipos de eletrolisadores nesta dissertação. O eletrolisador alcalino e o eletrolisador PEM. De modo a comparar cada um, é necessário distinguir cada um deles.

O eletrolisador alcalino possui a vantagem da robustez, do longo ciclo de vida e do baixo custo (Merit Bodner, 2014). A água é assim separada, originando hidrogénio (cátodo) e oxigénio (ânodo) como produto final, como é mostrado na Figura 5.

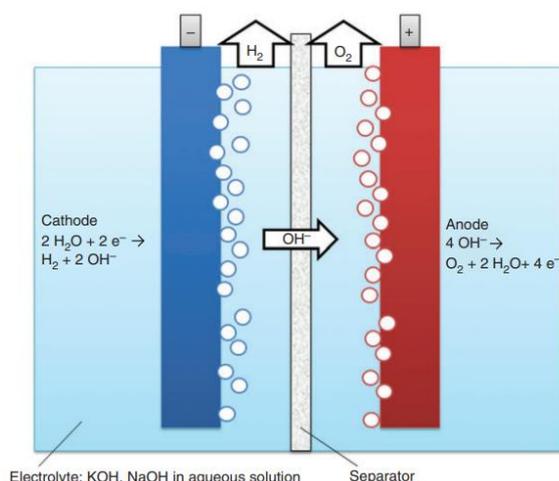


Figura 5 - Esquema do eletrolisador alcalino (Merit Bodner, 2014)

Já no eletrolisador PEM, existe uma membrana feita com um tipo de plástico específico responsável pela condução dos prótons, como mostra a Figura 6, separando os gases do hidrogénio e do oxigénio, resolvendo o problema da baixa densidade que o eletrolisador alcalino possui.

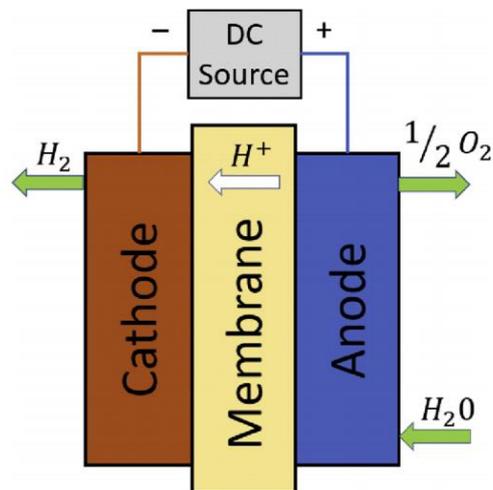


Figura 6 - Esquema do eletrolisador PEM (Ángel Hernández-Gómez, 2020)

2.3. Tipos de Hidrogénio

Existem 3 tipos de hidrogénio, porém, dois deles estão cada vez mais a cair em desuso devido às suas características poluentes. De um lado temos o hidrogénio cinzento, que é o mais abundante no planeta Terra, em que resulta do aquecimento dos combustíveis gás natural, petróleo e carvão a altas temperaturas, onde estes reagem com o vapor de água, produzindo assim hidrogénio. Este é um processo altamente poluente, emitindo assim milhões de toneladas de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera.

Do outro lado temos o hidrogénio azul (menos poluente que o cinzento), que é também obtido através da reformação de vapor. Este é obtido através do gás natural com o dióxido de carbono a ser produzido no processo de captura, armazenado e enterrado no solo, não sendo assim emitido CO_2 para a atmosfera. É, portanto, um tipo de tecnologia intermédia entre o hidrogénio verde e cinzento, sendo o tipo ideal para indústrias extremamente poluentes e dependentes de hidrogénio.

Atualmente, muitos países prosseguem estratégias de descarbonização, em que o hidrogénio irá estar sempre presente, principalmente no setor do transporte de longos trajetos, na navegação e na aviação. Para que isto aconteça, a obtenção do hidrogénio tem de ser realizada de forma descarbonizada, promovendo assim o Hidrogénio Verde (HV) e a sua produção através da eletrólise da água e utilizando eletricidade proveniente de energias renováveis.

Hoje em dia, o HV é o combustível preferencial ao nível da sustentabilidade ambiental. Dentro desta tecnologia, é o tipo mais estudado atualmente devido às emissões de dióxido de carbono nulas. O HV é produzido pela eletrólise da água, por eletrolisadores, com recurso à molécula da água (H_2O) e de energia elétrica. Assim, são separados o oxigénio (O) e o hidrogénio (H_2) através de uma corrente elétrica. O objetivo passa por utilizar eletricidade proveniente de fontes renováveis (energia solar, eólica ou hídrica), para que o uso desta tecnologia seja 100% “verde”. A água é dessalinizada e purificada, tornando o processo dispendioso financeiramente logo na primeira fase. Este processo é diferente consoante o tipo de eletrolisador, como se pôde constatar na secção 2.2.

Para produzir este tipo de hidrogénio, começam agora a ser desenvolvidas e implementadas tecnologias, estando ainda longe de uma capacidade de produção em larga escala, que abasteça as necessidades do nosso planeta, ainda com um elevado preço, mas com alto potencial para se reduzir o mesmo até 2050 (SIC Notícias, 2021).

A eletrólise da água para a obtenção de HV a partir do eletrólito ainda é uma tecnologia bastante dispendiosa financeiramente, mas os custos de produção estão cada vez mais a diminuir devido à queda dos custos de energia elétrica de origem renovável. Ainda assim, o HV é bastante mais caro que o hidrogénio azul, mas com o passar do tempo, e com a evolução da tecnologia, o preço do HV tende a diminuir (Cloete, 2020).

O maior componente de custo único para a produção local de HV é o custo da eletricidade renovável necessário para alimentar a unidade eletrolisadora. Isto faz com que a produção de HV seja mais cara do que a de hidrogénio azul, independentemente do custo do eletrolisador. Um baixo custo da eletricidade é, portanto, uma condição necessária para produzir HV competitivo. Isto cria uma oportunidade de produzir hidrogénio em locais em todo o mundo que possuem recursos renováveis ótimos, de

modo a alcançar a competitividade. Contudo, o baixo custo da eletricidade não é suficiente por si só para uma produção sustentável financeiramente de HV, sendo também necessárias reduções no custo das instalações de eletrólise. Este é o segundo maior componente de custo na produção de HV (Renewable & Agency, 2020).

O custo e desempenho verificados atualmente não são os mesmos para todas as tecnologias de eletrolisadores. Os eletrolisadores alcalinos e eletrolisadores *polymer electrolyte membrane* (PEM) são os mais avançados e já disponíveis no mercado, embora cada tecnologia tenha a sua própria vantagem competitiva. Completando o que foi descrito na secção 2.2, os eletrolisadores alcalinos têm o menor custo de instalação, enquanto os eletrolisadores PEM têm uma pegada ecológica muito menor, combinada com uma maior densidade de corrente e pressão de saída. (IRENA, 2018)

Para comparar melhor graficamente as duas tecnologias, a Figura 7 ajuda a entender sete aspetos diferentes do eletrolisador alcalino e do PEM. A eficiência influencia a facilidade para arrancar e parar a máquina, o nível de pureza do hidrogénio à saída e a própria pegada ecológica (*footprint*). Como se pode constatar, a tecnologia PEM tem um desempenho melhor em muitos aspetos. Por este motivo, o eletrolisador alcalino consegue ser mais barato (melhor custo) e conseqüentemente ser mais vendido no mercado (*trackrecord*).



Figura 7 - Gráfico comparativo das duas tecnologias (PEM e Alcalina) (HyJack, 2021)

Espera-se que as lacunas em termos de custo e desempenho diminuam ao longo do tempo à medida que a inovação e a implantação em massa de diferentes tecnologias de

eletrólise conduzam à convergência para custos semelhantes. Contudo, a vasta gama de custos do sistema necessita de permanecer constante, uma vez que este assunto depende muito da escala, aplicação e âmbito de fornecimento.

A inovação é crucial para reduzir os custos e melhorar o desempenho do eletrolisado (Renewable & Agency, 2020). Para tal, é necessário:

- Reduzir os custos através da normalização e simplificação do fabrico e conceção para permitir a industrialização;
- Melhorar a eficiência para reduzir a quantidade de eletricidade necessária para produzir uma unidade de hidrogénio;
- Aumentar a durabilidade para prolongar a vida útil do equipamento;
- Distribuir o custo da instalação do eletrolisador por um maior volume de produção de hidrogénio.

Como se pode constatar, ainda é necessário muito investimento em investigação e em novas tecnologias para que a eficiência do hidrogénio faça com que haja uma competitividade de preço em relação ao gás natural das nossas casas.

2.4. Terminologia Automóvel

Não se pode deixar de referir o interesse que o hidrogénio possui na indústria automóvel com as suas células de combustível. Estas células têm como objetivo converter o hidrogénio em eletricidade, tendo um princípio de funcionamento semelhante a uma bateria. De um lado temos o ânodo (polo negativo) que dispersa o hidrogénio na superfície do catalisador e que provoca a separação das moléculas de hidrogénio em prótons e eletrões, conduzindo os eletrões libertados das moléculas de hidrogénio para serem utilizados num circuito elétrico. A membrana apenas permite a passagem dos prótons, enquanto os eletrões têm de circular por um circuito externo até ao cátodo (polo positivo) que distribui o oxigénio na superfície do catalisador.

O ânodo e o cátodo são separados por uma membrana eletrolítica, que faz com que os eletrões sigam um caminho alternativo alimentando o motor elétrico. De seguida, os eletrões são recombinados com os prótons e com o oxigénio no catalisador, produzindo assim a água como um subproduto.

Um *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV), que é um veículo alimentado por uma célula de combustível, é composto por um ou mais tanques de hidrogénio, uma bateria (de aproximadamente 1.5 kWh), um *pack* de células de combustível, um conversor, um motor elétrico e uma unidade de controlo de potência. É possível abastecer, nestes carros, 5 kg de hidrogénio em cerca de 4 minutos, permitindo uma autonomia de cerca de 450 km sem que este tenha de ser ligado à rede e sem emitir qualquer substância nociva.

Atualmente, só existem duas técnicas bem desenvolvidas para alimentar veículos com motores elétricos: células de combustível ou baterias, em que podemos analisar uma comparação através da Figura 8. Tanto o hidrogénio como a eletricidade para as baterias, podem ser produzidas com baixas ou nulas emissões de gases com efeito de estufa através de fontes de energia renováveis como a solar ou eólica. Existe uma “batalha” de opiniões acerca destas duas tecnologias e cada país investe no que acredita, consoante o seu objetivo nacional.

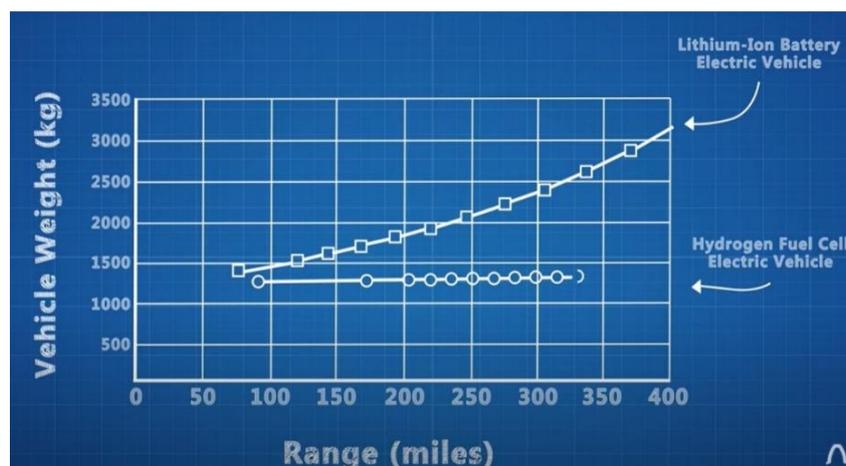


Figura 8 - Gráfico comparativo das duas tecnologias (Real Engineering, 2018)

O hidrogénio tem uma energia específica de cerca de 40 kWh/Kg, enquanto as baterias de íões de lítio, na melhor dos casos, têm uma energia específica de 278 Wh/kg, sendo que a maioria tem 167 Wh/kg. Ou seja, o hidrogénio tem em média de 239 vezes mais energia por quilograma que as baterias de lítio. (Real Engineering, 2018)

Ainda assim, e devido à sua densidade de energia e baixa massa, o hidrogénio comprimido e as células de combustível conseguem permitir um grande alcance aos veículos sem adicionar peso aos mesmos. Este problema do elevado peso das baterias

é sem dúvida um dos maiores entraves à adoção desta tecnologia. Deste modo, o hidrogénio e as células de combustível têm claras condições para fazerem parte do futuro de uma energia eficiente e limpa.

Em relação às células de hidrogénio, o uso deste combustível nestes veículos permite serem reabastecidos em menos de 5 minutos, enquanto os veículos elétricos de baterias podem demorar algumas horas a carregar totalmente dependendo do veículo e do carregador.

Tal como foi mencionado a seguir à [Figura 8](#), pode concluir-se que os veículos a hidrogénio, são uma melhor alternativa quanto à massa, quanto ao tempo de reabastecimento, quanto à energia específica e quanto à autonomia. No entanto, quando se constata a parte financeira, é possível verificar uma diferença elevada, em que um carro a hidrogénio (FCEV) é cerca de 8 vezes mais dispendioso, ao preço de abastecimento, do que um carro elétrico a baterias – *battery electric vehicle* (BEV).

2.5. Transporte e Armazenamento do Hidrogénio Puro

Assumindo que o hidrogénio é produzido localmente nas próprias estações de reabastecimento, podem-se ignorar os inconvenientes do transporte. No entanto, o armazenamento do gás é insustentável. O hidrogénio tem uma densidade de energia extremamente baixa, tanto no estado gasoso como no líquido. Assim, de forma a aumentar esta densidade de energia, é necessário aumentar a densidade do hidrogénio através da compressão ou da criogenia, de acordo com a representação e caracterização na [Tabela 1](#).

Tabela 1 - Comparação entre a compressão e a criogenia.

Compressão	Criogenia
O gás é comprimido até cerca de 790 atm em relação à pressão atmosférica. No entanto este método requer bastante energia (cerca de 13 % da energia contida no hidrogénio).	O gás é convertido para o estado líquido, sendo arrefecido a cerca de -252,9°C. Uma das vantagens deste método é que possui um tanque que armazena hidrogénio arrefecido criogenicamente, que é bastante mais leve que um tanque que armazena hidrogénio comprimido. No entanto, este processo envolve perdas de eficiência na ordem dos 40%.

Sendo assim, conclui-se que a compressão é o método energeticamente mais eficiente (Real Engineering, 2018).

Na eventualidade do hidrogénio não ser produzido nem comprimido numa estação local de reabastecimento de carros a hidrogénio, é necessária uma infraestrutura rentável capaz de transportar o hidrogénio para as estações de reabastecimento.

O local de obtenção e armazenamento do hidrogénio é fulcral do ponto de vista da rentabilidade. Dando um exemplo de uma grande central, esta pode ser capaz de fornecer hidrogénio a menor custo, uma vez que poderá produzir maiores quantidades. No entanto o custo de transporte torna-se mais elevado uma vez que as estações estão a grande distância uma da outra. De outra forma, produzindo o hidrogénio em diversas e pequenas estações distribuídas, os custos de produção são mais elevados porque os volumes de produção são inferiores, sendo que os custos de distribuição são relativamente baixos. Na Figura 9 é possível ter noção do tamanho de um tanque de H₂ comparando com a dimensão de um ser humano.



Figura 9 - Fotografia de três tanques de hidrogénio (Storengy, 2019)

No final, a maioria do hidrogénio é transportado de camião ou através de uma rede de tubos onde as perdas energéticas podem variar entre os 10 e os 40% (Real Engineering, 2018).

2.6. Associação do Hidrogénio com as Energias Renováveis

Os benefícios do hidrogénio como combustível limpo, versátil e eficiente só podem ser realizados se o hidrogénio for produzido a partir de fontes de energia renováveis. Isto, através de uma variedade de métodos, mas apenas alguns são comercialmente viáveis. A produção de hidrogénio a partir de fontes de energia renováveis envolve, na maioria dos casos, a eletricidade como uma etapa intermédia. Tanto o hidrogénio como a eletricidade são portadores de energia, que juntos podem satisfazer energeticamente um determinado tipo de população. Não devem competir um com o outro, mas sim complementarem-se. Com a sua versatilidade complementar, podem ajudar a aumentar a aceitação e penetração no mercado das tecnologias de energias renováveis. Os mercados de energia solar fotovoltaica estão a crescer 30% ao ano (LNEG, 2020).

O Hidrogénio e a eletricidade podem ser utilizados para a utilização de energias renováveis no setor industrial, doméstico e de transporte. Com a sua versatilidade,

umentam a aceitação e penetração no mercado das tecnologias de energias renováveis.

O que irá determinar as transições inevitáveis na utilização de energia e o futuro da nossa civilização é a taxa de rendimento das fontes de energias renováveis. Para qualquer decisão sobre a transição para as fontes de energia renováveis e o hidrogénio como fator energético (juntamente com a eletricidade), será absolutamente crítico analisar a energia incorporada. A avaliação das contribuições para a economia que são feitas pelas fontes de energia deve ter em conta todas as entradas de energia, incluindo os serviços ambientais, bem como os serviços de *feedback* de alta qualidade da própria economia (Barbir, 2008).

A energia solar e eólica são as duas fontes de energia mais utilizadas na produção de HV devido à constante redução de custo de cada uma delas com o passar dos anos ao nível de exploração. Sendo assim, estas vão ser as fontes renováveis de energia analisadas e estudadas nesta dissertação. O objetivo é conjugar as duas fontes aqui mencionadas e conseguir que o sistema esteja interligado com a produção de hidrogénio para que seja, desta forma, criado HV.

No caso da energia solar, o módulo fotovoltaico é conectado com uma camada do eletrolisador e ligado com sistema elétrico de energia através de um conversor, faz a conversão de corrente contínua para corrente alternada. Desta forma, fornece energia à rede e depois é utilizada para produzir HV através da eletrólise. (John Turner, 2007)

Na energia eólica existe um aerogerador que está ligado a uma caixa de velocidades e a um gerador. Estes três componentes fazem parte do sistema de conversão de energia eólica e cada um com o seu próprio rendimento. De seguida, o retificador, que alimenta as correntes no sistema de abastecimento, tem o eletrolisador ligado para que no final se armazene hidrogénio num tanque, ilustrado na [Figura 10](#), dando assim o resultado final. (Ayodele & Munda, 2019)

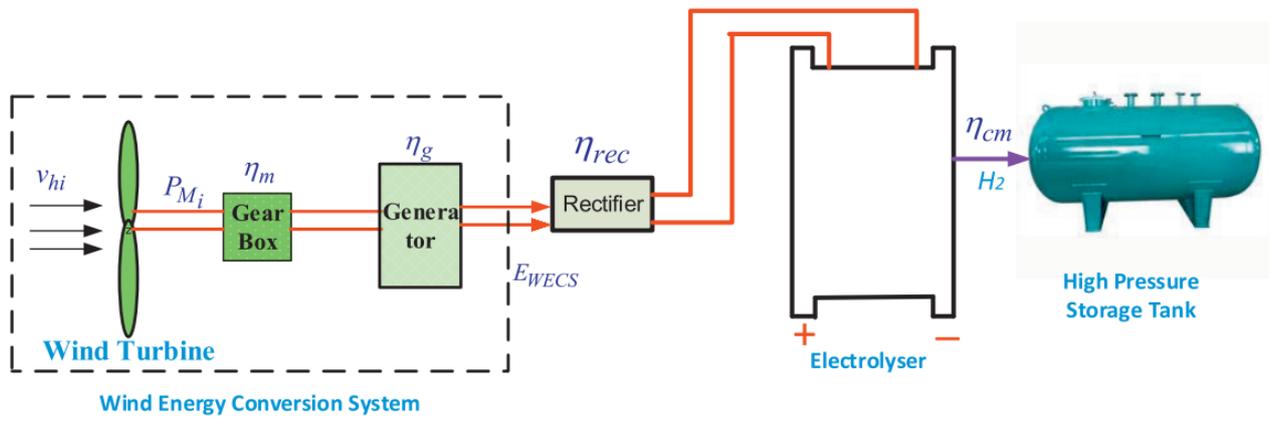


Figura 10 - Diagrama da produção de hidrogênio através de um aerogerador. (Ayodele & Munda, 2019)

3. Caracterização das Variáveis no Processo de Produção de Hidrogénio Verde

Este capítulo relata o estudo efetuado na análise das duas tecnologias de eletrolisadores escolhidas na realização da dissertação: Alcalina e PEM, e analisa cada uma delas de acordo com a junção híbrida de duas fontes renováveis (solar e eólica).

Outro objetivo importante é perceber os fatores e as variáveis que fazem com que as tecnologias de eletrolisadores Alcalina e PEM estejam inseridos no mercado. Irão ser realizados assim diferentes casos de estudo para cada tipo de tecnologia e para cada tipo de energia renovável, como está descrito na Figura 11:

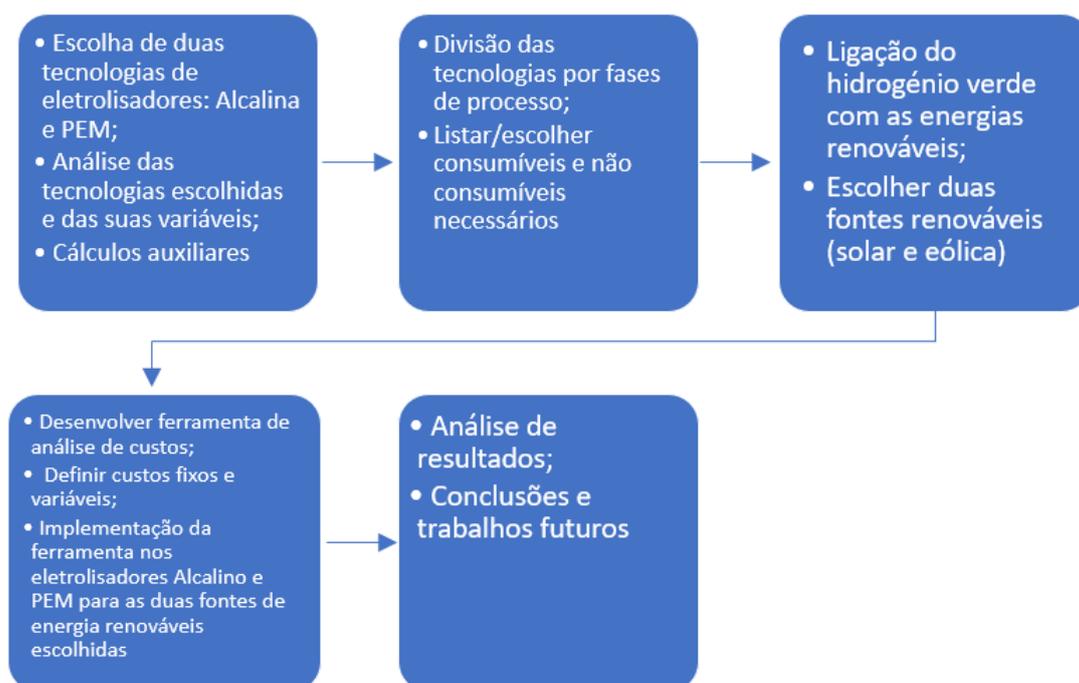


Figura 11 – Fases para a realização da ferramenta

3.1. Contextualização do Estudo

Depois de se perceberem as diferenças entre o eletrolisador Alcalino e o PEM, sabe-se que existem várias diferenças entre as duas tecnologias. Sendo assim, a análise final da dissertação só poderá ser considerada fiável se, teoricamente, for de encontro com a realidade e com os valores práticos apresentados no capítulo 4 e 5 deste trabalho. Os eletrolisadores Alcalino e PEM que irão ser utilizados nesta dissertação encontram-se representadas nas figuras Figura 12 e Figura 13.

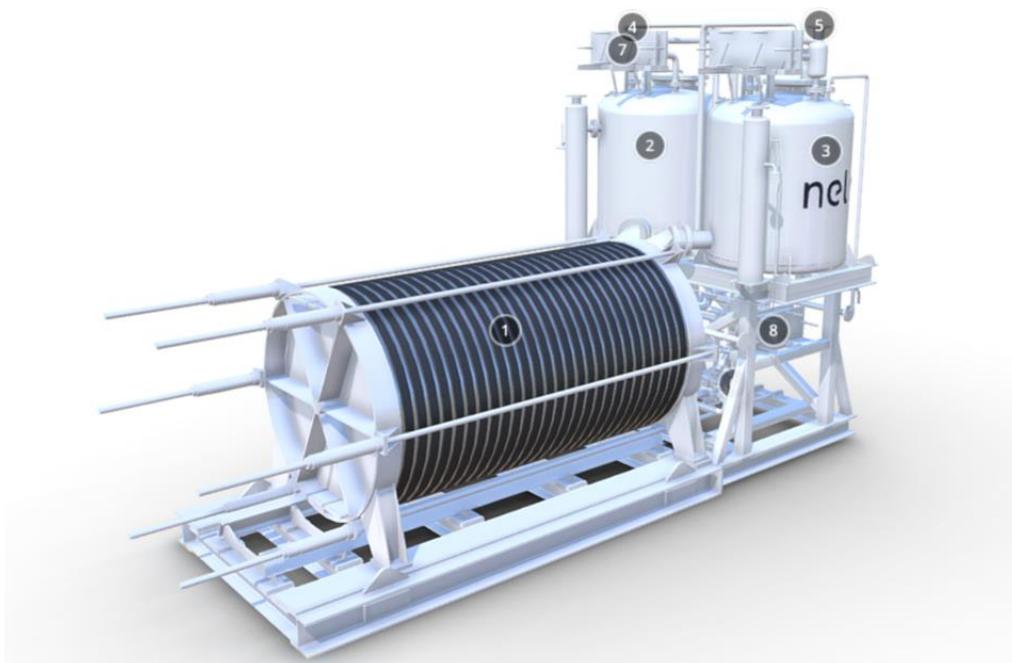


Figura 12 - Imagem 3D do eletrolisador alcalino (Nel, Atmospheric Alkaline Electrolyser, 2021)



Figura 13 - Imagem 3D do eletrolisador PEM (Nel, Containerized PEM Electrolyser, 2021)

Neste caso, a ferramenta de *pricing*, realizada em *Excel*, não se adequa a qualquer dimensão da unidade de produção, mas sim para um intervalo viável de uma fábrica projetada para produzir certo volume de H₂ por dia (m³/dia), como foi mencionado nos objetivos desta dissertação (secção 1.2).

3.2. Seleção do Processo Geral da Produção de Hidrogénio

Para compreender melhor o processo de cada uma das tecnologias, é necessário descrever o que acontece entre o tanque de água e a distribuição (transporte), fazendo com que haja uma simbiose entre a energia solar e a energia eólica, tanto para o eletrolisador alcalino, como para o PEM. O esquema que está representado na Figura 14 demonstra o processo de obtenção de HV de uma forma geral para as duas tecnologias.



Figura 14 - Fases do processo do HV

Neste capítulo, são descritas somente as fases 1, 2, 3, 4 e 5, visto que as fases A e B são realizados por entidades externas. Sendo assim, são analisadas as fases do tanque de água (1), do retificador e do transformador (2). De seguida, todo o sistema do próprio eletrolisador (3), o conseqüente compressor (4) e, por fim, o armazenamento do tanque de hidrogénio (5).

O tanque de água é considerado a fase 1 deste processo, em que se pode, ou não, armazenar os reservatórios em *stock* para utilizar na fase 3, analisada no capítulo 4. O processo de enchimento de um tanque/reservatório de alta pressão não pode ser realizado até ao máximo da capacidade do mesmo porque quanto mais cheio estiver o tanque, a menos temperatura este tem de estar devido a situações de segurança (M. Heitsch, 2010).

Na fase A são determinadas as quantidades de energia solar e eólica fornecidas, de modo que haja sempre uma união destas duas fontes de energia, como foi referenciado no capítulo 2. Isto dependendo sempre das condições meteorológicas, do potencial energético de forma renovável (solar e eólico) e da quantidade requisitada de HV nos próprios tanques.

Após injetar energia elétrica, a partir das duas fontes renováveis aqui referenciadas, é necessário que haja uma transformação de tensão através de um transformador e uma alteração de corrente através de um retificador, que passa de corrente alternada (C.A), da rede elétrica para corrente contínua (C.C) (fase 2) em direção ao eletrolisador (fase 3).

Na fase 3 é necessário escolher primeiro qual o tipo de eletrolisador desejado, seja ele o Alcalino, ou o PEM. Esta é a fase em que é necessário haver mais pormenor e exatidão na escolha e quantidade dos componentes consumíveis (energia e água) e não consumíveis (máquinas e reservatórios).

De seguida, e já com a obtenção do HV através do eletrolisador, é necessário comprimir o gás (fase 4) para que seja mais eficiente a nível de espaço realizar a fase seguinte: o armazenamento de HV (fase 5) e pronto para ser distribuído como produto final do processo aqui estudado para diferentes fins (fase B) ou armazenados novamente (fase 5), permitindo que haja tanques de hidrogénio em *stock* também.

3.3. Inputs Gerais e Específicos da Ferramenta de Cálculo

Neste caso, os *inputs* gerais são aqueles que são utilizados nas duas tecnologias presentes e os *inputs* específicos variam de tecnologia para tecnologia. Estes dois tipos de valores auxiliam na estrutura da ferramenta de cálculo para inserir nas fórmulas de cada custo analisado na secção 3.5. A Figura 15 exemplifica alguns dos *inputs* usados na ferramenta de cálculo (*Excel*) numa das várias fórmulas impostas na mesma.

CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m ³	por ano	%
<i>Custo do trabalho</i>		31.63 €	=C46*C19*C17*K35*E46	
1 - Tanque de água	2	3	60%	
Dias por ano		240	dias/ano	
Custo da água (m3)		1.38 €	€/m3	
Salário		15.00 €	€/hr	
Custo de energia unitário		0.08 €	€/kWh	
Tempo disponível		20.9	hr/day	
Tempo de atividade		22.4	hr/day	
Ciclo de produção		8	h	

Figura 15 - *Printscreen* de um exemplo de uma fórmula do Excel

Assim, a Tabela 2 demonstra quais os *inputs* gerais e a Tabela 3 quais os *inputs* específicos realizados nesta tese.

Tabela 2 - Inputs gerais

Dias por ano	dias/ano	Número de dias de trabalho por ano
Salário	€/h	Quantidade monetária que cada trabalhador recebe
Custo da energia	€/kWh	Custo de energia dos equipamentos
Taxa de juro	%	Percentagem do empréstimo em cada ano
Ciclo de vida do equipamento	anos	Quantidade de tempo do equipamento sem ser substituído
Custo do edifício	€/ m ²	Custo investido pelo edifício por área
Ciclo de vida do edifício	anos	Quantidade de tempo do edifício sem ser substituído
Espaço de inatividade	%	Espaço disponível que não está a ser usado
Área de construção	m ²	Área disponível para construir

Tabela 3 - Inputs específicos

Máquinas/Reservatórios	Quantidade	unidades
	Custo de aquisição	€
	Dedicação	%
	Ciclo de vida	anos
	Potência	kWh
Trabalhadores	Quantidade por turno	unidades
	Número de turnos	unidades
	Dedicação	%
Edifício	Espaço requerido	m ²
Consumíveis	Custos dos consumíveis	€
Tempo	Tempo de produção	h
	Tempo de produção com trabalhadores	h

3.4. Tipos de Espaços Temporais Utilizados na Ferramenta de Cálculo

O tempo de produção diário do sistema de cada um dos eletrolisadores numa fábrica é dividido em espaços temporais disponíveis e indisponíveis, mas também em tempo em funcionamento e tempo de paragem, como se pode constatar na Figura 16. Entre estas duas linhas temporais estão presentes os *inputs* analisados anteriormente, que irão ser melhor explicados mais a diante.

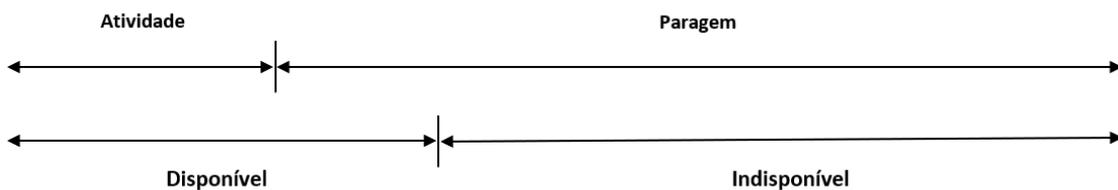


Figura 16 - Linha de utilização temporal em 24 horas

Para deduzir qual irá ser o tempo disponível e o tempo em funcionamento, é necessário resolver as equações:

$$\begin{aligned} \text{Tempo disponível } \left[\frac{h}{\text{dia}} \right] &= 24h - \\ &(\text{tempo de inatividade não planeada} + \\ &\text{manutenção em turno} + \text{pausa do trabalhador} + \\ &\text{pausas não remuneradas do trabalhador}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Tempo de atividade } \left[\frac{h}{\text{dia}} \right] &= \text{Tempo disponível} + \\ &\text{Tempo de inatividade} \end{aligned} \quad (2)$$

3.5. Custos Fixos e Variáveis

O custo da produção de cada um dos eletrolisadores pode ser dividido em custos fixos e custos variáveis. Os custos fixos são gastos a partir de recursos não consumíveis (máquinas/reservatórios, o edifício e a manutenção). Os custos variáveis dependem dos

recursos consumíveis ao longo do ano, variando se o volume da produção anual é elevado ou não. Neste caso são os custos com o trabalho, com a água e com a energia, dependendo da fase em que o processo se encontra.

De modo a calcular alguns destes custos, é necessário respeitar as fórmulas seguintes:

- **Custos variáveis:**

$$\text{Custo do trabalho} = n^{\circ} \text{ de trabalhadores} \times \text{Tempo de produção} \times \text{Salário} \times \text{Dias por ano} \times \text{Dedicação} \quad (3)$$

$$\text{Custo da energia} = \text{Tempo de produção} \times \text{Potência} \times \text{Custo unitário da energia} \quad (4)$$

$$\text{Custo da água} = \text{Custo volumétrico da água} \times \text{Produção anual real} \quad (5)$$

- **Custos fixos:**

$$\text{Custo principal dos componentes} = \text{PGTO} (\% \text{ taxa de juro, Ciclo de vida do componente, } - \text{ Investimento}) \quad (6)$$

$$\text{Custo do edifício} = \text{PGTO} (\% \text{ taxa de juro, Ciclo de vida do edifício, } - \text{ Investimento}) \quad (7)$$

$$\text{Investimento do componente} = \text{Custo} \times \text{Quantidade} \times \text{Percentagem da linha atribuída} \quad (8)$$

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + \text{Espaço de inatividade}) \times \text{Custo unitário do edifício} \times \text{Espaço necessário} \times \text{Percentagem da linha atribuída} \quad (9)$$

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (\text{Custo do componente} + \text{Custo do edifício}) \quad (10)$$

As duas fórmulas que mencionam o PGTO representam equações assumidas como um empréstimo, que irá ser feito de acordo com a taxa de juro, o tempo de vida da máquina ou do componente (máquina ou reservatório) e do edifício consoante o investimento dos mesmos, mais uma vez, na ferramenta de cálculo do *Excel*.

Na manutenção, considera-se que do total dos custos, 10% serão para investir numa manutenção periódica.

4. Implementação da Ferramenta de Cálculo

Neste capítulo, irão ser analisados os valores à entrada e à saída de cada um dos componentes correspondentes a cada uma das fases do sistema, que são equivalentes tanto para o sistema alcalino como para o sistema PEM (*Polymer Electrolyte Membrane*). São utilizadas as ferramentas de cálculo *Excel* e o simulador da *HyJack* (HyJack, 2021), em que este permitiu obter valores de entrada e de saída no eletrolisador (fluxo de H₂ à saída e de H₂O à entrada), no compressor (fluxo de H₂ à entrada) e no tanque de hidrogénio (capacidade de hidrogénio diário), funcionando como um simulador de referência. A Tabela 4 apresenta os valores equivalentes para as diferentes medidas nas duas tecnologias analisadas. De seguida, nas secções 4.1 e 4.2 irão ser individualizados os dois tipos de sistemas com os dois tipos de eletrolisadores diferentes (Alcalino e PEM), analisando cada um dos valores de entrada e de saída no mesmo simulador.

Tabela 4 – Valores equivalentes das principais fases nas duas tecnologias estudadas

Eletrolisador (fase 3)	Alcalino	PEM
Fluxo de H ₂ à saída (Nm ³ /h)	250.00	250.00
Produção de H ₂ (kg/h)	22.46	22.46
Fluxo de H ₂ O à entrada (L/h)	225.00	225.00
Fluxo de O ₂ à saída (kg/h)	169.00	169.00
Compressor (fase 4)	Elet. Alcalino	Elet. PEM
Fluxo de H ₂ à entrada (Nm ³ /h)	250.00	250.00
Tanque de H ₂ (fase 5)	Elet. Alcalino	Elet. PEM
Capacidade útil de Hidrogénio (kg/dia)	100.00	100.00

Na fase 1, o custo do trabalho é idêntico nas duas tecnologias já que, tanto o número de trabalhadores, o ciclo de produção e a dedicação no tanque de água, como os dias por ano e o salário não diferem do sistema alcalino para o sistema PEM.

No transformador e no retificador (fase 2) o custo do trabalho e da energia não difere nas duas presentes tecnologias visto que se utiliza o mesmo conjunto de máquinas com um total de 2000 kW e o custo unitário da energia é sempre igual a 0.08 €/kWh.

Na fase 3, as duas tecnologias irão possuir as mesmas quantidades de H₂ à saída do eletrolisador, já que os dois eletrolisadores têm a mesma capacidade de extração de hidrogénio. Foi assim assumido pelo simulador *HyJack* que se irá extrair 250 Nm³/h de H₂, ou seja, 22.46 kg/h deste gás. O fluxo de água à entrada irá ser de 225 L/h. Para além

do hidrogénio, resta o oxigénio, que sai para a atmosfera, e também possui uma quantia equivalente nas suas tecnologias de 169 kg/h.

No compressor (fase 4) o único valor equivalente no sistema com eletrolisador alcalino e PEM é, mais uma vez, o fluxo de hidrogénio. A diferença é que neste caso encontra-se à entrada, porque o eletrolisador fornece a mesma quantidade de H₂ da fase 3 para o compressor, ou seja, 250 Nm³/h.

Na última fase, em que se dá o armazenamento de HV (fase 5), estima-se que se produzam 100 kg deste gás durante um dia de trabalho. Este valor é pouco preciso porque dita a quantidade de hidrogénio produzido pelas duas tecnologias (eletrolisador alcalino e PEM), de modo a obter uma referência de comparação para analisar os valores dispares apresentados na secção 4.1.

4.1. Eletrolisador Alcalino: Cálculo dos Custos

Tanque de água (Fase 1):

Como foi referido no início do capítulo 4, existe à entrada do eletrolisador uma quantidade de 225 litros de água por hora. Sendo assim, e como o ciclo de produção do tanque é de 8 horas, multiplicando estes dois valores, uma quantia de 1800 L, ou seja, 1800 kg de água por dia entra no tanque de 2000 L.

Como custos variáveis, estão presentes nesta fase os do trabalho e os da própria água. Os dois custos podem ser calculados anualmente através das fórmulas 3 e 5, ou seja:

$$Custo\ do\ trabalho = 2 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.6 = 34\ 560 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

A produção anual real é calculada através do resultado obtido em termos volumétricos de hidrogénio analisada na fase 5. A produção anual desejada através da fase 5 é de 1615.2 m³/ano. Sendo assim, e como a eficiência do eletrolisador alcalino é de 67.65%, a produção anual real é igual aos 1615.2 a multiplicar pela eficiência mencionada anteriormente, dando um resultado de 1092.68. Portanto, o custo da água é dado por:

$$Custo\ da\ água = 1.38 \times 1092.68 = 1\ 509.76 \text{ €/ano}$$

O custo variável total é assim a soma dos dois últimos valores encontrados: 36 069.76 €/ano.

Em termos de custos fixos, são calculados os custos do reservatório de água, do edifício e da manutenção dos mesmos, através do empréstimo referido também no fim do capítulo 3 sobre o PGTO (*Primitive Gaussian Type Orbital*). Este empréstimo foi realizado de modo a investir no reservatório de água e no custo que este tem no edifício.

$$\text{Investimento do componente} = 700 \times 1 \times 0.65 = 455 \text{ €}$$

O custo do reservatório com este investimento é de 77.81 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 5 \times 0.65 = 5\,850 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 890.96 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (77.81 + 890.96) = 96.88 \text{ €}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do reservatório de água, do edifício e da manutenção: 1 065.65 €/ano

Como se pode constatar pela Tabela 5, o custo total de fabricação deste tanque de água é de 37 135.41 €/ano.

Tabela 5 - Custos da fase 1 no eletrolisador alcalino

Fase 1 - Tanque de Água					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m ³	por ano	%	
Custo do trabalho	F1	31.63 €	34,560.00 €	93%	
Custo da água		1.38 €	1,509.76 €	4%	
Custo variável total		33.01 €	36,069.76 €	97%	
CUSTOS FIXOS		por m ³	por ano	%	Investimento
Custo da principal do R1	R1	0.07 €	77.81 €	0.21%	455.00 €
Custo do edifício		0.82 €	890.96 €	2%	5,850.00 €
Custo de manutenção		0.09 €	96.88 €	0.26%	
Custos totais fixos		0.98 €	1,065.65 €	3%	6,305.00 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		33.99 €	37,135.41 €	100%	

Transformador e Retificador (fase 2):

O transformador e o retificador estão acoplados na mesma estrutura e ocupam uma área de 20 m², com uma potência de 2000 kW em conjunto. O custo do trabalho e da energia são os custos variáveis aqui apresentados:

$$\text{Custo do trabalho} = 1 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.4 = 11\,520 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

$$\text{Custo da energia} = 8 \times 2000 \times 0.08 = 1280 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo variável total é assim a soma dos dois últimos valores encontrados: 12 800 €.

Passando agora para os custos fixos, é necessário calcular o custo principal das duas máquinas, quanto é que elas custam no edifício e no final analisar os custos de manutenção, como é usual.

$$\text{Investimento do componente} = 1000 \times 1 \times 0.55 = 550 \text{ €}$$

O custo das duas máquinas com este investimento é de 109.59 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 20 \times 0.55 = 19\,800 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 3 945.19 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (109.59 + 3\,945.19) = 405.48 \text{ €}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do transformador e do retificador, do edifício e da manutenção: 4 460.26 €/ano

Como se pode constatar pela Tabela 6, o custo total de fabricação deste transformador e retificador é de 17 260.26 €/ano.

Tabela 6 - Custos a fase 2 no eletrolisador alcalino

Fase 2 -Transformador e retificador					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m ³	por ano	%	
<i>Custo do trabalho</i>	F2	10.54 €	11,520.00 €	67%	
<i>Custo da energia</i>		1.17 €	1,280.00 €	7%	
Custo variável total		11.71 €	12,800.00 €	74%	
CUSTOS FIXOS		por m ³	por ano	%	Investimento
<i>Custo da principal da M1</i>	M1	0.10 €	109.59 €	1%	550.00 €
<i>Custo do edificio</i>		3.61 €	3,945.19 €	23%	19,800.00 €
<i>Custo de manutenção</i>		0.37 €	405.48 €	2%	
Custos totais fixos		4.08 €	4,460.26 €	26%	20,350.00 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		15.80 €	17,260.26 €	100%	

Eletrolisador (fase 3):

No caso alcalino, segundo o simulador *Hyjack*, a potência nominal à entrada do eletrolisador é de 1308.10 kW, um consumo médio de 31395 kWh/dia e uma eficiência do eletrolisador de 67.65 % hhv, que é a percentagem de maior calor atingido (*Higher Heating Value*). Segundo o gráfico representado na Figura 17, para uma eficiência de 67.29 % hhv, existe um consumo específico de 5.26 kWh/Nm³, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Consumo específico} = 6.04 \times (\text{Potência nominal})^{-0.02} \quad (10)$$

Para este caso específico:

$$\text{Consumo específico} = 6.04 \times (1308.10)^{-0.02}$$

$$\text{Consumo específico} = 5.23 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}$$

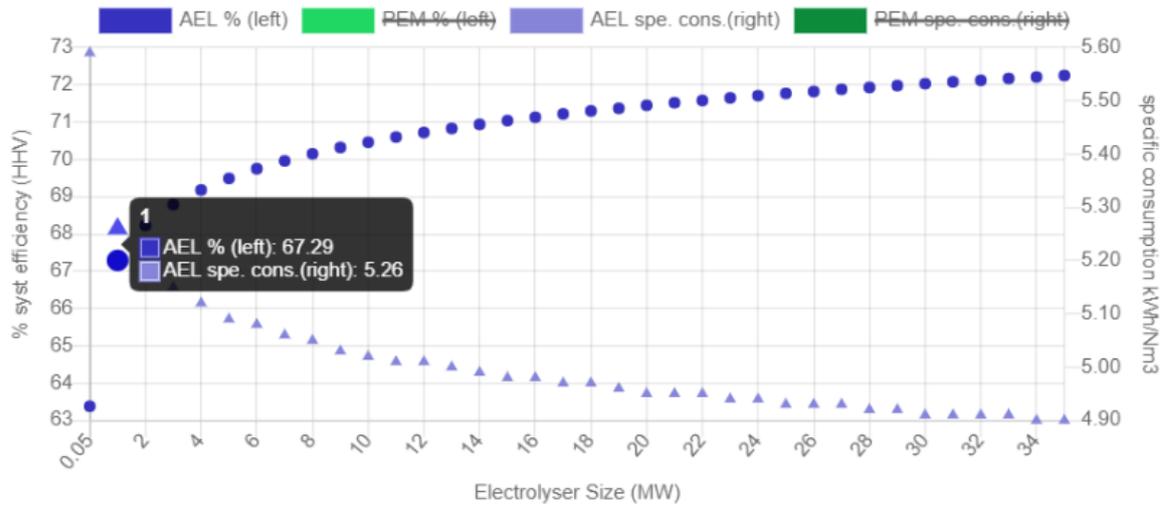


Figura 17 - Gráfico da relação entre potência, eficiência e consumo específico (HyJack, 2021)

É de notar também, que à medida que a potência do eletrolisador aumenta, a eficiência sobe e o consumo específico diminui.

A nível de custos, há que respeitar a fórmula básica do custo unitário de potência do eletrolisador alcalino em euros por quilowatt, colocando apenas a potência nominal demonstrada previamente (1308.10 kW).

$$\text{Custo unitário de potência} = 5900 \times (\text{Potência nominal})^{-0.198} \quad (11)$$

$$\text{Custo unitário de potência} = 5900 \times (1308.10)^{-0.198}$$

$$\text{Custo unitário de potência} = 1424.81 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$$

Mais uma vez, e segundo o simulador, este último valor dá-nos um custo do equipamento de 1 863 805 €, que contém o custo unitário de potência, o *stack*, e o sistema completo. Agora, o custo total mínimo do equipamento, é a soma do valor anterior com mais 70 %. O custo total máximo é realizado pelo mesmo método, mas com mais 150 %. Estas percentagens são os custos auxiliares, representando assim o caso mais otimista e o caso mais pessimista, respetivamente. Neste caso, obteve-se 3 168 468.50 € para o valor otimista e 4 286 751.50 € para o valor pessimista. Os valores aqui descritos podem ser analisados melhor na Tabela 7 e na Figura 18, que mostra um *printscreen* do simulador HyJack.

Tabela 7 - Valores simulados no eletrolisador alcalino

Eletrolisador (fase 3)	Alcalino
Potência nominal à entrada (kW)	1308.10
Consumo médio (kWh/dia)	31395.00
Consumo específico (kWh/Nm3)	5.23
Eficiência (% hhv)	67.65
Custo unitário (€/kW)	1,424.81 €
Custo do equipamento (€)	1,863,805.00 €
Custo total mínimo do sistema (€)	3,168,468.50 €
Custo total máximo do sistema (€)	4,286,751.50 €

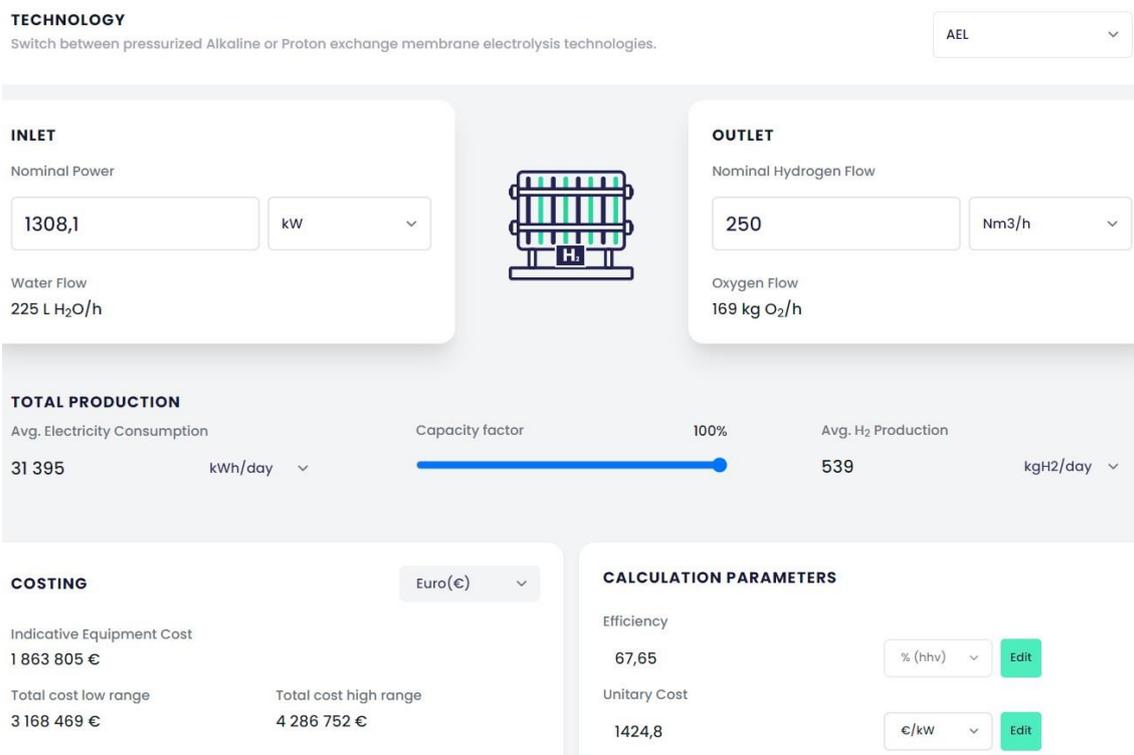


Figura 18 – Printscreen dos valores do simulador HyJack no eletrolisador alcalino (HyJack, 2021)

Com estes valores já definidos, é necessário proceder à identificação do custo da fábrica onde se realiza este processo. O custo do trabalho e da energia são os custos variáveis aqui apresentados.

$$\text{Custo do trabalho} = 2 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.7 = 40\,320 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

$$\text{Custo da energia} = 8 \times 1308 \times 0.08 = 837.12 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo variável total é assim a soma dos dois últimos valores encontrados:
41 157.12 €.

Passando agora para os custos fixos, é necessário calcular o custo principal do eletrolisador alcalino, quanto é que este custa no edifício e no final analisar os custos de manutenção, como é habitual.

$$\text{Investimento do componente} = 1\,863\,805 \times 1 \times 0.25 = 465\,951.25 \text{ €}$$

O custo desta máquina com este investimento é de 103 837.28 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 200 \times 0.25 = 90\,000 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 15 391.53 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (103\,837.28 + 15\,391.53) = 11\,922.88 \text{ €}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do sistema do eletrolisador, do edifício e da manutenção: 131 151.69 €/ano

Como se pode constatar pela Tabela 8, o custo total de fabricação deste eletrolisador é de 172 308.81 €/ano.

Tabela 8 - Custos da fase 3 no eletrolisador alcalino

Fase 3 - Sistema do eletrolisador					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m ³	por ano	%	
Custo do trabalho	F3	36.90 €	40,320.00 €	23%	
Custo da energia		0.77 €	837.12 €	0.49%	
Custo variável total		37.67 €	41,157.12 €	24%	
CUSTOS FIXOS					
		por m³	por ano	%	Investimento
Custo da principal da M2	M2	95.03 €	103,837.28 €	60%	465,951.25 €
Custo do edifício		14.09 €	15,391.53 €	9%	90,000.00 €
Custo de manutenção		10.91 €	11,922.88 €	7%	
Custos totais fixos		120.03 €	131,151.69 €	76%	555,951.25 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		157.69 €	172,308.81 €	100%	

Compressor (fase 4):

Analisando agora a fase 4, em que é necessário comprimir o gás produzido no eletrolisador para ser armazenado na fase 5, a pressão à entrada irá ser a pressão atmosférica (1 bar) e a pressão à saída é de 200 bar, que irá ser explicado mais à frente na fase 5. Utilizando mais uma vez o simulador *Hyjack*, a potência tem 83.08 kW como valor nominal com uma temperatura de funcionamento de 20°C (requisito fornecido pela ficha técnica do eletrolisador alcalino *Nel* usado neste caso).

Analisando agora os custos, o custo unitário por quilowatt, segundo o mesmo simulador, é de 4 886.61 €/kW, de acordo com a expressão seguinte:

$$\text{Custo unitário de potência} = 75700 \times (\text{Potência nominal})^{-0.62} \quad (12)$$

$$\text{Custo unitário de potência} = 75700 \times (83.08)^{-0.62}$$

$$\text{Custo unitário de potência} = 4\,886.61 \text{ €/kW}$$

Através do gráfico de referência da Figura 19 é possível verificar que o valor anterior é bastante plausível, já que para 80 kW de potência nominal, o equipamento apresenta um custo unitário de 5002 €/kW, que é semelhante ao previamente calculado.

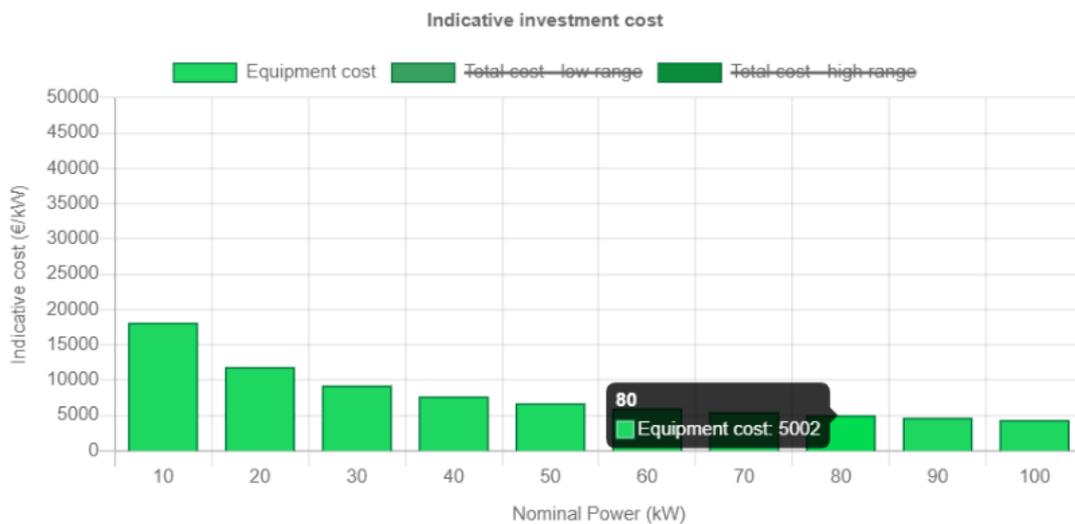


Figura 19 - Gráfico da relação entre a potência nominal e o custo unitário (HyJack, 2021)

O custo do equipamento inclui o próprio custo, adicionando o custo de todos os componentes do sistema, tendo assim sido calculado pelo *Hyjack* e resultado em 405 987 €. Para o custo total mínimo e máximo, tal como a fase anterior, a forma de calcular é a mesma, mas neste caso é a soma do valor anterior com mais 80%, obtendo assim 730 776.6 € como valor otimista. Como valor pessimista, a percentagem é de 160%, resultando em 1 055 566.2 €. Os valores aqui descritos podem ser analisados melhor na Tabela 9 e na Figura 20, que mostra um *printscreen* do simulador *HyJack*.

Tabela 9 - Valores simulados no compressor do eletrolisador alcalino

Compressor (fase 4)	Elet. Alcalino
Pressão à entrada (bar)	1.00
Pressão à saída (bar)	200.00
Potência nominal (kW)	83.08
Temperatura à entrada (°C)	20.00
Custo unitário (€/kW)	4,886.61 €
Custo do equipamento (€)	405,987.00 €
Custo total mínimo do sistema (€)	730,776.60 €
Custo total máximo do sistema (€)	1,055,566.20 €

TECHNOLOGY
Standard mechanical hydrogen compressor model. Standard compressor

INLET FLOW
Nominal H₂ flow: 250 Nm³ H₂/h

POWER
Nominal Power: 83,08 kW

PRESSURE
Inlet: 1 bar (14.5 psi) | Outlet: 200 bar (2900 psi)

COSTING
Euro(€)
Indicative Equipment Cost: 405 987 €
Total cost low range: 730 777 € | Total cost high range: 1 055 567 €

CALCULATION PARAMETERS
Inlet temperature: 20 °C [Edit]
Unitary Cost: 4886,46 €/kW [Edit]

Figura 20 - *Printscreen* dos valores do simulador *HyJack* no compressor do eletrolisador alcalino (HyJack, 2021)

Depois de obter estes resultados, procede-se à identificação do custo do fabrico do compressor. O custo do trabalho e da energia são os custos variáveis aqui apresentados.

$$\text{Custo do trabalho} = 1 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.3 = 8\,640 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

$$\text{Custo da energia} = 8 \times 83.08 \times 0.08 = 53.17 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo variável total é assim a soma dos dois últimos valores encontrados: 8 693.17 €.

Passando agora para os custos fixos, é necessário calcular o custo principal do compressor, quanto é que este custa no edifício e no final analisar os custos de manutenção.

$$\text{Investimento do componente} = 405\,987 \times 1 \times 0.5 = 202\,993 \text{ €}$$

O custo desta máquina com este investimento é de 40 446.87 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 20 \times 0.5 = 18\,000 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 3 586.54 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (40\,446.87 + 3\,586.54) = 4\,403.34 \text{ €}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do compressor, do edifício e da manutenção: 48 436.75 €/ano

Como se pode constatar pela Tabela 10, o custo total de fabricação deste compressor é de 57 129.92 €/ano.

Tabela 10 - Custos da fase 4 no eletrolisador alcalino

Fase 4 - Compressor					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m³	por ano	%	
<i>Custo do trabalho</i>	F4	7.91 €	8,640.00 €	15%	
<i>Custo da energia</i>		0.05 €	53.17 €	0.09%	
Custo variável total		7.96 €	8,693.17 €	15%	
CUSTOS FIXOS		por m³	por ano	%	Investimento
<i>Custo da principal da M3</i>	M3	37.02 €	40,446.87 €	71%	202,993.50 €
<i>Custo do edificio</i>		3.28 €	3,586.54 €	6%	18,000.00 €
<i>Custo de manutenção</i>		4.03 €	4,403.34 €	8%	
Custos totais fixos		44.33 €	48,436.75 €	85%	220,993.50 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		52.28 €	57,129.92 €	100%	

Tanque de Hidrogénio (fase 5):

Com o gás já comprimido, torna-se fundamental armazenar o H₂ em tanques, sendo que no caso alcalino é necessário 200 bar de pressão, ocupando assim um volume de 6.73 m³ num só dia, segundo o simulador habitual. Esta quantidade volumétrica é então multiplicada pelo número de dias anuais (240), obtendo um resultado de 1615.2 m³/ano, que ao multiplicar por 67.65% (percentagem da eficiência do eletrolisador alcalino), resulta na produção anual real de 1 092.68 m³/ano, como foi referido na fase 1 do sistema do eletrolisador alcalino desta mesma secção. Observando a Figura 21, é de notar que o que tem maior massa é o próprio gás de hidrogénio, ocupando normalmente 81% da massa total do tanque.

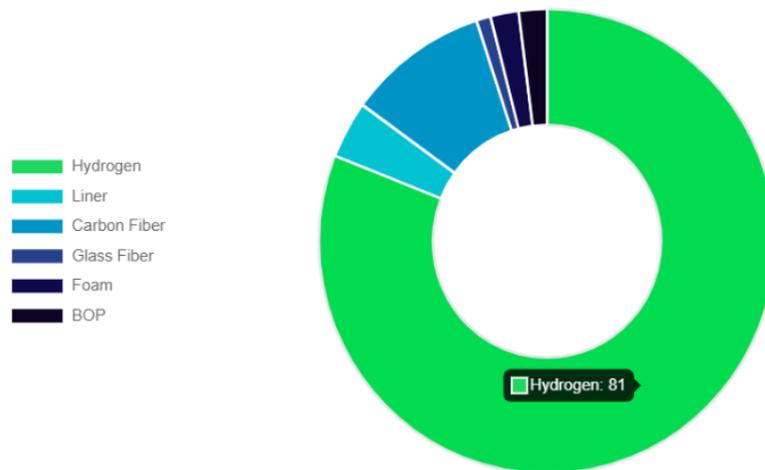


Figura 21 - Distribuição do volume em percentagem (HyJack, 2021)

Analisando agora nos custos, e como é habitual, existe um custo unitário, que, neste caso, é aplicado à capacidade total do armazenamento, ou seja, não só à capacidade útil. Este custo usa também uma expressão medida em euros por quilograma, que é dada por:

$$Custo\ unitário = 0.0015 \times (Pressão)^2 + 0.2521 \times (Pressão) + 448.54 \quad (13)$$

$$Custo\ unitário = 0.0015 \times (200)^2 + 0.2521 \times (200) + 448.54$$

$$Custo\ unitário = 558.96 \frac{€}{kg}$$

O gráfico da Figura 22 é uma referência utilizada pelo simulador que demonstra que o valor calculado anteriormente é aproximadamente o mesmo.

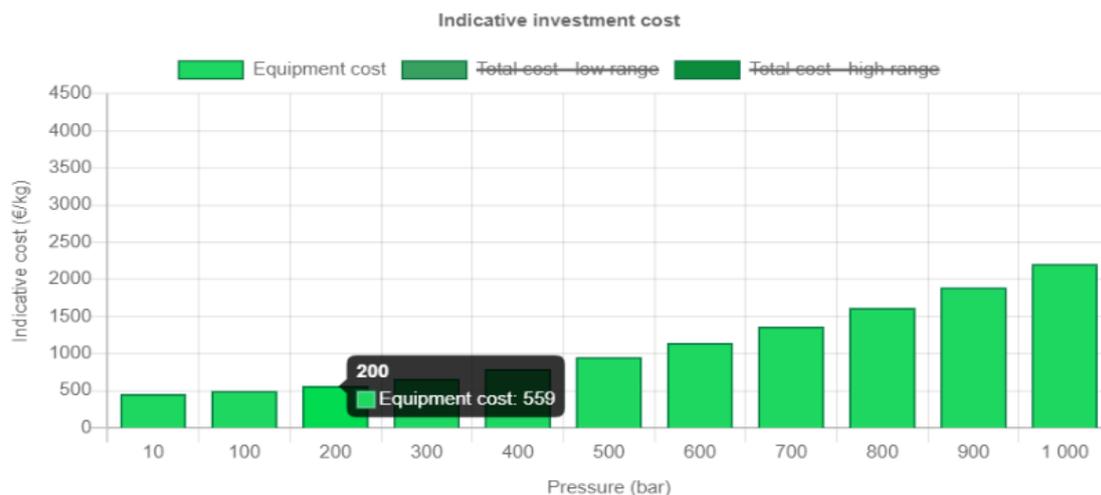


Figura 22 - Gráfico que relaciona pressão com custo unitário

O custo do equipamento corresponde ao próprio recipiente (tanque) e foi calculado através do valor anterior, resultando em 56 212 €. Com isto, deduz-se o valor total do sistema, incluídos os custos auxiliares. O valor otimista total do sistema é a soma do valor calculado anteriormente com mais 50 %: 84 318 €. O valor pessimista é a soma dos 56 212 € com mais 100%: 112 424 €. Os valores aqui descritos podem ser analisados melhor na Tabela 11 e na Figura 23, que mostra um *printscreen* do simulador da *HyJack*.

Tabela 11 - Valores simulados no tanque de hidrogénio através do método alcalino

Tanque de H2 (fase 5)	Elet. Alcalino
Volume (m3)	6.73
Pressão (bar)	200.00
Custo unitário (€/kg)	558.96 €
Custo do equipamento (€)	56,212.00 €
Custo total mínimo do sistema (€)	84,318.00 €
Custo total máximo do sistema (€)	112,424.00 €

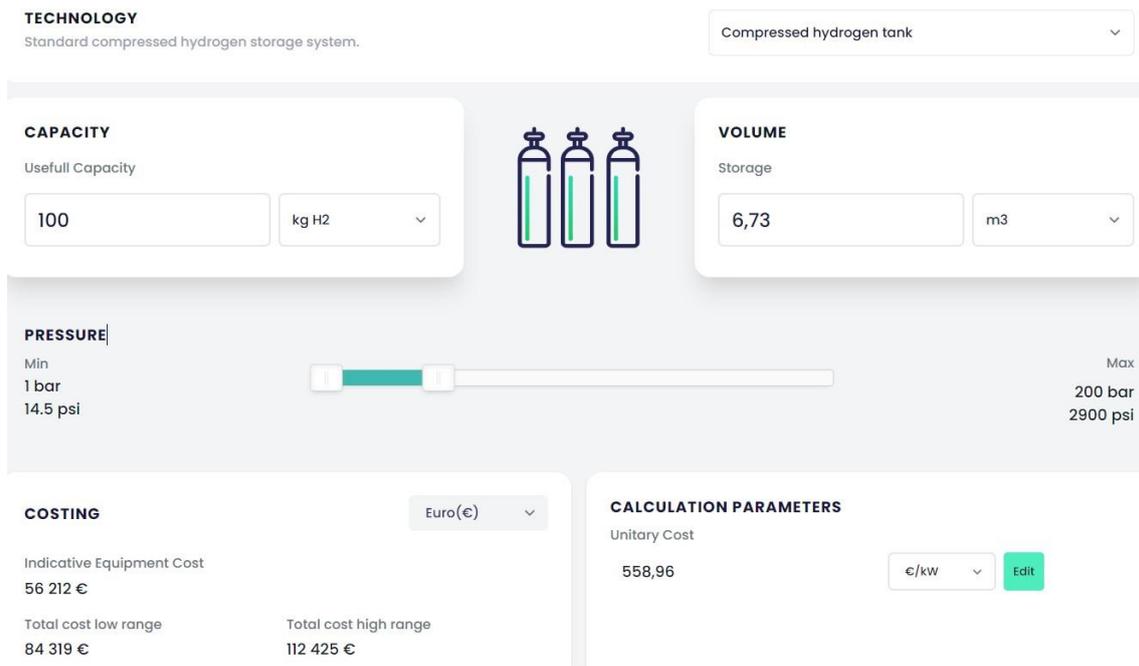


Figura 23 - Printscreen dos valores do simulador HyJack no tanque do eletrolisador alcalino (HyJack, 2021)

Com estes valores resultantes do simulador, é possível realizar um estudo mais detalhado do custo do fabrico dos tanques de hidrogénio.

$$\text{Custo do trabalho} = 2 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.5 = 28\,800 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo variável total é somente o custo do trabalho porque neste caso não se considera a energia para armazenar os tanques de H₂.

Nos custos fixos, é necessário calcular o custo principal do tanque, quanto é que este custa no edifício e no final analisar os custos de manutenção.

$$\text{Investimento do componente} = 56\,212 \times 1 \times 0.25 = 14\,053 \text{ €}$$

O custo deste reservatório com este investimento é de 2 403.30 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 20 \times 0.25 = 9\,000 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 1 370.70 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (2\,403.30 + 1\,370.70) = 377.40 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do tanque de hidrogénio, do edifício e da manutenção: 4 151.40 €/ano

Como se pode constatar pela Tabela 12, o custo total de fabricação deste compressor é de 32 951.40 €/ano.

Tabela 12 - Custos da fase 5 no eletrolisador alcalino

Fase 5 - Armazenamento de hidrogénio					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m ³	por ano	%	
<i>Custo do trabalho</i>	F5	26.36 €	28,800.00 €	87%	
<i>Custo da energia</i>					
Custo variável total		26.36 €	28,800.00 €	87%	
CUSTOS FIXOS		por m ³	por ano	%	Investimento
<i>Custo da principal do R2</i>	R2	2.20 €	2,403.30 €	7%	14,053.00 €
<i>Custo do edifício</i>		1.25 €	1,370.70 €	4%	9,000.00 €
<i>Custo de manutenção</i>		0.35 €	377.40 €	1%	
Custos totais fixos		3.80 €	4,151.40 €	13%	23,053.00 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		30.16 €	32,951.40 €	100%	

Por fim, e realizando o somatório total, a Tabela 13 mostra os custos totais para fabricar um sistema do eletrolisador com todos os seus componentes circundantes.

Tabela 13 - Custos totais da fábrica do eletrolisador alcalino

Custos totais				
CUSTOS VARIÁVEIS	por m ³	por ano	%	
<i>Custo de trabalho</i>	76.67 €	123,840.00 €	39%	
<i>Custo de energia e água</i>	2.28 €	3,680.05 €	1%	
Custo variável total	78.95 €	127,520.05 €	40%	
CUSTOS FIXOS	por m ³	por ano	%	Investimento
<i>Custo das componentes principais</i>	90.93 €	146,874.86 €	46%	684,002.75 €
<i>Custos do edifício</i>	15.59 €	25,184.92 €	8%	142,650.00 €
<i>Custo de manutenção</i>	10.65 €	17,205.98 €	5%	
Custos totais fixos	117.18 €	189,265.75 €	60%	€ 826,652.75
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		316,785.80 €		

4.2. Eletrolisador PEM: Cálculo dos Custos

Tanque de água (Fase 1):

À semelhança do que aconteceu na situação do caso alcalino, existe à entrada do eletrolisador PEM uma quantidade de 225 litros de água por hora. Sendo assim, e como o ciclo de produção do tanque é de 8 horas, multiplicando estes dois valores, uma quantia de 1800 L, ou seja, 1800 kg de água por dia é introduzida no tanque de 2000 L.

Como custos variáveis, estão presentes nesta fase os custos do trabalho e os da própria água. Os cálculos destes dois custos são calculados anualmente através das expressões referidas no fim do capítulo 3, ou seja:

$$\text{Custo do trabalho} = 2 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.6 = 34\,560 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

A produção anual real é calculada através do resultado obtido em termos volumétricos de hidrogénio, analisada na fase do armazenamento (fase 5). A produção anual desejada através da fase 5 é de 10 017.6 m³/ano. Sendo assim, e como a eficiência do eletrolisador PEM é de 68.14%, a produção anual real é igual aos 10 017.6 a multiplicar pela eficiência mencionada anteriormente, dando um resultado de 6825.99. Portanto, o custo da água é dado por:

$$\text{Custo da água} = 1.38 \times 6\,825.99 = 9\,431.47 \text{ €/ano}$$

O custo variável total é assim a soma dos dois últimos valores encontrados: 43 991.47 €/ano.

Em termos de custos fixos, são calculados os custos do reservatório de água, do edifício e da manutenção dos mesmos, através do empréstimo referido também no fim do capítulo 3 sobre o PGTO. Este empréstimo foi realizado de modo a investir no reservatório de água e no custo que este tem no edifício.

$$\text{Investimento do componente} = 700 \times 1 \times 0.65 = 455 \text{ €}$$

O custo do reservatório com este investimento é de 77.81 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 5 \times 0.65 = 5\,850 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 890.96 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (77.81 + 890.96) = 96.88\text{€}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do reservatório de água, do edifício e da manutenção: 1 065.65 €/ano

Como se pode observar na Tabela 14, o custo total de fabricação deste tanque de água é de 45 057.12 €/ano.

Tabela 14 - Custos da fase 1 para o eletrolisador PEM

Fase 1 - Tanque de Água						
CUSTOS VARIÁVEIS		Ref:	por m ³	por ano	%	
Custo do trabalho		F1	5.06 €	34,560.00 €	77%	
Custo da água			1.38 €	9,431.47 €	21%	
Custo variável total			6.44 €	43,991.47 €	98%	
CUSTOS FIXOS			por m ³	por ano	%	Investimento
Custo da principal do R1		R1	0.01 €	77.81 €	0.17%	455.00 €
Custo do edifício			0.13 €	890.96 €	2%	5,850.00 €
Custo de manutenção			0.01 €	96.88 €	0.22%	
Custos totais fixos			0.16 €	1,065.65 €	2%	6,305.00 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO			6.60 €	45,057.12 €	100%	

Transformador e Retificador (fase 2):

O transformador e o retificador estão acoplados na mesma estrutura e ocupam uma área de 20 m², com uma potência de 2000 kW em conjunto. O custo do trabalho e da energia são os custos variáveis aqui apresentados.

$$\text{Custo do trabalho} = 1 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.4 = 11\,520 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

$$\text{Custo da energia} = 8 \times 2000 \times 0.08 = 1280 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo variável total é assim a soma dos dois últimos valores encontrados: 12 800 €.

Passando agora para os custos fixos, é necessário calcular o custo principal das duas máquinas, quanto é que elas custam no edifício e no final analisar os custos de manutenção, como é usual.

$$\text{Investimento do componente} = 1000 \times 1 \times 0.55 = 550 \text{ €}$$

O custo das duas máquinas com este investimento é de 109.59 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 20 \times 0.55 = 19\,800 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 3 945.19 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (109.59 + 3\,945.19) = 405.48 \text{ €}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do transformador e do retificador, do edifício e da manutenção: 4 460.26 €/ano

Como se pode observar na Tabela 15, o custo total de fabricação deste transformador e retificador é de 17 260.26 €/ano.

Tabela 15 - Custos a fase 2 no eletrolisador alcalino

Fase 2 - Transformador e retificador					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m ³	por ano	%	
Custo do trabalho	F2	1.69 €	11,520.00 €	67%	
Custo da energia		0.19 €	1,280.00 €	7%	
Custo variável total		1.88 €	12,800.00 €	74%	
CUSTOS FIXOS		por m ³	por ano	%	Investimento
Custo da principal da M1	M1	0.02 €	109.59 €	1%	550.00 €
Custo do edifício		0.58 €	3,945.19 €	23%	19,800.00 €
Custo de manutenção		0.06 €	405.48 €	2%	
Custos totais fixos		0.65 €	4,460.26 €	26%	20,350.00 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		2.53 €	17,260.26 €	100%	

Assim, esta fase é exatamente igual à fase 2 no eletrolisador alcalino.

Eletrolisador (fase 3):

No caso do eletrolisador PEM, segundo o simulador *Hyjack*, a potência nominal à entrada do eletrolisador é de 1278.97 kW, um consumo médio de 31171 kWh/dia e

uma eficiência do eletrolisador de 68.14 % hhv. Segundo o gráfico representado na Figura 24, para uma eficiência de 67.64 % hhv, existe um consumo específico de 5.23 kWh/Nm³, de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Consumo específico} = 6.35 \times (\text{Potência nominal})^{-0.028} \quad (14)$$

Para este caso específico:

$$\text{Consumo específico} = 6.35 \times [1298.77]^{-0.028}$$

$$\text{Consumo específico} = 5.20 \frac{\text{kWh}}{\text{Nm}^3}$$

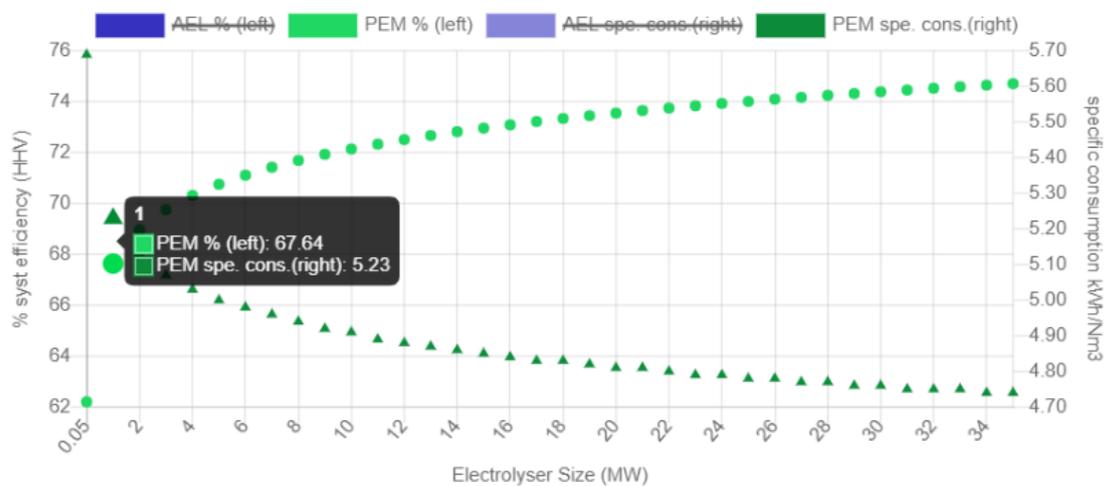


Figura 24 - Gráfico da relação entre potência, eficiência e consumo específico (HyJack, 2021)

É de notar também que à medida que um eletrolisador aumenta a sua potência, a eficiência aumenta e o consumo específico diminui.

A nível de custos, há que respeitar a expressão básica do custo unitário de potência do eletrolisador alcalino em euros por quilowatt, colocando apenas a potência nominal demonstrada previamente (1298.77 kW).

$$\text{Custo unitário de potência} = 7200 \times (\text{Potência nominal})^{-0.202} \quad (15)$$

$$\text{Custo unitário de potência} = 7200 \times [1298.77]^{-0.202}$$

$$\text{Custo unitário de potência} = 1691.99 \frac{\text{€}}{\text{kW}}$$

Mais uma vez, e segundo o simulador, este último valor dá-nos um custo do equipamento de 2 197 522 €, que engloba o custo unitário de potência, o stack, e o

sistema completo. O custo total mínimo do equipamento, é a soma do valor anterior mais 70 %. O custo total máximo é realizado pelo mesmo método, mas com mais 150 %. Estas percentagens são os custos auxiliares, representando assim o caso mais otimista e o caso mais pessimista, respetivamente. Neste caso, obteve-se 3 735 797 € para o valor otimista e 5 054 300.6 € para o valor pessimista. Os valores aqui descritos podem ser analisados melhor na Tabela 16 e na Figura 25, que mostra um *printscreen* do simulador da HyJack.

Tabela 16 - Valores simulados no eletrolisador PEM

Eletrolisador (fase 3)	PEM
Potência nominal à entrada (kW)	1298.77
Consumo médio (kWh/dia)	31171.00
Consumo específico (kWh/Nm ³)	5.20
Eficiência (% hhv)	68.14
Custo unitário (€/kW)	1,691.99 €
Custo do equipamento (€)	2,197,522.00 €
Custo total mínimo do sistema (€)	3,735,787.40 €
Custo total máximo do sistema (€)	5,054,300.60 €

TECHNOLOGY
Switch between pressurized Alkaline or Proton exchange membrane electrolysis technologies. PEM

INLET

Nominal Power

1298,77 kW

Water Flow
225 L H₂O/h



OUTLET

Nominal Hydrogen Flow

250 Nm³/h

Oxygen Flow
169 kg O₂/h

TOTAL PRODUCTION

Avg. Electricity Consumption: 31 171 kWh/day

Capacity factor: 100%

Avg. H₂ Production: 539 kgH₂/day

COSTING Euro(€)

Indicative Equipment Cost
2 197 522 €

Total cost low range: 3 735 787 €

Total cost high range: 5 054 301 €

CALCULATION PARAMETERS

Efficiency: 68,14 % (hhv) Edit

Unitary Cost: 1691,99 €/kw Edit

Figura 25 - *Printscreen* dos valores do simulador HyJack no eletrolisador PEM (HyJack, 2021)

Com estes valores já definidos, é necessário proceder à identificação do custo da fábrica da realização deste processo. O custo do trabalho e da energia são os custos variáveis aqui apresentados.

$$\text{Custo do trabalho} = 2 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.6 = 34\,560 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

$$\text{Custo da energia} = 8 \times 1298.77 \times 0.08 = 831.21 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo variável total é assim a soma dos dois últimos valores encontrados: 35 391.21 €.

Passando agora para os custos fixos, é necessário calcular o custo principal do eletrolisador PEM, quanto é que este custa no edifício e no final analisar os custos de manutenção, como é habitual.

$$\text{Investimento do componente} = 2\,197\,522 \times 1 \times 0.25 = 549\,380.50 \text{ €}$$

O custo desta máquina com este investimento é de 122 429.49 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 30.5 \times 0.25 = 13\,725 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 2 347.21 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (122\,429.49 + 2\,347.21) = 12\,477.67 \text{ €}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do sistema do eletrolisador, do edifício e da manutenção: 137 254.37 €/ano

Como se pode observar na [Tabela 17](#), o custo total de fabricação deste eletrolisador é de 172 645.59 €/ano.

Tabela 17 - Custos da fase 3 no eletrolisador PEM

Fase 3 - Sistema do eletrolisador					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m³	por ano	%	
<i>Custo do trabalho</i>	F3	5.06 €	34,560.00 €	20%	
<i>Custo da energia</i>		0.12 €	831.21 €	0.48%	
Custo variável total		5.18 €	35,391.21 €	20%	
CUSTOS FIXOS		por m³	por ano	%	Investimento
<i>Custo da principal da M2</i>	M2	17.94 €	122,429.49 €	71%	549,380.50 €
<i>Custo do edifício</i>		0.34 €	2,347.21 €	1%	13,725.00 €
<i>Custo de manutenção</i>		1.83 €	12,477.67 €	7%	
Custos totais fixos		20.11 €	137,254.37 €	80%	563,105.50 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		25.29 €	172,645.59 €	100%	

Compressor (fase 4):

Analisando agora a fase 4, em que é necessário comprimir o gás produzido no eletrolisador para ser armazenado na fase 5, a pressão à entrada irá ser a pressão atmosférica (1 bar) e a pressão à saída é de 30 bar, que irá ser explicado mais à frente na fase 5. Utilizando mais uma vez o simulador *Hyjack*, a potência tem o valor nominal de 53.13 kW, com uma temperatura de funcionamento de 10°C (requisito fornecido na ficha técnica do eletrolisador PEM da *Nel* usado neste caso).

Analisando agora os custos, o custo unitário por quilowatt, segundo o mesmo simulador, é de 6 447.41 €/kW, segundo a expressão 14:

$$\text{Custo unitário de potência} = 75700 \times [53.13]^{-0.62}$$

$$\text{Custo unitário de potência} = 6\,447.41 \text{ €/kW}$$

Através do gráfico de referência da Figura 26 é possível verificar que o valor anterior é bastante plausível, já que para 80 kW de potência nominal, o equipamento apresenta um custo unitário de 5002 €/kW, que é semelhante ao previamente calculado.

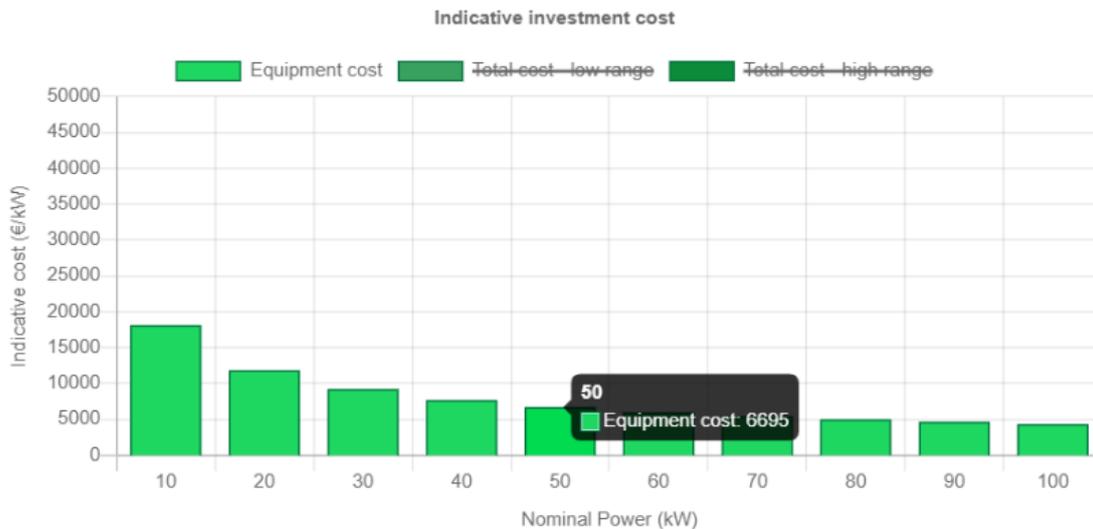


Figura 26 - Gráfico da relação entre a potência nominal e o custo unitário (HyJack, 2021)

O custo do equipamento inclui o mesmo, juntando todos os componentes do sistema, tendo assim sido calculado pelo Hyjack com o resultado de 342 563 €. Para o custo total mínimo e máximo, tal como a fase anterior, a forma de calcular é a mesma, mas neste caso é a soma do valor anterior com mais 80 %, obtendo assim 616 613.4 € como valor otimista. Como valor pessimista, a percentagem é de 160%, resultando 890 663.8 €. Os valores aqui descritos podem ser analisados melhor na

Tabela 18 e na Figura 27, que mostra o *printscreen* do simulador *HyJack* no seu *website*.

Tabela 18 - Valores simulados no compressor do eletrolisador PEM

Compressor (fase 4)	Elet. PEM
Pressão à entrada (bar)	1.00
Pressão à saída (bar)	30.00
Potência nominal (kW)	53.13
Temperatura à entrada (°C)	10.00
Custo unitário (€/kW)	6,447.41 €
Custo do equipamento (€)	342,563.00 €
Custo total mínimo do sistema (€)	616,613.40 €
Custo total máximo do sistema (€)	890,663.80 €

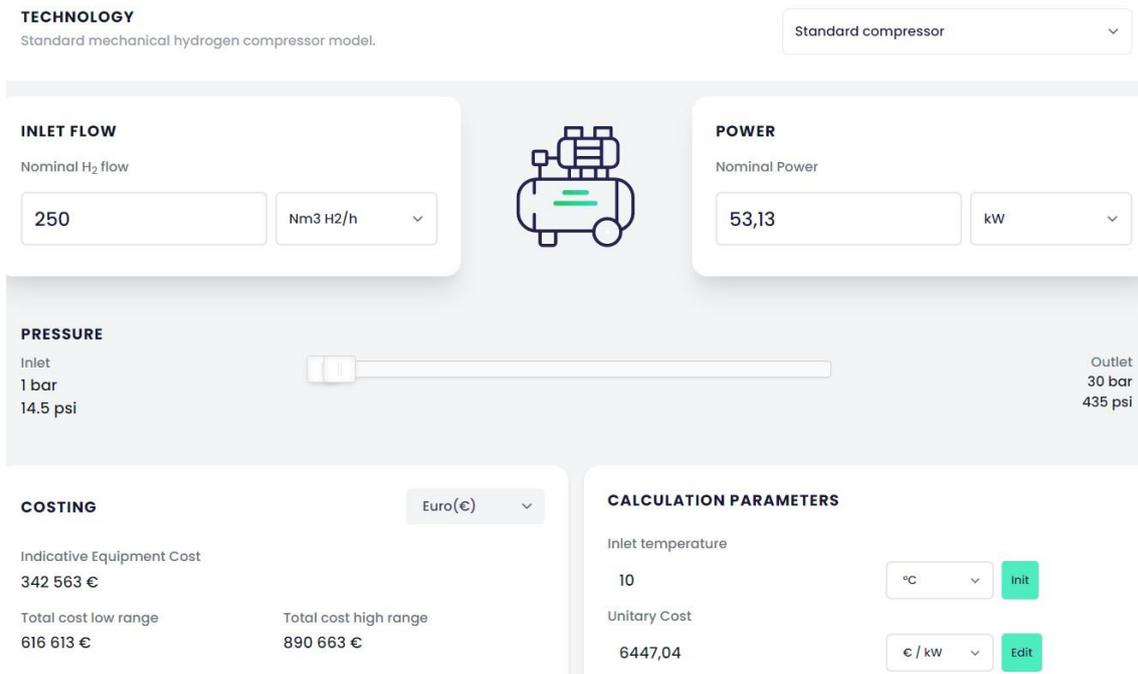


Figura 27 - Printscreens dos valores do simulador HyJack no compressor do eletrolisador PEM (HyJack, 2021)

Após obter estes resultados, procede-se à identificação do custo do fabrico do compressor. O custo do trabalho e da energia são os custos variáveis aqui apresentados.

$$\text{Custo do trabalho} = 1 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.3 = 8\,640 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

$$\text{Custo da energia} = 8 \times 53.13 \times 0.08 = 34 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo variável total é assim a soma dos dois últimos valores encontrados: 8 674 €.

Passando agora para os custos fixos, é necessário calcular o custo principal do compressor, quanto é que este custa no edifício e no final analisar os custos de manutenção.

$$\text{Investimento do componente} = 342\,563 \times 1 \times 0.5 = 171\,281 \text{ €}$$

O custo desta máquina com este investimento é de 34 128.19 €/ano através do PGTO.

$$\text{Investimento do edifício} = (1 + 0.2) \times 1\,500 \times 20 \times 0.5 = 18\,000 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 3 586.54 €/ano através do PGTO.

$$\text{Custo de manutenção} = 0.1 \times (34\,128.19 + 3\,586.54) = 3\,771.47 \text{ €}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do compressor, do edifício e da manutenção: 41 486.20 €/ano

Como se pode observar na Tabela 19, o custo total de fabricação deste compressor é de 50 160.21 €/ano.

Tabela 19 - Custos da fase 4 no eletrolisador PEM

Fase 4 - Compressor					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m³	por ano	%	
<i>Custo do trabalho</i>	F4	1.27 €	8,640.00 €	17%	
<i>Custo da energia</i>		0.0050 €	34.00 €	0.07%	
Custo variável total		1.27 €	8,674.00 €	17%	
CUSTOS FIXOS		por m³	por ano	%	Investimento
<i>Custo da principal da M3</i>	M3	5.00 €	34,128.19 €	68%	171,281.50 €
<i>Custo do edifício</i>		0.53 €	3,586.54 €	7%	18,000.00 €
<i>Custo de manutenção</i>		0.55 €	3,771.47 €	8%	
Custos totais fixos		6.08 €	41,486.20 €	83%	189,281.50 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		7.35 €	50,160.21 €	100%	

Tanque de Hidrogénio (fase 5):

Com o gás já comprimido, torna-se fundamental armazenar o H₂ em tanques, sendo que no caso do eletrolisador PEM é necessário 30 bar de pressão, ocupando assim um volume de 41.74 m³ por dia, segundo o simulador habitual (HyJack, 2021). Esta quantidade de HV é então multiplicada pelo número de dias anuais (240), obtendo um resultado de 10 017.6 m³/ano, que ao multiplicar por 68.14% (percentagem da eficiência do eletrolisador PEM), resulta na produção anual real de 6 825.99 m³/ano, como foi referido na fase 1 do sistema do eletrolisador PEM desta secção 4.2. Como se pode observar na Figura 28, o que tem maior massa é o próprio gás de hidrogénio, ocupando normalmente 81% da massa total do tanque.

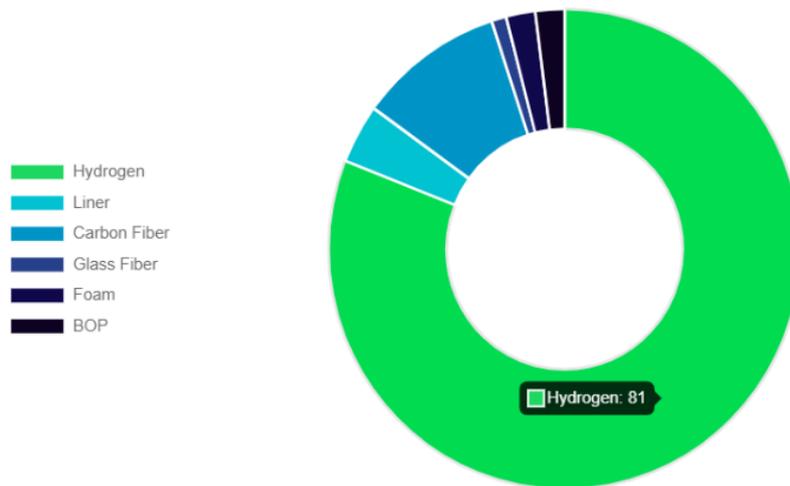


Figura 28 - Distribuição do volume em percentagem (HyJack, 2021)

Analisando os custos, e como é habitual, existe um custo unitário, que, neste caso, é aplicado à capacidade total do armazenamento, ou seja, não só à capacidade útil. Este custo tem também uma fórmula medida em euros por quilograma, que é dada pela expressão da equação nº 15:

$$\text{Custo unitário} = 0.0015 \times (30)^2 + 0.2521 \times (30) + 448.54$$

$$\text{Custo unitário} = 457.45 \frac{\text{€}}{\text{kg}}$$

O gráfico da Figura 29 é uma referência utilizada pelo simulador que demonstra que o valor calculado anteriormente é aproximadamente o mesmo.

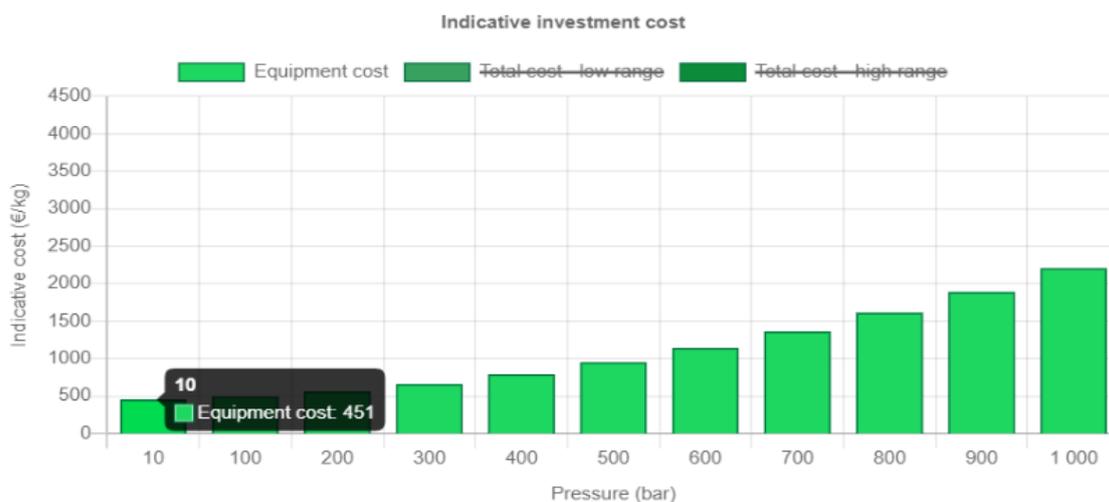


Figura 29 - Gráfico que relaciona pressão com custo unitário (HyJack, 2021)

O custo do equipamento corresponde ao próprio recipiente (tanque) e foi calculado através do valor anterior, resultando em 47 351 €. Com isto, deduz-se o valor total do sistema, incluídos os custos auxiliares. O valor otimista total do sistema é a soma do valor calculado anteriormente com mais 50 %: 71 026.5 €. O valor pessimista é a soma dos 47 351 € com mais 100%: 94 702 €. Os valores aqui descritos podem ser analisados melhor na Tabela 20 e na Figura 30, que mostra o *printscreen* do próprio simulador da *HyJack*.

Tabela 20 - Valores simulados no tanque de hidrogénio através do eletrolisador PEM

Tanque de H2 (fase 5)	Elet. PEM
Volume (m3)	41.74
Pressão (bar)	30.00
Custo unitário (€/kg)	457.45 €
Custo do equipamento (€)	47,351.00 €
Custo total mínimo do sistema (€)	71,026.50 €
Custo total máximo do sistema (€)	94,702.00 €

TECHNOLOGY
Standard compressed hydrogen storage system.

Compressed hydrogen tank

CAPACITY
Usefull Capacity

100 kg H2

VOLUME
Storage

41,74 m3

PRESSURE

Min
1 bar
14.5 psi

Max
30 bar
435 psi

COSTING
Euro(€)

Indicative Equipment Cost
47 351 €

Total cost low range
71 027 €

Total cost high range
94 702 €

CALCULATION PARAMETERS
Unitary Cost
457,45 €/kW

Figura 30 - Printscreem dos valores do simulador HyJack no tanque do eletrolisador PEM (HyJack, 2021)

Com estes valores resultantes do simulador, é possível realizar um estudo mais detalhado do custo do fabrico dos tanques de hidrogénio.

$$Custo\ do\ trabalho = 2 \times 8 \times 15 \times 240 \times 0.5 = 28\ 800 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo variável total é somente o custo do trabalho porque neste caso não se considera a energia para armazenar os tanques de H₂.

Nos custos fixos, é necessário calcular o custo principal do tanque, quanto é que este custa no edifício e no final analisar os custos de manutenção.

$$Investimento\ do\ componente = 47\ 351 \times 1 \times 0.25 = 11\ 837.8 \text{ €}$$

O custo deste reservatório com este investimento é de 2 024.46 €/ano através do PGTO.

$$Investimento\ do\ edifício = (1 + 0.2) \times 1\ 500 \times 20 \times 0.25 = 9\ 000 \text{ €}$$

O custo do edifício com este investimento é de 1 370.70 €/ano através do PGTO.

$$Custo\ de\ manutenção = 0.1 \times (2\ 024.46 + 1\ 370.70) = 339.52 \frac{\text{€}}{\text{ano}}$$

O custo fixo total é assim a soma do custo do tanque de hidrogénio, do edifício e da manutenção: 3 734.67 €/ano

Como se pode observar na Tabela 21, o custo total de fabricação deste compressor é de 32 534.67 €/ano.

Tabela 21 - Custos da fase 5 no eletrolisador PEM

Fase 5 - Armazenamento de hidrogénio					
CUSTOS VARIÁVEIS	Ref:	por m ³	por ano	%	
<i>Custo do trabalho</i>	F5	4.22 €	28,800.00 €	89%	
<i>Custo da energia</i>					
Custo variável total		4.22 €	28,800.00 €	89%	
CUSTOS FIXOS		por m ³	por ano	%	Investimento
<i>Custo da principal do R2</i>	R2	0.30 €	2,024.46 €	6%	11,837.75 €
<i>Custo do edifício</i>		0.20 €	1,370.70 €	4%	9,000.00 €
<i>Custo de manutenção</i>		0.05 €	339.52 €	1%	
Custos totais fixos		0.55 €	3,734.67 €	11%	20,837.75 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		4.77 €	32,534.67 €	100%	

Por fim, e realizando o somatório total, a Tabela 22 mostra os custos totais para fabricar um sistema do eletrolisador com todos os seus componentes à sua volta.

Tabela 22 - Custos totais da fábrica do eletrolisador PEM

Custos totais				
CUSTOS VARIÁVEIS	por m ³	por ano	%	
<i>Custo de trabalho</i>	11.79 €	118,080.00 €	37%	
<i>Custo de energia e água</i>	1.16 €	11,576.69 €	4%	
Custo variável total	12.94 €	129,656.69 €	41%	
CUSTOS FIXOS	por m ³	por ano	%	Investimento
<i>Custo das componentes principais</i>	15.85 €	158,769.54 €	50%	684,002.75 €
<i>Custos do edifício</i>	1.21 €	12,140.59 €	4%	66,375.00 €
<i>Custo de manutenção</i>	1.71 €	17,091.01 €	5%	
Custos totais fixos	18.77 €	188,001.15 €	59%	750,377.75 €
CUSTO TOTAL DE FABRICAÇÃO		317,657.84 €		

4.3. Ferramenta *Excel* VS. Simulador *HyJack*

No presente capítulo foram utilizados um simulador *web* e uma ferramenta de *software* como suporte de cálculo. O simulador *HyJack* determina valores técnicos consoante o tipo de tecnologia, de modo a estabelecer um custo final do equipamento. Esses valores fazem parte das fases 3, 4 e 5 deste estudo e, através do fluxo de hidrogénio à saída do eletrolisador, podem ser calculados os valores de potência nominal à entrada, da eficiência do eletrolisador, do volume do tanque de H₂, etc. Os valores calculados destas grandezas são transpostos para a ferramenta de cálculo do *Excel*, que permite determinar os custos variáveis e fixos específicos, com o intuito de definir um custo total de fabricação para ambas as tecnologias.

5. Análise de Resultados

Neste capítulo irão ser apresentados os cinco diferentes tipos de custos associados às cinco fases estudadas nesta dissertação, assim como uma análise comparativa e conclusiva de ambas as tecnologias. Nas secções 5.1 e 5.2 serão analisados os custos por metro cúbico demonstrados no capítulo 4, tanto para o sistema do eletrolisador alcalino, como para o sistema do eletrolisador PEM. De seguida, na secção 5.3, são apresentados os gráficos comparativos das duas tecnologias.

5.1. Análise dos Custos de Cada Fase do Processo Alcalino

No sistema alcalino, o tanque de água possui um custo do trabalho associado de 31.63 €/m³, constituindo assim a maior fatia do gráfico circular apresentado na Figura 31. Isto deve-se ao facto de serem necessários dois trabalhadores nesta fase, implicando assim mais dispêndio financeiro. Os restantes custos nesta fase são residuais, já que o tanque é um componente relativamente barato (só necessita de água), tem pouca manutenção e não ocupa muito espaço, quando comparado com outros componentes. Neste caso, o custo associado ao consumível (representado a cor-de-laranja), é o custo da água.

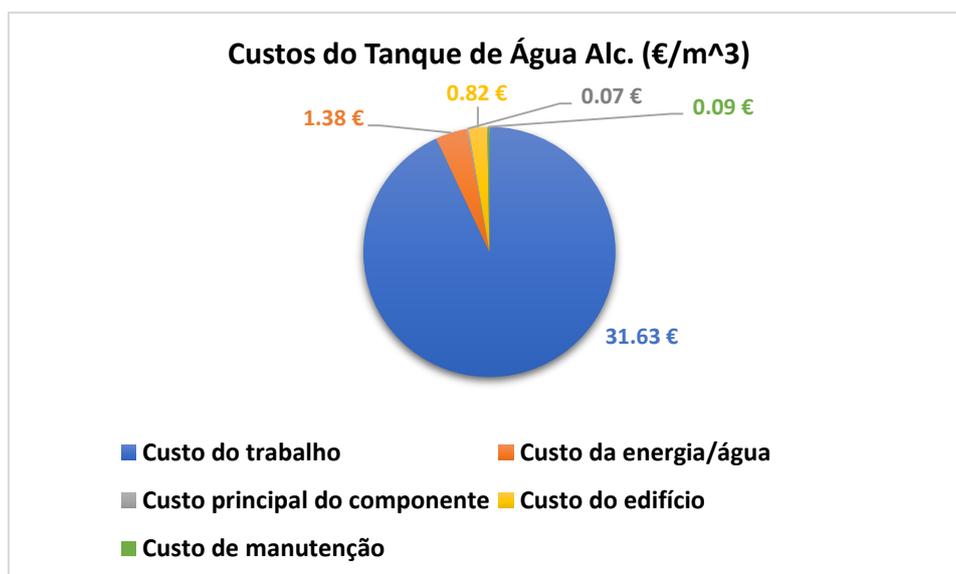


Figura 31 – Gráfico circular dos custos por metro cúbico do tanque de água no processo alcalino

Já o conjunto retificador/transformador tem um custo de edifício maior, com 3.61 €/m³, devido ao espaço que ocupa na fábrica. Mesmo assim, o maior custo é o do trabalho: 10.54 €/m³. A Figura 32 mostra o gráfico circular destes custos, em que o custo associado ao consumível (representado a cor-de-laranja), é o custo da energia.

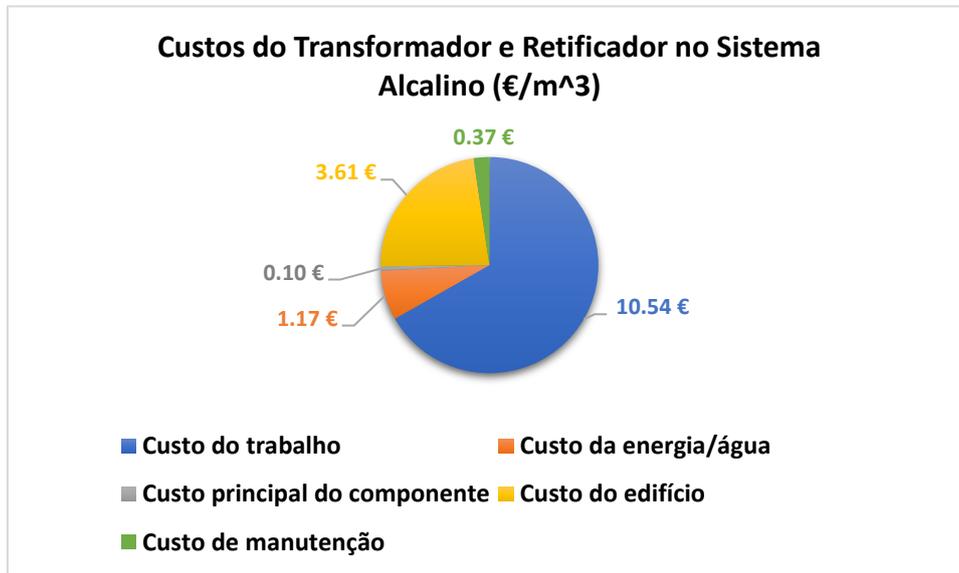


Figura 32 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do transformador e do retificador no processo alcalino

No sistema do eletrolisador alcalino, na fase 3, o custo principal está presente no próprio componente/máquina, representando 95.03 €/m³, já que é a fase mais importante, que é onde se vai obter o HV. O custo do trabalho também é significativo, com 36.90 €/m³, devido à quantidade de trabalhadores (dois) para esta fase do processo. Mais uma vez, o custo de edifício também corresponde a uma grande fatia no gráfico circular da Figura 33, pelo facto do eletrolisador ocupar muito espaço na fábrica, devido às suas dimensões. O custo de manutenção predomina em relação às fases anteriores, com um valor de 10.91 €/m³, porque é necessário que haja uma prevenção maior com uma máquina complexa como esta. Neste caso, o custo associado ao consumível (representado a cor-de-laranja), é o custo da energia.

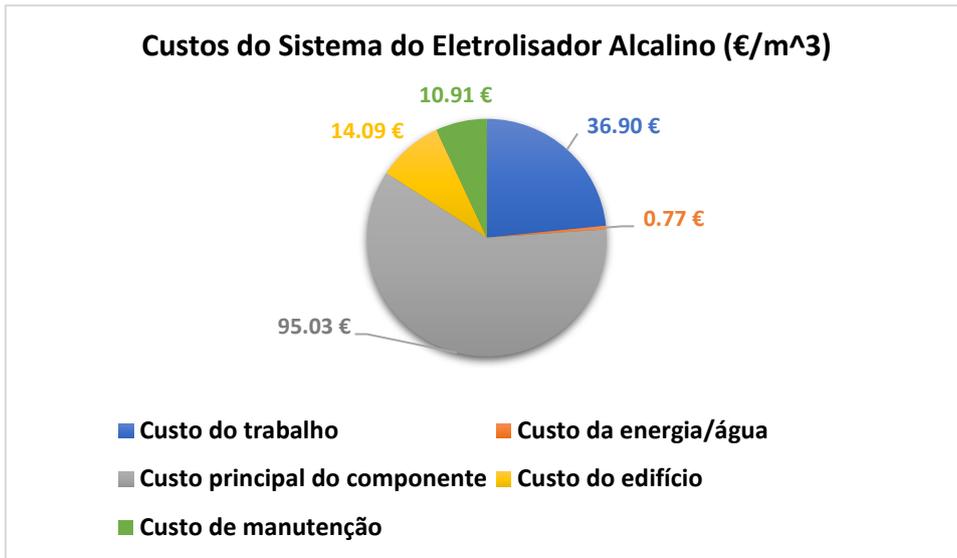


Figura 33 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do eletrolisador alcalino

Na fase 4, ou seja, no compressor, devido ao facto de ser uma máquina de passagem de hidrogénio entre o eletrolisador e o armazenamento (tanque de H₂), o maior custo reside no próprio componente, com 37.02 €/m³, mostrado na Figura 34. Em termos de dimensão, não causa grande impacto no custo de edifício e o custo do trabalho, como só necessita de um trabalhador, é reduzido: 7.91 €/m³. Neste caso, o custo associado ao consumível (representado a cor-de-laranja), é o custo da energia.

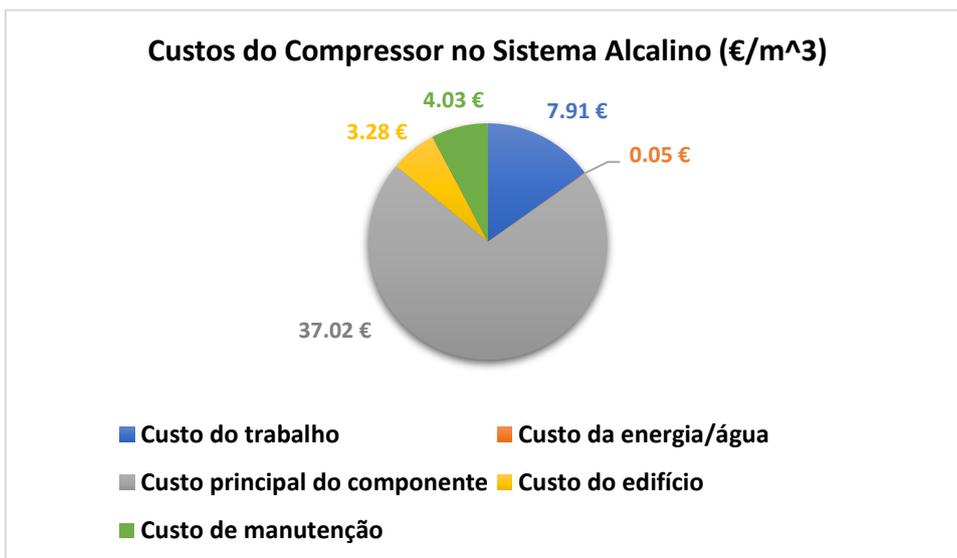


Figura 34 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do compressor do sistema alcalino

Na fase 5, em que o produto final está nos tanques de hidrogénio, somente o custo do trabalho é que é significativo, como se pode constatar na [Figura 35](#), com 26.36 €/m³. Mais uma vez, o reservatório não necessita praticamente de manutenção, por não possuir qualquer tipo de motor e o custo de edifício é também muito reduzido porque este tanque não ocupa um espaço excessivo, comparativamente com o eletrolisador. Neste caso, o custo associado ao consumível é zero, devido ao facto de não ser necessário mais nenhum consumo de energia ou água.

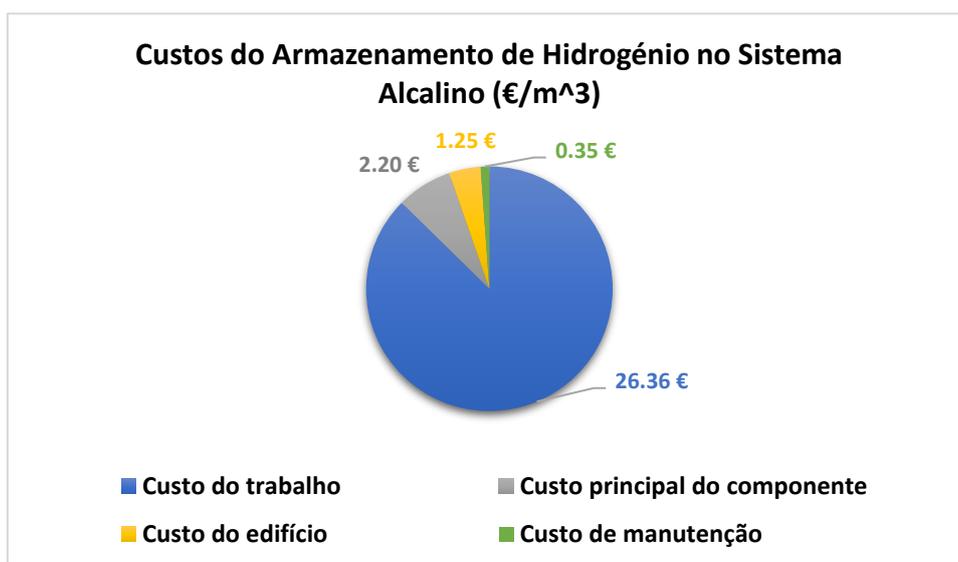


Figura 35 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do tanque de hidrogénio no processo alcalino

Como demonstra a [Figura 36](#), a fase do eletrolisador (fase 3) é a fase que causa mais impacto em cada um dos tipos de custo, sendo esta a máquina mais estudada e analisada nesta dissertação. O custo do edifício vai ser sempre influenciado pelo espaço ocupado por cada componente, em que, neste caso, é, mais uma vez, o eletrolisador alcalino. Para facilitar a compreensão do gráfico da [Figura 36](#), foram colocados individualmente os custos mínimos e máximos de cada uma das fases.

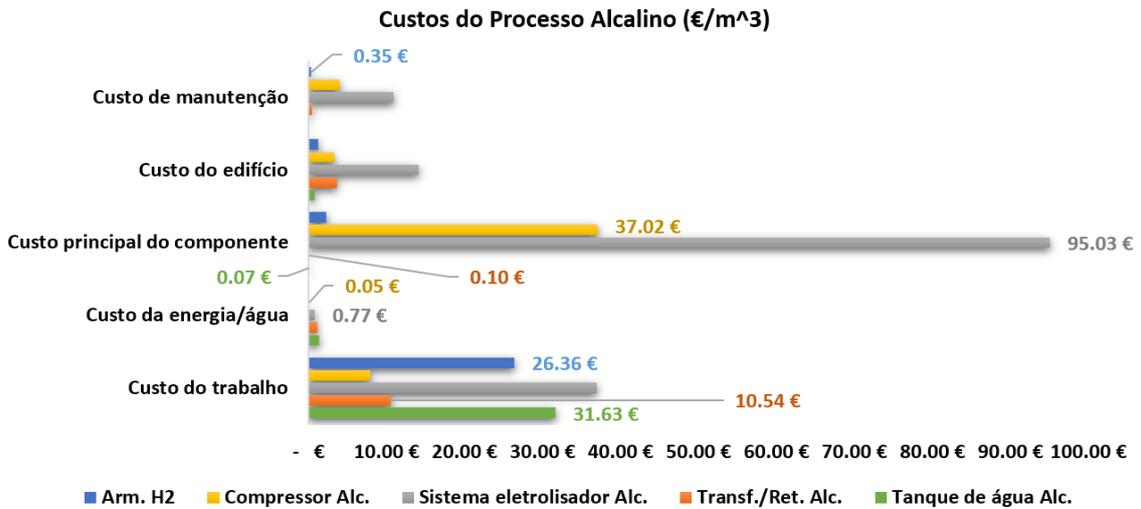


Figura 36 - Custos totais do processo alcalino (€/m³)

5.2. Análise dos Custos de Cada Fase do Processo PEM

Neste processo, para produzir HV através do eletrolisador PEM, o tanque de água possui um custo do trabalho associado de 5.06 €/m³, constituindo assim a maior fatia do gráfico circular apresentado na Figura 37, em que aqui são necessários dois trabalhadores. Os restantes custos nesta fase são reduzidos, já que o tanque de água é barato, tem pouca manutenção e não ocupa demasiado espaço, quando comparado com outros componentes. Neste caso, o custo associado ao consumível (representado a cor-de-laranja), é o custo da água.

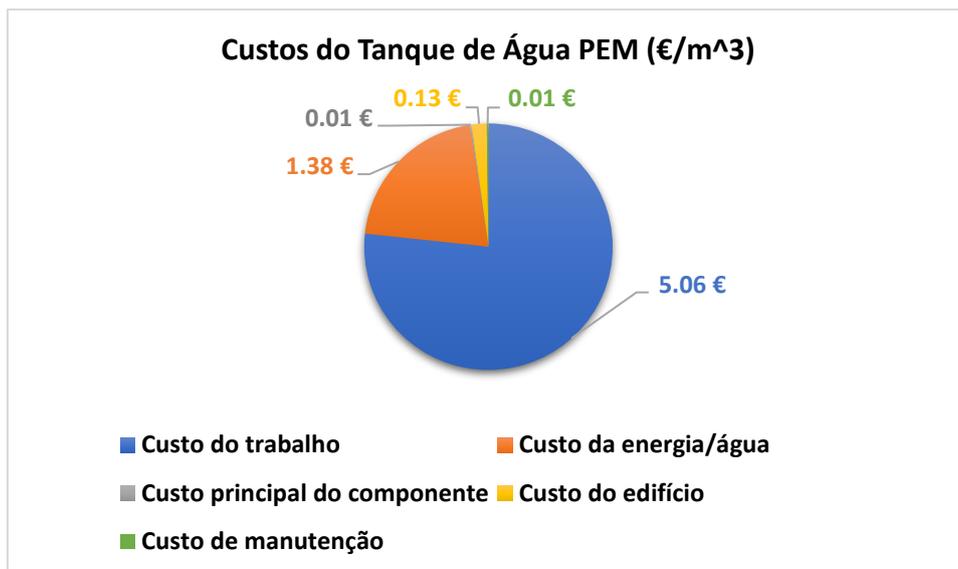


Figura 37 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do tanque de água no processo PEM

O retificador e o transformador têm um custo de trabalho de 1.69 €/m³, como mostra a Figura 38. Na secção 5.3 é explicado o porquê deste valor ser bastante mais reduzido que o mesmo valor para o processo alcalino. Neste caso, o custo associado ao consumível (representado a cor-de-laranja), é o custo da energia.

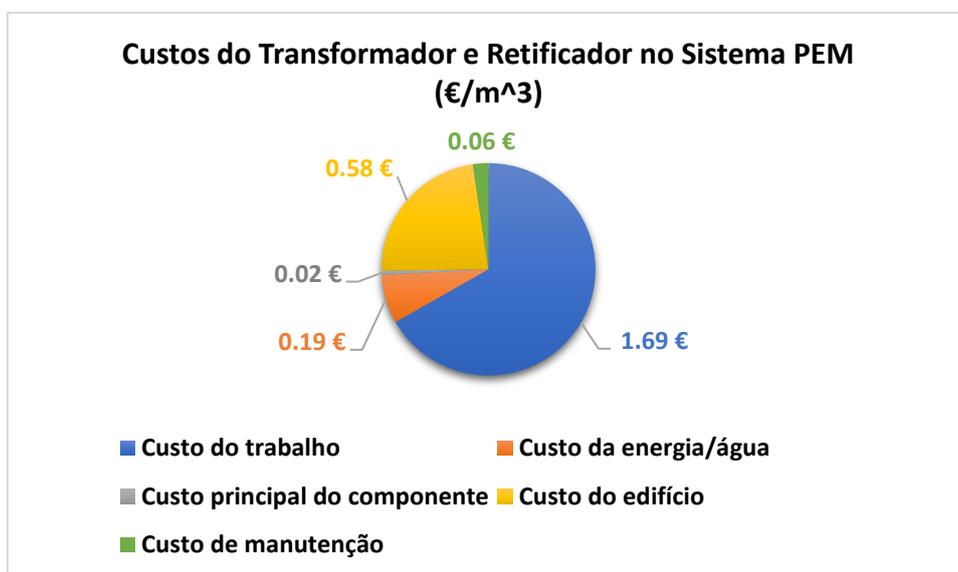


Figura 38 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do conjunto transformador/retificador no processo PEM

No sistema do eletrolisador PEM, na fase 3, o custo principal está presente no próprio componente/máquina, sendo de 17.94 €/m³, representado na Figura 39. Mais uma vez, na secção 5.3, é analisado como é que este último valor difere significativamente de uma tecnologia para outra. O custo do trabalho também é elevado, com 5.06 €/m³, devido à quantidade de trabalhadores (dois) para esta fase do processo. Desta vez, o custo de edifício representa um baixo valor, com 0.34 €/m³. O custo de manutenção predomina em relação às fases anteriores, com um valor de 1.83 €/m³, dado que é necessário que haja uma prevenção maior em relação a uma máquina complexa. Neste caso, o custo associado ao consumível (representado a cor-de-laranja), é o custo da energia.

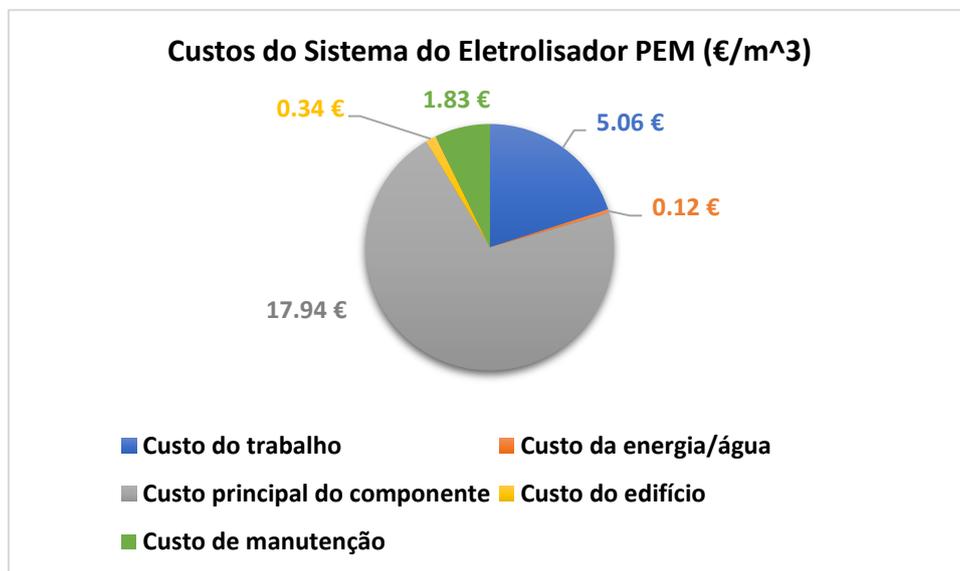


Figura 39 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do sistema do eletrolisador PEM

Na fase do compressor (fase 4), devido ao facto de ser uma máquina de passagem de hidrogénio entre o eletrolisador e o armazenamento (tanque de H₂), o maior custo reside no próprio componente, sendo de 5.00 €/m³, demonstrado na Figura 40. Em termos de dimensão, não causa grande impacto no custo de edifício e a nível do custo do trabalho, como só necessita de um trabalhador, permanece reduzido: 1.27 €/m³. Neste caso, o custo associado ao consumível (representado a cor-de-laranja), é o custo da energia.

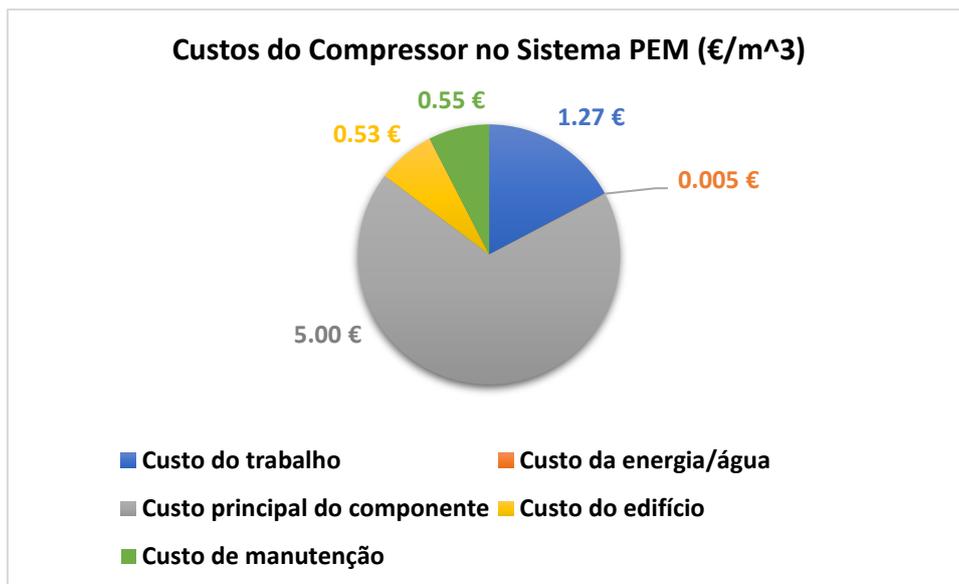


Figura 40 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do compressor no sistema PEM

Na última fase, em que o produto final está nos tanques de hidrogénio, somente o custo do trabalho é que é significativo, como se pode observar na [Figura 41](#)[Figura 35](#), com 4.22 €/m³. Mais uma vez, esta diferença abrupta para a tecnologia alcalina está explicada na secção 5.3. O reservatório não necessita praticamente de manutenção, por não possuir qualquer tipo de motor e o custo de edifício é também muito baixo porque este tanque não ocupa um espaço excessivo, comparativamente com o eletrolisador. Neste caso, o custo associado ao consumível é inexistente, devido ao facto de não ser necessário mais nenhum consumo de energia ou água.

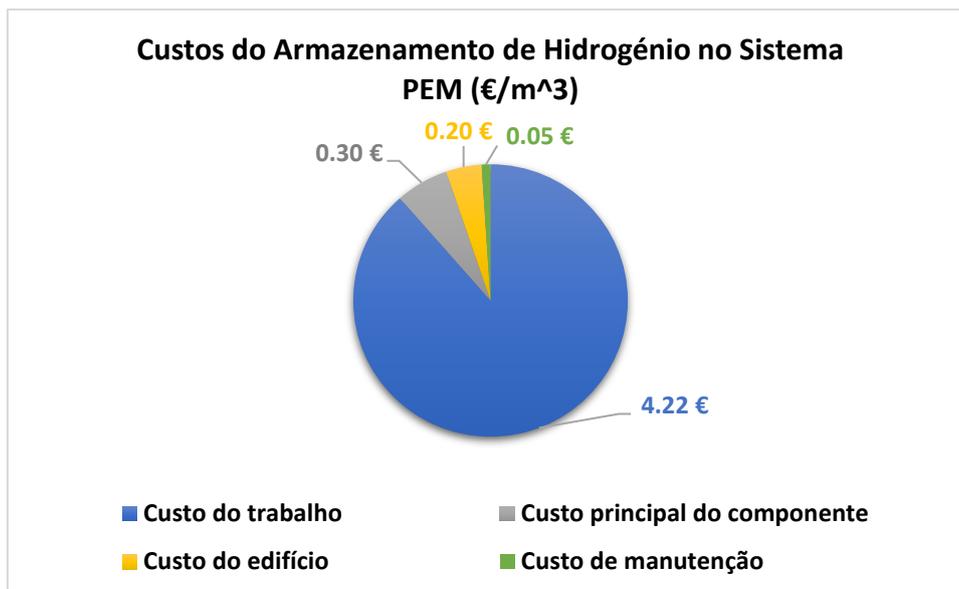


Figura 41 - Gráfico circular dos custos por metro cúbico do tanque de H₂ no processo PEM

No processo PEM, o sistema do próprio eletrolisador influencia em grande parte dois tipos de custo. Porém, no custo do edifício, é de notar que o eletrolisador não tem grande influência. Para facilitar a compreensão do gráfico da Figura 42, foram colocados individualmente os custos mínimos e máximos de cada uma das fases.

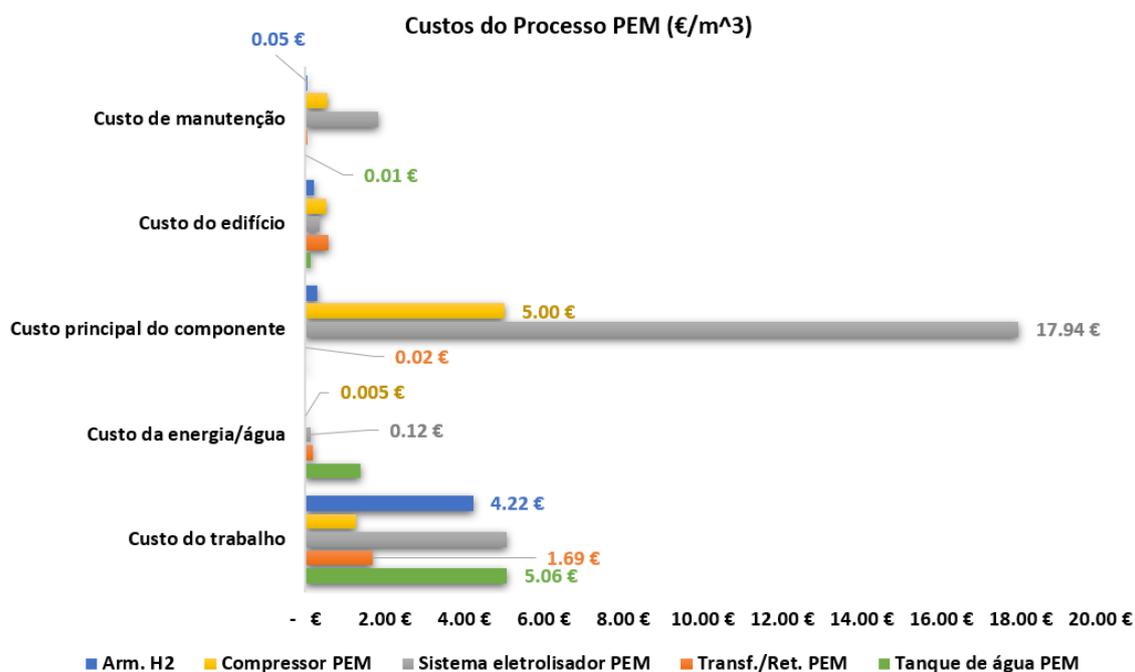


Figura 42 - Custos totais do processo PEM (€/m³)

5.3. Processo Alcalino VS. Processo PEM

Após analisar individualmente cada custo associado a cada uma das fases das duas tecnologias, é importante comparar uma com a outra. Assim, os dois gráficos das figuras Figura 43 e Figura 44 demonstram que existe uma discrepância entre o processo alcalino e o PEM em termos de custos. O processo alcalino tem um custo por metro cúbico bastante mais caro em relação ao processo PEM. Isto deve-se ao facto de o eletrolisador alcalino ser bastante maior do que o eletrolisador PEM, fazendo com que aumentem os valores dos custos do mesmo, aumentando conseqüentemente os outros custos. É por esta razão que o gráfico da Figura 43 tem a linha amarela dos custos de edifício acima da linha verde dos custos de manutenção no processo alcalino. Já na Figura 44, a linha amarela está abaixo da linha verde.

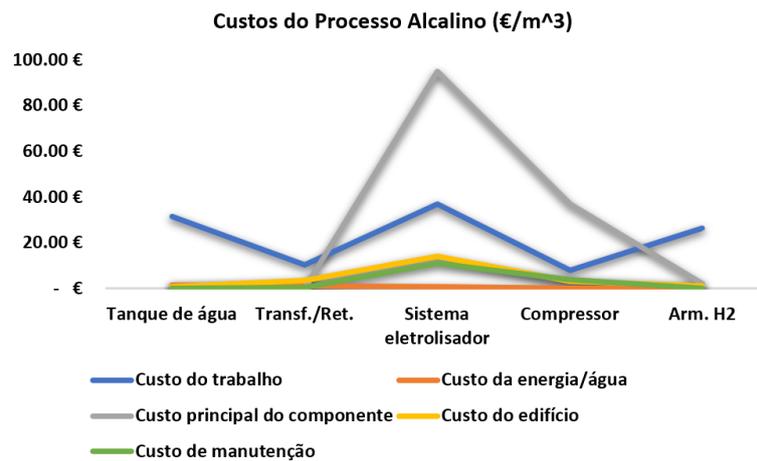


Figura 43 - Custos por metro cúbico do processo alcalino

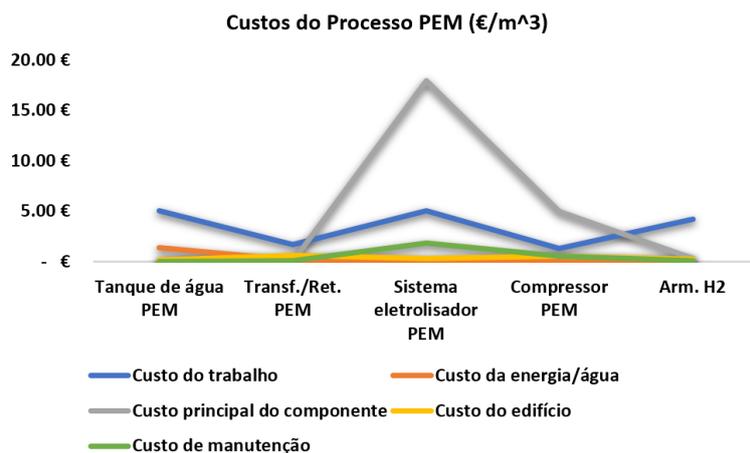


Figura 44 - Custos por metro cúbico do processo PEM

O estudo realizado no capítulo 4 mostrou que o custo total de fabricação e do processo do sistema alcalino é de 316 785.80 €/ano. Já no processo do eletrolisador PEM, este custo é de 317 657.84 €/ano. Apesar de este último valor ser ligeiramente maior do que o anterior, o custo por metro cúbico é maior no processo do sistema do eletrolisador alcalino.



Figura 45 - Custos totais por tipo de custo das tecnologias alcalina e PEM



Figura 46 - Custos totais por fase do processo das tecnologias alcalina e PEM

Os gráficos das figuras Figura 45 e Figura 46 mostram os custos totais por tipo de custo e os custos totais por fase, respetivamente.

6. Conclusão

Atualmente, as energias renováveis estão cada vez mais presentes no setor energético. Ainda assim, estas não estão desenvolvidas o suficiente de acordo com o seu potencial, tanto a nível energético, como a nível económico. Deste modo, o hidrogénio verde (HV) está habilitado para impulsionar o consumo de fontes renováveis, apesar desta tecnologia ainda não estar otimizada suficientemente. Para tentar contribuir para uma melhor compreensão deste paradigma, foi concebida uma ferramenta que permite analisar custos específicos envolvidos em fases diferentes.

6.1. Análise Conclusiva

Neste sentido, no presente trabalho foram estudadas duas alternativas de eletrolisadores para a produção de HV. Uma das alternativas foi o eletrolisador alcalino e a outra foi o eletrolisador PEM. Após a comparação destas duas tecnologias, através de um simulador e de uma ferramenta de custos, verificou-se que o eletrolisador alcalino tem de possuir uma fábrica com um tamanho significativo, fazendo com que também tenha um custo por metro cúbico elevado. Porém, o custo da própria fábrica e seus componentes é baixo, já que só produz uma quantidade de 1 092 m³ de HV por ano. No processo do eletrolisador PEM, a sua fábrica pode conter um tamanho bastante reduzido e um conseqüente custo por metro cúbico baixo. Contudo, como a produção de HV deste eletrolisador é de 6 825 m³/ano, o custo da fábrica e seus constituintes é ligeiramente mais elevado que a fábrica do eletrolisador alcalino. Esta diferença é de 872.04 € por ano de acordo com a ferramenta de cálculo utilizada.

Conseqüentemente, o custo do trabalho é bastante discrepante entre os dois processos, o que está de acordo com a análise teórica. Além disso, a água e a energia consumidas também dependem da dimensão de cada uma das fábricas, sendo que, neste caso, estes consumíveis são menos dispendiosos no processo PEM.

No caso em estudo, a tecnologia PEM demonstra ser mais eficiente, de acordo com o rácio produtividade/dimensão.

Foi possível a análise do funcionamento de um eletrolisador e os custos de manutenção não foram desprezados apesar de terem sido estimados como um valor fixo.

A ferramenta de cálculo é funcional e permite validar os valores teóricos. É também facilmente adaptável a outras produções de HV, bastando para tal alterar os campos dos valores variáveis. Assim, esta ferramenta é viável para fazer uma análise financeira de um processo de obtenção de HV através de um eletrolisador.

6.2. Trabalhos Futuros

Existem outros dois eletrolisadores pouco estudados nos dias de hoje: o eletrolisador *Anion Exchange Membrane* (AEM) e o eletrolisador de óxido de sólido. Sugere-se, deste modo, como trabalho futuro, a realização de um estudo económico comparativo relativo a estas duas tecnologias, recorrendo à ferramenta de cálculo e ao simulador utilizados nesta dissertação.

Bibliografia

Ángel Hernández-Gómez, V. R. (2020). *Investigation of PEM electrolyzer modeling*.

Cloete, S. (9 de Novembro de 2020). *energypost.eu*. Obtido de EnergyPost:
<https://energypost.eu/green-or-blue-hydrogen-cost-analysis-uncovers-which-is-best-for-the-hydrogen-economy/>

HyJack. (2021). *New Online Hydrogen Platform*. Obtido de Alexi Liedes:
<https://hyjack.tech/>

IEA. (2019). *The Future of Hydrogen - Seizing today's opportunities*.

IRENA. (2018). *Hydrogen from Renewable Power*.

John Turner, G. S.-C. (2007). Renewable hydrogen production. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*.

LNEG. (2020). *Fórum Energias Renováveis em Portugal 2020*. Hélder Gonçalves, Teresa Ponce de Leão.

M. Heitsch, D. B. (2010). *Numerical investigations on the fast filling of hydrogen tanks*.

Merit Bodner, A. H. (2014). *H2 Generation from Alkaline*.

Ministros, C. d. (2020). Resolução do Conselho de Ministros n.º 63/2020. *Diário da República*.

Nel. (2021). *Atmospheric Alkaline Electrolyser*. Obtido de Nel:
<https://nelhydrogen.com/product/atmospheric-alkaline-electrolyser-a-series/>

Nel. (2021). *Containerized PEM Electrolyser*. Obtido de Nel:
<https://nelhydrogen.com/product/m-series-containerized/>

Real Engineering. (2018, Julho 27). *The Truth About Hydrogen*.

SIC Notícias. (4 de Fevereiro de 2021). Hidrogénio Verde, o desafio. "*Hidrogénio verde, o desafio*". *Hoje no Jornal da Noite*.

Storengy. (2019). *Our References*. Obtido de Storengy.

Undertaking, J. (2017). *Fuell Cells and Hydrogen*.