

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

AVALIAÇÃO TÉCNICA DE TECNOLOGIAS DE ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO RENOVÁVEL

André Faria Quesado



Mestrado em Engenharia Mecânica

Supervisor: Prof. Eliseu Monteiro ; Dr. Lucas Marcon

29 de julho de 2024

AVALIAÇÃO TÉCNICA DE TECNOLOGIAS DE ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO RENOVÁVEL

André Faria Quesado

Mestrado em Engenharia Mecânica

29 de julho de 2024

Abstract

Hydrogen is playing an increasingly important role as an energy vector in the industry's efforts to decarbonise and can be produced using multiple methods and various technologies. This study aims to create a mathematical model, based on various criteria, to evaluate different green hydrogen production technologies using various economic and operational metrics in order to determine which of the various solutions best fulfils the requirements of the metrics under study. To this end, a survey of the typical operating values of the solutions available on the market was carried out with various suppliers of this type of technology. Once the data had been collected, it was summarised and incorporated into the comparison matrix, thus enabling the various solutions to be compared in multiple scenarios. The values resulting from this evaluation were then compared with the existing literature on the subject, in order to identify any discrepancies and realise their origin, in relation to the results obtained. With this research, the author concluded that in terms of purchase cost, alkaline solutions stand out as the most competitive on the market, but they are also the most expensive operationally and have a lower efficiency rate than the others. In terms of technological readiness, the best offer is provided by PEM-type solutions. However, it is important to note that the most suitable solution always varies according to the most relevant metric.

Keywords:Hydrogen, Alkaline, PEM, Criteria

Resumo

O hidrogénio desempenha um papel cada vez mais importante como vetor energético nos esforços da indústria para a descarbonização, podendo ser produzido utilizando múltiplos métodos e várias tecnologias. Este estudo tem como objetivo criar um modelo matemático, baseado em vários critérios, para avaliar as diferentes tecnologias de produção de hidrogénio verde, através de várias métricas económicas e operacionais de forma a determinar qual das várias soluções responde melhor aos requisitos da métrica em estudo. Para tal, foi efetuado um levantamento dos valores operacionais típicos das soluções disponíveis no mercado, junto de vários fornecedores deste tipo de tecnologia. Após a recolha dos dados, os mesmos foram sintetizados e incorporados na matriz de comparação, permitindo assim equiparar as várias soluções em múltiplos cenários. Os valores resultantes desta avaliação foram depois comparados com a literatura existente sobre o tema, de forma a identificar eventuais discrepâncias e perceber a sua origem, em relação aos resultados obtidos. Com a presente investigação, o autor concluiu que a nível de custo de aquisição, destacam-se as soluções alcalinas como as mais competitivas no mercado, contudo, são também as mais dispendiosas a nível operacional e apresentam uma taxa de eficiência inferior às demais. No que diz respeito ao nível de prontidão tecnológica, a melhor oferta é proporcionada pelas soluções do tipo PEM. No entanto, é importante notar que a solução mais adequada varia sempre de acordo com a métrica mais relevante.

Palavra-Chave: Hidrogénio, Alcalino, PEM, Matriz, Critérios

Agradecimentos

Ao Professor Eliseu Monteiro e ao Doutor Lucas Marcon um forte agradecimento pela orientação e ajuda na realização deste trabalho.

Aos meus pais, que tudo fizeram em prol do meu percurso académico e pessoal. O que hoje sou é senão reflexo deles e todo o sucesso por mim atingido foi, em parte, construído por eles. À minha irmã, que foi a amiga e companheira que nunca escolhi e, no entanto, sempre se revelou presente e atenta. A ti Rosária, pelo alento e companhia que me deste em todos os dias. O caminho foi mais fácil graças a ti.

André Faria Quesado

*“The greatest knowledge one can have”
is truly about the limits of himself”*

Ayrton Senna

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Contextualização do Tema	1
1.2	Enquadramento	1
1.3	Motivação e Objetivos	2
1.4	Estrutura do Estudo	2
2	Estado de Arte	5
2.1	Hidrogénio como vetor energético	5
2.1.1	Hidrogénio	5
2.1.2	Propriedades do hidrogénio	5
2.1.3	Hidrogénio como vetor energético	7
2.1.4	Escala TRL	8
2.2	Meios de produção de hidrogénio	10
2.2.1	Classificações do hidrogénio	15
2.3	Meios de produção de hidrogénio verde	17
2.3.1	Princípio de base	17
2.3.2	Sistemas Alcalinos	18
2.3.3	Sistemas PEM	20
2.3.4	Sistemas SOEC	22
2.4	Comparação entre sistemas alcalino e PEM	22
2.5	Norma ISO 14687	24
2.6	Projetos de exploração de hidrogénio	25
2.7	Modelos de avaliação	26
3	Metodologia	31
3.1	Critérios de avaliação e relevância relativa	32
3.1.1	Capacidade de produção Nominal-PN	32
3.1.2	Pressão de saída do Hidrogénio-P	33
3.1.3	CAPEX	33
3.1.4	Opex	33
3.1.5	Emissões de CO_2 evitadas durante o ano-eCO ₂ /y	34
3.1.6	Implementação no mercado - IP	35
3.1.7	Vida útil do equipamento - VU	35
3.1.8	Nível de TRL - TRL	35
3.1.9	Eficiência - EF	36
3.1.10	Vários cenários em estudo	36
3.2	Obtenção de valores e entradas na matriz	37
3.3	Construção e normalização da matriz	39

3.3.1	Aplicação do modelo para uma primeira iteração	39
3.4	Construção da matriz final	41
4	Resultados e discussão	43
4.1	Apresentação	43
4.2	Resumo dos resultados obtidos	43
4.3	Comparação com a literatura e justificação das diferenças	46
4.3.1	Justificação das diferenças	51
5	Conclusões e Trabalhos futuros	53
5.1	Conclusões	53
5.2	Limitações e trabalhos futuros	54
	Referências	55
A	Metodologia CMPO	61

Lista de Figuras

2.1	Digrama de fases do H_2 [6]. [7]	6
2.2	Cores do Hidrogénio - [41].	17
2.3	Esquema de funcionamento de um eletrolisador alcalino - [43].	19
2.4	Esquema de funcionamento de um eletrolisador PEM - [44].	20
2.5	Esquema de constituição de um eletrolisador PEM - [44].	21
2.6	Vantagens e desvantagens das Tecnologias PEM e alcalinas - [43] [19]	23
2.7	Categorias da Norma ISO 14687 - [49]	25
3.1	Modelo proposto [68].	32

Lista de Tabelas

2.1	Resumo das propriedades termofísicas do hidrogénio [8] [6] [9]	6
2.2	Energia por unidade de massa de vários combustíveis [10] [11] [12]	7
2.3	Processos de síntese de hidrogénio com recursos fósseis	12
2.4	Processos de síntese de hidrogenio com recurso a recursos alternativos	13
2.5	materiais típicos utilizados nos electrolisadores alcalinos [45]	19
2.6	Comparação das condições operacionais de sistemas alcalinos e PEM [44]	24
2.7	Empresas fornecedoras de electrolisadores	26
2.8	Exemplo do modelo de tomada de decisão por atributos múltiplos	27
2.9	Exemplo da sequência ideal do modelo RAC	27
3.1	CO ₂ emitido na queima de vários combustíveis convencionais [70][71][72]	35
3.2	Distribuição dos pesos ponderados mediante os cenários	36
3.3	Empresas contactadas para o estudo	37
3.4	Acrônimo e tipo dos vários eletrolisadores usados	37
3.5	Valores recolhidos para os vários electrolisadores	38
3.6	Exemplo de construção da matriz de comparação	39
3.7	Aplicação do método de avaliação para a solução GTS200	40
3.8	Matriz aplicada para os vários cenários	41
4.1	Pontuação final de cada solução	43
4.2	Síntese de resultados obtidos	45
4.3	Revisão bibliográfica-1	47
4.4	Revisão bibliográfica-2	48
4.5	Revisão bibliográfica-3	49
4.6	Revisão bibliográfica-4	50
A.1	Metodologia CMPO - 1	62
A.2	Metodologia CMPO - 2	62

Acrónimos

CAPEX	Despesa Capital
CMPO	Cálculo da média ponderada ordenada
COPRAS	COmplex PROportional ASsessment
ELECTRE	ELimination Et Choix Traduisant la REalité
eCO ₂ /y	Emissões de CO ₂ evitadas durante o ano
EF	Eficiência
GEE	Gases de efeito de estufa
IP	Implementação no mercado
ISO	International Organization for Standardization
OPEX	Custos operacionais
P	Pressão de saída do hidrogénio
PEM	Proton exchange membrane - Membrana permutadora de protões
PN	Produção Nominal
POX	Partial Oxidation - Oxidação Parcial
PPM	Partes por Milhão
RAC	Relação Analítica Cinzenta
TRL	Technology Readiness Level - Nível de prontidão tecnológica
SMR	Steam Methane Reforming - Reforma de metano a vapor
SOEC	Solid oxide electrolyzer cells
VU	Vida útil do equipamento

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização do Tema

Face aos constantes esforços, no sentido da descarbonização, novas fontes de energia verde são necessárias para diminuir, ou até mesmo abandonar, a utilização de combustíveis fósseis. Embora este papel tenha vindo a ser desempenhado de forma preponderante pelas energias renováveis, estas padecem de algumas limitações, sendo uma delas a dificuldade de armazenamento em momentos de excedente da mesma. O hidrogénio surge como solução para esta limitação, permitindo que o remanescente elétrico possa vir a ser utilizado para produção desta matéria-prima de modo a poder armazená-la para uso posterior. Existem vários meios de obtenção desta matéria-prima, sendo que dos mesmos, apenas alguns podem tirar proveito do excedente energético originado pelas energias renováveis, sendo esses os principais alvos desta investigação. Com inúmeros projetos e apoios para a produção desta matéria-prima, a indústria de produção de hidrogénio verde apresenta-se numa fase crescente. Estes em projetos de produção de hidrogénio verde, que apenas no ano de 2024 chegaram aos 70 milhões de euros, fornecidos pelo Plano de Recuperação e Resiliência, visam auxiliar o crescimento da indústria do hidrogénio verde [1]. Com várias tecnologias de produção de hidrogénio e diferentes empresas especializadas na exploração desta matéria-prima, surge como relevante a criação de ferramentas que permitam uma avaliação das várias soluções, de modo a facultar a eventuais clientes, investigadores ou demais interessados, auxílio na tomada de decisão acerca da solução de produção de hidrogénio que devem adotar.

1.2 Enquadramento

Este estudo foi realizado sob orientação do Professor Eliseu Monteiro e do Doutor Lucas Marcon, em parceria com o INEGI (Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial), empresa que tem como principal objetivo a realização de investigação técnica, transferência de tecnologia, consultoria, com vista ao progresso industrial e económico.

1.3 Motivação e Objetivos

Este estudo surge como meio de comparação de várias soluções de eletrólise, por forma a facultar uma compreensão acerca das soluções que permitem uma exploração mais otimizada deste produto, em múltiplos cenários, que salvaguardam todas as diferentes métricas como principal foco de estudo. Os resultados obtidos facultarão uma perspetiva do estado da indústria, não obstante serão por fim comparados com a literatura existente no tópico, de modo a verificar se estão em linha, ou não, com a mesma e perceber eventuais discrepâncias. Os principais objetivos do presente estudo são:

- **Enquadramento bibliográfico**

Facultar uma revisão bibliográfica relativa ao hidrogénio, às suas propriedades, meios de exploração, classificações possíveis e modelos matemáticos que podem vir a ser usados para a elaboração deste estudo;

- **Criação do modelo matemático**

Criação de um modelo matemático que visa avaliar as várias alternativas em estudo, em diversos cenários, de modo a facultar uma perspetiva sobre a que melhor desempenho apresenta, em cada um desses cenários;

- **Recolha de informação junto de fornecedores**

Contacto com várias empresas fornecedoras de soluções de produção de hidrogénio, com o intuito de recolher informações relacionadas com os valores mais relevantes das suas soluções;

- **Análise e comparação**

Comparar os resultados obtidos pelo presente estudo, com os existentes na literatura, de modo a constatar eventuais similaridades e discrepâncias, bem como justificar a origem das mesmas.

1.4 Estrutura do Estudo

O presente estudo divide-se em 5 capítulos, a saber:

- **Capítulo 1 - Introdução**

Apresenta um breve panorama sobre o contexto do hidrogénio como vetor energético. Expõe ainda um enquadramento deste estudo e descreve as principais motivações e objetivos do mesmo;

- **Capítulo 2 - Estado de arte**

É feita uma revisão bibliográfica sobre o hidrogénio, as suas propriedades, meios de produção, classificações, as tecnologias de eletrólise, escala de maturidade para tecnologias e avaliação de modelos matemáticos para tomada de decisão;

- **Capítulo 3 - Metodologia**

É descrito o método utilizado para a elaboração do presente estudo, bem como o processo de recolha de dados a ser utilizado para a obtenção de resultados;

- **Capítulo 4 - Resultados e discussão**

Os resultados do presente estudo são expostos e comparados, com a literatura inerente a esta área, de modo a ser feito um levantamento de divergências, bem como uma justificação das mesmas;

- **Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos Futuros**

São apresentadas as conclusões do presente estudo, bem como expostas as limitações que foram encontradas ao longo da realização do mesmo. São ainda sugeridos trabalhos futuros que visam a continuação desta dissertação.

Capítulo 2

Estado de Arte

2.1 Hidrogénio como vetor energético

2.1.1 Hidrogénio

Denominado por Antoine Lavoisier (1743–1794) em 1783 o hidrogénio é o elemento químico mais leve e, simultaneamente, mais abundante do universo conhecido, constituindo 75 % da matéria normal em massa, sendo também o terceiro elemento mais abundante na superfície da Terra [2].

Definido pelo símbolo químico H , apresenta um eletrão e um protão que o coloca no grupo 1 da tabela periódica. A nível molecular, o hidrogénio apresenta uma molécula constituída por 2 átomos ligados entre si, através da partilha de um eletrão de valência por meio de uma ligação covalente ¹, com uma energia de ligação de cerca de 434 kJ/mol, resultando na espécie química de símbolo atómico H_2 [3].

Embora sendo o elemento mais comum do universo a molécula de di-hidrogénio é de extrema raridade na atmosfera terrestre, apresentando uma concentração na mesma de cerca de 1 ppm (Partes por milhão). Este facto advém do seu peso reduzido permitir escapar à gravidade terrestre [4].

2.1.2 Propriedades do hidrogénio

Em condições de 1 atm e 25 °C apresenta-se como um gás incolor, inodoro, não tóxico e altamente inflamável, de massa molar 2,01 g/mol, uma estrutura di-atómica [5].

O hidrogénio gasoso tem pontos de fusão e de ebulição extremamente baixos (-259,2°C e -252,8°C respetivamente) devido às fracas forças de atração entre as moléculas. Quando o hidrogénio gasoso transita de alta para baixa pressão à temperatura ambiente, a sua temperatura aumenta, ao contrário da maioria dos outros gases. Isto deve-se ao facto de as forças de repulsão

¹Ligação Covalente-caracterizada pela partilha de eletrões entre átomos, resultando numa atração mútua que mantém a molécula formada unida. Estas ligações são mais fortes do que as interações intermoleculares e são comparáveis às ligações iónicas. Ocorrem entre átomos com eletronegatividade semelhante, são extremamente orientadas apresentando por isso uma gama limitada de formas e ângulos de ligação.

excederem as forças de atração entre as moléculas de hidrogénio, fazendo com que o hidrogénio arrefeça. Este efeito de arrefecimento é utilizado para atingir a temperatura de liquefação do hidrogénio gasoso.

A Figura 2.1 demonstra o diagrama de fases do hidrogénio que representa a variação dos estados do elemento, mediante os vários valores de temperatura e pressão.

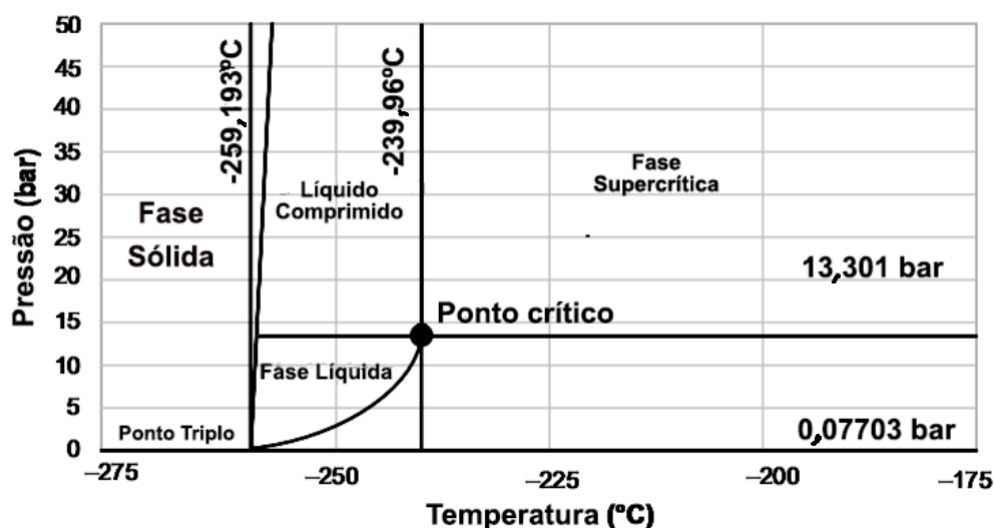


Figura 2.1: Diagrama de fases do H_2 [6]. [7]

A Tabela 2.1 resume as principais propriedades termofísicas do hidrogénio.

Tabela 2.1: Resumo das propriedades termofísicas do hidrogénio [8] [6] [9]

Propriedade	Valor
Volume específico (m^3/kg)	12,1
Densidade do líquido à pressão atmosférica (kg/m^3)	71,0
Viscosidade absoluta (centipoises)	0,009
Calor específico, C_p ($kJ/kg \cdot K$)	14,310
Rácio de calor específico, CMG,	1,405
Constante de gás, R ($kJ/kg \cdot oc$)	4,126
Condutividade térmica ($W/m \cdot oc$)	0,182
Ponto de ebulição-pressão de saturação 1 atm	20,4
Calor latente de evaporação no ponto de ebulição (kJ/kg)	447
Ponto de fusão a 1 atm (oc)	-259,1
Calor latente de fusão (J/kg)	58000
Temperatura crítica (oc)	-240,0
Pressão crítica (MN/m^2)	1,30
Volume crítico (m^3/kg)	0,033
Calor de combustão (kJ/kg)	144000

Analisar as propriedades termofísicas do hidrogénio, bem como interpretar o seu diagrama de fases, revela propriedades básicas que têm uma influência imediata na sua utilização como vetor energético. Em termos de armazenamento e transporte, o hidrogénio apresenta problemas especiais devido à sua baixa densidade. Uma compreensão completa do diagrama de fases do hidrogénio é essencial para maximizar os procedimentos de manuseamento e liquefação, a vários níveis de pressão e temperatura. Uma maior exploração das qualidades termofísicas promove a inovação na combustão, nos sistemas de refrigeração e noutras utilizações industriais, realçando assim o papel crítico que o hidrogénio desempenha na mudança para uma matriz energética mais sustentável e limpa.

2.1.3 Hidrogénio como vetor energético

Devido à preponderante intenção de abandono dos combustíveis fósseis, por motivos relacionados com as alterações climáticas, a importância do hidrogénio como vetor energético surge redobrada no paradigma energético mundial.

Vários setores industriais necessitam de elevada quantidade de energia térmica, não compatíveis com a eletrificação, sendo por isso necessário, a queima de um combustível que permita obter as elevadas temperaturas necessárias. O seu elevado potencial calorífico, comparado com os demais combustíveis tradicionais, coloca-o numa posição de interesse para cumprir este papel, aliado à sua cada vez mais acessível capacidade de produção e armazenamento, bem como à variabilidade de tecnologias existentes para o efeito. A Tabela 2.2 corrobora esta informação apresentando os valores de potencial calorífico de diferentes combustíveis.

Tabela 2.2: Energia por unidade de massa de vários combustíveis [10] [11] [12]

Combustível	Energia por unidade de massa (MJ/kg)
Hidrogénio	144
Metano	50-55
Methanol	22,7
Dimetil	29
Gasolina	44-46
Diesel	42-46
Crude	42-47
Gás Natural	42-55
Carvão	23.9
Madeira	18

Capaz de ser produzido em momentos de excedente energético por fontes renováveis, com zero emissões de gases de efeito de estufa, o hidrogénio visa colmatar dificuldades no armazenamento do excedente proveniente das fontes renováveis, que tem vindo a ser um obstáculo recorrente na exploração destas novas fontes de energia [13].

Relativamente ao seu potencial calorífico, o hidrogénio molecular evidencia, entre os combustíveis convencionais, o maior valor de energia por unidade de massa, sendo este valor, aproximadamente, o triplo do valor da gasolina.

2.1.4 Escala TRL

Antes de qualquer discussão sobre os meios de produção de hidrogénio, é necessário explicar o conceito de "Technology Readiness Level"(TRL) ou o nível de maturidade tecnológica. É uma escala numérica que descreve o nível de desenvolvimento de uma determinada tecnologia. No contexto da exploração do hidrogénio, esta classificação é relevante devido ao carácter recente de algumas das soluções para a produção desta matéria-prima. Esta escala foi desenvolvida pela NASA (National Aeronautics and Space Administration), no âmbito do seu planeamento de programas espaciais, para determinar as tecnologias que podem, ou não, ser utilizadas. É composta por nove níveis, em que cada um correspondente a um diferente grau de desenvolvimento tecnológico [14] [15]:

- **Nível 1- Princípios básicos observados e comunicados**

O nível mais baixo de maturidade de uma tecnologia, corresponde apenas ao início da pesquisa do seu desenvolvimento. Estudos e princípios básicos acerca de uma tecnologia são exemplos deste nível de maturidade.

- **Nível 2-Conceito e/ou aplicação da tecnologia formulada**

Uma vez provadas em estudos prévios, as tecnologias são postas em prática com testes que visam verificar a viabilidade dos princípios dos estudos anteriores. A este nível, a demonstração ainda é meramente especulativa e não suporta qualquer evidencia que corrobore uma eventual conjectura.

- **Nível 3- Função crítica analítica e experimental e/ou prova de conceito**

Neste nível de desenvolvimento da pesquisa, as tecnologias passam então a testes laboratoriais concretos que visam ensaiar a viabilidade prática, não só dos conceitos, como no nível anterior, mas das tecnologias em si, verificando assim se as previsões analíticas anteriores estão corretas.

- **Nível 4-Validação de componentes/subsistemas em ambiente laboratorial**

Após uma verificação conceptual com resultados concretos que corroborem as previsões relativas a elementos individuais, estes são unidos de modo a verificar se a sua implementação conjunta corresponde aos resultados obtidos previamente.

- **Nível 5-Validação do sistema/subsistema/componente no ambiente controlado**

A tecnologia é então implementada através de um processo de prototipagem exaustiva que visa integrar as tecnologias num meio mais realista. Este processo é ainda ilustrativo, dado que a prototipagem é feita a uma pequena escala.

- **Nível 6-Demonstração de modelos ou protótipos de sistemas**

Neste nível, fazem-se implementações de protótipos em problemas reais, que são parcialmente integrados com sistemas já existentes, visando demonstrar a viabilidade do sistema numa situação real.

- **Nível 7-Demonstração de protótipos de sistemas num ambiente operacional**

A prototipagem passa então a um modelo operacional que visa testar se a tecnologia tem capacidade de cumprimento das funções a que se compromete, através de uma operação próxima da real.

- **Nível 8-Sistema real concluído e qualificado**

Fase final dos testes e início da implementação da tecnologia que é posta em prática numa escala real, com o intuito de produção de energia a uma larga escala.

- **Nível 9- Sistema real comprovado através de operações bem efetuadas**

Neste nível, encontram-se as tecnologias já integradas no mercado com modelos completamente desenvolvidos e com provas dadas de funcionalidade e resultados práticos, que corroboram as capacidades das mesmas.

2.2 Meios de produção de hidrogénio

Devido à sua elevada procura no novo paradigma da indústria energética, os meios de produção de hidrogénio são vários e de diferentes tipos. Podem ser divididos, tendo por base as fontes de energias utilizadas, as emissões resultantes e as necessidades energéticas/caloríficas. As principais tecnologias de aquisição de hidrogénio são:

As principais tecnologias de aquisição de hidrogénio são :

- **Reforma de metano a vapor**

A reforma de hidrocarbonetos é a conversão de hidrocarbonetos combustíveis em hidrogénio, utilizando várias técnicas. Envolve a reforma a vapor, oxidação parcial e reações autotérmicas.

- **Pirólise de hidrocarbonetos**

A pirólise de hidrocarbonetos utiliza os hidrocarbonetos para produzir hidrogénio através da decomposição térmica. A decomposição termo-catalítica decorrente de hidrocarbonetos líquidos leves, produz carbono elementar e hidrogénio. Para as frações residuais pesadas, o hidrogénio é gerado através da hidrogasificação e quebra do metano.

- **Tecnologias termoquímicas de tratamento de gases de biomassa**

Os processos termoquímicos de transformação de gases resultantes da queima de biomassa, baseiam-se essencialmente na gasificação e pirólise em que os gases anteriormente mencionados são processados, de modo a obter hidrogénio ou gases ricos em hidrogénio. Outros processos que também se enquadram nesta categoria são a combustão e liquefação, ainda que menos utilizados.

- **Tecnologias bioquímicas de tratamento de gases de biomassa**

Devido à preocupação com o desenvolvimento sustentável e a minimização de resíduos, a produção biológica de hidrogénio tem vindo a crescer. Os principais processos biológicos utilizados para a produção de hidrogénio gasoso incluem a bio fotólise direta e indireta, a foto fermentação e a fermentação escura. O bio hidrogénio é produzido com recurso a bactérias e algas presentes na água, através de processos de hidrogenase ou da nitrogenase nos sistemas enzimáticos. A bio fotólise adapta os princípios encontrados na fotossíntese das plantas e das algas para gerar hidrogénio. As plantas e algas podem dividir as moléculas de água em iões de hidrogénio e oxigénio através da bio fotólise direta e indireta.

- **Eletrolise**

Método eficaz de separação da molécula de água, que consiste na utilização de um eletrodo fazer passar uma corrente elétrica contínua, entre um ânodo e cátodo, de modo a provocar a dissociação da molécula de hidrogénio em hidrogénios e oxigénio.

- **Termólise**

É o processo segundo o qual a água é separada à altas temperaturas (acima dos 2500 °C) em oxigénio e hidrogénio. Devido à elevada temperatura associada a este método, uma série de procedimentos termoquímicos tem vindo a ser implementada, de modo a diminuir a sua temperatura, tornando-o mais eficiente.

- **Foto-eletrólise**

Novos métodos que surgem na sequência do aproveitamento das novas fontes renováveis como a energia solar, utilizam a mesma para, com recurso a foto-catalisadores, decomporem a água em hidrogénio e oxigénio. Já na foto-eletrólise, a luz solar é absorvida através de alguns materiais semicondutores e o processo de separação da água é semelhante ao da eletrólise.

As Tabelas 2.3 a 2.4 resumem as principais características das várias metodologias de produção de hidrogénio:

Tabela 2.3: Processos de síntese de hidrogénio com recursos fósseis

Método de produção de hidrogénio	Fonte de energia	Emissões	Vantagens	Desvantagens	Nível de TRL	Temperaturas de operação °C	Referências
Reformação de Vapor	Combustíveis fósseis	CO_2	Tecnologia bastante desenvolvida e alicerçada na indústria	Emissões nocivas de gases de efeitos de estufa. Um processo complexo com elevado consumo de energia e necessidade de altas temperaturas e pressões.	9	700-900	[16] [17] [18]
Pirólise de hidrocarbonetos	Combustíveis fósseis	CO_2	Potencial de produção de hidrogénio a custos similares aos da reformação de vapor ,mantendo emissões quase nulas	Tecnologia muito precoce	3-5	300-900	[16] [19] [17] [20]
Oxidação parcial	Combustíveis fósseis	CO_2	Redução nos custos dos materiais Tempos de arranque mais reduzidos e um menor risco na formação de nitratos	Risco de produção de gases indesejados Necessidades caloríficas mais elevadas que a transformação de vapores	5	800-1000	[21] [22] [23] [24]

Tabela 2.4: Processos de síntese de hidrogenio com recurso a recursos alternativos

Método de produção de hidrogénio	Fonte de energia	Emissões	Vantagens	Desvantagens	Nível de TRL	Temperaturas de operação °C	Referências
Fermentação escura	Restos de colheitas Resíduos orgânicos Águas residuais	CO_2	2* Não há necessidade de estímulos externos e ao mesmo tempo tira partido dos resíduos que são extremamente abundantes. Extremamente rentável devido ao baixo custo das matérias-primas	Processo com bastantes technicalidades de difícil controlo e produção com uma variabilidade excessiva	3-8	20-35	[25] [26] [27] [28] [29] [30] [31]
Foto fermentação	Restos de colheitas Resíduos orgânicos Águas residuais	CO_2			3-8	20-35	[25] [32] [33] [34] [31]
Eletrólise	Energia elétrica	Zero emissões	O facto de ter zero emissões e de poder ser alimentada com fontes renováveis torna-a numa tecnologia interessante do ponto de vista ambiental	Ainda tem custos elevados e capacidades de produção reduzida	6-9	50-80	[16] [35] [13][36]
Termólise	Energia térmica	Zero emissões	2* Uso de fontes renováveis Emite O_2 como subproduto	Temperaturas extremamente altas	3-9	2500	[16] [35] [13][36]
Fotólise e foto-eletrólise	Energia solar	Zero emissões		Pouco eficaz e ainda muito precoce necessidade de luz solar	3-9	25	[16] [35] [13] [36]

A presente tabela sintetiza informações relevantes acerca dos diferentes meios de produção de hidrogénio, como as emissões subseqüentes de cada meio, vantagens e desvantagens, bem como o nível de TRL de cada uma das tecnologias. Embora as técnicas convencionais, como a reforma do gás natural, ainda sejam economicamente viáveis, as suas emissões de CO₂ representam um risco ambiental. A eletrólise da água utilizando eletricidade proveniente de fontes renováveis, como a solar e a eólica, é um método sustentável e promissor, quanto à redução das emissões de carbono.

A fim de maximizar a eficiência e a viabilidade económica do hidrogénio, contribuindo significativamente para a transição energética e a atenuação das alterações climáticas, é imperativo a utilização de opções de produção de hidrogénio com zero emissões.

2.2.1 Classificações do hidrogénio

Quando se trata da produção de hidrogénio, a terminologia relacionada com as várias cores do mesmo é predominante, tanto na literatura como na indústria. Esta categorização informal de cores está intrinsecamente ligada aos processos de produção de hidrogénio, às matérias-primas utilizadas no processo e às emissões subsequentes. O esquema de cores representa os processos e fontes de energia utilizadas para extrair o hidrogénio. Esta complexidade terminológica e cromática destaca-se como uma representação da importância crescente da sustentabilidade na produção de hidrogénio, que tem um impacto direto no progresso da indústria em direção a práticas mais limpas e ecologicamente responsáveis. Esta divergência não só influencia as decisões industriais, como também realça a necessidade crítica de práticas mais sustentáveis na transição para um panorama energético global mais equilibrado, do ponto de vista ambiental [37].

As diferentes terminologias de cor podem ser divididas nas seguintes [38]:

- **Hidrogénio Preto**

O hidrogénio preto é produzido através do processo de gaseificação de carvão que ocorre a cerca de 900 °C e entre 1 e 10 MPa de pressão. Este tipo de hidrogénio está muito dependente da qualidade do carvão, uma vez que a presença de impurezas e de outras substâncias pode diminuir a eficiência deste processo, bem como a pureza do produto final (até 83% que é uma pureza significativamente baixa para hidrogénio), a eficiência do processo varia (dependendo do material bem como do equipamento) entre os 78% e os 80%.

É ainda importante salientar que a produção deste tipo de hidrogénio acarreta um grande impacto ambiental a produção de cerca de 20 kg de CO_2 por cada quilograma de hidrogénio produzido [37], o que o coloca como a cor de hidrogénio mais poluente de entre as estudadas.

- **Hidrogénio Cinzento**

O hidrogénio cinzento, obtido a partir da reforma a vapor do gás natural, sem métodos de captura de carbono, não inclui métodos ou tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono. O facto de não existirem meios de captura de gases de efeito estufa faz com que este hidrogénio resulte num elevado nível de emissões de CO_2 para a atmosfera, com um contributo estimado de cerca de 10.9 a 13.8 $kgCO_2/kgH_2$.

- **Hidrogénio Azul**

Devido ao facto das emissões de gases de efeito estufa de metodologias como SMR (Steam Methane Reforming), em português "Reforma de metano a vapor" e POX (Partial Oxidation), em português "Oxidação Parcial" não conseguirem ser mitigadas através do processo em si, os métodos que dependem destas fontes podem beneficiar de metodologias de absorção e armazenamento de carbono. A combinação destas tecnologias com as metodologias acima mencionadas, resulta numa abordagem menos prejudicial para o ambiente e num produto final denominado de "Hidrogénio Azul".

Dependendo das tecnologias, estes meios de captura de gases de efeito de estufa podem apresentar rendimentos variáveis entre os 50% e os 90% [39] que resultam ainda em absorções que podem chegar às 800 toneladas de CO_2 .

O CO_2 capturado pode ser comprimido e transportado na conduta, por estrada, caminho de ferro ou mar, para utilização em várias aplicações ou, em alternativa pode ser armazenado. O CO_2 capturado pode ainda ser sequestrado e retido no subsolo como solução de armazenamento permanente. Estas soluções podem apresentar uma redução de custo de cerca de 50 % quando comparadas com soluções de hidrogénio verde, o que torna esta vertente competitiva em regiões com combustíveis fósseis a preços acessíveis. Embora ainda exista alguma incerteza relativamente à produção de hidrogénio azul, este surge como uma alternativa clara e viável às fontes de produção de hidrogénio.

Embora ainda exista alguma incerteza relativamente à produção de hidrogénio azul, este surge como uma alternativa clara e viável às fontes de produção de hidrogénio.

- **Hidrogénio Roxo/Cor de Rosa**

A energia nuclear pode ser usada como meio de produção para hidrogénio, ora como fonte de energia térmica, ora como fonte de energia elétrica [40]. Os reatores nucleares podem por isso, em momentos de excedente energético, utilizar o mesmo para produzir hidrogénio desviando o calor ou a eletricidade gerada a partir do reator para a produção de hidrogénio, que se denomina Hidrogénio roxo ou cor-de-rosa.

- **Hidrogénio Verde**

A definição de hidrogénio verde prende-se com as emissões, o meio de produção, bem como outros fatores climáticos associados à produção do hidrogénio [41]. O hidrogénio verde, quando comparado com os produzidos a partir de combustíveis fósseis, apresenta 70% de redução nas emissões de gases de efeito estufa. O principal meio de produção deste tipo de hidrogénio é a eletrólise, efetuada com recurso a fontes de energias renováveis, como a energia hídrica, eólica e solar. O recurso a este tipo de tecnologias permite um maior rendimento do processo, bem com maiores índices de pureza do produto final, ao mesmo tempo que enfatiza a transição para meios mais sustentáveis e utilização de energia limpa.

- **Hidrogénio Turquesa**

A produção de hidrogénio turquesa baseia-se na pirólise de metano, processo que beneficia da ausência de oxigénio, permitindo a produção de carbono sólido em detrimento de CO_2 , reduzindo o impacto ambiental do processo. O carbono sólido produzido pode ser depois armazenado e utilizado para múltiplos fins. Embora a tecnologia de pirólise de metano seja um processo com fundamento e vastamente conhecido no seio da indústria, soluções de hidrogénio turquesa ainda não estão amplamente

aplicadas, uma vez que estudos de carácter económico sugerem que a exploração deste tipo de hidrogénio só é rentável quando usada em larga escala.

• Hidrogénio Branco e Vermelho

O hidrogénio branco é o tipo de hidrogénio recente que está presente em grandes depósitos naturais no subsolo. Resulta de processos geoquímicos que ocorrem no interior da crosta terrestre, conferindo-lhe um carácter sustentável e inesgotável. É, no entanto, uma fonte ainda muito recente, e como tal, a sua exploração ainda não atingiu patamares de maior generalidade na indústria. Este processo é similar ao do gás natural com prospeção, perfuração e extração em locais, que até agora se localizam essencialmente nos Estados Unidos da América. Permite uma produção de hidrogénio com ausência virtual de produção de GEE, uma vez que o hidrogénio é feito através de processos naturais, enquanto permite um custo de cerca de 2 €/ quilograma, o que o coloca como um dos hidrogénios mais competitivos em termos de preço. No entanto, está ainda retido num grau de maturidade baixo que não permite uma exploração em larga escala.

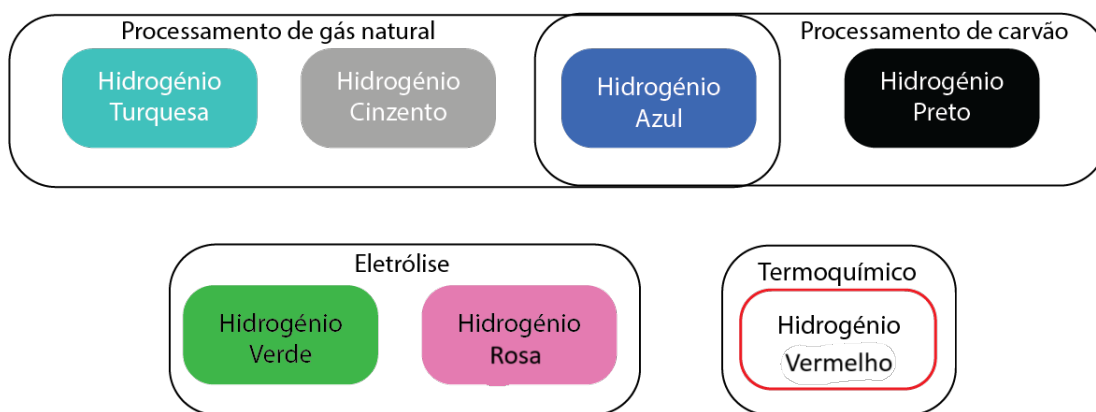


Figura 2.2: Cores do Hidrogénio - [41].

Esta imagem resume a informação descrita acima, ao mesmo tempo que fornece apoio visual para a separação de cores do hidrogénio do ponto de vista da fonte de energia utilizada para o produzir.

2.3 Meios de produção de hidrogénio verde

Na secção anterior foram revistas sucintamente todas as tecnologias de produção de hidrogénio, bem como as cores associadas às mesmas, algumas delas com fontes de energia não renováveis. Durante os próximos subcapítulos serão expostos e mais analisadas as tecnologias que apresentam como produto final hidrogénio verde, ou seja, aquele que provem de fontes de energia renováveis.

2.3.1 Princípio de base

A eletrólise da água consiste na reação de oxirredução resultante da passagem de corrente elétrica contínua, de modo a provocar, na presença de um eletrodo, a dissociação da molécula

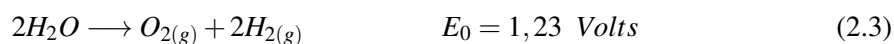
de água em di-hidrogénio e oxigénio. No cátodo, carregado negativamente, existe água pura que sofre uma redução formando hidrogénio gasoso e hidróxido, em solução aquosa, como descrito na equação.



Por sua vez no ânodo, carregado positivamente o hidróxido irá formar oxigénio e a água será reintroduzida, no ciclo como descrito na seguinte equação:



Assim a reação global que resulta das semirreações acima pode ser apresentada do seguinte modo:



A força eletromotriz da reação global é resultante da soma das semirreações de oxidação e redução, previamente apresentadas, podendo então constatar que de modo a se verificar eletrólise é necessário fornecer o valor de 1,23 Volts de diferença de potencial. No entanto, nas células eletrolíticas, o aumento da diferença de potencial aplicada leva a um aumento da corrente, o que aliado a resistências provenientes dos condutores, à difusão e mobilidade dos iões bem como a fenómenos de superfície, que resultam na formação de bolhas e entropia, levam à necessidade de um sobrepotencial (um aumento da diferença de potencial de equilíbrio) para provocar as reações. Todos estes fatores resultam num aumento da força eletromotriz para cerca de 1,48 Volts [42].

2.3.2 Sistemas Alcalinos

Desde a descoberta do processo em 1789, a eletrólise alcalina tornou-se uma tecnologia bastante madura na indústria da produção de hidrogénio, conseguindo ser competitiva desde pequenos a grandes projetos. Caracteriza-se pela imersão de dois elétrodos numa solução líquida de eletrólito consistindo numa solução com uma concentração de 20/30 % de hidróxido de potássio.

Os dois elétrodos são divididos por um diafragma que tem como objetivo impedir a mistura dos gases formados pelo processo, em detrimento da segurança e eficiência do mesmo. No entanto, este diafragma deve ser permeável aos iões de hidróxido e moléculas de água. O esquema abaixo permite uma compreensão típica do processo de eletrólise alcalina, em que o eletrólito é bombeado através da câmara de eletrólise onde a reação ocorre. Um eletrolisador alcalino típico é constituído por um sistema de regulação de temperatura e por duas câmaras de separação de fases.

O eletrólito líquido separador de fases é bombeado de volta para a câmara de eletrólise. Com ciclos de eletrólito separados, a concentração do eletrólito aumentará no lado catódico, devido ao consumo de água, e diminuirá no lado anódico, devido à produção de água. Por conseguinte, o eletrólito necessita de ser misturado, ocasionalmente, para manter uma condutividade ótima do eletrólito. O facto de apresentar um elevado grau maturidade faz com que já seja vendido

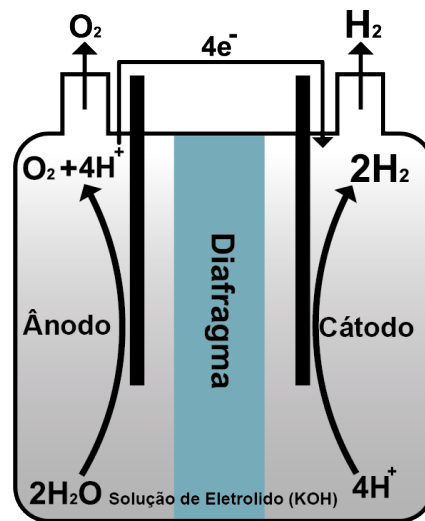


Figura 2.3: Esquema de funcionamento de um eletrolisador alcalino - [43].

por vários fornecedores. Em simultâneo, apresenta uma elevada variabilidade de capacidade de produção [44]. Esta tecnologia beneficia ainda de não necessitar de qualquer tipo de materiais raros ou dispendiosos, o que a torna bastante competitiva quando comparada com demais meios de eletrólise. A Tabela 2.5 resume os materiais típicos destes dispositivos.

A Tabela 2.5 resume os materiais típicos destes dispositivos.

Tabela 2.5: materiais típicos utilizados nos eletrolisadores alcalinos [45]

Diafragma	NiO (poroso)
Placa separadora	Aço inoxidável
Catalisador no ânodo	Ni/Co/Fe
Catalisador no cátodo	Ni/C-Pt
Material do ânodo	Ti/Ni/Zr
Material do cátodo	Aço inoxidável

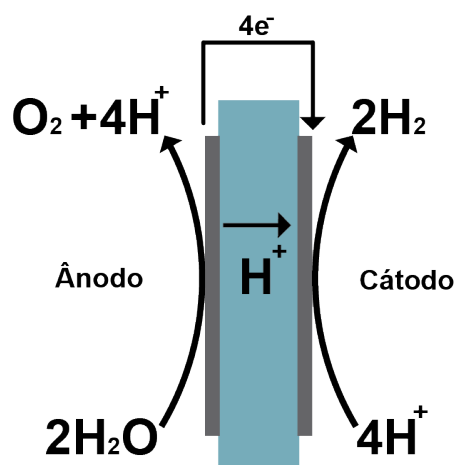
Esta tabela realça a ausência de metais raros, o que contrasta com as soluções PEM apresentadas abaixo, sendo este um dos fatores que contribui para a disparidade de preços entre as duas soluções.

2.3.3 Sistemas PEM

Os sistemas de Proton Exchange Membrane (PEM) em português, membrana de troca de prótons, surgem como uma alternativa aos eletrolisadores alcalinos convencionais, com o intuito de colmatar algumas falhas apresentadas pelos sistemas previamente descritos [44]. Estes sistemas são constituídos por dois compartimentos, um denominado anódico, onde a água introduzida passa pelos canais das placas separadoras, penetra no coletor de corrente, onde sofre a injeção de corrente elétrica e separa a mesma em eletrões, oxigénio diatômico e prótons[17]. O oxigénio diatômico produzido flui de novo pelas placas separadoras e sai do sistema como subproduto. Os eletrões seguem no sentido da região catódica, passando previamente pela camada catalítica. Os prótons seguem pela membrana no mesmo sentido e juntam-se aos eletrões formando hidrogénio diatômico que passa pela placa coletora da secção catódica saindo posteriormente do sistema [39].

A imagem seguinte representa um sistema típico de eletrólise por metodologia PEM.

Figura 2.4: Esquema de funcionamento de um eletrolisador PEM - [44].



Uma das partes fundamentais, e que mais distingue estes sistemas dos alcalinos, são as membranas. Estas vêm substituir os diafragmas dos sistemas alcalinos e são responsáveis por proporcionar uma elevada condutividade de prótons, baixa passagem de gás, conceção compacta do sistema e funcionamento a alta pressão. A baixa espessura da membrana (varia entre 20 e 300 μm de espessura) é em parte, a razão de muitas das vantagens do eletrólito de polímero sólido [44].

A imagem seguinte retrata com maior especificidade a membrana típica utilizada no sistema PEM:

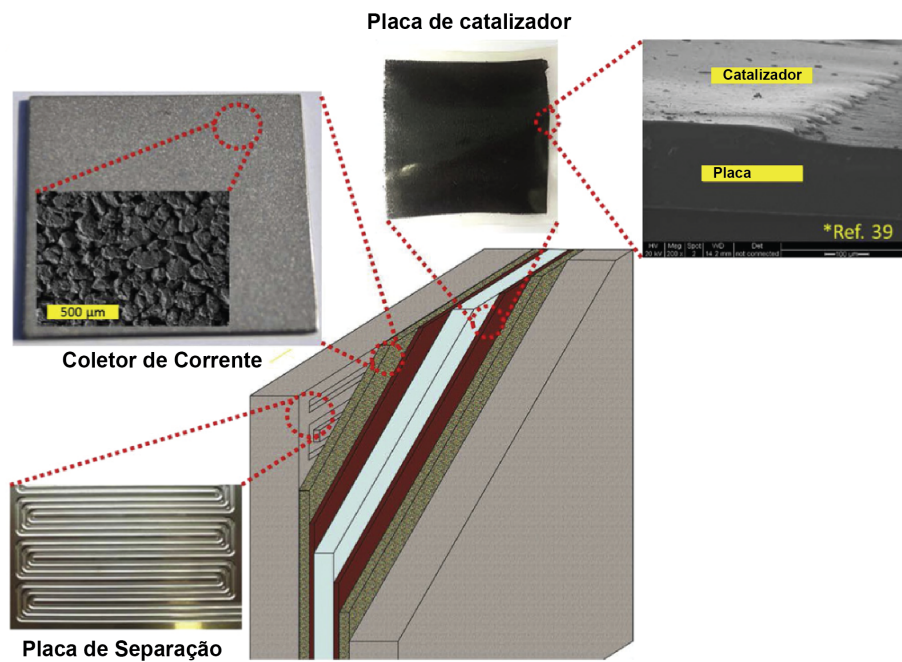


Figura 2.5: Esquema de constituição de um eletrolisador PEM - [44].

A placa de separação vista na imagem é composta por metais raros (p.e ouro), o que confere a estas soluções o seu elevado preço de compra, quando comparadas com metais mais comuns, como os utilizados na eletrólise alcalina.

2.3.4 Sistemas SOEC

Desde a sua descoberta na década de 1980 os sistemas SOEC têm atraído um grande interesse devido a permitirem converter energia elétrica/térmica em energia química, produzindo hidrogénio com elevada eficiência. As soluções SOEC podem ser utilizados para a conversão eletroquímica direta de vapor (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), ou ambos, em hidrogénio (H_2), monóxido de carbono (CO) ou gás de síntese (H_2+CO), respetivamente. As SOEC podem ser termicamente integradas com uma gama de sínteses químicas, permitindo a reciclagem do CO_2 e H_2O capturados, em gás natural sintético ou gasolina, metanol ou amoníaco, resultando em melhorias de eficiência adicionais, em comparação com as tecnologias de eletrólise a baixa temperatura [46].

No entanto, ainda é uma tecnologia com um nível de maturidade relativamente baixo, motivo que tem levado a um grande desenvolvimento e pesquisa feitos com o propósito de melhorar esta solução de produção de hidrogénio [44].

Um sistema SOEC consiste em dois elétrodos porosos e um eletrólito condutor iónico denso. O vapor é bombeado para o cátodo poroso. Quando é fornecido um potencial elétrico ao SOEC, as moléculas de água difundem-se para os locais de reação e decompõem-se em hidrogénio gasoso e iões de oxigénio, na interface cátodo-eletrólito. O hidrogénio criado difunde-se para a superfície do cátodo e é recolhido. Os iões de oxigénio são transferidos do eletrólito denso para o ânodo. O ânodo oxida os iões de oxigénio para gerar oxigénio gasoso, que é então entregue à superfície através dos poros [47].

Devido à sua elevada flexibilidade química estes dispositivos permitem que sejam utilizados na síntese de vários gases não o hidrogénio. Tecnologias SOEC tem um enorme potencial para a futura produção em massa de hidrogénio [47]. Se as questões como a durabilidade do sistema e as elevadas temperaturas de funcionamento forem ultrapassadas (atualmente estão a ser desenvolvidos estudos nesse sentido) os custos de produção diminuirão, tornando esta tecnologia competitivas em comparativamente com outras tecnologias [46] [48].

2.4 Comparação entre sistemas alcalino e PEM

Sendo, atualmente, os dois sistemas de eletrólise mais preponderantes atualmente no mercado e uma vez que os sistemas PEM surgem da necessidade de colmatar algumas falhas dos sistemas alcalinos, uma comparação pode ser feita de modo a constatar algumas diferenças cruciais nas metodologias e procedimentos das suas operações de eletrólise de hidrogénio.

Esta comparação pode ser verificada na seguinte na imagem 2.6 e Tabela 2.6 seguintes onde várias vantagens e desvantagens, associadas a cada um estão explícitas, bem como as suas condições operacionais.

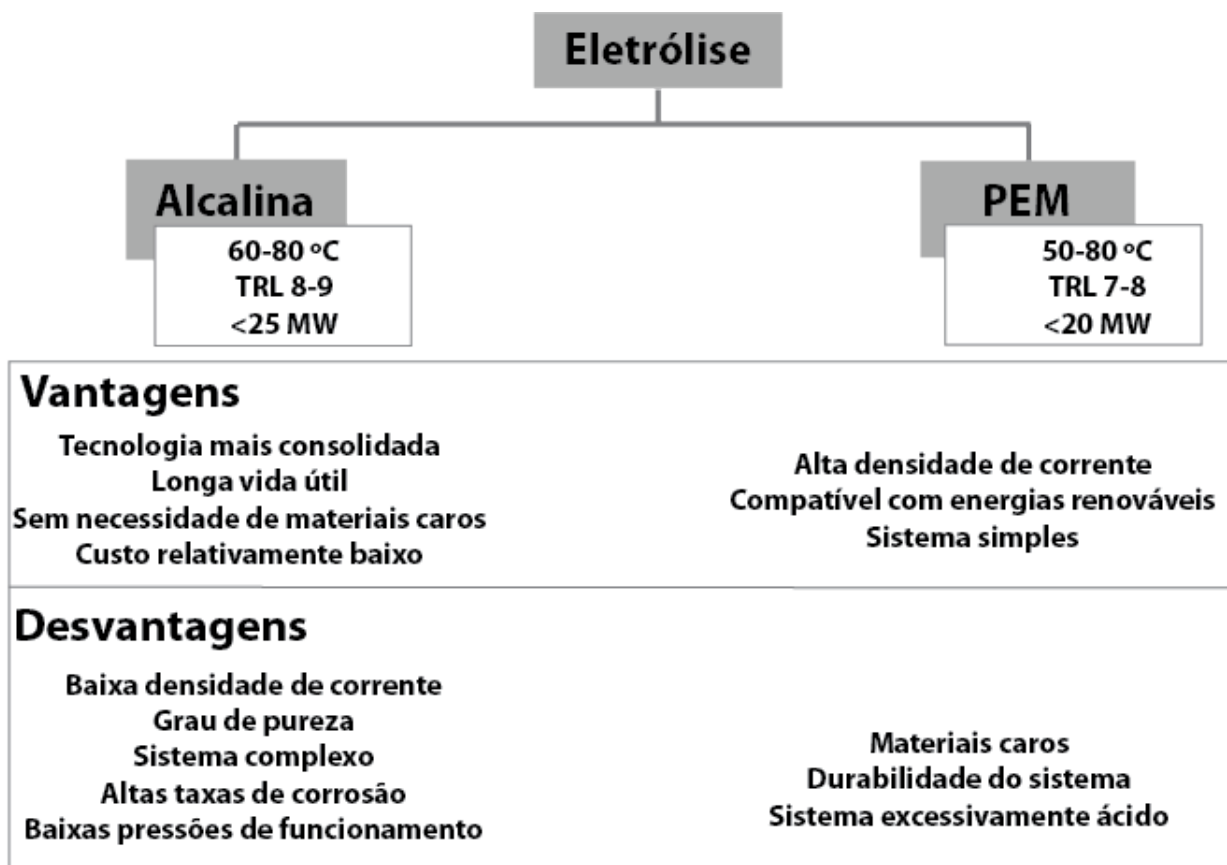


Figura 2.6: Vantagens e desvantagens das Tecnologias PEM e alcalinas - [43] [19]

A imagem e tabela acima enfatizam a ideia, anteriormente apresentada, de que os sistemas PEM são um complemento aos sistemas alcalinos, embora não estejam isentos de desvantagens, que em muitos casos advêm dos materiais caros e da baixa durabilidade do sistema, tornando-os uma opção menos competitiva do ponto de vista económico.

Tabela 2.6: Comparação das condições operacionais de sistemas alcalinos e PEM [44]

Condições operacionais	Sistemas Alcalinos	Sistemas PEM
Temperatura da célula	60-80°C	50-80°C
Pressão na célula	30 bar	30 bar
Densidade de corrente	0,2-0,4 A/cm ²	0,6-2 A/cm ²
Tensão na célula	1,8-2,4 V	1,8-2,2 V
Intervalo de carga	20-40%	20-40%
Consumo específico de energia	4,2-5,9 kWh/Nm ³	4,3-5,6 kWh/Nm ³
Eficiência da tensão na célula	52-69%	67-82%
Produção de hidrogénio	< 760 Nm ³ /h	760 Nm ³ /h
Nível de TRL	8-9	7-8
Tempo de vida da célula	90 000 h	20 000 h
Taxa de degradação	3 uV/h	14 uV/h
Tempo médio de vida do sistema	20-30 anos	10-20 anos
Custo por kW	600 \$	700 \$

2.5 Norma ISO 14687

Sendo o hidrogénio classificado como combustível, é possível catalogar o mesmo quanto às suas propriedades e distingui-lo quanto aos seus vários níveis de pureza. A norma ISO-14687 [49] (International Organization for Standardization), em português “Organização Internacional de Padronização” visa catalogar e diferenciar os diferentes níveis de pureza do hidrogénio de modo a distinguir aqueles que podem ou não ser utilizados para determinados meios. A classificação, quanto ao nível de pureza tem em consideração vários fatores como, concentrações de alguns contaminantes, a pressão do hidrogénio e o estado físico em que é produzido. A Imagem 2.5 visa sintetizar as possíveis classificações segundo a norma ISO descrita no parágrafo. A imagem retrata que a classificação, pode ser feita mediante o estado físico do hidrogénio (Tipo I gás; II líquido; III slush) bem como os usos possíveis mediante a nota de pureza registada, sendo o hidrogénio de maior pureza classificado com nota C, o de segunda maior pureza com a letra B e de menor pureza com a letra A.

A imagem retrata que a classificação, pode ser feita mediante o estado físico do hidrogénio (Tipo I gás ; II líquido ; III slush) bem como os usos possíveis mediante a nota de pureza registada, sendo o hidrogénio de maior pureza classificado com nota C , o de segunda maior pureza com a letra B e de menor pureza com a letra A.

Tabela 2.7: Empresas fornecedoras de electrolisadores

Produtora	País	Tecnologia	Capacidade de produção (Nm^3/h)	Referência
Utis	Portugal	PEM	10,7-60	[50]
Fusion Fuel	Irlanda	PEM	71-473	[51]
Nel Hydrogen	Noruega	Alcalino/PEM	0.27-4920	[52]
ITM Power	Inglaterra	PEM	404	[53]
Stargate Hydrogen	Estónia	Alcalino	200-2000	[54]
Enapter	Alemanha	Alcalino	0.5-210	[55]
Elogen	França	PEM	50-4000	[56]
John Cockerill	Bélgica	Alcalino	2-1000	[57]
Hystar	Noruega	PEM	854-3000	[58]
Nemesys	Itália	Alcalino	16-33	[59]
Plug Power	Estados Unidos da América	PEM	1-2000	[60]

As duas principais tecnologias de eletrólise utilizadas pelas empresas da área são a alcalina e a PEM, como se pode constatar, pela tabela acima. É possível verificar ainda que estas tecnologias apresentam uma gama de valores bastante ampla, o que confere a estas soluções um elevado grau de versatilidade, podendo ser escolhidas para projetos de maior ou menor amplitude. A matriz de comparação criada por este estudo surge com o intuito de facultar um mecanismo que apoie a tomada de decisão, em múltiplos cenários, para determinar que soluções, fornecidas pelas empresas, mais se adequam melhor aos vários panoramas.

2.7 Modelos de avaliação

O modelo de avaliação a utilizar é uma parte fulcral do presente trabalho. Esta secção do estudo visa efetuar um levantamento, junto da literatura, de vários modelos de avaliação, bem como das suas características, de modo a fundamentar a tomada de decisão sobre o modelo matemático a adotar [61], com o propósito de facultar uma ferramenta simples e intuitiva que permita, tanto do ponto de vista académico como empresarial, fornecer auxílio na decisão relativa ao modelo de eletrolisador a adotar.

• Tomada de decisão por atributos múltiplos

A tomada de decisão por atributos múltiplos é o um dos modelos de tomada de decisão mais conhecidos. A partir de um número finito de opções, este modelo visa selecionar a melhor alternativa, tendo por base a comparação de várias características da mesma. O mesmo, tem por base um número reduzido de critérios de avaliação, de modo a manter o nível de complexidade reduzido.

A avaliação, segundo este critério, baseia-se em quatro pilares: alternativas, atributos, peso ou importância relativa de cada atributo, e medidas de desempenho das alternativas em relação aos atributos.

Este modelo é apresentado na Tabela 2.8. O mesmo apresenta alternativas, atributos, e pesos dos atributos.

Tabela 2.8: Exemplo do modelo de tomada de decisão por atributos múltiplos

Alternativa	atributo x Peso (x)	atributo y Peso (y)	atributo z Peso (z)
alternativa 1	x_1	y_2	z_1
alternativa 2	x_2	y_2	z_3
alternativa 3	x_3	y_3	z_3

O método baseia-se na soma dos coeficientes entre os diferentes atributos, de cada alternativa, pelos respectivos pesos de cada atributo, de modo a constatar a melhor alternativa. Este cálculo pode ser expresso pela Fórmula 2.4:

$$CF = \sum_{j=1}^j x_{ij} \times \text{Peso}(x_j) \quad (2.4)$$

CF - Classificação Final

Este modelo, embora bastante fidedigno na demonstração de resultados, devido ao carácter numérico elevado de algumas métricas em estudo ia padecer de valores excessivamente elevados, o que de um ponto de vista de apresentação de conclusões poderia contribuir para uma dificuldade na interpretação do estudo.

• Relação Analítica Cinzenta

O principal procedimento da Relação Analítica Cinzenta (RAC) consiste, em primeiro lugar, em traduzir o desempenho de todas as alternativas numa sequência de comparabilidade onde, para cada métrica em estudo, de entre as várias alternativas é selecionada a que apresenta o melhor rendimento, criando assim uma sequência ideal. Este processo é exemplificado pela Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Exemplo da sequência ideal do modelo RAC

	Critério 1	Critério 2	Critério 3	-	Critério j
Sequência ideal	Valor ideal para o critério 1	Valor ideal para o critério 2	Valor ideal para o critério 3	-	Valor ideal para o critério j

Na fase seguinte calcula-se a diferença entre o valor que cada alternativa tem, para cada métrica em estudo, com o mesmo valor na sequência de referência. Estes valores são posteriormente multiplicados pelos respectivos Coeficientes de Relação Cinzenta². Os vários

²Coeficiente de Relação Cinzenta- Valor usado no modelo RAC que permite distinguir a importância das diferentes métricas.

produtos são somados e a opção que obtiver o valor mais baixo é classificada como a menos díspar da sequência ideal e, como tal, a melhor alternativa do estudo efetuado[62]. Este método pode ser resumido na equação 2.5.

$$DT = \sum_{j=1}^j |(VI_j) - (VA_j)| \times CRC_j \quad (2.5)$$

DT - Desvio Total

VI - Valor ideal para o critério

VA - Valor da alternativa

CRC - Coeficiente de Relação Cinzenta

Este método de avaliação tem algumas limitações, nomeadamente o facto de favorecer as soluções que se aproximam sistematicamente do valor ideal, não permitindo que as que se destacam numa métrica a utilizem como meio de seleção.

- **Método da média ponderada ordenada**

De um ponto de vista da distinção da melhor alternativa em avaliação, o método de cálculo da média ponderada ordenada (CMPO) baseia-se numa metodologia de organização de resultados. Esta metodologia de avaliação tem por base a organização dos valores de todas as alternativas, por ordem decrescente de desempenho, atribuindo uma classificação pontual à solução, mediante a sua posição na ordem [63]. A primeira posição obtém a pontuação máxima, a segunda posição, a segunda maior pontuação e assim sucessivamente, até a última. Em seguida, com o propósito de obter a prestação final de cada alternativa, é efetuado o somatório do produto de todas as pontuações obtidas, pelas várias alternativas, nas diferentes métricas com os respetivos pesos ponderados. A Equação 2.6 representa a obtenção das classificações para cada uma das alternativas.

$$PF = \sum_{j=1}^j P_j \times PP_j \quad (2.6)$$

P- Pontuação mediante a ordenção

PP- Peso ponderado

A alternativa que apresentar o valor mais alto deste somatório é então a que é classificada pelo modelo como a melhor . [63]

- **Modelo Electre**

ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) (em português - eliminação de escolhas tradutoras da realidade) é um modelo de avaliação, essencialmente binário, que visa a distinção entre duas alternativas ,a que apresenta melhores resultados em diferentes métricas [64].

Matematicamente o modelo apresenta uma complexidade reduzida, não sendo necessária a realização de qualquer cálculo. Os valores de cada métrica, das várias alternativas, são postos lado a lado, sendo todos eliminados, exceto o que apresente o melhor desempenho. De entre todas as alternativas é escolhida a que no final do processo apresentar mais valores. No caso de um eventual empate entre alternativas, são usados coeficientes de relevância que visam distinguir as métricas mais e menos relevantes, sendo escolhida a alternativa que apresente melhores resultados nas métricas mais relevantes, segundo os coeficientes mencionados.

Este modelo, embora simples, é limitado, pois soluções em que apenas sobressaem algumas métricas, podem ser classificadas como superiores, mesmo quando comparadas a alternativas que apresentam mais consistência ao longo de todas as métricas em estudo.

- **Modelo COPRAS**

COMplex PROportional ASsessment (COPRAS), em português, “avaliação complexa de proporções” é um modelo de avaliação matemático bastante similar ao da tomada de decisão por atributos múltiplos simples. A principal diferença entre estes modelos, prende-se com a normalização dos valores em estudo, de modo a facultar uma apresentação mais simples dos dados, tornando mais fácil a sua leitura [65]. Esta normalização é feita através do quociente entre o valor que cada alternativa tem, na respetiva métrica, pelo somatório do valor de todas as soluções analisadas. A vertente matemática deste modelo será apresentada no capítulo da Metodologia, uma vez que foi este o selecionado.

Capítulo 3

Metodologia

O foco deste trabalho debruça-se na criação da matriz de comparação para tecnologias de síntese de hidrogénio verde. Como revisto no capítulo anterior, a síntese deste tipo de hidrogénio recai no processo de eletrólise, processo esse que depende essencialmente do eletrolisador a ser utilizado. Ao longo deste capítulo é apresentada uma análise comparativa, em que os vários critérios de distensão destes dispositivos serão apresentados, ponderados e avaliados, de modo a ser construída uma matriz para determinar a solução tecnológica que permita uma produção mais otimizada, mediante o critério em estudo. Numa abordagem inicial foi efetuada uma matriz tendo por base o método CMPO, descrito na secção anterior, em que a tecnologia que apresentava o melhor valor dentro de cada métrica, tinha uma pontuação máxima, seguida da que apresentava o segundo melhor valor, e assim sucessivamente, até ao pior valor. No entanto, esta matriz não salvaguardava a diferença substancial que algumas tecnologias podiam ter dentro da mesma métrica, não beneficiando devidamente aquelas que se sobressaem em certos campos e prejudicando excessivamente as que apresentam valores medianos de forma consecutiva. Esta matriz pode ser consultada no Anexo A.

Tendo isto em consideração, foi reestruturada a matriz, desta feita com recurso ao método COPRAS, que se baseia numa análise proporcional das métricas em estudo, em detrimento de uma análise absoluta das mesmas [66].

Esta abordagem é um processo, de várias etapas, que levam à criação da matriz de comparação para o produto desejado. As mesmas prendem-se, desde a estruturação da matriz de decisão, até à atribuição de relevância das diferentes métricas em análise. O esquema ?? sintetiza, de forma prática, as múltiplas etapas do modelo COPRAS aplicadas ao processo do estudo em curso. . [67]:

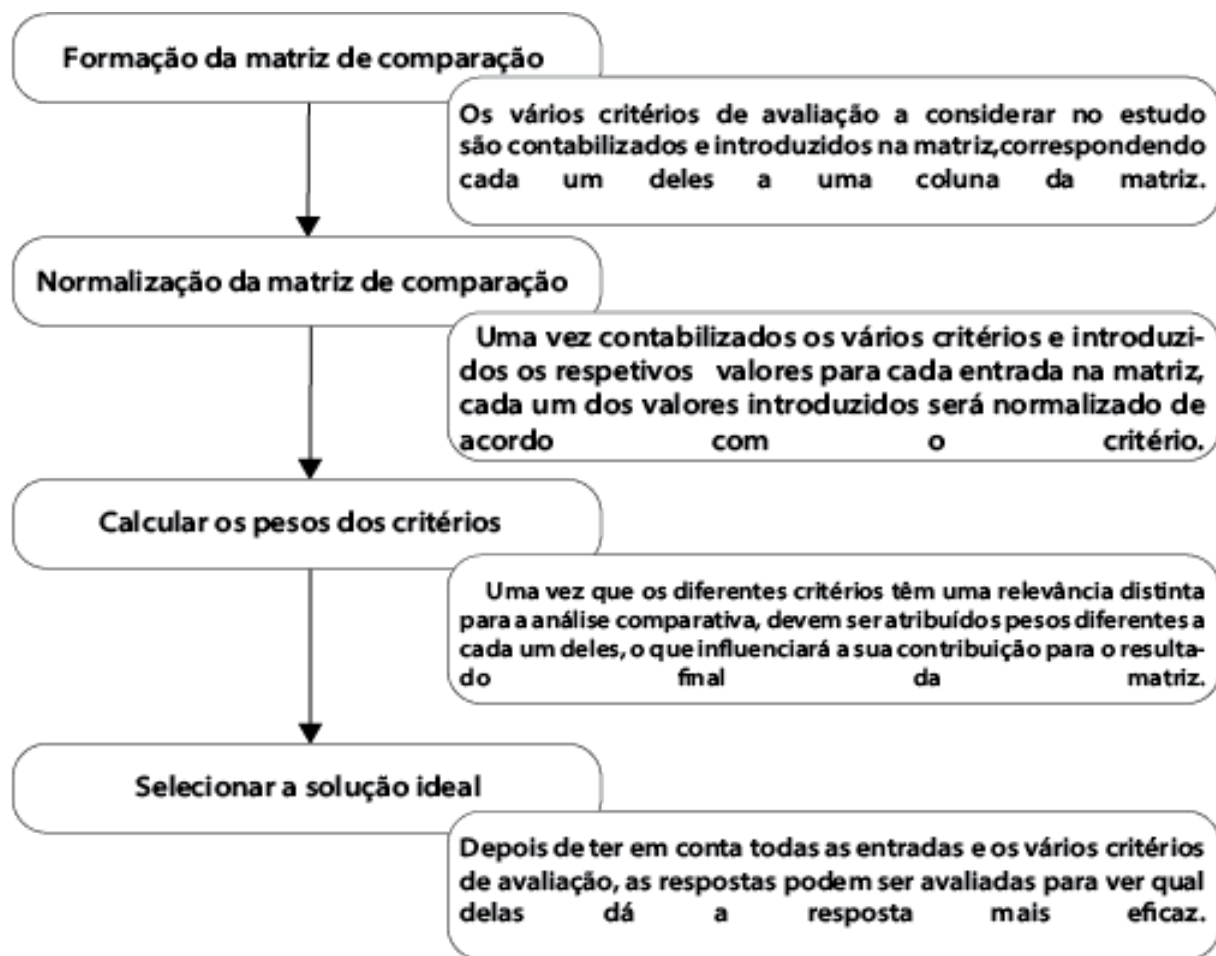


Figura 3.1: Modelo proposto [68].

3.1 Critérios de avaliação e relevância relativa

A construção da matriz de comparação inicia-se na seleção dos critérios que serão utilizados, para a comparação das diferentes soluções tecnológicas de produção de hidrogénio. A seleção e importância destes critérios irá variar em alguns cenários distintos apresentados ao longo do estudo. Para cada um será construída uma matriz de relevância, na qual serão introduzidos os valores mediante o cenário. O intuito final é apresentar a reação das várias soluções, quando avaliadas com maior incidência em alguns critérios específicos, de modo a permitir determinar quais são as mais adaptadas para diferentes intuítos finais.

A seleção destes critérios baseia-se igualmente numa série de catálogos que fornecem o tipo de informação, geralmente apresentada pelos fornecedores deste tipo de tecnologia.

3.1.1 Capacidade de produção Nominal-PN

Um critério fundamental na distinção destas tecnologias é a capacidade de produção nominal de hidrogénio que cada eletrolisador consegue suportar. Isto apresenta a capacidade horária de

produção de hidrogénio. É expressa em diferentes métricas, mediante o fornecedor, sendo as duas mais comuns o kg/h e o Nm^3/h ¹ (sendo a proporção de 1 Nm^3/h para 0.089 kg/h).

3.1.2 Pressão de saída do Hidrogénio-P

Um dos critérios a ter em conta na produção de hidrogénio é a pressão de saída do eletrolisador. Este valor, em bar, determina a facilidade com que o hidrogénio pode ser preservado após a produção, sem utilizar um compressor externo.

3.1.3 CAPEX

O CAPEX (Capital Expenditure), em português, “Despesa Capital” é o custo de aquisição do produto. Representa um fator de extrema relevância pois permite, perceber a rentabilidade das tecnologias, constatando quais são aquelas que acarretam um maior custo de implementação em comparação, com as demais. De modo a não prejudicar as soluções que implicam maiores custos de aquisição, resultantes da sua maior dimensão, esta métrica apresenta-se numa unidade de euros por kW de potência de output, sendo possível calcular o valor da mesma com recurso à Fórmula 3.1.

$$Capex = \frac{Custo\ Capital}{Output} \quad (3.1)$$

A potência de saída, por sua vez, quando não fornecida pelo fabricante, pode ser obtida multiplicando a capacidade de produção em kg por hora pelo respetivo poder calorífico do hidrogénio, conforme explicitado na Fórmula 3.2

$$Output = PM \times 144 \quad (3.2)$$

PN - Produção Nominal 144 - Valor da capacidade térmica do hidrogénio (MJ/kg)

3.1.4 Opex

Semelhante ao CAPEX o OPEX (Operational Expenditure), em português, “Despesas Operacionais” é uma métrica relativa aos custos que a operação de eletrólise acarreta para o dispositivo em questão. Esta, no caso das tecnologias de produção de hidrogénio verde, prende-se com custos provenientes, essencialmente, da eletricidade necessária para o devido funcionamento dos eletrolisadores.

O cálculo do OPEX é obtido através da Fórmula 3.3 :

$$OPEX = Custo\ da\ eletricidade \times Consumo \quad (3.3)$$

¹O Nm^3/h é uma unidade de medida de volume quando a substância a conservar se encontra em determinadas condições de pressão, humidade e temperatura sendo as mesmas:

.1,013 bar

.0 (zero) graus centígrados ou 273 graus K

.0 % de humidade relativa

Após análise do preço do kw/h praticado e ajustando o facto de este valor poder ser negociado pela indústria, considerou-se um preço por kW/h de cerca de 0,13€. O consumo de eletricidade pode ser obtido a partir do cálculo expresso pela equação 3.4:

$$Eletricidade\ consumida = \frac{39,41 \times PN}{EF} \quad (3.4)$$

PN-Produção Nominal

EF- Eficiência

Se, o produtor fornecer o consumo específico, a eletricidade consumida pode ser calculada utilizando a equação 3.5:

$$Eletricidade\ consumida = 365 \times Consumo \times PN \quad (3.5)$$

3.1.5 Emissões de CO_2 evitadas durante o ano-e CO_2 /y

Sendo o hidrogénio uma alternativa a outros combustíveis fósseis, é possível prever a quantidade de CO_2 que não se liberta mediante a utilização e quantidade de hidrogénio produzido. Para efeitos do cálculo, é contabilizada a pureza final do hidrogénio produzido, bem como a quantidade gerada, com o intuito de perceber, por comparação dos LCH(low calorific heat), em português, “poder calorífico inferior” de vários combustíveis fósseis, dos quais o hidrogénio permite uma poupança de emissões de CO_2 . Para simplificar esta substituição foi efetuada, por referência no gás natural, uma vez que a implementação de hidrogénio na rede de gás é uma das soluções mais praticadas no mercado devido, à facilidade de substituição entre os combustíveis mencionados.

Através do relatório da Agência Portuguesa do Ambiente [69] é possível constatar a quantidade de CO_2 emitido para aquisição de GJ de energia através da Fórmula 3.8 :

$$CO_2\ emitido = FE \times FO \times PCI/PCS \quad (3.6)$$

- FE- Fator de emissão específico do Gás Natural [56,6 kg CO_2 /GJ]
- FO- Fator de oxidação [0,995]
- PCI- Poder calorífico inferior [0,03844 GJ/ m^3 (n)]
- PCS- Poder calorífico superior [0,042119 GJ/ m^3 (n)]

O CO_2 emitido para aquisição de 1 GJ de energia é o seguinte.

$$CO_2\ emitido = 56,6 \times 0,995 \times 0,912 = 51,3611 \quad (3.7)$$

Como visto no capítulo anterior, o poder calorífico do hidrogénio é de 144 MJ/kg, pelo que podemos calcular a quantidade de hidrogénio necessária para obter 1 GJ de energia.

$$H_2 \text{ necessario} = \frac{1000}{144} = 6,94kg \quad (3.8)$$

Sendo possível concluir que, aproximadamente, 7 kg de hidrogénio poupam cerca de 56,6 kg de CO – 2. O quadro seguinte tem como objetivo comparar a quantidade de CO₂ que seria poupada, em função da fonte fóssil a substituir.

Tabela 3.1: CO₂ emitido na queima de vários combustíveis convencionais [70][71][72]

Combustível	kg para atingir 1 MJ de energia	kg de CO ₂ emitidos por queima de kg de combustível	kg de CO ₂ emitidos para obter 1 MJ
Diesel	78	3,15	244
Gasolina	74	3,30	244
Carvão	127	2,82	358
Biomassa	168	1,83	308

Como observado, dependendo da aplicação do hidrogénio, a poupança em termos de toneladas de CO₂ pode ser diferentes.

3.1.6 Implementação no mercado - IP

Alguns fornecedores de soluções de eletrólise apresentam modelos que, embora possuam características interessantes nas demais métricas, falham por não terem nenhuma unidade em utilização prática, o que pode pôr em causa a viabilidade das tecnologias fornecidas. Este critério permite distinguir as soluções que ainda não foram colocadas em situações práticas, das que já se apresentam implementadas no mercado.

3.1.7 Vida útil do equipamento - VU

A vida útil do equipamento é a previsão do espaço temporal, em que a solução consegue operar de modo eficaz. É uma métrica bastante relevante pois permite atenuar valores como o CAPEX, mas incrementa o valor de OPEX, uma vez que é necessário efetuar a operação durante mais tempo.

3.1.8 Nível de TRL - TRL

No seguimento da implementação prática, mas complementando-a de modo a distinguir soluções com números semelhantes de unidades instaladas, a classificação de nível de TRL, explicada na secção anterior, visa distinguir as soluções que estão mais desenvolvidas, de um ponto de vista tecnológico e que já se apresentam com um maior nível de maturidade e prontidão para serem implementadas no mercado.

3.1.9 Eficiência - EF

O critério relativo a eficiência visa determinar as soluções que melhor convertem a energia elétrica em hidrogénio, como produto final. Este valor, por vezes, não é facultado pelos fabricantes, no entanto, é determinado através do cálculo entre o poder calorífico do hidrogénio produzido e a energia utilizada para extração do hidrogénio, expresso na Equação 3.9.

$$EF = \frac{40}{CE} \quad (3.9)$$

*O valor 40 corresponde ao valor de kW/h obtido pela combustão de 1 kg deste combustível
CE - Consumo específico de Energia por kg de H_2 produzido

3.1.10 Vários cenários em estudo

O objetivo desta secção é apresentar as diferentes ponderações, face aos possíveis cenários de estudo para a avaliação das soluções. O objetivo é permitir que cada métrica se destaque num cenário em que a sua ponderação é claramente superior às demais.

A Tabela 3.2 resume os vários cenários do estudo, bem como a distribuição dos pesos ponderados dos vários cenários, de modo a permitir um destaque a uma métrica por cenário, nunca fazendo com que esta ultrapasse a metade da importância relativa.

Tabela 3.2: Distribuição dos pesos ponderados mediante os cenários

Cenário	Distribuição
1	A produção nominal tem uma relevância de 47,5 % e os restantes critérios 8,75 %.
2	O CAPEX tem uma relevância de 47,5 % e os restantes critérios 8,75 %.
3	O OPEX tem uma relevância de 47,5 % e os restantes critérios 8,75 %.
4	A vida útil tem uma relevância de 47,5 % e os restantes critérios 8,75 %.
5	A implementação prática tem uma relevância de 47,5 % e os restantes critérios 8,75 %.
6	A eficiência tem uma relevância de 47,5 % e os restantes critérios 8,75 %.
7	O nível de TRL tem uma relevância de 47,5 % e os restantes critérios 8,75 %.

Apesar de terem sido recolhidos valores de pressão de saída do hidrogénio inicialmente previstos como critério de avaliação, esta métrica revelou-se uniforme em todos os valores recolhidos, pelo que é redundante considerar um cenário em que a mesma tenha alguma relevância.

Num outro ponto, as toneladas de CO₂, que poderiam ser evitadas com recurso a estas soluções também foram descartadas de critério de avaliação, pois o mesmo necessita de informação relativamente ao uso final do hidrogénio, de modo a perceber que combustível fóssil está a ser substituído e, por conseguinte, quantas toneladas de GEE são evitadas por implementação destas soluções.

3.2 Obtenção de valores e entradas na matriz

Os valores necessários à realização deste estudo não constam, na sua íntegra, na maior parte dos catálogos de eletrolisadores, tendo em muitos casos que ser requisitados por outro meio. Com recurso a alguns contactos efetuados através de correio eletrónico, reuniões e de troca de ideias, junto de algumas empresas da área, foi possível recolher a informação desejada. Este processo foi demorado, tendo em certos casos prolongando-se durante meses, sem resultados conclusivos. Algumas empresas optaram por não divulgar valores tornando assim mais difícil a realização do estudo pretendido.

A Tabela 3.3 resume as informações das empresas contactadas, assim como o meio de contacto utilizado.

Tabela 3.3: Empresas contactadas para o estudo

Empresa	Região	Contacto
Stargate	Estônia	E-mail
Utis	Portugal	E-mail/Contacto telefónico
Empresa que solicitou anonimato	—	E-mail
Nemesys	Itália	Reunião Online

Embora tenham sido contactadas mais empresas, devido ao desejo expresso das partes envolvidas em não divulgar informações, sobre as soluções que oferecem, estas foram omitidas nesta secção.

Destes contactos foi possível retirar informação relativa às soluções de produção de hidrogénio, que se encontram sintetizadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Acrônimo e tipo dos vários eletrolisadores usados

Acrônimo	Tipo de eletrolisador
GTS200	Alcalino
GTS400	Alcalino
GTS600	Alcalino
GTS800	Alcalino
GTS1600	Alcalino
GTS2000	Alcalino
PEM1	PEM
PEM2	PEM
NM1	Alcalino
NM2	Alcalino
PEMUT1	PEM
PEMUT2	PEM

A inexistência de determinadas empresas, bem como os nomes de determinados modelos, deve-se a pedidos expressos das mesmas em permanecer no anonimato, ao longo do estudo, devido a divulgação de valores das suas soluções no mercado.

A Tabela 3.5 resume os valores recolhidos junto dos vários fornecedores acima mencionados.

Tabela 3.5: Valores recolhidos para os vários electrolisadores

Símbolo	Tipo	PN (Nm ³)	Capex (euro/kW)	Opex (euro)	tCO ₂ /y (ton)	VU (anos)	Ip	EF	TRL
GTS200	Alcalino	200	1200	43559	1275	20	1	69,40%	6
GTS400	Alcalino	400	1200	87118	2550	20	1	69,40%	6
GTS600	Alcalino	600	1200	130677	3825	20	1	69,40%	6
GTS800	Alcalino	800	1200	174236	5100	20	1	69,40%	6
GTS1600	Alcalino	1600	1200	348473	10200	20	1	69,40%	6
GTS2000	Alcalino	2000	1200	435591	12750	20	1	69,40%	6
NM1	Alcalino	16	517	3416	100	20	2	69,0%	7
NM2	Alcalino	33	1739	7141	209	20	2	69,0%	7
PEM1	PEM	71	925	6300	452	20	4	76,10%	8
PEM2	PEM	95	925	8400	603	20	4	76,10%	8
PEM3	PEM	142	1050	11100	904	20	4	76,10%	8
PEM4	PEM	473	1050	42000	3014	20	4	76,10%	8
PEMUT1	PEM	10,7	23981	36000	68	10	140	60,0%	9
PEMUT2	PEM	60	23809	200000	382	10	140	71,0%	9

A amostra de dados recolhida permite ter uma boa representatividade dos modelos de electrolisadores presentes no mercado, pois inclui modelos com dimensões e características bastante distintas, permitindo uma análise abrangente deste tipo de tecnologias.

3.3 Construção e normalização da matriz

Tendo sido feita a seleção de critérios e a recolha de informação junto de fornecedores, a próxima etapa é a formulação da matriz de comparação, de modo a poder ser efetuada a avaliação, das soluções em estudo.

Cada linha da matriz corresponde a uma solução comercial, representando as colunas um critério de avaliação.

Tabela 3.6: Exemplo de construção da matriz de comparação

Modelos de eletrolisador	critério x	critério y	critério z
modelo 1	x_1	y_2	z_1
modelo 2	x_1	y_2	z_3
modelo 3	x_3	y_3	z_3

Uma vez preenchida cada coluna da matriz é efetuada a normalização de cada célula que obedece à Fórmula 3.10:

$$Norm(x_{ij}) = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^j x_{ij}} \quad (3.10)$$

O peso ponderado de cada entrada é efetuado mediante a multiplicação de cada célula da matriz pelo nível de importância do critério. A mesma pode ser obtida através da seguinte Fórmula 3.11:

$$x_{ij}^{\wedge} = Norm(x_{ij}) * IR \quad (3.11)$$

IR- Importancia relâtiva.

A classificação final das soluções estudadas é obtida através do somatório dos valores normalizados, multiplicados pelos respetivos pesos ponderados. Este somatório ocorre ao longo de uma linha da matriz podendo ser expresso através da seguinte Fórmula 3.12.

$$Class\ final = \sum_{j=1}^j x_{ij} \quad (3.12)$$

3.3.1 Aplicação do modelo para uma primeira iteração

Com o propostio de ilustrar a aplicação do modelo matemático para avaliar as soluções de produção de hidrogénio, nesta secção será aplicado à primeira solução (GTS200) referida na Tabela 3.4. Para calcular a pontuação obtida para a produção nominal, foi calculado o coeficiente entre o valor do eletrolisador e o do resumo das outras soluções. A Equação 3.13 mostra este cálculo.

$$Pontos\ PN = \frac{VS}{\sum PN} = \frac{200}{6499} = 0,03 \quad (3.13)$$

VS -Valor da solução

PN- Produção Nominal

Este valor deve ser multiplicado pelo fator de relevância apropriado, que varia de cenário para cenário. No exemplo ilustrativo, é utilizado o Cenário 1, pelo que o fator de produção nominal é o que assume uma relevância de 47,5 %, enquanto os restantes são iguais. Posto isto, a pontuação, após a aplicação da relevância relativa é obtida através do cálculo expresso na Equação 3.14.

$$\text{Pontos PN Final} = 0,0049 \times 0,475 = 0,01508 \quad (3.14)$$

Para os critérios seguintes, foi aplicado o mesmo procedimento e os valores resultantes podem ser resumidos na Tabela 3.7 :

Tabela 3.7: Aplicação do método de avaliação para a solução GTS200

Critério	Valor	Pontuação
PN	200	0,01508
CAPEX	1200	0,08576
OPEX	43559,1	0,08501
VU	20	0,00673
IP	1	0,00025
EF	69,4%	0,00613
TRL	6	0,00525

3.4 Construção da matriz final

Uma vez aplicado o modelo aos resultados obtidos, construiu-se a matriz, expressa na Tabela 3.8, em que cada coluna representa um dos cenários previamente descritos na secção 3.1.10, e onde se destaca a negrito a melhor solução para os diferentes cenários.

Tabela 3.8: Matriz aplicada para os vários cenários

Símbolo	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6	Cenário 7
GTS200	0,204	0,572	0,568	0,222	0,193	0,219	0,029
GTS400	0,217	0,572	0,558	0,222	0,193	0,219	0,029
GTS600	0,229	0,572	0,547	0,222	0,194	0,219	0,029
GTS800	0,242	0,572	0,536	0,222	0,194	0,220	0,029
GTS1600	0,292	0,573	0,493	0,223	0,195	0,221	0,029
GTS2000	0,318	0,574	0,471	0,224	0,195	0,221	0,029
NM1	0,195	0,578	0,580	0,224	0,196	0,221	0,033
NM2	0,194	0,569	0,578	0,222	0,195	0,219	0,033
PEM1	0,200	0,577	0,582	0,226	0,201	0,225	0,038
PEM2	0,202	0,577	0,581	0,226	0,201	0,226	0,038
PEM3	0,205	0,577	0,581	0,226	0,201	0,226	0,038
PEM4	0,228	0,580	0,576	0,229	0,204	0,229	0,038
PEMUT1	0,190	0,432	0,574	0,210	0,373	0,219	0,043
PEMUT2	0,185	0,425	0,525	0,203	0,365	0,216	0,043

Uma vez aplicado o modelo, é então possível obter a matriz global que apresenta a avaliação de cada uma das soluções nos vários cenários de estudo, matriz essa que pode ser vista no capítulo [4](#).

Capítulo 4

Resultados e discussão

4.1 Apresentação

Este capítulo do estudo debruça-se sobre os resultados obtidos, assim como o seu enquadramento na literatura existente, de modo a perceber concordâncias e diferenças existentes, tentando explicar a origem das mesmas.

Tabela 4.1: Pontuação final de cada solução

Símbolo	Tipo	Total
PEM4	PEM	2,084
PEM3	PEM	2,055
PEM2	PEM	2,050
PEM1	PEM	2,048
PEMUT1	PEM	2,040
GTS2000	Alcalino	2,031
NM1	Alcalino	2,027
GTS1600	Alcalino	2,025
GTS800	Alcalino	2,015
GTS600	Alcalino	2,012
GTS400	Alcalino	2,009
NM2	Alcalino	2,009
GTS200	Alcalino	2,007
PEMUT2	PEM	1,963

Fazendo o somatório de todos os valores obtidos na secção 3, é possível construir a Tabela 4.1 que contempla a pontuação final de todas as soluções estudadas. Esta apresenta as soluções por ordem decrescente de classificação, bem como a pontuação respetiva.

4.2 Resumo dos resultados obtidos

Nesta secção será feita a síntese dos resultados obtidos, ao nível das diferentes métricas analisadas, entre as várias soluções em estudo.

- **Produção Nominal**

A nível de produção nominal, destacam-se as soluções alcalinas que registam valores tão altos como 2000 Nm³, mas mantendo a capacidade de se adaptar a casos onde não existe necessidade de tanta produção. Pode-se justificar este facto com o fornecedor em questão apresentar uma gama mais vasta, com soluções mais robustas e adequadas para grandes projetos, diferindo então das soluções mais específicas como o caso das PEM.

- **Pressão de saída do hidrogénio**

A pressão de saída do hidrogénio revelou-se uniforme ao longo de todos os eletrolisadores estudados, tendo-se registado um valor de 30 bar. Estes valores diferem de alguns indícios da literatura, que sugerem que as tecnologias alcalinas produzem hidrogénio a uma pressão final inferior à das tecnologias PEM. No entanto, de entre os fornecedores estudados, todos conseguiram desenvolver soluções que permitem chegar ao valor que a indústria classifica como adequado para conservação de hidrogénio.

- **CAPEX**

A nível de CAPEX, os resultados apresentam-se como mistos, com uma tendência para as soluções PEM mostrarem valores mais elevados, dentro desta métrica, ao mesmo tempo que soluções desta tecnologia verificam, em certos casos, inferiores aos das soluções alcalinas. Esta discrepância advém das várias abordagens das empresas, sendo que algumas apresentam soluções padrão que não permitem um grande nível de personalização, o que resulta num custo de produto final superior. Em contrapartida, algumas empresas optam por projetar cada uma das suas soluções, permitindo atingir custos mais competitivos que chegam a ultrapassar algumas barreiras que se estipulam na literatura.

- **OPEX**

Esta métrica mostrou-se em linha com a dimensão da solução, sendo que aquelas que verificam produções nominais superiores registam, por consequente, custos operacionais mais elevados. Quando comparando soluções com a mesma capacidade de produção nominal, verifica-se que, salvo a solução PEMUT2, as opções de carácter alcalino apresentam custos de operação tipicamente superiores.

- **Vida útil**

A métrica relativa à vida útil dos dispositivos verificou uma uniformidade generalizada ao longo dos vários dispositivos estudados, tendo apenas o último registado um valor mais reduzido. Apesar do mencionado, foi referido pelo fornecedor que estas soluções, em certos cenários, conseguem chegar a vidas úteis superiores a 10 anos, com resultados ainda interessantes a nível de produtividade.

- **Implementação prática**

Esta métrica permite constatar que, de entre todas as soluções estudadas, as do tipo PEM são as que apresentam maior incidência a nível de implementação, não sendo isso sinónimo da generalidade do mercado, mas apenas da realidade e da maturidade das empresas que facultaram dados para a realização deste estudo.

- **Eficiência**

Os valores de eficiência obtidos entre os fornecedores permitem constatar que as tecnologias do tipo PEM (com valores entre os 71% e os 76,1%) sobressaem em relação às alcalinas (com valores na ordem dos 69%).

- **Nível de TRL**

Os valores registados ao nível da prontidão das tecnologias também se relacionam, intrinsecamente, com a implementação prática das mesmas, uma vez que aquelas que apresentam múltiplas aplicações no mercado mostram níveis de TRL bastante elevados, enquanto as soluções que ainda estão numa fase inicial da sua implementação no mercado, associam-se a um nível TRL mais baixo.

A Tabela 4.2 tem como objetivo resumir os vários resultados obtidos e perceber quais as ligas com melhor desempenho em cada uma das métricas.

Tabela 4.2: Síntese de resultados obtidos

Métrica	Conclusões globais	Melhor solução	Tipo
PN	Depende da dimensão da solução, tendo se verificado melhores valores nas soluções alcalinas	GTS2000	Alcalino
CAPEX	Verificam-se valores mais baixos nas soluções alcalinas	NM1	Alcalino
OPEX	Para produções nominais similares, as tecnologias alcalinas superiorizam-se	NM1	Alcalino
IP	As soluções PEMUT1 e PEMUT2 destacam-se, pois apresentam mais unidades instaladas no mercado	PEMUT1 PEMUT2	PEM
EF	A nível de eficiência os valores registados sugerem uma maior eficiência das soluções PEM	PEM1 PEM2 PEM3 PEM4	PEM
TRL	As soluções PEM verificam níveis de TRL mais elevados que as alcalinas	PEMUT1 PEMUT2	PEM

A tabela mostra que nenhum tipo de tecnologia foi reconhecido como superior em todas as métricas em estudo, tendo as várias sido divididas entre os diferentes tipos de solução. É também possível observar que há métricas em que as soluções têm o mesmo valor e, portanto, partilham o facto de serem a melhor solução.

4.3 Comparação com a literatura e justificação das diferenças

Para verificar se os resultados obtidos estão de acordo com os existentes na literatura, foi efetuado um levantamento de alguns estudos na área, com o objetivo de comparar as conclusões obtidas no presente estudo. O mesmo pode ser sintetizado entre as Tabelas [4.3](#) e [4.6](#).

Tabela 4.3: Revisão bibliográfica-1

Ano	Procedência	Título	Abordagem
2024	China	Overview of electrolyser and hydrogen production power supply from industrial perspective	Análise das principais tecnologias de electrolisadores, incluindo uma série de fatores do ponto de vista do aumento da eficiência num contexto industrial.
2024	China	A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies	Estudo das potenciais aplicações do hidrogénio em vários sectores; discute as diferentes formas de produzir hidrogénio; destaca os avanços no transporte e armazenamento e identifica áreas de investigação importantes para o futuro desenvolvimento e implementação generalizada das tecnologias do hidrogénio.
2023	Malásia	Hydrogen electrolyser technologies and their modelling for sustainable energy production: A comprehensive review and suggestions	Análise de cada solução de produção de hidrogénio, a fim de identificar problemas e soluções para os mesmos, com o propósito de aumentar a competitividade das tecnologias.
2023	Alemanha	A comparison of the most promising low-carbon hydrogen production technologies	Comparação das tecnologias de produção de hidrogénio com baixo teor de carbono, baseado em critérios económicos e ambientais

Tabela 4.4: Revisão bibliográfica-2

Título	Resultados chave	Diferenças	Referências
Overview of electrolyser and hydrogen production power supply from industrial perspective	Os eletrolisadores alcalinos revelam-se como uma tecnologia mais madura, mas apresentam uma baixa densidade de corrente e inferior capacidade produção de hidrogénio .Os eletrolisadores PEM apresentam uma taxa de produção nominal mais elevada mas com custos de funcionamento mais altos.	Os níveis de TRL e PN registaram o contrário	[39]
A comprehensive review of the promising clean energy carrier: Hydrogen production, transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies	As tecnologias PEM apresentam alta densidade de potência no entanto um custo elevado do material. As tecnologias alcalinas caracterizam-se por uma elevada eficiência, materiais de baixo custo e são uma opção bem estabelecida, embora com disponibilidade comercial limitada	Os níveis de eficiência e TRL apresentam uma algumas discrepâncias	[73]
Hydrogen electrolyser technologies and their modelling for sustainable energy production: A comprehensive review and suggestions	As tecnologias PEM têm custos de aquisição mais elevados e uma eficiência inferior	Os valores de CAPEX e eficiência verificam-se, no geral, mais competitivos nas soluções PEM	[17]
A comparison of the most promising low-carbon hydrogen production technologies	As soluções alcalinas apresentam-se como mais maduras eficientes	Os níveis de eficiência e de TRL são maiores nas soluções PEM	[19]

Tabela 4.5: Revisão bibliográfica-3

Ano	Procedência	Título	Metodologia
2023	-	Hydrogen towards sustainable transition: A review of production, economic, environmental impact and scaling factors	Análise termodinâmica de processos de eletrólise alcalina e PEM, com o objetivo de comparar vários parâmetros das duas tecnologias.
2019	-	Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis	Comparação dos princípios de funcionamento das tecnologias PEM e alcalinas e análise das duas as soluções
2017	Alemanha	Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry	Descrição das soluções de descarbonização para a indústria, bem como as dificuldades técnicas, os condicionalismos financeiros, os investimentos a efetuar e necessidades de investigação para viabilizar as soluções apresentadas.
2014	Europa	Development of Water Electrolysis in the European Union	Análise de dados bibliográficos; dados fornecidos pelos fabricantes de electrolisadores e outras partes interessadas, afim de avaliar as várias soluções de eletrólise com base em vários indicadores-chave de desempenho.

Tabela 4.6: Revisão bibliográfica-4

Título	Resultados chave	Diferenças	Referências
Hydrogen towards sustainable transition: A review of production economic ,enviromental impact and scaling factors	Tecnologias PEM tem um CAPEX mais elevado bem como uma vida útil mais baixa, enquanto as tecnologias alcalinas têm valores de de eficiência de pressão mais baixo.	Os valores de vida útil pressão registados são similares	[74]
Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis	Tecnologias PEM têm um custo superior bem como uma vida útil baixa	A vida útil resgistou-se similar	[75]
Low carbon energy and feedstock f or the European chemical industry	Ambas as soluções têm eficiência e despesas de funcionamento semelhantes, mas as tecnologias PEM têm custos de aquisição mais elevados	As tecnologias PEM superiorizam-se a nível de eficiência,custos operacionais e de aquisição mais baixos	[76]
Development of Water Electrolysis in the European Union	Atualmente e num futuro próximo as tecnologias PEM são mais caras , enquanto as soluções alcalinas são mais eficazes atualmente podendo paradigma irá mudar no futuro.	As melhores eficiências registaram se nas soluções PEM	[77]

As diferenças registadas nestes quadros serão devidamente justificadas na secção seguinte do estudo, com base em alguns fatores registados durante o seu desenvolvimento.

4.3.1 Justificação das diferenças

As diferenças verificadas entre os resultados obtidos e a revisão bibliográfica podem justificar-se por motivos que variam mediante a diferença em questão. O foco desta secção é justificar as principais discrepâncias registadas e os motivos inerentes às mesmas.

- **Diferenças a nível do CAPEX.**

A nível de custos de aquisição é possível verificar em outros estudos que os valores das soluções alcalinas se apresentam como inferiores aos das soluções PEM. A discrepância entre esta realidade, e a verificada no estudo efetuado prende-se com o carácter padronizado de grande parte das soluções alcalinas presentes em estudo. Este aspeto limita os ajustes a cada projeto, resultando num incremento de custos, que contrasta com o carácter altamente personalizado das soluções PEM que foram consideradas.

- **Diferenças a nível de eficiência**

A discrepância verificada, em termos de eficiência, pode ser justificada pelo facto de os estudos que apontam para uma maior eficiência em sistemas alcalinos terem sido publicados há cerca de uma década, o que permitiu que as tecnologias PEM tirassem partido da sua maior densidade de corrente, para atingir eficiências mais elevadas. Uma outra justificação para os estudos mais recentes, que apontam para a mesma conclusão, pode ser mais uma vez a personalização superior das soluções PEM abordadas em estudo.

- **Diferenças a nível de TRL**

Os níveis de TRL registados apresentaram disparidades face aos verificados na literatura, tendo as soluções alcalinas ficado aquém dos níveis habituais e as soluções PEM transcendido os mesmos. A maturidade e o mercado das empresas que contribuem para o estudo influenciaram, em muito, esta métrica, pois as empresas que já se apresentam no mercado com maior maturidade e volume de vendas podem apresentar o nível de TRL das suas soluções como 8 e 9. Em contrapartida, aquelas cujas soluções ainda não apresentam uma presença significativa no mercado registam níveis de TRL inferiores.

- **Diferenças a nível de vida útil**

A principal diferença entre os valores de vida útil registados prende-se com uma uniformidade verificada entre as soluções de carácter alcalino e carácter PEM, sendo que a literatura fazia prever uma discrepância maior entre estes valores. A principal justificação para esta diferença é a data de publicação dos estudos que apontam para esse facto, o que pode sugerir que no prazo temporal foi possível as tecnologias colmatarem esta divergência, uniformizando assim os valores do mercado.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Este estudo permitiu a implementação de um modelo matemático que visou a avaliação multicritérioria de várias soluções de eletrólise de hidrogénio verde. Foi possível constatar, de entre as soluções submetidas pelos vários fornecedores que fizeram parte deste estudo, que não existe uma solução que se superiorize verdadeiramente em todas as métricas abordadas, sendo possível verificar que, mediante a necessidade do projeto de produção de hidrogénio, a solução tecnológica no mercado pode variar. Esta paradigma de mudança conseguiu ser previsto, com sucesso, pelo modelo, tendo por base a importância relativa dos vários critérios de avaliação do estudo, tal como foi apresentado na Tabela 4.2.

O presente estudo possibilitou ainda a implementação de um modelo matemático destinado a avaliar várias soluções de eletrólise de hidrogénio verde, fornecidas pelos diferentes fornecedores que participaram no mesmo. Os resultados mostraram que nenhuma opção é verdadeiramente superior, em relação às outras em todos os critérios examinados. Pelo contrário, a eficácia comparativa de cada solução diferiu com base nas métricas específicas que foram tidas em conta.

As conclusões mostram que não existe uma abordagem tecnológica única para a produção de hidrogénio. Pelo contrário, dependendo das necessidades e objetivos específicos de cada projeto, é necessário ponderar considerações como o custo, a escalabilidade, a eficiência e a fiabilidade, de acordo com os propósitos do projeto e o contexto específico.

Como se pode ver na Tabela 4.2, o modelo foi capaz de antecipar esta flutuação, atribuindo aos vários critérios, diferentes graus de relevância. Este método tornou possível compreender, em profundidade, a comparação entre várias tecnologias numa variedade de cenários e necessidades.

A investigação destaca a importância de adotar uma estratégia personalizada ao escolher uma tecnologia de produção de hidrogénio verde. Utilizando um quadro de avaliação exaustivo e baseado em critérios, como o criado neste estudo, os responsáveis pelos projetos podem tomar decisões bem alicerçadas, tendo em conta os objetivos e limitações específicos dos seus projetos.

Como resultado, o presente estudo realça a complexidade dos métodos de produção de hidrogénio verde, tendo por base a tomada de decisões racionais e baseada em critérios. No final, o

modelo fornecido faculta um instrumento sólido para avaliar e escolher a melhor tecnologia, permitindo avaliar várias soluções. Tendo por base vários parâmetros permite, inclusive, aumentar a importância relativa daqueles que o utilizador considerar mais relevantes para a sua operação, de acordo com os requisitos específicos de um projeto, apoiando assim o processo de produção de hidrogénio de forma mais eficiente, duradoura ambientalmente responsável.

5.2 Limitações e trabalhos futuros

A maior limitação deste estudo relacionou-se com a obtenção de informação indispensável à sua realização. Esta dependeu muito da resposta das empresas, pois o não fornecimento de informação, ou o seu provimento demorado, dificultou, e muito, o presente trabalho. A aliar a este facto, algumas empresas recusaram o fornecimento de dados devido a normas internas. Na sequência do estudo efetuado é possível constatar conclusões interessantes a partir do modelo de avaliação utilizado. Este tem potencial para auxiliar e facultar apoio na tomada de decisões acerca da solução tecnológica mais adequada ao projeto em questão. Numa perspetiva de trabalhos futuros, o mesmo modelo pode ser implementado numa gama mais ampla de soluções, de modo a tornar ainda mais abrangentes e consensuais as conclusões provenientes da matriz. Outra possibilidade é ainda a inclusão de novos critérios de avaliação que venham a ganhar relevância, como o consumo de água do eletrolisador, pressão e a vida útil, caso novas entradas apresentem valores dispares que justifiquem a contabilização destes critérios.

Referências

- [1] Eco Sapo. <https://eco.sapo.pt/2024/06/18/empresas-de-producao-de-gases-renovaveis-tem-apoio-de-70-milhoes-do-prr/>. acedido à 21 de Junho.
- [2] Vincenzo Balzani Nicola Armaroli. *The Hydrogen Issue*. PhD thesis, Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA, Weinheim, 2011.
- [3] Tânia Esmeralda Rodrigues Estêvão. O hidrogénio como combustível, 2008.
- [4] John S. Rigden. *Hydrogen The essential Element*. Harvard University Press, 2003.
- [5] William Lee. Jolly. *hydrogen*. Encyclopedia Britannica, 2024.
- [6] Massimo Santarelli Andrea Lanzini Domenico Ferrero Francesco Calise, Massimo Dentice D'Accadia. *Solar Hydrogen Production*. Processes, Systems and Technologies, 2019.
- [7] Vladimir Molkov. *Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering I*. bookboon, 2013.
- [8] Paulo Coelho. *Tabelas de Termodinâmica*. LIDEL, 2007.
- [9] National Geographic. Recapitulando: As propriedades do hidrogénio. <https://www.nationalgeographic.pt/ciencia/propriedades-hidrogenio407>, 2023.
- [10] National Institute of Standards and Technology. *NIST Chemistry WebBook*. U.S department of commerce, 2023.
- [11] World Nuclear Association. Heat values of various fuels. <https://world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>, 2016.
- [12] Woodgas.com. Biomass energy foundation: Fuel densities. https://web.archive.org/web/20100110042311/http://www.woodgas.com/fuel_densities.htm, 2010.
- [13] Andreas Poullikkas Pavlos Nikolaidis. *A comparative overview of hydrogen production processes*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, Cyprus University of Technology, P.O. Box 50329, 3603, Limassol, Cyprus, 2017.
- [14] Catherine G. Manning. Technology readiness levels. *Nasa Website*, 2023.
- [15] John C. Mankins. *TECHNOLOGY READINESS LEVELS*. PhD thesis, Office of Space Access and Technology NASA, 1995.
- [16] Hai-Bo Yuan c James C. Moran a Nakorn Tippayawong Fawad Rahim Malik a, b. *Overview of hydrogen production technologies for fuel cell utilization*. PhD thesis, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Chiang Mai University, Thailand, 2023.

- [17] * Ali Q. Al-Shetwi b R.A. Begum c M.J. Hossain d Pin Jern Ker e TM Indra Mahlia f A.Z. Arsad a, M.A. Hannan a. *Hydrogen electrolyser technologies and their modelling for sustainable energy production: A comprehensive review and suggestions*. PhD thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Tenaga Nasional, Kajang 43000, Malaysia, 2023.
- [18] Hwai Chyuan Ong e Anh Tuan Hoang f Thanh-Binh Nguyen g Cheng-Di Dong g Wei-Hsin Chen a b c, Partha Pratim Biswas b d. *A critical and systematic review of sustainable hydrogen production from ethanol/bioethanol: Steam reforming, partial oxidation, and autothermal reforming*. PhD thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, 2023.
- [19] Uwe Riedel Sandra Dermühl *. *A comparison of the most promising low-carbon hydrogen production technologies*. PhD thesis, Institute of Low-Carbon Industrial Processes, German Aerospace Center (DLR), Walther-Pauer-Straße 5, Cottbus 03046, Germany, 2023.
- [20] Amir Sharafian Kevin Wei Omar E. Herrera Walter Mérida Shashank Reddy Patlolla, Kyle Katsu. *A review of methane pyrolysis technologies for hydrogen production*. PhD thesis, Clean Energy Research Centre, The University of British Columbia, 2360 East Mall, Vancouver, BC, V6T 1Z3, Canada, 2023.
- [21] S Cavallaro b S Freni a, G Calogero a. *Hydrogen production from methane through catalytic partial oxidation reactions*. PhD thesis, Istituto CNR-TAE, S.ta S. Lucia, 5-98125 Messina, Italy, 2000.
- [22] Hwai Chyuan Ong e Anh Tuan Hoang f Thanh-Binh Nguyen g Cheng-Di Dong g Wei-Hsin Chen a b c, Partha Pratim Biswas b d. *A critical and systematic review of sustainable hydrogen production from ethanol/bioethanol: Steam reforming, partial oxidation, and autothermal reforming*. PhD thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, Tainan 701, Taiwan, 2023.
- [23] Huann-Ming Chou Wei-Cheng Chiu, Rong-Fang Horng. *Hydrogen production from an ethanol reformer with energy saving approaches over various catalysts*. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, Clean Energy Center, Kun Shan University, No. 949, Da-Wan Road, Yung-Kang District, Tainan 710, Taiwan, 2013.
- [24] Ahmed I. Osman. *Catalytic Hydrogen Production from Methane Partial Oxidation: Mechanism and Kinetic Study*. PhD thesis, Queen's University Belfast, David Keir Building, School of Chemistry and Chemical Engineering, Stranmillis Road, BT9 5AG Belfast, UK, 2020.
- [25] Uwe Riedel Sandra Dermühl *. *A Review on Hydrogen Production from Biomass and Commercialization Assessment Through Technology Readiness Levels (TRLs)*. PhD thesis, Institute of Low-Carbon Industrial Processes, German Aerospace Center (DLR), Walther-Pauer-Straße 5, Cottbus 03046, Germany, 2023.
- [26] Wei Liu Jing Guo Mo Xian Yujin Cao, Hui Liu. *Debottlenecking the biological hydrogen production pathway of dark fermentation: insight into the impact of strain improvement*. PhD thesis, CAS Key Laboratory of Biobased Materials, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266101, China, 2022.

- [27] Ali Q. Al-Shetwi R.A. Begum M.J. Hossain Pin Jern Ker TM Indra Mahlia A.Z. Arsad, M.A. Hannan. *Hydrogen electrolyser technologies and their modelling for sustainable energy production: A comprehensive review and suggestions*. PhD thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Tenaga Nasional, Kajang 43000, Malaysia, 2022.
- [28] Trevor M. Letcher. *Comprehensive Renewable Energy*. sciencedirect, 2022.
- [29] Muhammad Kamran and Muhammad Rayyan Fazal. *Renewable Energy Conversion Systems*. sciencedirect, 2021.
- [30] Eric Latrille-Hélène Carrère Jean-Philippe Steyer Xin Mei Guo, Eric Trably. *Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review*. PhD thesis, INRA, UR050, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, F-11100 Narbonne, France, 2010.
- [31] Kavitha S Yakesh Kannah R Yogalakshmi K N Sivashanmugam P Amit Bhatnagar Gopalakrishnan Kumar Rajesh Banu J, Mohamed Usman T M. *A critical review on limitations and enhancement strategies associated with biohydrogen production*. PhD thesis, Department of Life Sciences, Central University of Tamilnadu, Neelakudi, Thiruvavur, Tamilnadu, India, 2021.
- [32] Yasuo Asada Jun Miyake, Masato Miyake. *Biotechnological hydrogen production research for efficient light energy conversion*. PhD thesis, National Institute for Advanced Interdisciplinary Research, Tsukuba, Ibaraki 305-8562, Japan, 1999.
- [33] Supriyanka Rana a Lakhveer Singh a b Mimi Sakinah a Zularisam Ab Wahid Puranjan Mishra a, Santhana Krishnan a. *Outlook of fermentative hydrogen production techniques: An overview of dark, photo and integrated dark-photo fermentative approach to biomass*. PhD thesis, Faculty of Engineering Technology, Universiti Malaysia Pahang, Lebuhraya Tun Razak, 26300, Gambang, Kuantan, Pahang, Malaysia, 2019.
- [34] Jorge Rocha René H. Wijffels Ida Akkerman, Marcel Janssen. *Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design*. PhD thesis, The New Delta, Laan 1933-1, 6711 NX Ede, Netherlands, 2002.
- [35] Annabelle Brisse Andreas Patyk, Till M. Bachmann. *Life cycle assessment of H₂ generation with high temperature electrolysis*. PhD thesis, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute for Technology Assessment and Systems Analysis (ITAS), Karlstraße 11, D-76133 Karlsruhe, Germany, 2013.
- [36] Ali Q. Al-Shetwi b R.A. Begum c M.J. Hossain d Pin Jern Ker e TM Indra Mahlia f A.Z. Arsad a, M.A. Hannan a. *Hydrogen electrolyser technologies and their modelling for sustainable energy production: A comprehensive review and suggestions*. PhD thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, Universiti Tenaga Nasional, Kajang 43000, Malaysia, 2023.
- [37] Jose M. Marín Arcos and Diogo M. F. Santos. *The Hydrogen Color Spectrum: Techno-Economic Analysis of the Available Technologies for Hydrogen Production*. PhD thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2023.
- [38] National Grid. The hydrogen colour spectrum. *National Grid Website*, 2023.

- [39] Hengyi Zhu Shiqi Zhang JXiaoqiang Guo. *Overview of electrolyser and hydrogen production power supply from industrial perspective*. PhD thesis, Department of Electrical Engineering, Yanshan University, 2023.
- [40] Jeremy Hartvigsen James O'Brien Roxanne Pinsky, Piyush Sabharwall. *Comparative review of hydrogen production technologies for nuclear hybrid energy systems*. PhD thesis, University of Michigan, 2020.
- [41] Aleksandar Cuculi' Ivan Pani' and Jasmin Celi'. *Color-Coded Hydrogen: Production and Storage in Maritime Sector*. PhD thesis, Faculty of Maritime Studies, University of Rijeka, 2022.
- [42] Jörn Brauns and Thomas Turek. *Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review*. PhD thesis, Institute of Chemical and Electrochemical Process Engineering, Clausthal University of Technology,, 2020.
- [43] Guilherme Alexandre Correia Canas Martins. *Análise de um sistema de energia usando uma célula bivalentede membrana eletrolítica alcalina a hidrogénio. Desenho de uma célula. Estado atual desta tecnologia e seu desenvolvimento futuro*. PhD thesis, UNIVERSIDADE DE LISBOA FACULDADE DE CIÊNCIAS, 2022.
- [44] Ju''rgen Mergel Detlef Stolten Marcelo Carmo, David L. Fritz. *A comprehensive review on pem water electrolysis*, 2013.
- [45] Petra Zapp Ramchandra Bhandari*, Clemens A. Trudewind. *Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis e a review*. PhD thesis, Institute for Energy and Climate Research, Systems Analysis and Technology Evaluation (IEK-STE), Forschungszentrum Jülich, D-52425 Jülich, Germany, 2013.
- [46] P. Blennow A. B. Hansen J. B. Hansen B. V. Mathiesen M. B. Mogensen A. Hauch, R. Küngas. *Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC)*. PhD thesis, American Association for the Advancement of Science, Washington, 2020.
- [47] Dennis Y.C. Leung Meng Ni, Michael K.H. Leung. *Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC)*. PhD thesis, Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, PR China, 2008.
- [48] G. Schiller Æ A. Ansar Æ M. Lang Æ O. Patz. *High temperature water electrolysis using metal supported solid oxide electrolyser cells (SOEC)*. PhD thesis, Deutsches Zentrum fu''r Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut fu''r Technische Thermodynamik, Stuttgart, Germany, 2008.
- [49] ISO International Organization for Standardization. Iso 14687. <https://www.iso.org/standard/69539.html>, 2019.
- [50] Utis . <https://www.utis.pt/pt-pt/>. . acedido à 20 de Junho.
- [51] Utis . <https://www.fusion-fuel.eu/>. . acedido à 20 de Junho.
- [52] Nel Hydrogen . <https://nelhydrogen.com/>. . acedido à 20 de Junho.
- [53] ITM Power . <https://itm-power.com/>. . acedido à 20 de Junho.

- [54] Stargate Hydrogen. <https://stargatehydrogen.com/rockfins-case-study/>. . acessido à 20 de Junho.
- [55] Enapter. <https://www.enapter.com/>. acessido à 20 de Junho.
- [56] Elogen. <https://elogenh2.com/en/>. acessido à 20 de Junho.
- [57] John Cockerill. <https://johncockerill.com/en/>. acessido à 20 de Junho.
- [58] Hystar. <https://hystar.com/>. acessido à 20 de Junho.
- [59] Nemesys. <https://nemesysenergy.com/en/>. acessido à 20 de Junho.
- [60] Plug Power. <https://www.plugpower.com/>. acessido à 20 de Junho.
- [61] R.Venkata Rao. *Decision Making in the Manufacturing Environment Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods*. Springer, 2013.
- [62] Deng Julong. *Introduction to Grey System Theory*. Springer, 1988.
- [63] RONALD R. YAGER. *On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decisionmaking*. 1993.
- [64] Eduardo Fernández-González Juan Carlos Leyva-López. *A new method for group decision support based on ELECTRE III methodology*. PhD thesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Ciudad Universitaria, Calzada de Las Americas S/N, Culiacán, Sinaloa, Mexico, CP 80040, Mexico, 2002.
- [65] Friedel Peldschus Zenonas Turskis Edmundas Kazimieras Zavadskas, Artiras Kaklauskas. *Multi-Attribute Assessment of Road Design Solutions by Using the Copras Method*. PhD thesis, Vilnius Gediminas Technical University, Lithuania, 2007.
- [66] Edmundas Kazimieras Zavadskas Seyed Hossein Razavi Hajiaghah, Shide Sadat Hashemib. *Complex Proportional Assessment (COPRAS) based Multiple-Criteria Decision Making (MCDM) paradigm for hard turning process parameters*. PhD thesis, Institute for Trade Studies and Research, Sheibani Alley, North Jamalzade Ave., Tehran, Iran c Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, Sauletekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania, 2012.
- [67] Rasika S. Jadhav Shruti S. Suryawanshi Sunil J. Raykar Sairaj B. Patil, Tushar A. Patole. *Complex Proportional Assessment (COPRAS) based Multiple-Criteria Decision Making (MCDM) paradigm for hard turning process parameters*. PhD thesis, D.Y. Patil College of Engineering and Technology, Kasaba Bawada, India, 2022.
- [68] Edmundas Kazimieras Zavadskas Seyed Hossein Razavi Hajiaghah, Shide Sadat Hashemib. *Selecting the optimal renewable energy using multi criteria decision making*. PhD thesis, Young Researchers Club, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran, 2014.
- [69] Agência Portuguesa do Ambiente. Poder calorífico inferior, fator de emissão e fator de oxidação. *Comércio Europeu de Licenças de Emissão (CELE) 2013-2020*, 2013.
- [70] Engineering toolbox. Combustion of fuels - carbon dioxide emission. *Engineering toolbox*, 2009.

- [71] Buck Feng. Power plant efficiency: Coal, natural gas, nuclear, and more. *pci energy solutions*, 2023.
- [72] Hannah Ritchie, Pablo Rosado, and Max Roser. Co emissions by fuel. *Our World in Data*, 2020. <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel>.
- [73] Lei Zhang , Cunqi Jia , Fuqiao Bai , Wensen Wang , Senyou An , Kaiyin Zhao , Zihao Li , Jingjing Li , Hai Sun .A comprehensive review of the promising clean energy carrier:Hydrogen production,transportation, storage, and utilization (HPTSU) technologies.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, China.2024
- [74] Aravindan M , Praveen Kumar G.Hydrogen towards sustainable transition: A review of production economic ,enviromental impact and scaling factors.School of Mechanical Engineering, Vellore Institute of Technology, Vellore, 632014, Tamil Nadu, India.2023
- [75] Yujing Guo, Gendi Li, Junbo Zhou and Yong Liu.Comparison between hydrogen production by alkaline water electrolysis and hydrogen production by PEM electrolysis.College of Mechanical and Electrical Engineering.2019
- [76] Dr. Alexis Michael Bazzanella,Dr. Florian Ausfelder,DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie.Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry.DECHEMA.2017
- [77] Luca Bertuccioli,Alvin Chan,David Hart,Franz Lehner, Ben Madden,Eleanor Standen.Development_of_Water_Electrolysis_in_the_European_Union.Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking,Switzerland.2014

Apêndice A

Metodologia CMPO

O presente anexo ilustra a proposta segundo a metodologia CMPO Capítulo [3](#).

Tabela A.1: Metodologia CMPO - 1

Acrônimo	Tipo	PN	Pontos	Capex	Pontos	Opex	Pontos
GTS200	Alcalino	200	8	1200	12	43559,1	7
GTS400	Alcalino	400	10	1200	12	87118,2	6
GTS600	Alcalino	600	11	1200	12	130677,3	5
GTS800	Alcalino	800	12	1200	12	174236,4	4
GTS1600	Alcalino	1600	13	1200	12	348472,8	2
GTS2000	Alcalino	2000	14	1200	12	435591	1
NM1	Alcalino	16	2	517	14	3147,245	14
NM2	Alcalino	33	3	1739	11	6580,604	12
PEM1	PEM	71	5	1050	13	6300	13
PEM2	PEM	95	6	1050	13	8400	11
PEM3	PEM	142	7	1050	13	11100	10
PEM4	PEM	473	10	1050	13	42000	8
PEMUT1	PEM	10,7	1	23980,82	10	36000	9
PEMUT2	PEM	60	3	23809,52	10	200000	3

Tabela A.2: Metodologia CMPO - 2

Acrônimo	Tipo	VU	Pontos	Ip	Pontos	EF	Pontos	TRL	Pontos	Total
GTS200	Alcalino	20	14	1	11	69,4 %	12	6	11	83,00
GTS400	Alcalino	20	14	1	11	69,40%	12	6	11	76
GTS600	Alcalino	20	14	1	11	69,40%	12	6	11	80
GTS800	Alcalino	20	14	1	11	69,40%	12	6	11	82
GTS1600	Alcalino	20	14	1	11	69,40%	12	6	11	84
GTS2000	Alcalino	20	14	1	11	69,40%	12	6	11	86
NM1	Alcalino	20	14	2	12	69%	11	7	12	88
NM2	Alcalino	20	14	2	12	69%	11	7	12	66
PEM1	PEM	20	14	4	13	76,10%	14	8	13	77
PEM2	PEM	20	14	4	13	76,10%	14	8	13	79
PEM3	PEM	20	14	4	13	76,10%	14	8	13	81
PEM4	PEM	20	14	4	13	76,10%	14	8	13	87
PEMUT1	PEM	10	13	140	14	60%	10	9	14	63
PEMUT2	PEM	10	13	140	14	71,65%	13	9	14	70