

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE 2022/2023

**Avaliação de Ciclo de Vida dos Impactes Sociais
(Social Life Cycle Assessment) da Produção de
Hidrogénio “Verde”**

RUI PEDRO COUTO ALVES DOS REIS

Dissertação submetida para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Presidente do Júri:

Adrián Manuel Tavares da Silva, Professor Associado do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientadora Académico:

Belmira de Almeida Ferreira Neto, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Metalúrgica e dos Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Coorientador:

Gustavo Paias da Silva Torres Rangel, Assistente Convidado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e dos Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Setembro, 2023

*“We all love to instruct,
though we can teach only what is not worth knowing.”
Jane Austen*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de dedicar a presente dissertação a todas as pessoas que me apoiaram, sem as quais não seria possível a sua elaboração.

À Prof. Belmira Neto e Prof. Gustavo Rangel, orientadores desta dissertação, membros integrados do LEPABE – Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: LA/P/0045/2020 (ALICE), UIDB/00511/2020 e UIDP/00511/2020 (LEPABE), financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), agradeço por no decorrer destes meses se dedicarem a auxiliá-me na realização desta dissertação. Obrigado por todos os conselhos e valores transmitidos.

Expresso a minha gratidão ao engenheiro Tommaso Orlandini e ao engenheiro Pedro Valverde do projeto GreenH₂Atlantic pelo seu valioso apoio e contribuição na obtenção de dados.

A todos os docentes da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, que me transmitiram os conhecimentos necessários para me tornar num engenheiro do Ambiente.

Aos meus amigos, pelo apoio, incentivo e por todos os momentos partilhados nestes 5 anos.

Por fim, agradeço à minha família pelo esforço que fizeram para que eu pudesse estudar. Por estarem sempre ao meu lado a motivarem, e a demonstrar o vosso amor incondicional. Um especial agradecimento, à minha irmã e ao meu irmão, pela paciência e força que me deram ao longo destes anos.

Resumo

O crescimento da produção industrial, impulsionado pelo aumento populacional e pelo crescente consumo, resultou num aumento substancial na procura por energia, o que por sua vez, contribuiu para a exploração excessiva de recursos não renováveis.

A produção de eletricidade por meio dos recursos não renováveis acarreta sérios problemas para o meio ambiente, destacando-se, a emissão de gases de efeito estufa. De forma a combater os problemas ambientais tem-se vindo a investir nas energias renováveis como hidroelétrica, eólica e solar. Contudo essas fontes não conseguem atender plenamente à procura, resultando em desequilíbrios entre o consumo e a produção de energia renovável.

Como solução para esse desafio, o hidrogénio surge como um vetor essencial para a descarbonização dos sistemas energéticos. O hidrogénio verde ganha destaque por ser produzido a partir de fontes limpas, reduzindo significativamente a dependência de combustíveis fósseis e, consequentemente, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Nesta dissertação, a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) apresentada nas Diretrizes para a Avaliação do Ciclo de Vida Social de Produtos da UNEP/SETAC é aplicada à produção de hidrogénio verde a partir da separação eletrolítica da água por um eletrolisador de troca de prótons. O sistema estudado abrange as etapas de extração e processamento das matérias-primas do eletrolisador e do sistema de osmose inversa, a manufatura dos dois sistemas e a produção do hidrogénio verde.

Seguindo a metodologia da ACV, os dados referentes a cada uma das etapas incluídas no sistema são inventariados e posteriormente introduzidos no software PSILCA v.3 Starter integrado no programa informático SimaPro versão 9.3.0.2. Os dados foram avaliados considerando várias categorias, designadamente, trabalhadores, intervenientes na cadeia de valor e sociedade através dos indicadores: “crianças empregadas, total”; “frequência de trabalho forçado”; “horas de trabalho semanais por funcionário”; “bens produzidos por trabalho forçado”; “salário digno, mensal”; “diferença salarial entre gêneros”; “esperança de vida corrigida pela incapacidade devido à poluição interna e externa do ar e da água”; “taxa de acidentes fatais no local de trabalho”; “taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho”; “presença de medidas suficientes de segurança”; “direitos de associação e negociação”; “densidade sindical”; “contribuição do setor para o desenvolvimento económico”; “adesão a uma iniciativa que promove a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento”.

Os resultados obtidos revelam que a extração e processamento da matéria-prima necessária para a manufatura dos eletrolisadores foi a principal etapa responsável pelos impactos sociais em 12 indicadores. Por outro lado, a etapa de manufatura dos eletrolisadores destaca-se como o maior contribuinte para os indicadores “horas de trabalho semanais por funcionário” e “densidade sindical”. No entanto, quando esta é associada à etapa produção de hidrogénio, devido a terem Portugal como país manufator, estas etapas tornam-se as maiores contribuidoras também para os indicadores “frequência de trabalho forçado”, “salário digno, mensal” e “taxa de acidentes não fatais no local de trabalho”, tornando Portugal um dos principais contribuintes para os impactos sociais. É importante mencionar que este estudo também enfatiza o papel significativo de países como a China e a África do Sul nos impactos sociais, especialmente na fase de extração e processamento de matéria-prima. Os resultados das análises de sensibilidade realizadas mostraram que com o aumento no número de trabalhadores a maioria dos indicadores aumentou proporcionalmente. Por outro lado, a redução da disponibilidade de energia excedente resulta numa redução nas horas de produção de hidrogénio e consequentemente num aumento significativo nos impactos sociais.

Este estudo exploratório fornece informações valiosas para orientação de decisões estratégicas na componente social da sustentabilidade pois possibilita uma visão detalhada dos impactos sociais associados ao caso específico da produção de hidrogénio verde num hub previsto para produção em Portugal.

PALAVRAS-CHAVE: HIDROGÉNIO VERDE; AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA SOCIAL; PSILCA

Abstract

The growth in industrial production, driven by population growth and increasing consumption, has resulted in a substantial increase in the demand for energy, which in turn has contributed to the overexploitation of non-renewable resources.

The production of electricity using non-renewable resources causes serious problems for the environment, in particular the emission of greenhouse gases. To combat various environmental problems, investment has been made in renewable energies such as hydroelectric, wind and solar power. However, these sources cannot fully meet demand, resulting in imbalances between consumption and production of renewable energy.

As a solution to this challenge, hydrogen has emerged as an essential vector for decarbonizing energy systems. Green hydrogen stands out because it's produced from clean sources, significantly reducing dependence on fossil fuels and, consequently, helping to reduce greenhouse gas emissions.

In this dissertation, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology presented in the UNEP/SETAC Guidelines for the Social Life Cycle Assessment of Products is applied to the production of green hydrogen from the electrolytic separation of water by a proton exchange electrolyser. The system studied covers the stages of extraction and processing of the raw materials for the electrolyser and the reverse osmosis system, the manufacture of the two systems and the production of green hydrogen.

Following the LCA methodology, the data relating to each of the stages included in the system is inventoried and then entered the PSILCA v.3 Starter software integrated into the SimaPro version 9.3.0.2. The data was evaluated considering various impact categories, namely workers, value chain actors and society through the indicators: "children in employment, total"; "frequency of forced labour"; "weekly hours of work per employee"; "goods produced by forced labour"; "living wage, per month"; "gender wage gap"; "disability-adjusted life expectancy due to indoor and outdoor air and water pollution"; "rate of fatal accidents at workplace"; "rate of non-fatal accidents at workplace"; "presence of sufficient safety measures"; "association and bargaining rights"; "trade union density"; "contribution of the sector to economic development"; "social responsibility along the supply chain".

The results show that the extraction and processing of the raw materials needed to manufacture electrolyzers was the main stage responsible for social impacts in 12 indicators. On the other hand, the electrolyser manufacturing stage stands out as the biggest contributor to the "weekly hours of work per employee" and "trade union density" indicators. However, when this is associated with the hydrogen production stage, due to Portugal being the manufacturing country, these stages also become the biggest contributors to the indicators "frequency of forced labour", "living wage, per month" and "rate of non-fatal accidents at workplace", making Portugal one of the main contributors to social impacts. It's important to mention that this study also emphasizes the significant role of countries such as China and South Africa in social impacts, especially in the raw material extraction phase. The results of the sensitivity analyses carried out showed that with an increase in the number of workers, most of the indicators increased proportionally. On the other hand, reducing the availability of surplus energy results in a reduction in hydrogen production hours and consequently a significant increase in social impacts.

This exploratory study provides valuable information for guiding strategic decisions on the social component of sustainability, as it provides a detailed view of the social impacts associated with the specific case of green hydrogen production in a hub planned for production in Portugal.

KEYWORDS: GREEN HYDROGEN; SOCIAL LIFE CYCLE ASSESSMENT; PSILCA

Índice

Conteúdo

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Estado de arte: a produção de hidrogénio.....	4
1.3. Estrutura da dissertação	12
2. A produção do Hidrogénio Verde	13
2.1. Descrição do processo de Produção de hidrogénio por eletrólise.....	13
3. Avaliação do Ciclo de Vida Social	23
3.1. Introdução	23
3.2. Descrição do processo e definição das fronteiras do sistema	25
3.3. Definição do objetivo e do âmbito	27
3.4. Categorias e subcategorias de impacto	27
3.5. Análise de sensibilidade	29
3.6. Inventário da avaliação do ciclo de vida social	30
3.6.1. Extração e Processamento de matérias-primas.....	30
3.6.2. Manufatura do eletrolisador.....	34
3.6.3. Manufatura do sistema de Osmose Inversa.....	35
3.6.4. Produção de hidrogénio	36
3.7. Avaliação do impacto do ciclo de vida social	38
3.7.1. Contribuição relativa de cada processo para os impactes.....	38
sociais.....	38
3.7.2. Contribuição de Portugal nos impactes totais do hidrogénio verde .	41
3.7.3. Descrição das atividades subjacentes à contribuição do impacto dos processos de extração e processamento dos materiais do eletrolisador...	44
3.7.4. Contribuição do sistema da osmose inversa nos resultados globais	51

3.7.5. Comparação com os resultados do estado de arte.....	52
3.8. Análise de sensibilidade	53
4. Conclusões, Limitações e Trabalhos Futuros	57
Bibliografia	61
----- ANEXOS -----	67
Anexo A: Distribuição das categorias, subcategorias e indicadores do PSILCA dos artigos do estado de arte e do estudo efetuado	68
Anexo B: Exemplificação dos cálculos para obtenção da quantidade total de hidrogénio produzido e água consumida no processo de produção de hidrogénio.....	72
Anexo C – Referência bibliográfica das bases de dados da ProdCom usadas nos dados de inventário das etapas de extração e processamento dos materiais do eletrolisador e do sistema de osmose inversa	73

Índice de figuras

FIGURA 1 - TECNOLOGIAS ENVOLVIDAS NA PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO E PRINCIPAIS INDÚSTRIAS UTILIZADORAS DO HIDROGÉNIO	3
FIGURA 2 - MODELO DE SISTEMA DE ELETRÓLISE PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO	14
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO DO EQUIPAMENTO UTILIZADO POR RITTER NO SEUS EXPERIMENTOS.....	15
FIGURA 4 - QUATRO TECNOLOGIAS DE ELETRÓLISE DA ÁGUA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE.	16
FIGURA 5 - AS QUATRO FASES ITERATIVAS DO S-LCA.....	23
FIGURA 6 - DIAGRAMA DAS FRONTEIRAS DO SISTEMA INCLUINDO A EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DAS MATÉRIAS-PRIMAS, A MANUFATURA DO ELETROLISADOR, DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA E POR FIM A PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO VERDE	26
FIGURA 7 – CONTRIBUIÇÕES RELATIVAS DOS CINCO PROCESSOS ESTUDADOS PARA CADA INDICADOR DE IMPACTE SOCIAL CONSIDERADO	40
FIGURA 8 – CONTRIBUIÇÕES RELATIVAS DOS BENS DE CONSUMO DA ETAPA DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS DO ELETROLISADOR	49
FIGURA 9 - RESULTADOS OBSERVADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NOS IMPACTES SOCIAIS DA ETAPA DE PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO DE 1 KG DE HIDROGÉNIO APÓS A MUDANÇA DO NÚMERO DE TRABALHADORES PARA 100 (HYPERION) E 450 (RESOLUÇÃO DO CONSELHO DE MINISTROS) TRABALHADORES EM COMPARAÇÃO COM O NÚMERO DE TRABALHADORES CONSIDERADO NO CASO BASE (GREENH ₂ ATLANTIC).	54

FIGURA 10 - RESULTADOS OBSERVADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NOS IMPACTES SOCIAIS TOTAIS DE 1 KG DE HIDROGÉNIO APÓS A MUDANÇA DO NÚMERO DE TRABALHADORES PARA 100 (HYPERION) E 450 (RESOLUÇÃO DO CONSELHO DE MINISTROS) TRABALHADORES EM COMPARAÇÃO COM O NÚMERO DE TRABALHADORES CONSIDERADO NO CASO BASE (GREENH ₂ ATLANTIC).	55
FIGURA 11 - RESULTADOS OBSERVADOS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE NOS IMPACTES SOCIAIS TOTAIS DE 1 KG DE HIDROGÉNIO APÓS A ALTERAÇÃO DA PERCENTAGEM DE ENERGIA EXCEDENTE DISPONÍVEL	56

Índice de tabelas

TABELA 1 – SELEÇÃO DE ESTUDOS DE S-LCA APLICADOS AO HIDROGÉNIO VERDE	6
TABELA 2 - PARÂMETROS TÉCNICOS REFERENTES ÀS ELETRÓLISE POR: ELETRÓLISE ALCALINA, ELETRÓLISE POR MEMBRANA DE ELETRÓLITOS DE POLÍMEROS, ELETRÓLISE POR MEMBRANA ANIÓNICA, ELETRÓLISE DE ÓXIDOS SÓLIDOS	19
TABELA 3 – CATEGORIAS SOCIAIS, SUBCATEGORIAS E INDICADORES EM FOCO NESTA DISSERTAÇÃO ...	28
TABELA 4 – DADOS DE INVENTÁRIO DA EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DO ELETROLISADOR. OS VALORES DOS CUSTOS DOS MATERIAIS SÃO REPORTADOS À UNIDADE FUNCIONAL DE 1 KG DE HIDROGÉNIO VERDE PRODUZIDO.	32
TABELA 5 - DADOS DE INVENTÁRIO DA EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA. OS VALORES DOS CUSTOS DOS MATERIAIS SÃO REPORTADOS À UNIDADE FUNCIONAL DE 1 KG DE HIDROGÉNIO VERDE PRODUZIDO.	33
TABELA 6 - DADOS DE INVENTÁRIO DA MANUFATURA DO ELETROLISADOR. OS VALORES DOS CUSTOS DA MANUFATURA SÃO REPORTADOS À UNIDADE FUNCIONAL DE 1 KG DE HIDROGÉNIO VERDE PRODUZIDO.	35
TABELA 7 - DADOS DE INVENTÁRIO DA MANUFATURA DO SISTEMA DE OSMOSE INVERSA. OS CUSTOS SÃO REPORTADOS À UNIDADE FUNCIONAL DE 1 KG DE HIDROGÉNIO VERDE PRODUZIDO	35
TABELA 8 - DADOS DE INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO RELATIVO AO NÚMERO DE TRABALHADORES. OS CUSTOS SÃO REPORTADOS À UNIDADE FUNCIONAL DE 1 KG DE HIDROGÉNIO VERDE PRODUZIDO.	37
TABELA 9 - DADOS DE INVENTÁRIO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO RELATIVO AO CONSUMO DE ELETRICIDADE. OS CUSTOS SÃO REPORTADOS À UNIDADE FUNCIONAL DE 1 KG DE HIDROGÉNIO VERDE PRODUZIDO.	38
TABELA 10 – CONTRIBUIÇÕES DOS CINCO PROCESSOS ESTUDADOS PARA CADA INDICADOR DE IMPACTE SOCIAL CONSIDERADO	38
TABELA 11 - CONTRIBUIÇÕES DOS BENS DE CONSUMO DA ETAPA DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS DO ELETROLISADOR	46
TABELA 12 - PERCENTAGEM DAS CONTRIBUIÇÕES DOS VÁRIOS PAÍSES PARA OS IMPACTES SOCIAIS ASSOCIADOS À ETAPA DE EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS DO ELETROLISADOR ...	50

TABELA A. 1 - DISTRIBUIÇÃO DAS CATEGORIAS, SUBCATEGORIAS E INDICADORES DO PSILCA DOS ARTIGOS DO ESTADO DE ARTE E DO ESTUDO EFETUADO	68
TABELA B. 1 - DADOS NECESSÁRIOS AO CÁLCULO DA QUANTIDADE TOTAL DE HIDROGÉNIO PRODUZIDO E DA ÁGUA CONSUMIDA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROGÉNIO	72
TABELA C. 1 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA DAS BASES DE DADOS DA PRODCOM POR MATERIAL	73

Abreviaturas

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AE – Alterações Climáticas

AEL– Eletrólise Alcalina

AEM – Eletrólise por Membrana Aniónica

BOP – Balance of Plant

EM – Estado Membro

EU – União Europeia

EVCI – Esperança de Vida Corrigida por Incapacidade

GEE – Gases de efeito de estufa

ILO – Organização Internacional do Trabalho

Mtoe – Megatoneladas de petróleo equivalente

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PEM – Membrana de Troca de Protões

PEMFC – Célula combustível de membrana de protões

PSILCA – Product Social Impact Life Cycle Assessment

SETAC – Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental

SHDB – Social Hotspot Database

S-LCA – Avaliação de Ciclo de Vida Social

SOEL – Eletrólise de Óxidos Sólidos

UNEP – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

USD – Dólares Americanos

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Com o aumento da população mundial e do consumismo foi inevitável o crescimento da produção industrial. Este crescimento levou a um maior consumo energético, promovendo uma sobre-exploração dos recursos não renováveis (Wang et al. 2021).

Desde a revolução industrial, em meados de 1850, a concentração de gases de efeito de estufa (GEE) na atmosfera cresceu, de 285 ppm para 419 ppm, o que induziu um aumento da temperatura média superficial terrestre entre 0,97°C e 1,21°C (Chen et al., 2022). De 2000 a 2021 verificou-se um aumento do consumo de energia por parte da indústria tendo-se o valor fixado nos 169 EJ, o que se traduz num aumento de 6 EJ face a 2020 (IEA, 2022b). Este consumo teve como consequência um aumento nas emissões de gases de efeito de estufa, tendo-se este valor, em 2021, fixado em 52,8 Gt CO₂ eq. Na base destas emissões está a queima dos combustíveis fósseis no setor da energia, sendo o valor resultante igual a 37,9 Gt de CO₂ eq. (IEA, 2023a).

No ano de 2000, a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu oito Objetivos de Desenvolvimento do Milénio que tinham como finalidade criar metas para alcançar um futuro mais próspero, tendo como prazo de implementação o ano de 2015. Nesse mesmo ano foram introduzidos na Agenda 2030 da ONU, os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Estes são uma extensão dos objetivos anteriores identificando novas metas e indicadores. Entre eles, o ODS 7 tem como intuito garantir o acesso da população à energia limpa, reagindo positivamente à problemática das alterações climáticas (ONU, 2023).

No mesmo ano, 197 estados-membros das Nações Unidas assinaram o Acordo de Paris que estabelecia um plano de ação contra as alterações climáticas. Deste acordo surgiu como meta, «Manter o aumento da temperatura média mundial bem abaixo dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais e prosseguir os esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C» (ONU, 2016). Já em 2021 a 26ª Conferência das Partes sobre Mudanças Climáticas das Nações Unidas em Glasgow veio salientar a necessidade de elidir os combustíveis fósseis de forma a travar as adversidades antes de se tornarem

permanentes. Os 124 Estados Membros (EM) expressaram a intenção de se transformarem em nações neutras em Carbono até 2050 (UNFCCC, 2021).

A neutralidade carbónica é definida por Wang et al. (2021) como a quantidade total de GEE, emitidos por um país, empresa, produto, atividade ou indivíduo durante um determinado período que é sequestrada ou armazenada na totalidade, compreendendo assim o equilíbrio (Wang et al., 2021).

De forma a evitar as emissões de GEE e reduzir os impactes das Alterações Climáticas (AC) a União Europeia (UE) implementou várias políticas, como o Pacto Ecológico Europeu. Uma das medidas instauradas foi o decréscimo do consumo de energia primária, para 1176 Mtoe (Megatoneladas de petróleo equivalente) em 2030, associados ao uso de fontes não renováveis. Visa-se a substituição de formas de produção de energia a partir do petróleo, gás natural e carvão mineral, por fontes renováveis, como por exemplo, a eólica, solar fotovoltaica e hidroelétrica (EEA, 2022). Porém, é também essencial aplicar todos os vetores de descarbonização ao nosso dispor para atingir os objetivos acordados, alcançando-se a neutralidade carbónica, enquanto se assegura a contemplação dos aspetos sociais, económicos e ambientais (Chen et al., 2022).

Na UE, 75% das emissões dos GEE são causadas pelo setor de produção de energia. Entre 2005 e 2021 ocorreu uma redução de 1279 Mt de CO₂ eq. (EEA, 2022) (Resolução do Conselho de Ministros, 2019). Os valores têm vindo a diminuir em virtude da eliminação progressiva dos combustíveis fósseis e implementação de energias renováveis, assim como, desenvolvimento e melhoria da eficiência das tecnologias de produção de energia (EEA, 2022) (Resolução do Conselho de Ministros, 2019).

Todavia, as energias renováveis apresentam algumas desvantagens, sendo uma das principais a variabilidade da produção ao longo do tempo. Fontes como a eólica apresentam uma instabilidade na produção por efeito da imprevisibilidade do vento. Outro exemplo, é a ausência de produção de energia a partir de fonte solar durante o período noturno ou períodos de menor difusão da luz.

De forma a superar esta limitação reconheceu-se a capacidade do hidrogénio na substituição dos combustíveis de origem fóssil. O potencial do hidrogénio é lato podendo atuar como intermediário energético para promover a

descarbonização dos sistemas de aquecimento, transporte, indústria e rede elétrica (Götz et al., 2016).

Por exemplo, em momentos que a produção de energia excede a procura, a energia remanescente pode ser encaminhada para a geração de hidrogénio, que posteriormente, pode ser convertido em eletricidade por meio de uma célula de combustível e fornecido de volta à rede elétrica (Götz et al., 2016).

O hidrogénio demonstra ser uma das soluções para a redução da problemática das emissões de GEE, devido à ausência de emissões de GEE na sua combustão. Com o investimento nesta alternativa, os setores com maior consumo de combustíveis fósseis podem progressivamente diminuir as suas emissões diretas, contribuindo para um menor impacto associados às alterações climáticas (Capurso et al., 2022) (Turner, 2004).

Atualmente, a produção de hidrogénio tem essencialmente origem a partir dos combustíveis fósseis, sendo 48% obtido pela pirólise do gás natural, 30% pela gasificação parcial do petróleo, 18% pela gasificação do carvão e os restantes 4% obtidos por eletrólise (Valente et al., 2021). Os principais setores utilizadores deste recurso são a indústria da refinação do petróleo (50%) e a produção de amónia (44%). A Figura 1 demonstra esquematicamente as origens/tecnologias envolvidas na produção de hidrogénio e os setores industriais com maior consumo (Valente et al., 2021).

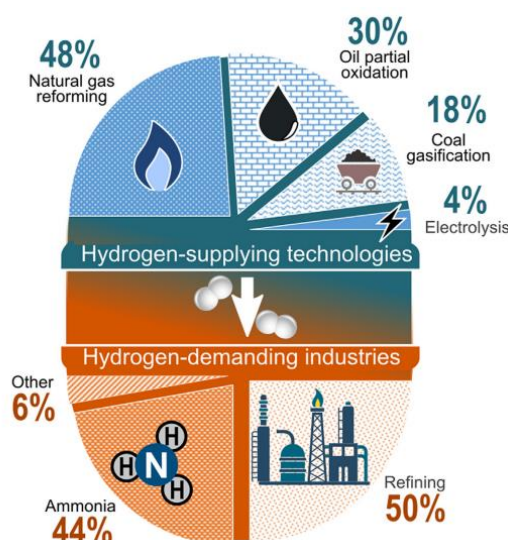


Figura 1 - Tecnologias envolvidas na produção de hidrogénio e principais indústrias utilizadoras do hidrogénio
(Valente et al., 2021)

O hidrogénio pode ser produzido a partir de várias fontes e formas sendo os mais usuais o hidrogénio “cinza”, gerado através do processamento dos combustíveis fósseis, o hidrogénio “azul”, produzido do mesmo modo que o anterior, mas empregando medidas de sequestro e armazenamento geológico de CO₂, e o hidrogénio “verde”, obtido através da eletrólise da água fazendo uso de energias renováveis.

O hidrogénio verde é o portador com maior destaque sociopolítico dado ser produzido a partir de fontes limpas, limitando o uso de combustíveis fósseis e consequentemente diminuindo as emissões de GEE. O preço de produção atual do hidrogénio verde situa-se entre os 3 e os 7 €/kg, demonstrando ser um produto dispendioso quando comparado com o preço do hidrogénio cinzento (1,5 € e os 3 €/kg) (IRENA, 2019).

O hidrogénio verde é apontado como uma das soluções sustentáveis para o futuro dos combustíveis. A sustentabilidade é suportada por três pilares, o pilar ambiental, o económico e o social. No entanto, os estudos realizados para análise da produção de hidrogénio verde focam-se predominantemente nos seus impactes no meio ambiente e na economia.

1.2. Estado de arte: a produção de hidrogénio

Valente et al. (2017) analisou 65 estudos referentes a 139 estudos de caso originais de avaliação de ciclo de vida ambiental do hidrogénio verde, demonstrando o crescente e elevado interesse pela quantificação dos impactes ambientais do hidrogénio (Valente et al., 2017).

Os estudos de Parra et al. (2019), Hong et al. (2023), e Khan & Al-Ghamdi (2023) são alguns exemplos de estudos efetuados para a avaliação económica das várias tecnologias de produção, armazenamento e transporte de hidrogénio. Para além destes, várias instituições governamentais avaliaram aspetos económicos de projetos de produção de hidrogénio, o que comprova a dedicação da investigação recente nos pilares do ambiente e da economia na produção deste elemento (Parra et al., 2019), (Hong et al., 2023), (Khan & Al-Ghamdi, 2023).

Verifica-se que, o impacte social é parcamente aprofundado para a generalidade dos setores, tecnologias e produtos. O motivo é essencialmente

devido à dificuldade na aquisição de dados, escassa bibliografia disponível e pelo facto de que a metodologia existente, ser recente estando ainda a ser desenvolvida no que respeita à sua aplicabilidade específica aos vários tipos de casos de estudo que incluem distintos setores de atividade económica (UNEP, 2020)(Bonilla-Alicea & Fu, 2022).

A revisão bibliográfica realizada com foco em estudos de avaliação de ciclo de vida social (S-LCA) permitiu identificar apenas cinco estudos relativos a esta temática. Na Tabela 1 são realçadas as características principais dos cinco artigos encontrados a respeito do hidrogénio verde e das tecnologias usadas na sua produção.

Na base da recolha e seleção dos estudos foram usados alguns critérios que possibilitam a confrontação dos resultados obtidos na bibliografia com os resultados obtidos nesta dissertação. O primeiro critério é o software utilizado na avaliação. Foram apenas selecionados os estudos realizados com os softwares *Product Social Impact Life Cycle Assessment* (PSILCA) e o *Social Hotspot Database* (SHDB), e de seguida o ano da sua publicação. Não foram identificados estudos anteriores a 2019.

Tabela 1 – Seleção de estudos de S-LCA aplicados ao hidrogénio verde

Estudo	Objetivo	Abordagem e fases de ciclo de vida	Unidade funcional	Software (S-LCA) usado no estudo	Categoria de impacto social avaliadas	Principais conclusões
(Werker et al., 2019)	Avaliar os impactos sociais provenientes da produção de hidrogénio verde por meio de eletrólise alcalina à escala industrial	As fases do ciclo de vida incluem a <u>fabricação do eletrolisador</u> na Suíça, <u>o transporte do eletrolisador</u> para vários países destino final (Alemanha, Espanha ou Áustria), <u>a produção de hidrogénio</u> durante 20 anos e posterior <u>substituição de equipamentos</u> após 10 anos de funcionamento	1 kg de hidrogénio produzido	PSILCA v 2.0	Trabalhadores	Uma avaliação complementar foi executada de forma a elaborar os resultados obtidos a partir da base de dados do PSILCA. O acesso a sindicatos e outras formas de associação demonstram ser um ponto com elevada vulnerabilidade na Europa Ocidental, enquanto a diferença salarial é um ponto crucial na Áustria. Os resultados evidenciam que os países - China e Índia - que fornecem os equipamentos e outros produtos, contribuem para um impacto social relevante no que respeita aos direitos de associação, negociação e na diferença salarial entre géneros. Os autores do estudo face à identificação destes pontos críticos recomendam exercer uma maior pressão nas empresas que fornecem os equipamentos de forma a melhorar as condições de trabalho ao invés de retirar os processos produtivos dos países. Esta última ação afetaria a economia do país, instigando as empresas a instaurar medidas adversas que conduziriam a piores condições dos trabalhadores. Os autores concluíram que a Alemanha apresenta, para as fronteiras estudadas, os melhores resultados seguindo-se a Espanha e por fim a Áustria.

Estudo	Objetivo	Abordagem e fases de ciclo de vida	Unidade funcional	Software (S-LCA) usado no estudo	Categoria de impacto social avaliadas	Principais conclusões
(Valente et al., 2021)	Avaliar e comparar a sustentabilidade do ciclo de vida do hidrogénio, usando três tecnologias de produção. • “Steam Methane Reforming” (Caso base) • Eletrólise alcalina com energia eólica como fonte energética • Gasificação da biomassa	O sistema abrange a <u>extração dos materiais</u> e <u>produção da energia, a produção de hidrogénio</u> e como última etapa a <u>compressão do hidrogénio</u>.	1 kg de hidrogénio com 99.9% (vol.) de pureza a 200 bar e 25°C	PSILCA	Trabalhadores; Sociedade	A produção de eletricidade por meio da energia eólica é um ponto que tem um peso elevado nos resultados sociais. O estudo considera que a maquinaria e os equipamentos têm origem na China onde a produção de hidrogénio faz uso de horas de “trabalho infantil O artigo aponta que a Espanha contribui significativamente para o indicador “gastos com a saúde”, devido à complexidade dos setores envolvidos na operação dos equipamentos para produção de eletricidade através de geradores eólicos. Isso sugere que a operação desses equipamentos pode estar associada a problemas de saúde que afetam os trabalhadores e a comunidade. Os autores do estudo concluem que todas as opções avaliadas apresentam impactos sociais. Portanto, não é possível determinar uma opção como sendo mais benéfica em termos de impacto social. Isso pode ser devido à complexidade e interdependência dos fatores envolvidos.

Estudo	Objetivo	Abordagem e fases de ciclo de vida	Unidade funcional	Software (S-LCA) usado no estudo	Categoria de impacto social avaliadas	Principais conclusões
(Bargiacchi et al., 2022)	Avaliar os impactos sociais de uma célula de combustível de membrana de troca de prótons (PEMFC)	As fronteiras do sistema são abordadas em três níveis: <u>fabríco das baterias</u> em Espanha; a <u>produção dos componentes</u> necessários e os <u>fluxos de energia</u> necessários pelo nível anterior e a <u>produção dos materiais</u> e os <u>fluxos de energia</u> do nível 2.	1 célula de combustível de membrana de troca de prótons	PSILCA v 3.0	Trabalhadores; Sociedade	O estudo revelou que o metal platina, mesmo representando menos de 0,1% da massa total do sistema, desempenha um papel crucial nos indicadores sociais analisados apresentado relevância significativa em diversos indicadores sociais, incluindo "Trabalho infantil", "Salário justo", "Trabalho forçado", "Disparidade salarial entre gêneros" e "Despesas na saúde". Estes resultados são devido ao custo elevado do material e ao risco significativo do setor da extração mineira. Porém, no indicador "contribuição para a prosperidade económica" a China exibiu os resultados mais promissores na produção dos compostos carbonáceos

Estudo	Objetivo	Abordagem e fases de ciclo de vida	Unidade funcional	Software (S-LCA) usado no estudo	Categoria de impacto social avaliadas	Principais conclusões
(Akhtar et al., 2023)	Avaliar os impactos sociais da produção de hidrogénio verde	As fronteiras incluem a <u>construção dos parques eólicos e solares</u> , o sistema de <u>eletrólise da água por eletrólise alcalina</u> , a <u>produção e transmissão da energia</u> renovável e a <u>produção de hidrogénio</u> . O sistema exclui a desionização da água.	1 kg de hidrogénio produzido	PSILCA v 3.0	Trabalhadores; Intervenientes da Cadeia de Valor; Sociedade; Comunidade local	Dos 19 indicadores calculados apenas cinco foram alvos de interpretação crítica sendo eles “Trabalho infantil”, “Disparidade salarial entre gêneros”, “Contribuição do setor para o desenvolvimento económico”, “Despesas na saúde” e “Valor agregado incorporado total”. Os resultados mostram uma importante contribuição (> 50%) associada ao fabrico dos equipamentos necessários para a produção de hidrogénio, essencialmente associada à sua importação. Os autores procederam à avaliação dos impactos modificando o local de fabrico dos componentes relevantes e concluem que o risco para a maioria dos indicadores reduz-se (i.e., o trabalho infantil diminui mais de 50% no Chile, Arábia Saudita, Austrália e EUA). A África do Sul, em particular, exibiu os piores resultados, devido ao acesso limitado a educação de qualidade e gratuita, à alta taxa de desemprego e ao baixo produto interno bruto/paridade do poder de compra per capita em comparação com o Chile, Arábia Saudita, Austrália, China, Omã, EUA.

Estudo	Objetivo	Abordagem e fases de ciclo de vida	Unidade funcional	Software (S-LCA) usado no estudo	Categoria de impacto social avaliadas	Principais conclusões
(Holger et al., 2017)	Avaliar os impactos sociais da produção de hidrogénio verde por meio de eletrólise alcalina à escala industrial	O estudo compreende as <u>etapas de construção e operação de um eletrolisador</u> de 6 MW. Os equipamentos considerados na fase de construção foram: as baterias das células, um separador de gás, tanques, permutadores de calor, bombas e equipamentos eletrónicos. No que toca a fase de operação, esta abrangeu a eletricidade, a água desionizada, a solução de hidróxido de potássio, o vapor de processo e o azoto. As fases de armazenamento e utilização não foram avaliadas.	1 kg de hidrogénio produzido	Social Hotspot Database (SHDB)	Direito do trabalhador; Direitos humanos; Governo; Saúde e segurança; Infraestrutura comunitária;	O artigo demonstra que para a Áustria o país que tem maior peso nos impactos é o Uzbequistão e de seguida a China. No caso da Alemanha é a China que introduz os piores resultados. Por último, a Espanha importa a maioria dos impactos da África sendo a Argélia que introduz o maior impacto social. O artigo refere os impactos provenientes dos próprios países são parcos (Espanha – 5,2%; Áustria – 5,9%; Alemanha – 8,5%) comprovando que os países não importam só os componentes para a produção de hidrogénio como também os impactos sociais destes, e que não basta apenas garantir impactos sociais baixos nos países consumidores de hidrogénio, mas também na cadeia de valor responsável pela sua disseminação. Os autores afirmam que as autoridades europeias não têm controlo sobre os riscos sociais dos outros países, mas devem ter em mente estes riscos nas suas decisões.

A partir dos dados apresentados na Tabela 1, é evidente a lacuna de artigos que aborda o ciclo de vida social do hidrogénio verde. Além disso, é verificada uma dificuldade significativa em realizar comparações entre os estudos, mesmo estes seguindo as diretrizes estabelecidas pela UNEP/SETAC. Isto porque a ampla gama de indicadores explorados nas diferentes pesquisas impossibilita a comparação direta dos resultados, agravada pela disparidade de programas informáticos (que usam diferentes metodologias e indicadores) empregados para análise. Quatro dos cinco autores delinearam unidades funcionais semelhantes, o que facilita as comparações, contudo as fases do ciclo de vida selecionadas também introduzem obstáculos adicionais a essa análise comparativa.

Em virtude da vasta quantidade de indicadores disponíveis na metodologia da UNEP, (2021), a análise exaustiva de todos eles é demorada e complexa, verificando-se que os estudos disponíveis dão uma visão limitada aos problemas sociais. Um exemplo ilustrativo dessa situação é o estudo realizado por Werker et al., (2019), que focou exclusivamente em uma categoria sociocultural específica, os "trabalhadores", omitindo outras de igual importância (como por exemplo, a comunidade local, sociedade).

Nos estudos de Werker et al., (2019), Bargiacchi et al., (2022), Akhtar et al., (2023), e Holger et al., (2017), é evidente que os países em desenvolvimento, como a China e a África do Sul, são os maiores contribuidores para os impactos sociais.

A análise dos artigos evidencia que ao longo da cadeia de valor da produção de hidrogénio, ao importar os componentes necessários, também importamos os impactos sociais correspondentes. Isso implica que os países consumidores não estão simplesmente adquirindo os componentes essenciais para a produção de hidrogénio, mas estão, de facto, absorvendo os impactos sociais associados a esses componentes. Isso sugere que os impactos não estão confinados ao território dos países produtores, mas também afetam os países consumidores e que assegurar impactos sociais baixos nos países consumidores de hidrogénio não é suficiente para garantir que o impacto social da tecnologia seja minimizado.

Akhtar et al., (2023) diverge das conclusões do estudo de Werker et al., (2019) ao concluir que a retirada da manufatura dos equipamentos chave para a

produção de hidrogénio é uma forma de diminuir os impactes sociais do hidrogénio. Werker et al., (2019) por outro lado, defende que os consumidores devem pressionar os fornecedores para melhorar os aspetos sociais das etapas de produção nos países em desenvolvimento.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação dispõe da seguinte organização.

No capítulo 2 é detalhado o processo de produção de hidrogénio verde, destacando-se as principais tecnologias de produção e são apresentados os principais projetos relacionados com a produção de hidrogénio verde em Portugal.

No capítulo 3 descreve-se o fundamento teórico e a consequente aplicação da ferramenta de avaliação de ciclo de vida social (S-LCA) de acordo com as normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044, assim como as mais recentes diretivas publicadas pelas Nações Unidas para a realização deste tipo de estudos. Este mesmo capítulo apresenta os resultados obtidos para os diferentes indicadores e subsequente análise detalhada, destacando os principais desafios identificados. Além disso, ele incorpora duas análises de sensibilidade para avaliar as alterações decorrentes da variação de dois parâmetros.

Em forma de síntese, o capítulo 4 enumera as principais conclusões do estudo, suas limitações e trabalhos futuros.

2. A produção do Hidrogénio Verde

2.1. Descrição do processo de Produção de hidrogénio por eletrólise

O hidrogénio é o elemento químico mais abundante do Universo constituindo cerca de 75% e o quarto mais abundante na Terra. Este elemento é o primeiro da tabela periódica sendo também o mais leve, com uma massa atómica de 1,01u. No seu estado natural, este elemento forma uma molécula diatómica (H_2), que possui um ponto de fusão a $-259,2^{\circ}C$ e o ponto de ebulição a $-252,9^{\circ}C$, a uma atmosfera. Nas condições de pressão e temperatura padrão este gás demonstra ser incolor, inodoro e extremamente inflamável (NIST, 2023).

O hidrogénio, na natureza, frequentemente está combinado com o oxigénio para formar água e com o carbono para criar hidrocarbonetos, sendo estas duas substâncias as mais comuns. A produção deste gás é predominantemente obtida a partir do gás natural (48%), petróleo (30%) e carvão (18%), contando com um elevado impacte no planeta, em específico no que contribui para as emissões de gases com efeito de estufa (Valente et al., 2021). A água demonstra ser uma origem com maior potencial de produção dado que os seus reservatórios terrestres (água doce e salgada) são praticamente inesgotáveis, renovando-se com o ciclo natural da água. Em contrapartida, os combustíveis fósseis são uma fonte finita de hidrocarbonetos, e emissoras de GEE (Balat, 2008).

A obtenção de hidrogénio a partir da água recorre a eletrolisadores. Estes equipamentos são constituídos por dois elétrodos com cargas opostas, um ânodo e um cátodo, onde é induzida uma corrente elétrica. No ânodo ocorre a oxidação libertando-se oxigénio e no cátodo a redução emitindo hidrogénio. A água fornecida ao eletrolisador deve ter uma concentração de sais diminuta para não interferir na eletrólise. O sistema de secagem é agregado de forma a diminuir a concentração de água e oxigénio no hidrogénio gasoso, elevando a pureza do gás até aos 99,9%. A Figura 2 retrata um sistema de produção de H_2 a partir da eletrólise da água (IRENA, 2020).

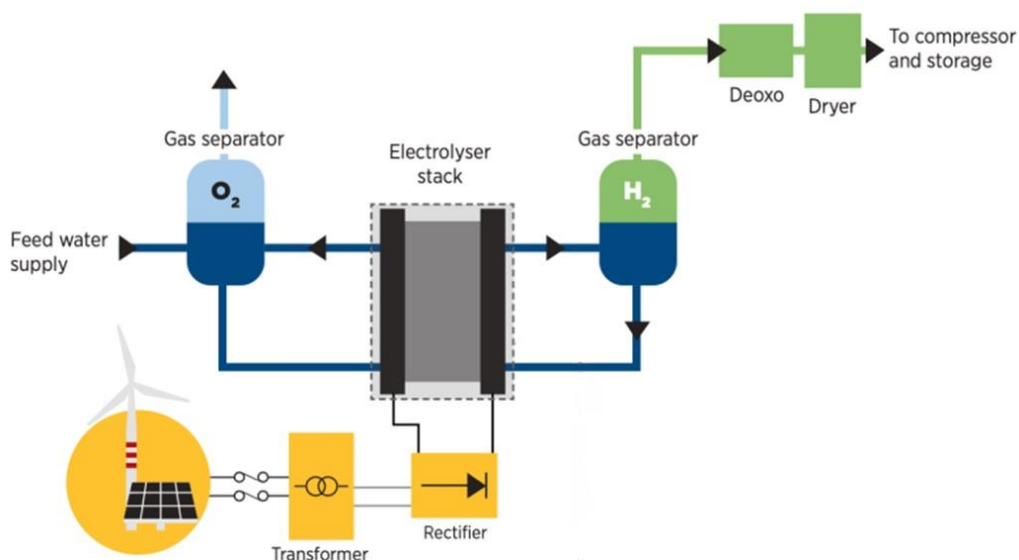


Figura 2 - Modelo de sistema de eletrólise para produção de hidrogénio
(IRENA, 2020)

De forma a compreender as nuances operacionais dos eletrolisadores utilizados é essencial compreender a evolução histórica do desenvolvimento destes equipamentos possibilitando o entendimento do seu crescimento e as etapas de maturidade em que se encontram.

Em 1789, os comerciantes holandeses Jan Rudolph Deiman e Adriaan Paets van Troostwijk demonstraram pela primeira vez a eletrólise da água (Chisholm & Cronin, 2016). Estes submergiram dois elétrodos de ouro em água e operando um gerador eletrostático, produziram uma descarga eletrostática, resultando na emissão de hidrogénio e oxigénio gasosos. Johann Wilhelm Ritter, mais tarde, foi capaz de separar os gases produzidos provenientes da eletrólise utilizando a tecnologia de bateria de Volta (Figura 3). No século seguinte, em 1888, o engenheiro russo Dmitry Lachinov desenvolveu um processo de síntese de oxigénio e hidrogénio à escala industrial. No início do século XX existiam em funcionamento mais de 400 eletrolisadores industriais que utilizavam soluções alcalinas aquosas como os seus eletrólitos (Chisholm & Cronin, 2016).

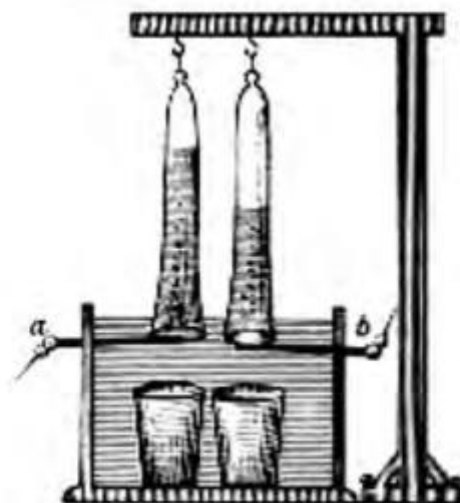


Figura 3 - Representação do equipamento utilizado por Ritter no seus experimentos
(Chisholm & Cronin, 2016)

Com os avanços tecnológicos provenientes da exploração espacial, em meados da década de 60, a General Electric desenvolveu uma membrana de troca de prótons (PEM) para produção de eletricidade para o Programa Espacial Gemini, que posteriormente foi adaptado para a eletrólise (Chisholm & Cronin, 2016).

Nos últimos anos (2010-2022), ocorreu um maior crescimento na implementação das tecnologias de eletrólise para produção de hidrogénio associada às energias renováveis. Na base deste crescimento destaca-se a introdução da temática das alterações climáticas nas agendas políticas, o aumento da eficiência dos eletrolisadores, e a diminuição do seu custo de investimento (Pereira, 2021).

As principais tecnologias de eletrólise da água são classificadas de acordo com o eletrólito aplicado, sendo estas a Eletrólise Alcalina (AEL) (Buchmayr et al., 2022), a Eletrólise por Membrana de Troca de Protões, a Eletrólise por Membrana Aniónica (AEM) e a Eletrólise de Óxidos Sólidos (SOEL) (Buchmayr et al., 2022).

A Figura 4 demonstra por meio de diagramas as quatro tecnologias, o seu modo de funcionamento e suas reações anódicas e catódicas.

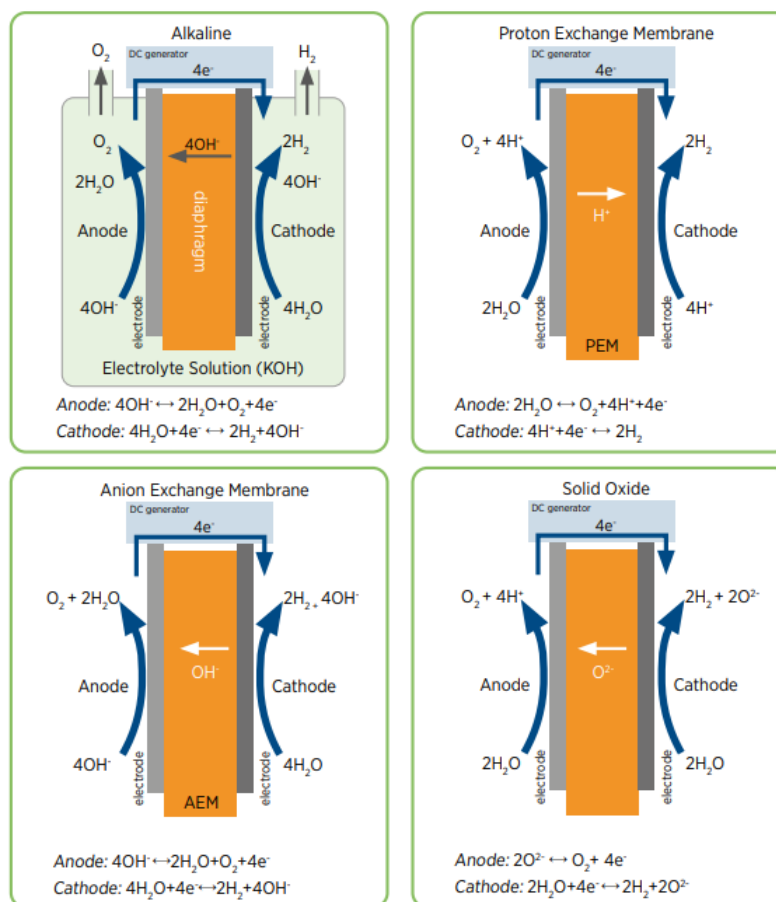


Figura 4 - Quatro tecnologias de eletrólise da água para produção de hidrogénio verde.

(IRENA, 2020)

A eletrólise **alcalina** (Buchmayr et al.) (Alkaline na Figura 4) é a tecnologia que existe há mais tempo no mercado sendo também a mais estudada. Esta tecnologia pode ser operada à pressão atmosférica ou a uma pressão elevada, todavia a eficiência elétrica dos sistemas pressurizados é menor e a pureza do hidrogénio é afetada. Por outro lado, como o hidrogénio obtido a partir da AEL pressurizada se encontra a uma pressão mais elevada, não é necessária uma demanda energética tão dispendiosa para o seu posterior armazenamento ou utilização. Na AEL são utilizados sais de hidróxido de potássio (KOH) ou de sódio (NaOH) como eletrólitos. Estes sais são extramente corrosivos nas concentrações utilizadas (i.e., solução de hidróxido de potássio entre os 20-30%) exigindo altos custos de manutenção. Os eletrolisadores alcalinos possuem uma vida útil de 30 anos com substituições a cada 8 a 12 anos, tratando-se de um

tempo de utilização mais elevado em comparação com outras tecnologias (PEM: 6-11 anos; SOEL: 1-2 anos) (Götz et al., 2016) (Buttler & Spliethoff, 2018). O AEL tem vindo a ser otimizado nos últimos anos, sobretudo no que diz respeito à eficiência de produção e ao investimento total.

A eletrólise de **membrana de troca de protões** (Proton Exchange Membran na [Figura 4](#)) é uma tecnologia recente em comparação com a AEL, tendo o primeiro eletrolisador sido comercializado em 1978. Este eletrolisador apresenta uma membrana polimérica que separa os dois elétrodos favorecendo a troca das cargas iónicas. Devido à acidez do meio promovido pela membrana e provocado pelos iões H^+ é necessária a utilização de catalisadores de forma a diminuir os efeitos da corrosão (irídio para o ânodo, platina para o cátodo). O fornecimento de água é realizado a partir do ânodo, e a permeação cruzada da membrana é quase nula, elevando a pureza do produto a 99,99%, após a secagem. A tecnologia PEM apresenta uma partida a frio mais rápida (AEL: 1h; PEM: $8e^{-3}$ h; AEM: 0,3h; SOEL: 12h), maior flexibilidade relativa à carga produzida (AEL: 15 -100%; PEM: 5-120%; AEM: 5-100%; SOEL: 30-125%), duas características que facilitam a produção de hidrogénio quando conectada a fontes de energia intermitentes. Em contrapartida, os investimentos nesta tecnologia são mais elevados devido aos custos referentes à membrana e ao uso de metais nobres e o tempo de vida útil é menor relativo aos sistemas AEL (Götz et al., 2016) (Buttler & Spliethoff, 2018).

Os eletrolisadores de **membrana de troca aniónica** (Anion Exchange Membrane na [Figura 4](#)) são uma combinação dos modelos PEM e AEL, porém esta tecnologia ainda se encontra na fase de demonstração da sua pesquisa. Estes equipamentos operam de forma similar à tecnologia PEM, no entanto emprega materiais de menor valor económico como na AEL (metais não nobres), associando as vantagens dos dois sistemas (Lagioia et al., 2023).

A última tecnologia mencionada, (Solid Oxide na [Figura 4](#)), ainda está em fase piloto, no entanto, a empresa Topsoe espera que até 2025 o primeiro projeto à escala industrial esteja funcional (capacidade 500 MW) (Rais, 2023). A eletrólise de **óxido sólido** (SOEL) ou também referida como eletrólise de alta temperatura utiliza temperaturas entre os 700°C e 1000°C como forma de eletrolisar a água para produção do hidrogénio. O eletrólito usado na solução é o dióxido de zircónio (ZrO_2) estabilizado com ítria (Y_2O_3) que nas altas

temperaturas age como condutor dos iões de oxigénio e mantém a estabilidade térmica e química da solução. (Götz et al., 2016) (Buttler & Spliethoff, 2018).

A Tabela 2 apresenta os parâmetros técnicos referentes aos eletrolisadores das diferentes tecnologias, adaptados de (IRENA, 2020), (Götz et al., 2016), (Capurso et al., 2022), (Buttler & Spliethoff, 2018).

Tabela 2 - Parâmetros técnicos referentes às eletrólise por: eletrólise alcalina, eletrólise por membrana de eletrólitos de polímeros, eletrólise por membrana aniônica, eletrólise de óxidos sólidos

Parâmetros técnicos	AEL	PEM	AEM	SOEL
Temperatura de operação [°C]	60-90	50-80	40-60	700-900
Pressão de operação [bar]	<30	<70	<35	<5
Densidade de corrente [A/cm ²]	0,6	2,2	0,5	0,6
Produção de H ₂ [Nm ³ /h]	<760	<400	-	<40
Pureza do H ₂ [%]	>99,5	99,99	99,99	99,99
Gama de operação parcial [%]	15-100	5-120	5-100	30-125
Consumo elétrico específico da eletrólise [kWh _e /kgH ₂]	50-78	50-83	57-69	45-55
$\eta_{\text{eletrólise}}$ (elétrica) [%]	42-66	40-66	-	60-74
Tempo de partida a frio [s]	3600	30	1200	43200
Tempo de vida do equipamento [kh]	55-120	60-100	(5-8) *	(8-20) *
Investimento [€/kW]	600	900	1000 *	2130 *
Estado de desenvolvimento	Comercial	Comercial	Demonstração	Demonstração

*A incerteza é elevada dado o desenvolvimento estar ainda à escala pré comercial

Portugal tem previstos vários projetos de produção de H₂ em diferentes estados de desenvolvimento. Entre os projetos já identificados, seis deles planeiam ou já utilizam a tecnologia PEM, enquanto dois projetos adotaram a tecnologia AEL (IEA, 2022a).

No entanto, a maioria dos projetos ainda se encontra em fase de estudo, logo ainda não é possível determinar com certeza qual será a tecnologia empregada. Dos projetos conhecidos 19 deles já indicaram que vão fazer uso de fontes de energias renováveis sendo que 58% usarão painéis fotovoltaicos.

Portugal possui como meta para 2030 a implementação de 2 a 2,5 GW de eletrolisadores para produção de hidrogénio verde ou outros combustíveis verdes (IEA, 2022a).

Alguns projetos delineados para produção de hidrogénio verde são:

- GreenH₂Atlantic
Capacidade até 2025: 100 MW
Localização: Sines
- Nazaré Green Hydrogen Valley
Capacidade até 2025: 40 MW
Capacidade esperada: 600 MW
Localização: Nazaré
Consórcio de empresas do setor do cimento e da vidraria
- Projeto da Hyperion renewables
Capacidade esperada: 100 MW e 250 MW
Localização: Setúbal e Alandroal
- MadoquaPower2X
Capacidade esperada: 500 MW
Localização: Sines

A estratégia de curto prazo para o aproveitamento do hidrogénio tem como principal objetivo utilizar o excedente de energia renovável elétrica disponível na rede elétrica portuguesa para produzir hidrogénio por meio da eletrólise. Devido ao melhor desempenho da tecnologia PEM em relação às oscilações da rede elétrica, como um tempo de arranque mais curto e uma operação em regime de carga parcial mais flexível, essa é a opção mais lógica para o aproveitamento destes excedentes energéticos. O aumento das vendas dos eletrolisadores PEM, superando os números do AEL, indicam a crescente adoção destes equipamentos (Hydrogen Europe, 2022). Desta forma o presente

trabalho terá como foco a avaliação dos impactes sociais associados aos eletrolisadores do tipo PEM.

3. Avaliação do Ciclo de Vida Social

3.1. Introdução

A avaliação do ciclo de vida social é uma metodologia utilizada para avaliar os aspetos sociais e socioeconómicos que se relacionam com produtos, organizações e serviços e quantificar os potenciais impactes positivos ou negativos, relativos às diferentes partes interessadas, ao longo do ciclo de vida desse produto (UNEP, 2020).

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e a Sociedade de Toxicologia e Química Ambiental (SETAC) publicaram, em 2009, as Diretrizes para a Avaliação do Ciclo de Vida Social de Produtos de modo a normalizar os métodos de avaliação dos impactes sociais adotando a estrutura da avaliação do ciclo de vida ambiental proveniente da ISO 14044. Estas diretrizes foram atualizadas em 2020 (UNEP, 2020). No entanto, a metodologia proposta pela UNEP/SETAC por oposição aos estudos de avaliação do ciclo de vida ambiental, ainda carece de uma ampla implementação pela comunidade científica (Tsalidis et al., 2023).

As Diretrizes da UNEP/SETAC propõem quatro fases iterativas para a construção de um estudo sendo estas: objetivo e âmbito, inventário do ciclo de vida social, avaliação dos impactes do ciclo de vida social e a interpretação de resultados (Figura 5) (UNEP, 2020).

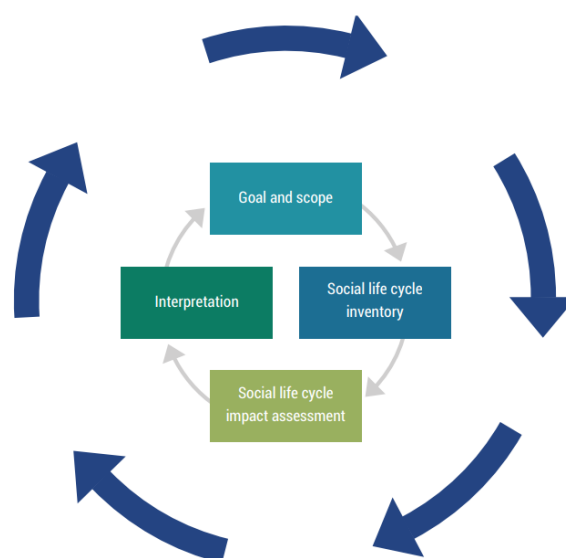


Figura 5 - As quatro fases iterativas do S-LCA
(UNEP, 2020)

A primeira fase descreve o objetivo e propósito do estudo que permite compreender a intenção do autor, o caso de estudo e estabelecer a metodologia utilizada, definindo também a unidade funcional aplicada no estudo. Nesta mesma fase são selecionadas as categorias a ser avaliadas no caso de estudo. A UNEP/SETAC desenvolveu um documento que agrupa os indicadores sociais em categorias e subcategorias (UNEP, 2021).

Na sua última versão são listadas seis categorias denominadas por categorias das partes interessadas (*stakeholder categories*) que refletem os impactos de cariz social da cadeia de valor. Dentro destas são identificadas quarenta subcategorias.

Outros pontos expostos nesta fase são referentes às fronteiras do sistema e o fluxo de referência, às categorias selecionadas para a avaliação dos impactos e a abordagem da avaliação, escala de referência (Tipo I) ou via de impacto (Tipo II).

A avaliação por escala de referência (Tipo I) estima os impactos sociais da vida de um produto em relação a um ponto de referência, expressando os resultados como um desempenho social ou advertindo para o risco de violação dos padrões definidos (UNEP, 2020). Cada categoria de impacto apresenta o seu ponto de referência impossibilitando a agregação de resultados ou do estabelecimento de uma relação entre eles. A avaliação por via de impacto (Tipo II) aborda a relação de causalidade entre o processo e os impactos (UNEP, 2020).

O passo seguinte consiste no inventário do ciclo de vida social que inclui a recolha de dados e a determinação da qualidade da informação (Buchmayr et al., 2022). A informação recolhida pode ser integrada em duas divisões: genérica ou específica. A informação originária de dados genéricos é procedente, a título de exemplo, de dados da bibliografia, de base de dados e estatísticas, e é usada, habitualmente, quando o estudo é focado para um setor da sociedade ou a uma escala nacional. Por outro lado, a recolha de informação para uma análise específica exige uma recolha de dados a partir de, por exemplo, entrevistas, ou dados recolhidos no local, e é disponibilizada usualmente em estudos nos quais os dados são referentes a organizações e/ou processos específicos dentro das fronteiras do sistema (Tsalidis, 2022).

O cálculo e avaliação da magnitude dos potenciais impactes sociais é tida na etapa de avaliação, a partir dos dados recolhidos na etapa anterior, e estruturada consoante a abordagem selecionada na primeira fase.

Nesta última fase do estudo de ciclo de vida social, os resultados são abordados e discutidos baseados no objetivo e âmbito do estudo elaborados na primeira etapa (Tsalidis et al., 2023). As conclusões apresentadas e as recomendações sugeridas podem levar a aplicações diretas como, identificar pontos críticos e elaborar alternativas de forma a melhorar o desempenho social, auxiliar nas tomadas de decisão de empresas, órgãos de soberania e outras organizações.

3.2. Descrição do processo e definição das fronteiras do sistema

O presente trabalho assenta numa instalação hipotética de 100 MW localizada em Portugal e adota um período de 20 anos para a duração dos componentes, produzindo no total 0,20 Mt de hidrogénio.

Foi considerado que a fonte de energia elétrica corresponde aos excedentes encontrados na rede em períodos de excesso de oferta. O sistema foi classificado como intermitente, dado que, para o caso de referência inicial, o hidrogénio verde desempenha o papel de estabilizar os sistemas de energia, compensando os desequilíbrios na rede elétrica.

As fronteiras selecionadas são do tipo berço ao portão e as etapas avaliadas foram:

- A extração e processamento das matérias-primas que compõem os equipamentos;
- A manufatura dos componentes do sistema, necessários para a produção de hidrogénio (instalação de osmose inversa e eletrolisador);
- A operação do eletrolisador e da unidade de osmose inversa para a produção de hidrogénio verde a partir da energia elétrica renovável excedente na rede nacional.

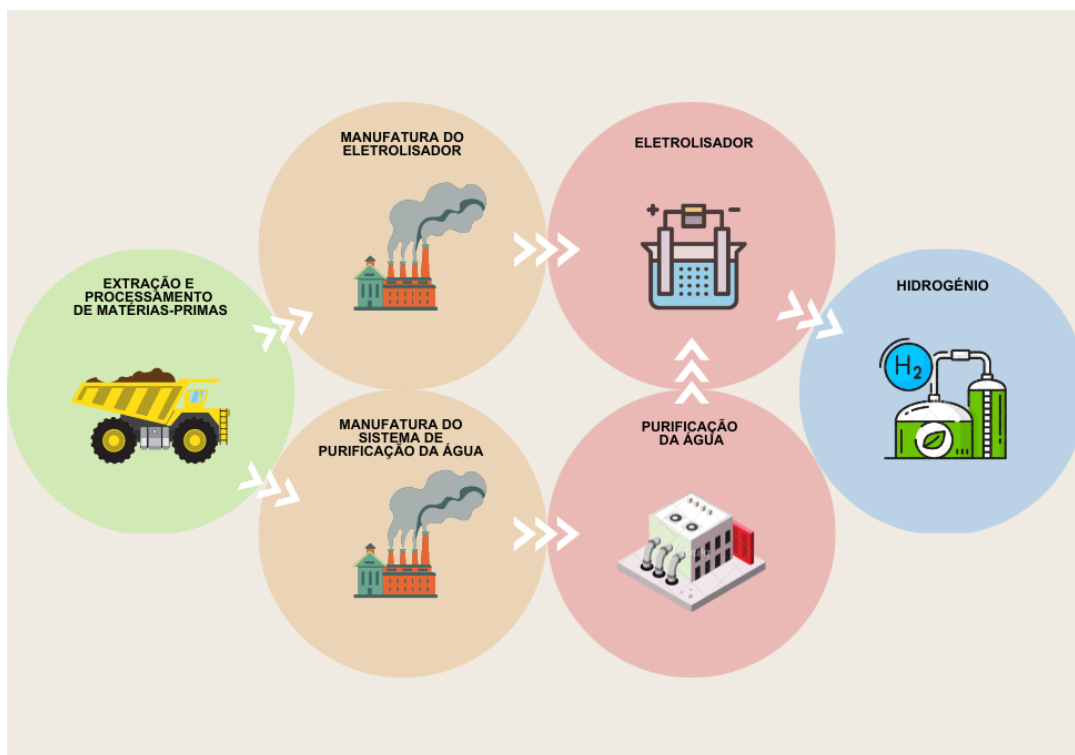


Figura 6 - Diagrama das fronteiras do sistema incluindo a extração e processamento das matérias-primas, a manufatura do eletrolisador, do sistema de osmose inversa e por fim a produção de hidrogénio verde

Alguns processos e equipamentos foram excluídos da análise devido essencialmente à diversidade nomeadamente, os processos de armazenamento e uso do hidrogénio.

O armazenamento do hidrogénio, pode ser realizado através de cilindros de alta pressão (hidrogénio comprimido), liquefeito, transformado em compostos orgânicos, por meio da adsorção a materiais, entre outras formas, o que comprova a multiplicidade de processos (Zuttel, 2004).

Os equipamentos usados na produção de energia verde e na produção de eletricidade para consumo do eletrolisador não foram contabilizados porque considerou-se que a energia utilizada era em excesso, logo seria desperdiçada por falta de opção de utilização, não acarretando impactes associados à sua utilização. O transporte dos materiais e dos equipamentos foi excluído das fronteiras do sistema pois não existe ainda um local definido para implantação nacional da unidade de produção de hidrogénio.

3.3. Definição do objetivo e do âmbito

O objetivo do trabalho é proceder a uma avaliação do ciclo de vida social da produção de hidrogénio verde, utilizando a eletrólise da água por membrana de troca de protões, a fim de identificar os pontos críticos de natureza social ao longo da cadeia de abastecimento. A avaliação dos potenciais impactes sociais foca num eletrolisador de membrana de protões com capacidade nominal de 100 MW, operando em estado intermitente, e com a eletricidade fornecida a partir dos excedentes da rede elétrica nacional. A opção pelo eletrolisador PEM deve-se ao desempenho superior em comparação com as outras tecnologias existentes e a sua capacidade de 100 MW foi definida analogamente ao projeto GreenH₂Atlantic cujo dados de inventário foram empregados neste estudo (GreenH₂Atlantic, comunicação pessoal, julho de 2023). Além disso, a produção de hidrogénio requer água purificada, o que leva a que o sistema avaliado inclua uma estação de tratamento de água por osmose inversa de capacidade 240 m³/dia.

A unidade funcional do estudo é 1 kg de hidrogénio verde produzido a partir de excedentes de eletricidade da rede elétrica portuguesa em 2021.

3.4. Categorias e subcategorias de impacto

As “Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment” referem um total de 6 categorias de partes interessadas, que por sua vez contêm 40 subcategorias. Já o software PSILCA na sua versão 3 apresenta quatro categorias principais (Trabalhadores, Comunidade Local, Intervenientes na Cadeia de Valor e Sociedade), abrangendo um total de 70 indicadores nas diversas subcategorias.

A Tabela 3 apresenta as categorias, subcategorias e indicadores selecionados. A nomenclatura empregada para as categorias, subcategorias e indicadores teve como base as “Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment” (UNEP, 2021).

O Anexo. A lista todos os indicadores do PSILCA, identificando os indicadores avaliados nos artigos da bibliografia tal como os abordados nesta dissertação.

A seleção dos indicadores a avaliar teve como suporte os indicadores resultantes da revisão bibliográfica exposta no estado de arte (secção 1.2), tendo sido atualizados com base nos novos indicadores presentes na base de dados PSILCA v.3. Adicionalmente, a escolha foi influenciada pelas decisões do autor com base nos temas da atualidade como o racismo e a discriminação, a diferença salarial entre homens e mulheres, a segurança e higiene no trabalho.

Os indicadores selecionados incidirão em três categorias: trabalhadores, intervenientes na cadeia de valor e sociedade, sendo excluídas as categorias crianças e consumidores uma vez que não estão presentes no Software PSILCA v.3. A categoria comunidade local não foi objeto de análise pois o foco principal do estudo incide nas condições dos trabalhadores e nos esforços das entidades a melhorar o ambiente de trabalho.

A presente dissertação distingue-se pela introdução na avaliação de cinco novos indicadores que não foram considerados nos artigos do estado da arte, designadamente, “bens produzidos por trabalho forçado”; “esperança de vida corrigida por incapacidade (EVCI) devido à poluição interna e externa do ar e da água”; “taxa de acidentes fatais no local de trabalho”; “taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho”; “presença de medidas suficientes de segurança”.

Tabela 3 – Categorias sociais, subcategorias e indicadores em foco nesta dissertação

Categoria	Subcategoria	Indicador
Trabalhadores	Trabalho infantil	Crianças empregadas, total
	Trabalho forçado	Frequência de trabalho forçado
		Bens produzidos por trabalho forçado
	Horas de trabalho	Horas de trabalho semanais por funcionário
	Salário justo	Salário digno, mensal
	Discriminação	Diferença salarial entre gêneros
	Saúde e segurança	EVCI devido à poluição interna e externa do ar e da água
		Taxa de acidentes fatais no local de trabalho
		Taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho
		Presença de medidas suficientes de segurança
Sociedade	Liberdade de associação e negociação coletiva	Direitos de associação e negociação
		Densidade sindical
	Contribuição para o desenvolvimento económico	Contribuição do setor para o desenvolvimento económico
Intervenientes na cadeia de valor	Promover a responsabilidade social	Adesão a uma iniciativa que promove a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento

3.5. Análise de sensibilidade

De forma a avaliar o comportamento dos impactes sociais em resposta à variação de dois parâmetros independentes conduziram-se duas análises de sensibilidade, sendo os parâmetros em questão o número de trabalhadores e a percentagem de energia excedente.

Os dados recolhidos para a produção de hidrogénio verde provieram do projeto GreenH₂Atlantic. Contudo, este projeto designa como eletrolisador um AEL, pelo que quando comparado com PEM possui diferentes necessidades no que toca à manutenção dos equipamentos. Estas diferenças estão na base da realização da análise de sensibilidade onde foram calculados dois cenários com a alteração do número de trabalhadores.

A primeira hipótese foi retirada da notícia de jornal “Hyperion prepara instalação de unidade de produção de hidrogénio em Setúbal” onde a empresa Hyperion renewables afirma que prevê empregar entre 5 a 10 pessoas na equipa de operação no projeto de capacidade 7,5 MW (Jesus, 2023). Desta forma, foi extrapolado o número de trabalhadores calculando o seu número no caso mínimo (5 trabalhadores) e máximo (10 trabalhadores). De seguida, calculou-se a média e obteve-se como valor final 100 trabalhadores. A Equação 1 exemplifica o passo realizado para o cálculo do número de trabalhadores para o cenário mínimo.

$$N^{\circ} \text{ de trab. do presente artigo}_{\min} = \frac{Cap_{art} * n^{\circ} \text{ trab. hyperion min}}{Cap_{Hyperion}} \quad \text{Eq. 1}$$

A segunda hipótese tem como base o conselho de ministros que refere que até 2030 estão previstos serem instalados entre 2 e 2,5 GW de capacidade de eletrolisadores para produção de hidrogénio verde. Os projetos envolvidos criarão entre 8000 e 12000 empregos (Resolução do Conselho de Ministros, 2019). O cálculo para a descoberta do número de trabalhadores seguiu os mesmos passos que a hipótese 1, obtendo-se a média de 450 trabalhadores.

Na análise da sensibilidade foi também alterada a disponibilidade de energia renovável. No caso base foi considerado que existiria um excedente de energia renovável disponível para ser consumido sempre que existisse a geração de energia renovável, o que leva a que os eletrolisadores consigam

operar uma média de 61% das horas do ano. No entanto, pode não haver um excedente na medida em que a energia renovável é um recurso escasso e altamente valorizado como um vetor de descarbonização. Deste modo, a análise de sensibilidade avalia dois casos em que a percentagem de energia verde excedente da rede foi inferior e em vez de 61% das horas do ano, assumiu-se uma disponibilidade de energia renovável em excesso entre 15 e 30% das horas totais de um ano.

3.6. Inventário da avaliação do ciclo de vida social

Na presente secção, são descritas as fases consideradas, incluindo os processos que ocorrem dentro dos limites do sistema, com base no inventário dos materiais, água e energia consumidos ou produzidos, bem como no tempo necessário para a fabricação e utilização dos equipamentos usados para os processos produtivos, considerando o ciclo de vida dos mesmos. Este trabalho resulta na enumeração dos recursos naturais, energia e a duração das horas de produção. Os dados utilizados foram obtidos de fontes bibliográficas, sendo apresentadas as principais suposições e hipóteses adotadas para este estudo.

No Anexo. B são listados os dados necessários ao cálculo da massa total de hidrogénio produzido e da água consumida no processo.

De forma a uniformizar os dados usados no inventário adotou-se o ano de 2021 como ano base. Os valores de custos monetários, necessários para converter os balanços de massa e energia em indicadores de atividade social, foram convertidos, quando aplicável, de euros para dólares americanos (USD). Para além disso, custos reportados em períodos anteriores ao ano base foram reportados para 2021 usando um fator de conversão monetário (Exchange Rates, 2021) (BLS, n.d.).

3.6.1. Extração e Processamento de matérias-primas

Os dados referentes aos materiais necessários para o eletrolisador foram obtidos do artigo Bareiß et al., (2019) que foca num eletrolisador de 1 MW. No âmbito da presente dissertação, foi assumido um eletrolisador de 100 MW. Por conseguinte, foi necessária a multiplicação da massa por um fator de 100 atribuindo-se um escalamento linear. O sistema do eletrolisador é constituído

pelo equipamento e pelas instalações auxiliares, ou “Balance-of-plant” (BOP). O eletrolisador tem um tempo de vida de 90 mil horas que representam aproximadamente 10 anos, exigindo dois dispositivos ao longo do tempo de vida útil estimada para o sistema. O BOP tem uma validade de 20 anos.

O preço dos materiais foi estimado, em geral, com o apoio da base de dados Prodcom, (2023), salvo exceções - titânio, alumínio, nafion e o aço de alta e baixa liga cujos valores foram recolhidos de (Trading economics, 2023), (Daily Metal Prices, 2023), (Banerjee & Curtin, 2004), (LME, 2023).

O Anexo. C são listadas as referências bibliográficas das bases de dados da Prodcom usadas nos dados de inventário das etapas de extração e processamento dos materiais do eletrolisador e do sistema de osmose inversa

Os custos dos materiais dependem da região onde são produzidos e comercializados. De forma a selecionar o país fornecedor dos materiais usados, assumiram-se dois critérios:

- Se o fabrico fosse europeu, o país com maior produção na Europa foi assumido como o país fornecedor.
- Quando a quantidade importada de um produto foi superior à sua produção na União Europeia, foi considerado que o fornecedor era o país com maior fatia no mercado global.

No caso do material cuja modelagem não foi possível devido à heterogeneidade de seus componentes, optou-se por não a considerar. No artigo Bareiß et al., (2019) é mencionado o material de processo, porém não são especificados os seus constituintes, apresentando apenas lubrificante e absorvente como exemplos ilustrativos. A Tabela 4 apresenta os materiais presentes no eletrolisador e nas instalações auxiliares, juntamente com as respetivas massas, país fornecedor, preço por massa de hidrogénio, a base de dados selecionada no PSILCA e a referência bibliográfica utilizada para obter o preço do material. Os valores reportam-se à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido.

Tabela 4 – Dados de inventário da extração e processamento do eletrolisador. Os valores dos custos dos materiais são reportados à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido.

Material	Massa (kg)	País fornecedor	Custos dos materiais usados (\$/kg de H ₂)	Base de dados PSILCA	Referência Bibliográfica
Aço de alta liga	1,90E+02	China	6,35E-07	Commodities - Steel-processing - CHN	(LME, 2023)
Aço de baixa liga	4,80E+02	China	1,60E-06	Commodities - Steel-processing - CHN	(LME, 2023)
Aço inoxidável	2,00E+04	Espanha	2,92E-04	Commodities - Metallurgy products - ESP	(Prodcom, 2023)
Alumínio	1,06E+05	China	5,42E-05	Commodities - Nonferrous metal processing - CHN	(Daily Metal Prices, 2023)
Betão	5,60E+02	Alemanha	1,36E-07	Commodities - Construction - PRT	(Prodcom, 2023)
Carvão ativado	1,80E+03	China	2,12E-05	Commodities - Coal mining and processing - CHN	(Prodcom, 2023)
Cobre	9,10E+02	Chile	1,16E-05	Commodities - Copper - CHL	(Prodcom, 2023)
Iridio	1,50E+02	África do Sul	1,72E-02	Commodities - Non-ferrous metals - ZAF	(Prodcom, 2023)
Material eletrónico	1,10E+02	Alemanha	2,53E-05	Commodities - Communication and electronic equipment - DEU	(Prodcom, 2023)
Nafion	3,20E+03	China	2,72E-02	Commodities - Manufacture of plastic products - CHN	(Banerjee & Curtin, 2004)
Plástico	3,00E+01	Arábia Saudita	2,54E-07	Industries - Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products - SAU	(Prodcom, 2023)
Platina	1,50E+01	África do Sul	5,12E-04	Commodities - Non-ferrous metals - ZAF	(Prodcom, 2023)
Titânio	1,06E+05	China	4,64E-03	Commodities - Nonferrous metal processing - CHN	(Trading economics, 2023)

Os dados relativos aos materiais do sistema de osmose inversa provieram do artigo Sbaih, (2017) que avalia a implementação de um sistema de purificação da água com uma capacidade de 50 m³/dia, totalizando uma purificação de 3,65E+08 kg de água no período homólogo de 20 anos. No entanto, para o

presente estudo, os valores de massa dos componentes foram multiplicados por um fator de 4,8 de forma a compensar a diferença de valores entre este estudo e os dados da bibliografia. O valor de 4,8 é dado pela razão entre a quantidade de água purificada durante 20 anos no presente estudo (1,75E+09 kg) e a quantidade de água purificada no mesmo período temporal identificada na bibliografia (Sbaih, 2017).

Os equipamentos possuem tempos de vida útil menores que o do adotado sendo necessário a sua substituição. O sistema de osmose inversa requer 30 membranas, com uma vida útil média de 3,5 anos, para uma produção de um caudal de 50 m³/dia, logo para os 20 anos e um caudal de 240 m³/dia, considerando uma relação linear, serão necessárias 171 membranas.

Ao nível da bomba esta só necessita de substituição ao fim de 10 anos. No artigo, os valores do PET, PSF, PA foram agrupados, não especificando a percentagem de cada um em relação à massa total. Por forma a contornar a falta de informação específica para cada material foi considerada uma divisão equitativa entre as quantidade usadas de cada material.

As massas dos materiais do sistema de osmose inversa, assim como os países fornecedores, os preços por unidade de massa de hidrogénio, a base de dados selecionada no PSILCA e a referência bibliográfica estão presentes na Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de inventário da extração e processamento do sistema de osmose inversa. Os valores dos custos dos materiais são reportados à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido.

Material	Massa (kg)	País fornecedor	Custos dos materiais usados (\$/kg de H ₂)	Base de Dados PSILCA	Referência Bibliográfica
ABS	1,17E+03	Coreia do Sul	6,81E-07	Commodities - Manufacture of plastic products - KOR	(Prodcom, 2023)
Aço inoxidável	6,73E+02	Espanha	9,18E-07	Commodities - Metallurgy products - ESP	(Prodcom, 2023)
Cobre	3,99E+01	Chile	4,77E-08	Commodities - Copper - CHL	(Prodcom, 2023)
Cola de poliuretano	3,91E+02	Alemanha	5,91E-07	Commodities - Manufacture of plastic products - DEU	(Prodcom, 2023)
Ferro	3,99E+01	Austrália	1,65E-09	Industries - Iron and steel semi-manufactures - AUS	(Prodcom, 2023)

Material	Massa (kg)	País fornecedor	Custos dos materiais usados (\$/kg de H ₂)	Base de Dados PSILCA	Referência Bibliográfica
Ferro fundido	3,99E+01	Alemanha	4,10E-08	Commodities - Casting of metal products - DEU	(Prodcorn, 2023)
Fibra de plástico reforçado	5,51E+02	Alemanha	3,20E-07	Commodities - Manufacture of plastic products - DEU	(Prodcorn, 2023)
Fibra de vidro com Resina de poliéster	5,86E+02	China	3,41E-07	Commodities - Manufacture of glass and glass products - CHN	(Prodcorn, 2023)
Poliamida (PA)	3,91E+02	China	6,54E-07	Commodities - Manufacture of plastic products - CHN	(Prodcorn, 2023)
Polietileno Tereftalato (PET)	8,31E+02	Itália	4,70E-07	Commodities - Manufacture of rubber and plastic products - ITA	(Prodcorn, 2023)
Polipropileno (PP)	3,42E+02	Arábia Saudita	2,71E-07	Industries - Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products - SAU	(Prodcorn, 2023)
Polisulfona (PSF)	3,91E+02	Coreia do Sul	2,27E-07	Commodities - Manufacture of plastic products - KOR	(Prodcorn, 2023)
Policloreto de Vinil (PVC)	2,20E+03	Itália	1,31E-06	Commodities - Manufacture of rubber and plastic products - ITA	(Prodcorn, 2023)

3.6.2. Manufatura do eletrolisador

O valor do preço do eletrolisador apresenta um intervalo de preços por kW instalado (1100-1800 \$/kWe) (IEA, 2022). Considerou-se o valor médio de 1450 \$/kWe obtendo-se o valor de 1.45E+08 \$ para a capacidade do caso de estudo (100 MW).

Assumiu-se que a manufatura do eletrolisador se situa em Portugal dado o projeto de execução ocorrer neste país e existirem já empresas especializadas no fabrico destes equipamentos (Fusion Fuel, 2021).

A Tabela 6 expõe os dados relativos ao país fornecedor, ao preço do eletrolisador por massa de hidrogénio, a base de dados selecionada no PSILCA e a referência bibliográfica utilizada para obter o preço do material. Os valores reportam-se à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido.

O PSILCA não dispõe de uma base de dados específica para a manufatura do eletrolisador. Foi necessário recorrer a uma base de dados

análoga, “Commodities - Machinery and equipment n.e.c. - PRT”, que se considerou suficientemente representativa do setor. Esta base de dados foi alterada retirando-se os dados de inventário relativos aos materiais usados na manufatura e combustível para eliminação dupla contagem.

Tabela 6 - Dados de inventário da manufatura do eletrolisador. Os valores dos custos da manufatura são reportados à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido.

Material	País fornecedor	Custos da manufatura (\$/kg de H ₂)	Base de Dados PSILCA	Referência Bibliográfica
Eletrolisador	Portugal	7,45E-01	Commodities - Machinery and equipment n.e.c. - PRT	(IEA, 2023b)

3.6.3. Manufatura do sistema de Osmose Inversa

O custo do sistema de manufatura da osmose inversa foi determinado com base no estudo Sbaih, (2017). O valor identificado foi convertido através de um fator designado por *six-tenths*, que de acordo com a bibliografia especializada em economia refere para a normalização dos custos em relação às dimensões dos equipamentos (McGraw-Hill, 2003).

A Tabela 7 apresenta os dados referentes ao país fornecedor, ao preço do sistema de osmose inversa por massa de hidrogénio, a base de dados selecionada no PSILCA e a referência bibliográfica utilizada para obter o preço do material. Os valores reportam-se à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido.

De forma igual à etapa anterior, utilizou-se a base de dados “*Commodities - Machinery and equipment n.e.c. – PRT*” para superar a falta de base de dados específica deste setor eliminando-se o inventário relativo aos materiais usados e combustíveis para eliminar dupla contagem.

Tabela 7 - Dados de inventário da manufatura do sistema de osmose inversa. Os custos são reportados à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido

Material	País fornecedor	Custo (\$/kg de H ₂)	Base de Dados PSILCA	Referência Bibliográfica
Osmose Inversa	Portugal	1,74E-04	Commodities - Machinery and equipment n.e.c. - PRT	(Sbaih, 2017)

3.6.4. Produção de hidrogénio

A produção de hidrogénio verde a partir de eletricidade da rede nacional, requer a verificação do facto de este ter origem em fontes renováveis (European Commission, 2023). Foi assumido que nos períodos de geração de energia renovável, estaria disponível um excedente para utilização do sistema de produção de hidrogénio proposto no caso de estudo. Para o caso português verifica-se que, durante o ano de 2021 foram produzidos, o equivalente a 223 dias de eletricidade com origem em fontes renováveis (APA, 2023).

Assumiu-se que o excedente do total de produção de eletricidade verde (61% da eletricidade total produzida) foi usado na produção de hidrogénio verde, tendo sido hipoteticamente produzidos 0,19 Mt de H₂ verde (APA, 2023). Como mencionado anteriormente, foi negligenciada o impacte da eletricidade utilizada devido a que a sua produção tem outro tipo de função primordial e para o intuito deste trabalho apenas se considerar a produção de energia em excesso.

No entanto, o consumo de eletricidade, resultante da operação do sistema de purificação da água, assume que provém da rede elétrica nacional apresentando um impacte. Este consumo diário de eletricidade, 427,5 kwh, resultou da multiplicação do valor do artigo Sbaih, (2017) pelo fator 4,8. O valor utilizado do preço da eletricidade tem origem no valor médio da eletricidade no primeiro semestre de 2021 no segmento não industrial (0,1206 €/kwh) (ERSE, 2021).

Em relação ao número de trabalhadores necessários para a gestão dos sistemas de produção de hidrogénio, estes provieram do projeto GreenH₂Atlantic. O projeto emprega cinco equipas de operários, cada uma constituída por um chefe de turno e quatro operadores a trabalhar em contínuo e uma equipa de operação e manutenção (O&M) constituída por um engenheiro de segurança e ambiente, um responsável pelo planeamento da produção, um analista técnico, um técnico de instrumentação e controlo, um responsável pelo armazém e um fiel de armazém (GreenH₂Atlantic, comunicação pessoal, julho de 2023).

Para o valor do salário dos trabalhadores utilizou-se o salário médio por hora de Portugal para 2021 que foi de 15,4 €/h (Eurostat, 2023b).

O PSILCA não apresenta uma base de dados específica para a produção de hidrogénio, desta forma recorreu-se a uma base de dados análoga, “*Commodities - Electrical energy, gas, steam and hot water – PRT*”, que se considerou como sendo representativa do setor da produção de hidrogénio. Foram eliminados os dados de entrada relativos aos materiais usados e combustíveis para eliminar dupla contagem, visto que já tinham sido contabilizados nas etapas anteriores. A base de dados foi também ajustada afetando-se como horas associadas aos problemas sociais as obtidas para o caso do hidrogénio (0.006116181 h).

As Equações 2 e 3 demonstram os cálculos efetuados para obtenção do preço por massa de hidrogénio e das horas associadas aos problemas sociais.

$$\begin{aligned} \text{Preço total de trabalho por kg de H}_2 &= \\ &= \frac{\text{Total de horas anuais dos trabalhadores} * \text{Salário médio português}}{\text{Produção anual de hidrogénio}} \end{aligned} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\begin{aligned} \text{Horas de trabalho por kg de H}_2 &= \\ &= \frac{\text{Total de horas anuais dos trabalhadores}}{\text{Produção anual de hidrogénio}} \end{aligned} \quad \text{Eq. 3}$$

A Tabela 8 e 9 apresentam as informações relativas ao país fornecedor, ao preço e as horas por massa de hidrogénio verde produzido e a base de dados do PSILCA. A Tabela 8 exhibe na segunda coluna o número de trabalhadores e a Tabela 9 informa sobre o consumo anual de eletricidade.

Tabela 8 - Dados de inventário da produção de hidrogénio relativo ao número de trabalhadores. Os custos são reportados à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido.

Material	Número de trabalhadores	País fornecedor	Custo (\$/kg de H ₂)	Horas (h/kg de H ₂)	Base de Dados PSILCA
Trabalhadores	31	Portugal	0,11	0,0061	Commodities - Electrical energy, gas, steam, and hot water hidrogénio – PRT

Tabela 9 - Dados de inventário da produção de hidrogénio relativo ao consumo de eletricidade. Os custos são reportados à unidade funcional de 1 kg de hidrogénio verde produzido.

Material	Consumo anual (kWh)	País fornecedor	Custo (\$/kg de H ₂)	Base de Dados PSILCA	Referência Bibliográfica
Eletricidade	8,03E-04	Portugal	1,17E-03	Commodities - Electrical energy, gas, steam, and hot water – PRT	(Sbaih, 2017)

3.7. Avaliação do impacte do ciclo de vida social

Nesta secção são quantificadas as contribuições para os aspetos sociais de cada etapa envolvida na produção de hidrogénio verde pelos indicadores mencionados na secção 3.4. Para o cálculo dos impactes sociais, utilizou-se o software PSILCA v.3 Starter integrado na versão 9.3.0.2 do SimaPro.

Em primeiro lugar será realizado uma avaliação dos impactes dos cinco processos avaliados, nomeadamente, a extração e processamento dos materiais do eletrolisador e do sistema de osmose inversa, a manufatura dos dois sistemas e a produção de hidrogénio verde. Em seguida serão exploradas as causas adjacentes aos processos com maior contribuição para os impactes sociais.

3.7.1. Contribuição relativa de cada processo para os impactes sociais

A Tabela 10 apresenta os resultados dos impactes sociais relativos a cada um dos cinco processos avaliados, que incluem: a extração e processamento dos materiais do eletrolisador e do sistema de osmose inversa, a manufatura dos dois sistemas e a produção de hidrogénio. A extração e processamento dos materiais do eletrolisador e a manufatura do eletrolisador são os dois processos com a maior contribuição relativa para os impactes. A produção de hidrogénio aparece em diversos casos como a terceira etapa com maior contribuição sendo que as suas percentagens se encontram entre os 0% e os 34%.

Por fim, a extração e processamento dos materiais da osmose inversa usados assim como a manufatura do mesmo sistema não revelam impacte significativos (são zero ou próximos de zero) por comparação com os restantes.

Tabela 10 – Contribuições dos cinco processos estudados para cada indicador de impacto social considerado

Indicador	Unidade	Total	Extração/Processamento dos materiais do eletrolisador	Extração/Processamento dos materiais da osmose inversa	Manufatura do eletrolisador	Manufatura do sistema de osmose inversa	Produção de hidrogénio
Crianças empregadas, total	CL med rh	1,83E-01	1,81E-01	2,16E-06	1,14E-03	2,66E-07	8,75E-04
Frequência de trabalho forçado	FL med rh	2,97E-04	1,21E-04	1,45E-08	1,14E-04	2,66E-08	6,24E-05
Bens produzidos por trabalho forçado	GFL med rh	4,03E-03	2,27E-03	1,18E-07	1,14E-03	2,66E-07	6,18E-04
Horas de trabalho semanais por funcionário	WH med rh	1,80E-01	4,28E-03	8,02E-07	1,14E-01	2,66E-05	6,15E-02
Salário digno, mensal	FS med rh	1,35E+00	6,28E-01	4,04E-05	4,67E-01	1,09E-04	2,54E-01
Diferença salarial entre gêneros	GW med rh	1,22E-01	1,05E-01	2,65E-06	1,14E-02	2,66E-06	6,38E-03
EVCI devido à poluição interna e externa do ar e da água	DALY med RH	3,20E-03	3,00E-03	1,85E-07	1,14E-04	2,66E-08	8,04E-05
Taxa de acidentes fatais no local de trabalho	FA med rh	7,82E-04	6,04E-04	3,81E-08	1,14E-04	2,66E-08	6,38E-05

Indicador	Unidade	Total	Extração/Processamento dos materiais do eletrolisador	Extração/Processamento dos materiais da osmose inversa	Manufatura do eletrolisador	Manufatura do sistema de osmose inversa	Produção de hidrogénio
Taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho	NFA med rh	3,58E-03	1,67E-03	7,09E-07	1,14E-03	2,66E-07	7,68E-04
Presença de medidas suficientes de segurança	SM med rh	1,22E-02	1,08E-02	9,26E-07	1,14E-03	2,66E-07	2,87E-04
Direitos de associação e negociação	ACB med rh	5,30E-01	4,66E-01	1,76E-05	1,14E-03	2,66E-07	6,27E-02
Densidade sindical	TU med rh	1,80E+00	4,88E-02	1,27E-05	1,14 E+00	2,66E-04	6,16E-01
Contribuição do setor para o desenvolvimento económico	CE med rh	5,60E-02	3,84E-02	1,84E-06	1,14E-02	2,66E-06	6,27E-03
Adesão a uma iniciativa que promove a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento	PSR med rh	4,81E-01	3,05E-01	1,55E-05	1,14E-01	2,66E-05	6,20E-02

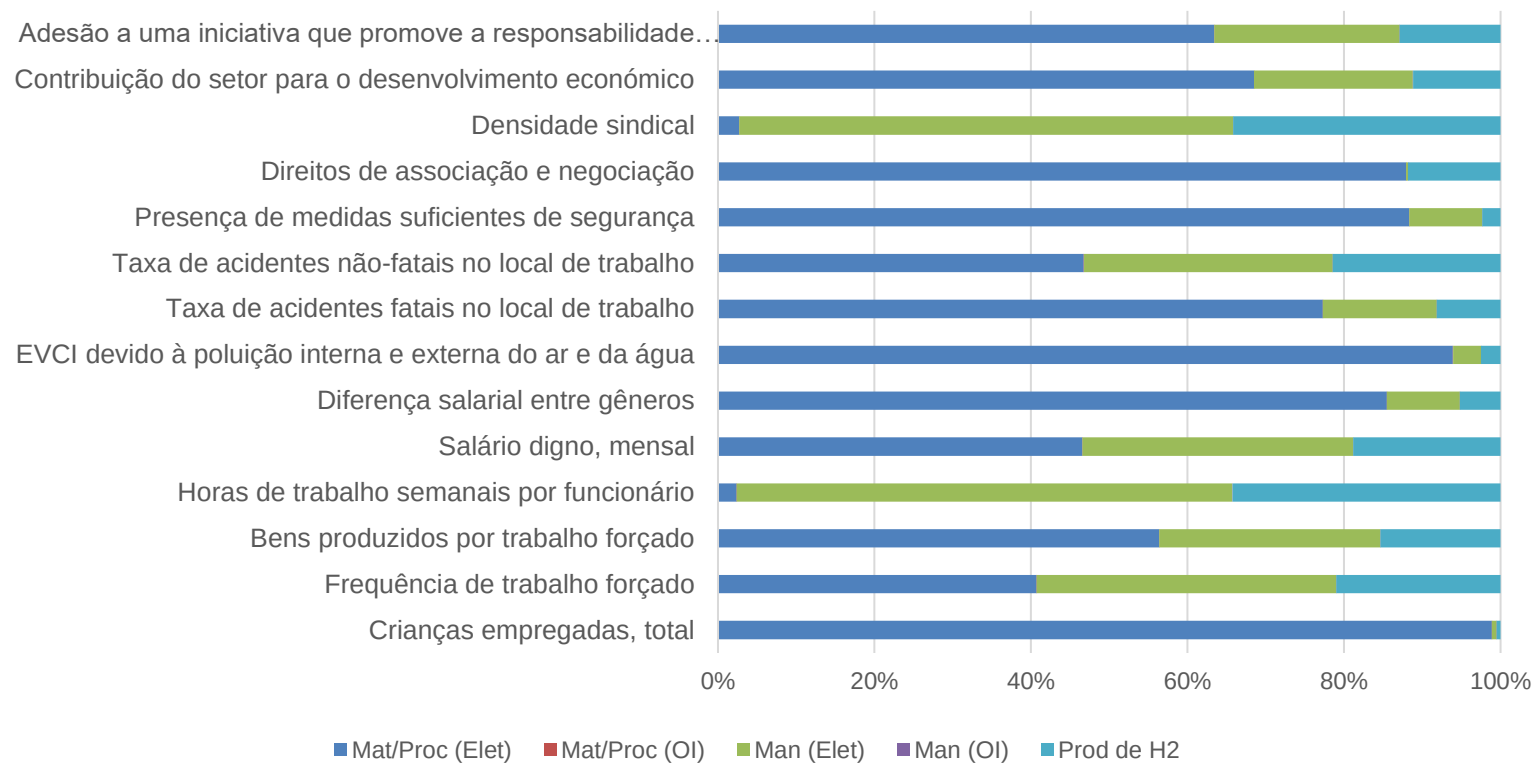


Figura 7 – Contribuições relativas dos cinco processos estudados para cada indicador de impacte social considerado

A extração e processamento dos materiais demonstra ser a etapa que tem a maior contribuição para 12 dos 14 indicadores avaliados e, os valores da contribuição variam entre 41-99%.

A manufatura dos eletrolisadores apresenta a maior contribuição relativa para dois dos indicadores “horas de trabalho semanais por funcionário” (63%) e “densidade sindical” (63%). Ainda para a manufatura se verifica um número representativo de categorias com contribuição inferior a 10% (total de cinco).

A produção de hidrogénio apresenta uma contribuição para os impactes menor que 25%. A exceção verifica-se para as “horas de trabalho semanais por funcionário” e a “densidade sindical” (ambos possuem uma contribuição de 34%), tornando-se a segunda etapa com maior contribuição para estes indicadores em específico. Na secção de análise de sensibilidade serão analisados estes processos com maior detalhe.

As etapas da extração e processamento dos materiais da osmose inversa, juntamente com a manufatura do sistema de osmose inversa, apresentam percentagens nulas nos 14 indicadores, o que indica que sua contribuição no plano geral dos impactes sociais é insignificante.

3.7.2. Contribuição de Portugal nos impactes totais do hidrogénio verde

A fase de fabricação do eletrolisador utilizou a base de dados “Commodities - Machinery and equipment n.e.c. – PRT”, enquanto a produção de hidrogénio fez uso da base de dados “Commodities - Electrical energy, gas, steam, and hot water hidrogénio – PRT”. Dado que o país fornecedor é o mesmo, muitos dos impactes possuem justificações semelhantes. Portanto, a agregação dos resultados proporciona uma visão mais abrangente da contribuição de Portugal para o sistema previsto para a produção de hidrogénio em termos sociais.

Quando agregados os impactes sociais das fases de manufatura do eletrolisador e produção de hidrogénio, os resultados revelam que estas fases, decorrentes em Portugal, contribuem com mais de 50% nos indicadores “frequência de trabalho forçado”, “salário digno, mensal” e “taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho”.

A soma dos impactes das duas etapas referidas anteriormente no indicador “horas de trabalho semanais por funcionário” contribui para 97% dos impactes sociais. Esse indicador mostra números elevados devido a uma combinação de fatores em Portugal. O país manifesta salários baixos, o que leva muitos trabalhadores a compensarem essa situação com horas extras. Ademais, a produtividade é afetada negativamente devido às diversas pausas efetuadas ao longo do dia, o que exige a reposição dessas horas para atingir os objetivos (RHJ, 2023).

Embora a semana de trabalho legal máxima em Portugal seja de 40 horas, e a jornada de trabalho legal máxima seja de 8 horas por dia, aproximadamente 72% da força de trabalho em Portugal trabalha mais de 40 horas por semana. Isso coloca o país como o terceiro membro da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico (OCDE) com a média de horas de trabalho mais longa, ficando atrás apenas do Reino Unido e da Irlanda (Passport to Trade 2.0, 2023).

Já no plano da “frequência de trabalho forçado” e do “salário digno, mensal” estes indicadores possuem contribuições de 59% e 53%, respetivamente. A compreensão destes dois indicadores ajuda a esclarecer o motivo pelo qual as horas de trabalho semanais por funcionário apresentam valores elevados.

Portugal assinou a convenção da Organização Internacional do Trabalho (ILO) que retrata a abolição do trabalho forçado, no entanto, o código penal não o criminaliza a não ser que esteja vinculado aos crimes de coação, escravidão ou tráfico de seres humanos (Cardoso et al., 2014).

No presente, a situação económica nacional contribui para que a exploração laboral seja ignorada, priorizando os interesses económicos acima dos trabalhadores. Os baixos salários, a instabilidade laboral e o baixo nível de escolaridade levam a que estas práticas sejam mais recorrentes. Adicionalmente, a colocação de trabalhadores de países de baixos rendimentos agrava a exploração laboral dado que estes são mais vulneráveis à intimidação e ao assédio dos empregadores (Cardoso et al., 2014).

Como no indicador “frequência de trabalho forçado”, a situação económica nacional impacta o “salário digno, mensal”. Portugal é o 6º país da OECD com o salário médio anual bruto mais baixo (Crisóstomo, 2023).

Como mencionado anteriormente, a baixa produtividade diminui a eficiência na produção de bens, o que consequentemente diminui os salários. O elevado grau de segmentação do mercado de trabalho leva a que trabalhadores com baixos níveis de escolaridade tenham a probabilidade de ocupar empregos mal remunerados e inseguros mais facilmente. Dependendo da cidade, o custo de vida pode chegar aos 1000 a 1500 €/mês, que associados a um salário mínimo de 740,83 €/mês exerce nos trabalhadores uma pressão crescente. Outro fator que faz elevar os resultados deste indicador são os elevados impostos. Portugal é o nono país da OCDE com maior carga fiscal (Expresso, 2023).

Um ponto que merece ressalva é que o indicador “bens produzidos por trabalho forçado” não apresenta um valor tão elevado como os indicadores analisados anteriormente, reforçando a ideia da baixa produtividade em Portugal.

Portugal destaca-se negativamente em relação ao número de acidentes não mortais por 100 000 pessoas empregadas (2.814 acidentes) em comparação com a média da união europeia de 1444 acidentes por 100 000 pessoas empregadas (Eurostat, 2023a). Deste modo, o elevado valor ocorrido no indicador “taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho” alinha-se com os dados da Eurostat. Entre as razões por trás desse cenário estão questões relacionadas à organização e ao sistema de trabalho, incluindo deficiências na formação, ausência de equipamentos de segurança e más condições de trabalho (ILO, n.d.).

O indicador da “densidade sindical” apresentou igualmente valores elevados para Portugal perfazendo 97%. Para a análise deste indicador é necessário considerar a evolução histórica do país.

A elevação do fascismo em Portugal dificultou a entrada do sindicalismo no país sofrendo ainda atualmente com as consequências. A falta de confiança demonstrada pelos jovens nos sindicatos devido à percepção da ineficácia destes na defesa dos seus interesses, agrava os resultados (Costa & Rego, 2023)

A falta de sindicatos levou também às negociações coletivas não sindicalizadas que revelaram serem capazes de manter os direitos dos trabalhadores enfraquecendo assim mais uma vez a confiança nos sindicatos (Ramalho, 2013).

No entanto este indicador não evidencia por si só o estado de Portugal no que toca aos direitos dos trabalhadores. É necessário ter em mente também o indicador “direitos de associação e negociação”, que nos resultados obtidos tem uma baixa percentagem de impacto nas fases de ciclo de vida decorrentes em Portugal. Isto indica que o baixo sindicalismo é contraposto por outras formas de negociação coletivas.

De forma a entender melhor os resultados obtidos no que toca à etapa da extração e processamentos dos materiais do eletrolisador, a seguinte secção tem como objetivo a avaliação mais detalhada dessa etapa.

3.7.3. Descrição das atividades subjacentes à contribuição do impacto dos processos de extração e processamento dos materiais do eletrolisador

De acordo com a Tabela 11 é evidente que a maioria das contribuições para as categorias sociais decorre da extração dos metais não ferrosos, mais especificamente, os metais raros e da manufatura de plásticos que perfazem entre 76% e 99% dos impactos nas demais categorias.

A base de dados “*Commodities - Manufacture of plastic products – CHN*” apresenta a maior contribuição relativa para os indicadores: “adesão a uma iniciativa que promove a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento” (85%), “direitos de associação e negociação” (83%); “contribuição do setor para o desenvolvimento económico” (78%); “presença de medidas suficientes de segurança” (68%); “bens produzidos por trabalho forçado” (67%); “horas de trabalho semanais por funcionário” (64%); “taxa de acidentes fatais no local de trabalho” (62%); “salário digno, mensal” (61%).

Por outro lado, a base de dados “*Commodities - Non-ferrous metals – ZAF*” exibiu os piores impactos nos indicadores: “diferença salarial entre gêneros” (94%); “crianças empregadas, total” (73%); “taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho” (44%); “densidade sindical” (44%).

A base de dados “*Commodities - Nonferrous metal processing – CHN*” tem contribuições que variam entre 1% (“diferença salarial entre gêneros”) e os 22% (“bens produzidos por trabalho forçado”), tornando-se em muitos dos casos a terceira atividade com maior contribuição para os impactos sociais. As

restantes bases de dados mostram contribuições menores para os indicadores sociais inferiores a 10% sendo que para a maioria a contribuição é nula.

Tabela 11 - Contribuições dos bens de consumo da etapa de extração e processamento dos materiais do eletrolisador

Indicador	Unidade	Total	Commodities - Steel-processing - CHN	Commodities - Steel-processing - CHN	Commodities - Metallurgy products - ESP	Commodities - Nonferrous metal processing - CHN	Commodities - Basic construction - DEU	Commodities - Coal mining and processing - CHN	Commodities - Copper - CHL	Commodities - Non-ferrous metals - ZAF	Commodities - Communication and electronic equipment - DEU	Commodities - Manufacture of plastic products - CHN	Industries - Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products - SAU	Commodities - Non-ferrous metals - ZAF	Commodities - Nonferrous metal processing - CHN
Crianças empregadas, total	CL med rh	1,81E-01	1,06E-06	2,66E-06	5,26E-05	8,44E-05	8,84E-09	5,40E-05	1,18E-06	1,32E-01	4,23E-06	3,77E-02	2,86E-08	3,93E-03	7,23E-03
Frequência de trabalho forçado	FL med rh	1,21E-04	1,61E-09	4,06E-09	1,96E-06	1,36E-07	9,88E-11	6,08E-08	1,42E-08	4,95E-05	2,89E-08	5,63E-05	4,87E-10	1,47E-06	1,17E-05
Bens produzidos por trabalho forçado	GFL med rh	2,27E-03	8,40E-08	2,12E-07	3,06E-06	5,78E-06	6,59E-10	3,82E-05	1,62E-07	1,93E-04	4,69E-07	1,53E-03	3,42E-09	5,76E-06	4,95E-04
Horas de trabalho semanais por funcionário	WH med rh	4,28E-03	1,35E-07	3,39E-07	1,75E-05	9,29E-06	6,79E-09	5,45E-06	1,06E-06	7,01E-04	2,05E-06	2,73E-03	3,97E-08	2,09E-05	7,95E-04
Salário digno, mensal	FS med rh	6,28E-01	1,04E-05	2,62E-05	1,65E-03	8,28E-04	6,82E-07	5,42E-04	4,21E-05	1,64E-01	1,48E-04	3,84E-01	1,14E-06	4,90E-03	7,09E-02

Indicador	Unidade	Total	Commodities - Steel-processing - CHN	Commodities - Steel-processing - CHN	Commodities - Metallurgy products - ESP	Commodities - Nonferrous metal processing - CHN	Commodities - Basic construction - DEU	Commodities - Coal mining and processing - CHN	Commodities - Copper - CHL	Commodities - Non-ferrous metals - ZAF	Commodities - Communication and electronic equipment - DEU	Commodities - Manufacture of plastic products - CHN	Industries - Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products - SAU	Commodities - Non-ferrous metals - ZAF	Commodities - Nonferrous metal processing - CHN
Diferença salarial entre gêneros	GW med rh	1,05E-01	7,84E-08	1,98E-07	1,34E-04	7,76E-06	3,12E-08	1,71E-06	1,92E-06	9,82E-02	7,85E-06	2,68E-03	2,61E-08	2,92E-03	6,64E-04
EVCI devido à poluição interna e externa do ar e da água	DALY med rh	3,00E-03	3,45E-08	8,70E-08	9,72E-06	3,99E-06	1,12E-09	9,79E-07	2,40E-07	1,20E-03	2,85E-07	1,41E-03	4,45E-09	3,58E-05	3,41E-04
Taxa de acidentes fatais no local de trabalho	FA med rh	6,04E-04	1,05E-08	2,65E-08	4,05E-06	8,26E-07	1,71E-10	5,39E-07	1,97E-08	1,50E-04	5,71E-08	3,74E-04	1,34E-09	4,46E-06	7,07E-05
Taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho	NFA med rh	1,67E-03	1,89E-08	4,75E-08	1,09E-04	1,70E-06	5,32E-09	6,44E-07	1,82E-05	7,40E-04	8,50E-07	6,36E-04	6,60E-09	2,20E-05	1,46E-04
Presença de medidas suficientes de segurança	SM med rh	1,08E-02	1,97E-07	4,96E-07	3,24E-05	1,86E-05	1,88E-08	8,09E-06	3,16E-06	1,69E-03	2,65E-06	7,39E-03	4,97E-08	5,04E-05	1,59E-03

Indicador	Unidade	Total	Commodities - Steel-processing - CHN	Commodities - Steel-processing - CHN	Commodities - Metallurgy products - ESP	Commodities - Nonferrous metal processing - CHN	Commodities - Basic construction - DEU	Commodities - Coal mining and processing - CHN	Commodities - Copper - CHL	Commodities - Non-ferrous metals - ZAF	Commodities - Communication and electronic equipment - DEU	Commodities - Manufacture of plastic products - CHN	Industries - Petroleum, Chemical and Non-Metallic Mineral Products - SAU	Commodities - Non-ferrous metals - ZAF	Commodities - Nonferrous metal processing - CHN
Direitos de associação e negociação	ACB med rh	4,66E-01	1,07E-05	2,70E-05	8,72E-05	8,35E-04	3,49E-08	5,79E-04	3,68E-06	4,83E-03	2,98E-05	3,88E-01	9,76E-08	1,44E-04	7,15E-02
Densidade sindical	TU med rh	4,88E-02	7,34E-07	1,85E-06	1,20E-03	4,75E-05	2,48E-07	1,20E-05	7,56E-05	2,17E-02	5,28E-05	2,10E-02	4,68E-07	6,45E-04	4,07E-03
Contribuição do setor para o desenvolvimento económico	CE med rh	3,84E-02	7,15E-07	1,80E-06	3,78E-05	5,43E-05	7,15E-09	1,07E-05	3,20E-06	3,50E-03	3,46E-06	3,00E-02	3,86E-08	1,04E-04	4,65E-03
Adesão a uma iniciativa que promove a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento	PSR med rh	3,05E-01	2,19E-06	5,51E-06	2,99E-04	1,96E-04	1,86E-07	5,57E-05	5,39E-05	2,88E-02	2,81E-05	2,58E-01	4,07E-07	8,58E-04	1,67E-02

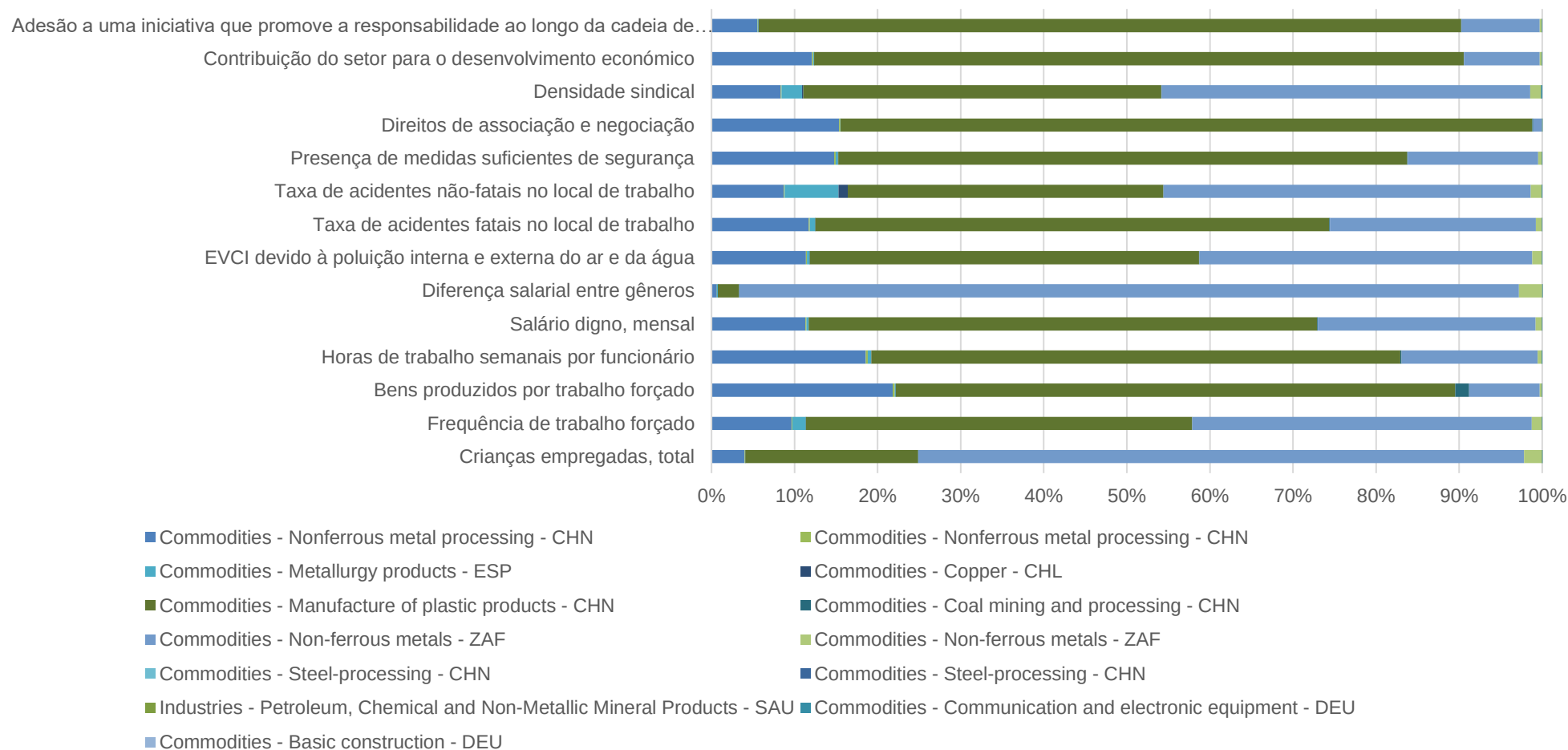


Figura 8 – Contribuições relativas dos bens de consumo da etapa de extração e processamento dos materiais do eletrolisador

Para uma melhor compreensão da avaliação dos impactos sociais, é importante analisar os países envolvidos na extração e processamento dos materiais usados no eletrolisador.

Ao considerar os países em que ocorre a extração e o processamento dos materiais do eletrolisador, é possível obter uma visão mais clara e compreensível dos impactos sociais envolvidos em cada processo. Essa abordagem permitirá identificar os locais específicos onde são necessárias melhorias ou medidas corretivas para reduzir os impactos negativos e promover práticas mais socialmente responsáveis.

A Tabela 12 apresenta os impactos sociais em percentagem organizados por país. Os dois países com maior contribuição para os impactos sociais são a China que contribui entre 3% (“diferença salarial entre gêneros”) e 99% (“direitos de associação e negociação”) para os indicadores sociais avaliados e a África do Sul que apresenta uma contribuição entre 1% (“direitos de associação e negociação”) e 97% (“diferença salarial entre gêneros”). Os restantes países (Espanha, Chile, Arábia Saudita e Alemanha) têm contribuições nulas ou menores que 7% para qualquer indicador social avaliado.

A indústria extrativa na África do Sul destaca-se por apresentar uma relativa maior contribuição para os indicadores “diferença salarial entre gêneros” (97%) e “crianças empregadas, total” (75%). A China apresenta as contribuições mais significativas nos restantes indicadores, dado que o principal processo a ter em consideração é a manufatura dos materiais de plástico.

Tabela 12 - Percentagem das contribuições dos vários países para os impactos sociais associados à etapa de extração e processamento dos materiais do eletrolisador

Indicador	China	África do Sul	Espanha	Chile	Arábia Saudita	Alemanha
Crianças empregadas, total (%)	25	75	0	0	0	0
Frequência de trabalho forçado (%)	56	42	2	0	0	0
Bens produzidos por trabalho forçado (%)	91	9	0	0	0	0
Horas de trabalho semanais por funcionário (%)	83	17	0	0	0	0
Salário digno, mensal (%)	73	27	0	0	0	0
Diferença salarial entre gêneros (%)	3	97	0	0	0	0
EVCI devido à poluição interna e externa do ar e da água (%)	58	41	0	0	0	0
Taxa de acidentes fatais no local de trabalho (%)	74	26	1	0	0	0

Indicador	China	África do Sul	Espanha	Chile	Arábia Saudita	Alemanha
Taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho (%)	47	46	6	1	0	0
Presença de medidas suficientes de segurança (%)	83	16	0	0	0	0
Direitos de associação e negociação (%)	99	1	0	0	0	0
Densidade sindical (%)	52	46	2	0	0	0
Contribuição do setor para o desenvolvimento económico (%)	90	9	0	0	0	0
Adesão a uma iniciativa que promove a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento (%)	90	10	0	0	0	0

Ao comparar as Tabelas 11 e 12, simultaneamente, é evidente um paralelismo entre a China e a base de dados que mais contribui, "Commodities - Manufacture of plastic products – CHN". Ambos demonstraram ser os principais contribuintes nos mesmos indicadores. De forma similar, os indicadores que apresentam as maiores contribuições têm origem na base de dados "Commodities - Non-ferrous metals – ZAF", que podem ser identificados na África do Sul.

Esse cenário alerta para os componentes Nafion e o metal irídio, que emergem como os principais impulsionadores dos impactes sociais.

3.7.4. Contribuição do sistema da osmose inversa nos resultados globais

O sistema de osmose inversa compreende duas etapas de ciclo de vida: a extração e processamento dos materiais e a manufatura. As contribuições dadas por ambas etapas foram nulas, o que sugere que seu impacto no contexto global é praticamente insignificante.

Isto pode ser explicado pelas seguintes razões:

- A massa total dos componentes do sistema de osmose inversa é 21 vezes menor que os componentes do eletrolisador, resultando em uma massa por kg de H₂ produzido consideravelmente inferior. Isso contribui significativamente para a redução de seu impacto.

- Os materiais usados no sistema de osmose inversa não incluem metais raros, que frequentemente estão associados a graves problemas sociais e ambientais em suas áreas de extração.
- Os materiais do sistema de osmose inversa são predominantemente produzidos em países desenvolvidos, onde as questões sociais são monitoradas e abordadas de forma mais rigorosa.
- A diferença nos custos de fabricação dos equipamentos por kg de H₂ é significativamente menor para o sistema de osmose inversa, o que sugere uma menor complexidade do sistema, resultando num maior controlo nas condições de trabalho e segurança

3.7.5. Comparação com os resultados do estado de arte

A presente dissertação alinha-se com as várias conclusões destacadas no estado da arte (Tabela 1).

A literatura mencionada afirma que os países em desenvolvimento desempenham um papel significativo para a geração de impactes sociais. O presente estudo comprova essa afirmação, demonstrando que na realidade países como a China e a África do Sul são os principais contribuintes para esses impactes no caso específico do estudo prospetivo da produção de hidrogénio em Portugal. O estudo de Werker et al., (2019) destaca que a China para o indicador “direitos de associação e negociação” foi o maior contribuidor algo igualmente corroborado neste estudo. Já no estudo de Bargiacchi et al., (2022), a África do Sul emergiu como o principal contribuinte em relação aos indicadores "crianças empregadas, total", "frequência de trabalho forçado" e "diferença salarial entre gêneros". Dos três indicadores apresentados, dois deles confirmam a conclusão de que a África do Sul é a maior contribuinte, como afirmado no presente estudo.

Estas conclusões são de importância fundamental para que numa tomada de decisão se tenha em consideração o país de origem dos materiais importados e as condições sociais que prevalecem nesses países. No entanto, não se pode ignorar os impactes provenientes dos países desenvolvidos. Portugal demonstrou ter uma elevada contribuição nos impactes o que demonstra que os impactes não só são importados como também produzidos. A etapa da manufatura do eletrolisador não pode ser desconsiderada e o seu processo de

fabrico necessita de ser reestruturado, de forma a aumentar a produtividade dos trabalhadores, os seus salários e combater o trabalho forçado, para diminuir o seu papel nos impactes.

As múltiplas fontes de impactes devem ser abordadas de forma cuidadosa. Aquando da tomada de decisões, é crucial ter em consideração se um determinado país adota medidas adequadas e implementa as melhores práticas para minimizar os impactes. Caso isso não ocorra, é essencial exercer pressão para incentivar essa mudança. Isso demonstra a importância de uma visão holística da cadeia de valor e dos seus impactes. Todas as etapas devem ser examinadas, tanto em termos gerais quanto em detalhes específicos.

Essas informações são cruciais para direcionar esforços e políticas com o objetivo de mitigar e melhorar os impactes sociais associados ao hidrogénio verde.

3.8. Análise de sensibilidade

Com o objetivo de avaliar as consequências decorrentes da alteração de dois parâmetros independentes, realizou-se duas análises de sensibilidades. Os parâmetros considerados foram o número de trabalhadores, com dados obtidos da GreenH₂Atlantic, da Hyperion e do conselho de ministros, e o excedente de energia, assumindo uma percentagem de energia disponível de 30% e 15%.

A Figura 99 apresenta os resultados da análise de sensibilidade relativa ao número de trabalhadores calculados para a etapa de produção de hidrogénio.

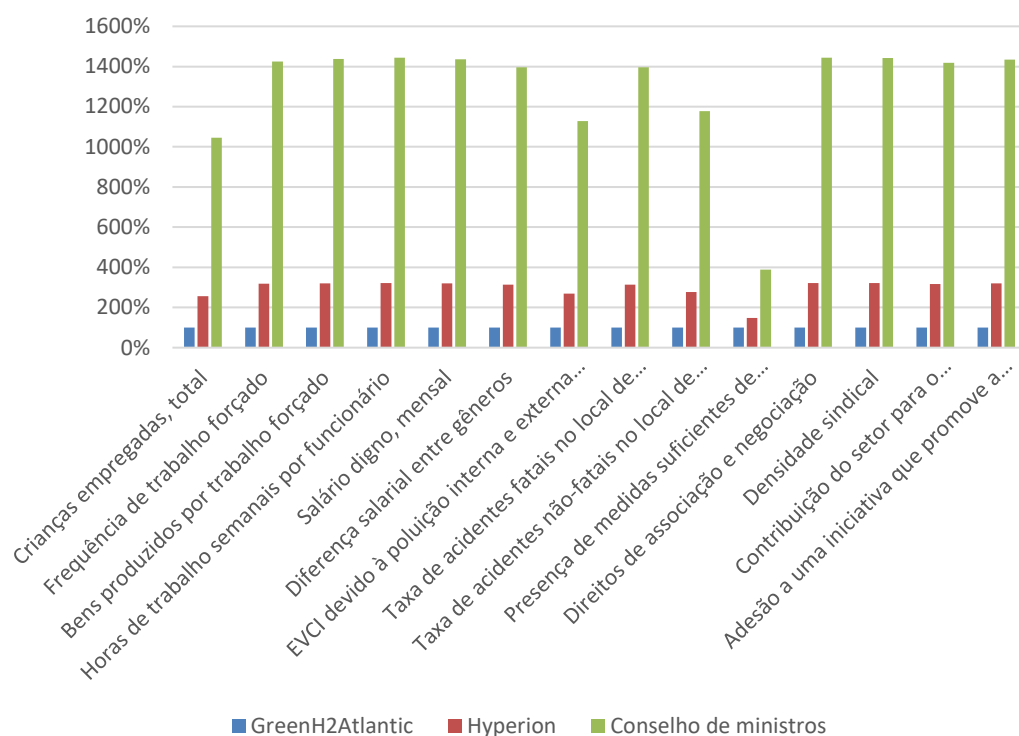


Figura 9 - Resultados observados da análise de sensibilidade nos impactos sociais da etapa de produção de hidrogénio de 1 kg de hidrogénio após a mudança do número de trabalhadores para 100 (Hyperion) e 450 (Resolução do Conselho de Ministros) trabalhadores em comparação com o número de trabalhadores considerado no caso base (GreenH₂Atlantic).

Em relação ao caso base da GreenH₂Atlantic, houve um aumento de 3 vezes no número de trabalhadores na hipótese da Hyperion e de 14,5 vezes na hipótese do Conselho de Ministros. O padrão dos impactos seguiu a mesma tendência, apresentando um aumento médio de 3 vezes e 13 vezes, respetivamente.

Contudo, o indicador de "crianças empregadas, total" teve um aumento de 2,6 e 10, enquanto os valores de "EVCI devido à poluição interna e externa do ar e da água" aumentaram em 2,7 e 11. A "taxa de acidentes não fatais no local de trabalho" teve um acréscimo de 2,7 e 12. Por outro lado, o indicador "presença de medidas suficientes de segurança" teve um crescimento menos linear, com um incremento de 1,47 e 3,8, sendo o que menos se desenvolveu.

Os resultados provenientes do conselho de ministros são pouco rigorosos dado que neles estão compreendidos os trabalhos diretos e indiretos na envolvente dos projetos, havendo uma dupla contagem dos impactos através das etapas anteriores. Esta hipótese auxilia na afirmação que os indicadores "crianças empregadas, total"; "EVCI devido à poluição interna e externa do ar e

da água”; “taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho” e “presença de medidas suficientes de segurança” têm um crescimento menor que os restantes indicadores.

Para compreender os impactes que esta mudança tem nos impactes totais a [Figura 10](#) apresenta a evolução da contribuição da produção de hidrogénio no total dos impactes.

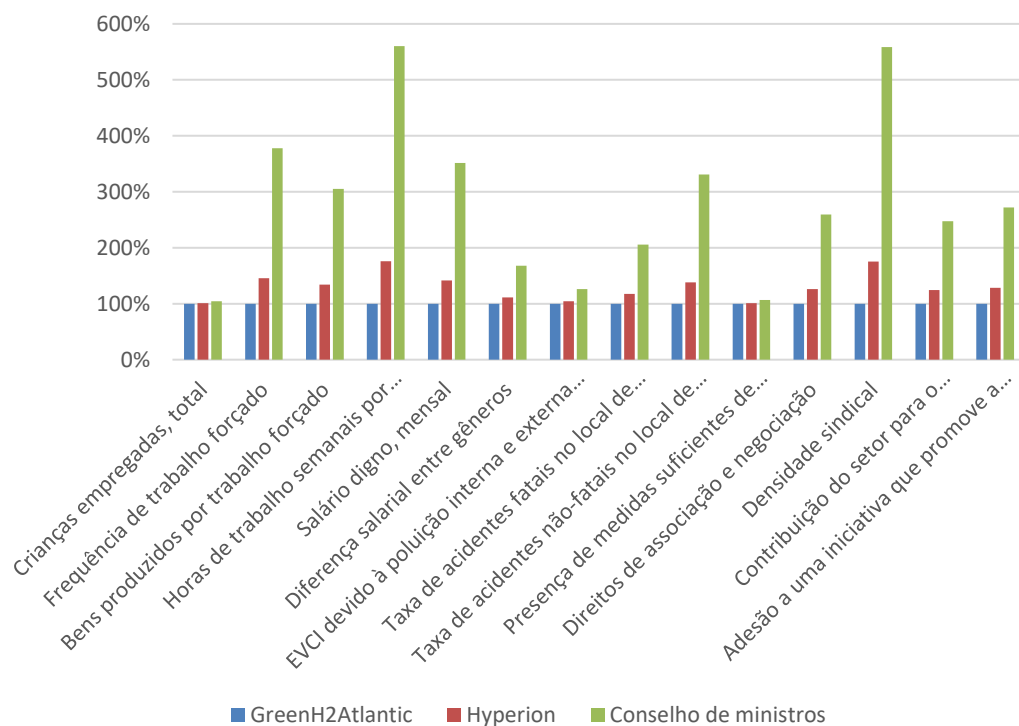


Figura 10 - Resultados observados da análise de sensibilidade nos impactes sociais totais de 1 kg de hidrogénio após a mudança do número de trabalhadores para 100 (Hyperion) e 450 (Resolução do Conselho de Ministros) trabalhadores em comparação com o número de trabalhadores considerado no caso base (GreenH₂Atlantic).

A partir dos resultados da [Figura 10](#), observa-se que ocorreu um aumento significativo dos impactes, à exceção dos indicadores: "crianças empregadas, total", "EVCI devido à poluição interna e externa do ar e da água", "presença de medidas suficientes de segurança,". Os restantes indicadores apresentaram um comportamento errático, indicando que a influência da etapa varia consideravelmente de acordo com o indicador em questão.

No que diz respeito à análise de sensibilidade em que a disponibilidade de energia renovável foi variada, os resultados encontram-se na [Figura 11](#).

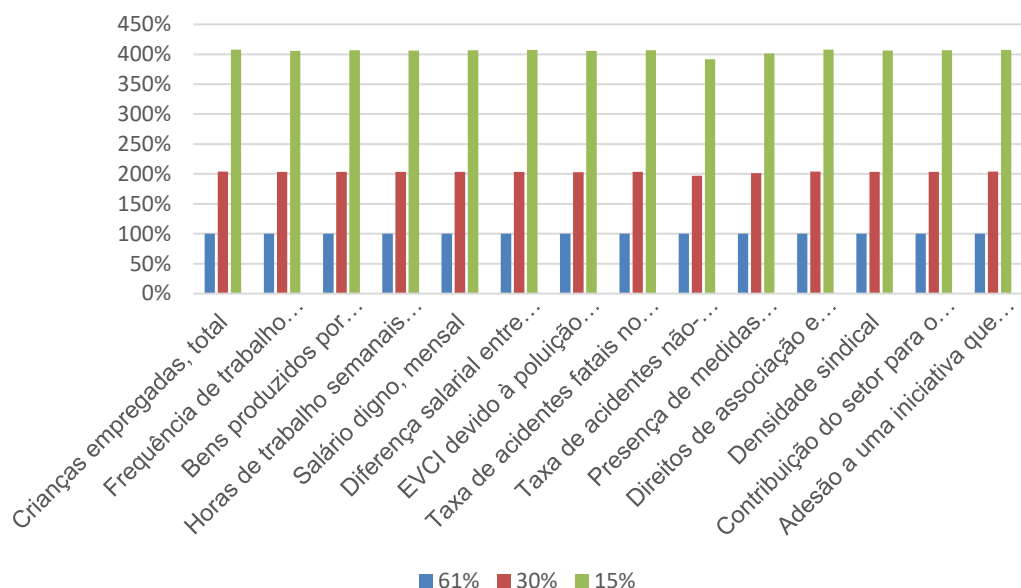


Figura 11 - Resultados observados da análise de sensibilidade nos impactes sociais totais de 1 kg de hidrogénio após a alteração da percentagem de energia excedente disponível

Como previsto, com a diminuição da energia fornecida para metade e um quarto, a produção de H_2 diminui na mesma proporção, o que culminou no aumento dos impactes sociais para o dobro e quadruplo, à exceção da “presença de medidas suficientes de segurança” que já demonstra uma desaceleração. Isso indica que a produção de hidrogénio e os impactes sociais estão em uma relação inversamente proporcional.

Desse modo, é crucial garantir o máximo de energia disponível, a fim de aumentar a produção de hidrogénio, dado que contribui para a redução dos impactes sociais ao distribuí-los por uma quantidade maior de produto.

4. Conclusões, Limitações e Trabalhos

Futuros

Na presente dissertação foram avaliados os impactes sociais provenientes da produção de hidrogénio verde a partir dos excedentes energéticos da rede nacional elétrica.

A extração e processamento da matéria-prima do eletrolisador apresenta a maior contribuição nas etapas: “crianças empregadas, total”; “frequência de trabalho forçado”; “bens produzidos por trabalho forçado”; “salário digno, mensal”; “diferença salarial entre gêneros”; “EVCI devido à poluição interna e externa do ar e da água”; “taxa de acidentes fatais no local de trabalho”; “taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho”; “presença de medidas suficientes de segurança”; “direitos de associação e negociação”; “contribuição do setor para o desenvolvimento económico”; “adesão a uma iniciativa que promove a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento”. Os restantes indicadores (“horas de trabalho semanais por funcionário”; “densidade sindical”) tiveram a etapa da manufatura do eletrolisador como maior contribuidor.

A etapa da produção de hidrogénio quando ligada à manufatura do eletrolisador, dado terem como país fornecedor Portugal, superam a extração e processamento da matéria-prima do eletrolisador nos indicadores “frequência de trabalho forçado”; “salário digno, mensal”; “taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho”, tornando assim Portugal o país que mais contribuiu para os impactes sociais.

Por outro lado, como mencionado na bibliografia exposta no estado de arte, países como a China e a África do Sul são os principais contribuintes dos impactes sociais nas categorias mencionadas na etapa da extração e processamento da matéria-prima do eletrolisador.

As etapas referentes ao sistema de osmose inversa tiveram em todos os indicadores percentagens nulas tornando-se prescindível a sua avaliação.

No que toca às análises de sensibilidade, estas ajudaram a compreender o comportamento do sistema no que toca à variação do número de trabalhadores e do número de horas de produção de hidrogénio verde. Na primeira análise de sensibilidade foi alterado o número de trabalhadores de 31 para 100 e 450. O

comportamento dos impactes dos indicadores foi o esperado, tendo seguido uma tendência linear de aumento à exceção dos indicadores: “crianças empregadas, total”; “diferença salarial entre gêneros”; “taxa de acidentes não fatais no local de trabalho” e “presença de medidas suficientes de segurança”. Já na segunda análise de sensibilidade, com a diminuição da percentagem de energia excedente fornecida para 30% e 15%, as horas de produção diminuíram para metade e um quarto o que levou à duplicação e quadruplicação dos impactes.

As principais limitações deste estudo de caso residem na dependência de dados secundários e nas considerações subsequentes, o que pode originar desvios nos resultados. Por exemplo, o uso do salário médio nacional ao invés do salário médio do setor pode introduzir imprecisões nos dados. Além disso, a utilização da versão 3. Starter do Software PSILCA, integrada no Simapro, introduziu uma maior incerteza nos dados. A versão Starter possui um limite incorporado, que exclui da base de dados os fluxos com contribuições inferiores a 1E-5 USD. De forma similar, o Simapro, devido a restrições de memória, suprimiu os fluxos de produtos com valores menores que 3E-5 USD (Maister et al., 2020).

A avaliação dos impactes referentes aos países baseou-se nos resultados presentes em primeiro plano não assumindo assim os países que influenciam de forma mais indireta sobre os bens de consumo.

A avaliação restrita de 14 indicadores não proporciona uma visão abrangente da situação social, sendo apenas avaliadas 3 categorias (trabalhadores, intervenientes na cadeia de valor, sociedade) ao invés das 6 categorias das partes interessadas (comunidade local, consumidor, crianças).

Por fim, o cálculo das horas de produção e consequente quantidade de hidrogénio produzido fundamentaram-se em uma estimativa que não considerou de forma precisa o excedente de energia verde disponível na rede nacional, o que contribui para as imprecisões descritas anteriormente.

Para superar essas limitações, num estudo posterior, deve ser priorizado a aquisição de dados primários, considerando um caso real no qual a localização da infraestrutura e os dados de inventário dos equipamentos sejam reais. Isso permitirá uma abordagem mais precisa e próxima da realidade em relação aos impactes sociais.

Outro ponto que em estudos subsequentes deve ser ponderado é a expansão da análise para além da produção de hidrogénio, abrangendo também as fases de armazenamento e utilização do mesmo.

Por fim, é essencial a expansão dos indicadores avaliados para incorporar um espectro mais amplo de categorias de partes interessadas, a fim de obter uma visão mais ampla da situação social relacionada ao hidrogénio verde.

BIBLIOGRAFIA

- Akhtar, M. S., Khan, H., Liu, J. J., & Na, J. (2023). Green hydrogen and sustainable development – A social LCA perspective highlighting social hotspots and geopolitical implications of the future hydrogen economy. *Journal of Cleaner Production*, 395. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136438>
- APA. (2023). ENERGIA E CLIMA: Energias Renováveis. Agência Portuguesa do Ambiente. Retrieved 3 de julho de 2023, from <https://rea.apambiente.pt/content/energias-renov%C3%A1veis>
- Balat, M. (2008). Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(15), 4013-4029. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.047>
- Banerjee, S., & Curtin, D. E. (2004). Nafion® perfluorinated membranes in fuel cells. *Journal of Fluorine Chemistry*, 125(8), 1211-1216. <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2004.05.018>
- BareiB, K., de la Rua, C., Möckl, M., & Hamacher, T. (2019). Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems. *Applied Energy*, 237, 862-872. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.001>
- Bargiacchi, E., Campos-Carriedo, F., Iribarren, D., & Dufour, J. (2022). Social Life Cycle Assessment of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell stack. *E3S Web of Conferences*, 334. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233409001>
- BLS. (s.d.). CPI Inflation Calculator. U.S. Bureau of Labour Statistics. Retrieved 1 de julho, from https://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm
- Bonilla-Alicea, R. J., & Fu, K. (2022). Social life-cycle assessment (S-LCA) of residential rooftop solar panels using challenge-derived framework. *Energy, Sustainability and Society*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00332-w>
- Buchmayr, A., Verhofstadt, E., Van Ootegem, L., Thomassen, G., Taelman, S. E., & Dewulf, J. (2022). Exploring the global and local social sustainability of wind energy technologies: An application of a social impact assessment framework. *Applied Energy*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118808>
- Buttler, A., & Spliethoff, H. (2018). Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling via power-to-gas and power-to-liquids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2440-2454. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.003>

- Capurso, T., Stefanizzi, M., Torresi, M., & Camporeale, S. M. (2022). Perspective of the role of hydrogen in the 21st century energy transition. *Energy Conversion and Management*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114898>
- Cardoso, A., Leitão, J., & Brázia, A. (2014). Severe forms of Labour Exploitation: Supporting victims of severe forms of labour exploitation in having access to justice in EU Member States. *Social Fieldwork Research (FRANET)*.
- Chen, L., Msigwa, G., Yang, M., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P. S. (2022). Strategies to achieve a carbon neutral society: a review. *Environ Chem Lett*, 20(4), 2277-2310. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8>
- Chisholm, G., & Cronin, L. (2016). Hydrogen From Water Electrolysis. In *Storing Energy* (pp. 315-343). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803440-8.00016-6>
- Costa, A., & Rego, R. (2023). TRADE UNIONS AND RIGHT-WING POPULISM IN EUROPE. *friedrich ebert stiftung*, 1-9.
- Crisóstomo, P. (2023). Na UE ainda há 14 países com salários mínimos brutos abaixo de mil euros. *Público*. <https://www.publico.pt/2023/07/21/economia/noticia/ue-ha-14-paises-salarios-minimos-brutos-abaixo-mil-euros-2057678>
- Daily Metal Prices. (2023). Daily Metal Spot Prices: Aluminum Price (USD / Kilogram) for the Last 2 weeks. Retrieved 26 de junho de 2023, from <https://www.dailymetalprice.com/metalprices.php?c=ir&u=kg&d=10>
- EEA. (2022). *Trends and projections in Europe 2022*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2800/16646>
- ERSE. (2021). Comparação de preços de eletricidade Eurostat. *Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos*.
- European Commission. (2023). *COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU)* Brussels
- Eurostat. (2023a). Accidents at work statistics. Retrieved 19 de agosto de 2023, from https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Accidents_at_work_statistics
- Eurostat. (2023b). Hourly labour costs. Retrieved 27 de julho de 2023, from https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Hourly_labour_costs#Hourly_labour_costs_ranged_between_.E2.82.AC8.2_and_.E2.82.AC50.7_in_2022
- Exchange Rates. (2021). Euro to US Dollar Spot Exchange Rates for 2021. Retrieved 26 de junho de 2023, from <https://www.exchangerates.org.uk/EUR-USD-spot-exchange-rates-history-2021.html>

- Expresso. (2023). Portugueses são dos que pagam mais impostos nos países da OCDE. *Expresso*. <https://expresso.pt/economia/impostos/2023-08-17-Portugueses-sao-dos-que-pagam-mais-impostos-nos-paises-da-OCDE-bd02e46c>
- Fusion Fuel. (2021). *Fusion Fuel* Retrieved 1 de julho de 2023 from <https://www.fusion-fuel.eu/>
- Götz, M., Lefebvre, J., Mörs, F., McDaniel Koch, A., Graf, F., Bajohr, S., Reimert, R., & Kolb, T. (2016). Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 85, 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>
- GreenH2Atlantic. (2023). (comunicação pessoal).
- Holger, S., Jan, K., Petra, Z., Andrea, S., & Jürgen-Friedrich, H. (2017). The Social Footprint of Hydrogen Production - A Social Life Cycle Assessment (S-LCA) of Alkaline Water Electrolysis. *Energy Procedia*, 105, 3038-3044. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.626>
- Hong, S., Kim, E., & Jeong, S. (2023). Evaluating the sustainability of the hydrogen economy using multi-criteria decision-making analysis in Korea. *Renewable Energy*, 204, 485-492. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.037>
- Hydrogen Europe. (2022). Clean Hydrogen Monitor 2022. <https://hydrogeneurope.eu/clean-hydrogen-monitor-2022/>
- IEA. (2022a). *Hydrogen Projects Database*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>
- IEA. (2022b). *Industry*. <https://doi.org/https://www.iea.org/reports/industry>
- IEA. (2023a). *CO2 Emissions in 2022*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>, License: CC BY 4.0
- IEA. (2023b). *Electrolysers*. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/electrolysers>
- IEA. (2023c). *Hydrogen*. <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
- ILO. (s.d.). Occupational safety and health country profile: Portugal. *international Labour Organization*. <https://www.ilo.org/safework/countries/europe/portugal/lang-en/index.htm#banner>
- IRENA. (2019). *HYDROGEN: A RENEWABLE ENERGY PERSPECTIVE* International Renewable Energy Agency.
- IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. International Renewable Energy Agency.
- Jesus, T. (2023). Hyperion prepara instalação de unidade de produção de hidrogénio em Setúbal. *O Setubalense*.

- Khan, M. I., & Al-Ghamdi, S. G. (2023). Hydrogen economy for sustainable development in GCC countries: A SWOT analysis considering current situation, challenges, and prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(28), 10315-10344. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.033>
- Lagioia, G., Spinelli, M. P., & Amicarelli, V. (2023). Blue and green hydrogen energy to meet European Union decarbonisation objectives. An overview of perspectives and the current state of affairs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(4), 1304-1322. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.044>
- LME. (2023). LME Steel HRC NW Europe (Argus). *The London Metal Exchange*. <https://www.lme.com/en/Metals/Ferrous/LME-Steel-HRC-NW-Europe-Argus#Price+graph>
- Maister, K., Di Noi, C., Cirotto, A., & Srocka, M. (2020). *PSILCA v.3 Database documentation*.
- McGraw-Hill. (2003). Six tenths factor In *McGraw-Hill Dictionary of Scientific & Technical Terms*.
- NIST. (2023). *Hydrogen* (N. I. o. S. a. Technology, Ed.) <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C1333740&Mask=1&Type=JANAFG&Plot=on>
- ONU. (2016). Acordo de Paris. *Jornal Oficial da União Europeia* [https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019\(01\)&from=PI](https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:22016A1019(01)&from=PI)
- ONU. (2023). *Objetivos de desenvolvimento sustentável*. <https://unric.org/pt/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/>
- Parra, D., Valverde, L., Pino, F. J., & Patel, M. K. (2019). A review on the role, cost and value of hydrogen energy systems for deep decarbonisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 279-294. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.010>
- Passport to Trade 2.0. (2023). Work-life balance. *Passport to Trade 2.0*.
- Pereira, P. S. S. (2021). *O Hidrogénio como vetor estratégico das utilities elétricas ibéricas: modelos de negócio e risco* [universidade do Porto].
- Prodcom. (2023). *Sold production, exports and imports* <https://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/database>
- Rais, A. (2023). Topsoe Develops World's First Industrial Scale SOEC Electrolyzer Facility. *Process Worldwide*. <https://www.process-worldwide.com/topsoe-develops-worlds-first-industrial-scale-soec-electrolyzer-facility-a-9c2ed6489e5e967007895047905388b6/>

- Ramalho, M. d. R. P. (2013). Portuguese labour law and industrial relations during the crisis. *Governance and Tripartism Department International Labour Office*.
- COMUNICAÇÃO DA COMISSÃO AO PARLAMENTO EUROPEU, AO CONSELHO EUROPEU, AO CONSELHO, AO COMITÉ ECONÓMICO E SOCIAL EUROPEU E AO COMITÉ DAS REGIÕES, (2019). https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF
- RHJ. (2023). 10 facts about the Portuguese workforce. *RHJ Accountants and Associates*. <https://rhjaccountants.com/10-facts-about-the-portuguese-workforce/>
- Sbaih, I. A. (2017). Life Cycle Assessment of RO Water Desalination System Powered by Different Electricity Generation Alternatives *An- Najah National University*.
- Trading economics. (2023). Titanium. <https://tradingeconomics.com/commodity/titanium>
- Tsalidis, G. A. (2022). Type I Social Life Cycle Assessments: Methodological Challenges in the Study of a Plant in the Context of Circular Economy. *Sustainability*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/su142215031>
- Tsalidis, G. A., Xevgenos, D., Ktori, R., Krishnan, A., & Posada, J. A. (2023). Social life cycle assessment of a desalination and resource recovery plant on a remote island: Analysis of generic and site-specific perspectives. *Sustainable Production and Consumption*, 37, 412-423. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.03.017>
- Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972-974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
- UNEP. (2020). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products and Organizations 2020. *Benoît Norris, C., Traverso, M., Neugebauer, S., Ekener, E., Schaubroeck, T., Russo Garrido, S., Berger, M., Valdivia, S., Lehmann, A., Finkbeiner, M., Arcese, G. (eds.) United Nations Environment Programme (UNEP)*.
- UNEP. (2021). Methodological Sheets for Subcategories in Social Life Cycle Assessment (S-LCA) 2021. *Traverso, M., Valdivia, S., Luthin, A., Roche, L., Arcese, G., Neugebauer, S., Petti, L., D'Eusanio, M., Tragnone, B.M., Mankaa, R., Hanafi, J., Benoît Norris, C., Zamagni, A. (eds.). United Nations Environment Programme (UNEP)*.
- UNFCCC. (2021). GLASGOW CLIMATE CHANGE CONFERENCE – OCTOBER-NOVEMBER 2021 <https://unfccc.int/conference/glasgow-climate-change-conference-october-november-2021>

- Valente, A., Iribarren, D., & Dufour, J. (2021). Comparative life cycle sustainability assessment of renewable and conventional hydrogen. *Sci Total Environ*, 756, 144132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144132>
- Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., Yin, Z., Huang, L., Fu, Y., Li, L., Chang, S. X., Zhang, L., Rinklebe, J., Yuan, Z., Zhu, Q., Xiang, L., Tsang, D. C. W., Xu, L., Jiang, X., . . . Chen, J. M. (2021). Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. *Innovation (Camb)*, 2(4), 100180. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180>
- Werker, J., Wulf, C., & Zapp, P. (2019). Working conditions in hydrogen production: A social life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 23(5), 1052-1061. <https://doi.org/10.1111/jiec.12840>
- Zuttel, A. (2004). Hydrogen storage methods. *Naturwissenschaften*, 91(4), 157-172. <https://doi.org/10.1007/s00114-004-0516-x>

----- ANEXOS -----

Anexo A: Distribuição das categorias, subcategorias e indicadores do PSILCA dos artigos do estado de arte e do estudo efetuado

Tabela A. 1 - Distribuição das categorias, subcategorias e indicadores do PSILCA dos artigos do estado de arte e do estudo efetuado

Categoria	Subcategoria	Indicador	(Werker et al., 2019)	(Valente et al., 2021)	(Bargiacchi et al., 2022)	(Akhtar et al., 2023)	Presente artigo
Trabalhadores	Trabalho infantil	Crianças empregadas, feminino					
		Crianças empregadas, masculino					
		Crianças empregadas, total		X	X	X	X
	Trabalho forçado	Frequência de trabalho forçado			X	X	X
		Bens produzidos por trabalho forçado					X
		Tráfico Humano					
	Salário justo	Salário digno, mensal			X	X	X
		Salário mínimo, mensal	X				
		Média do salário do setor, mensal					
	Expediente	Horas de trabalho semanais por funcionário	X			X	X
	Discriminação	Mulheres na força de trabalho (total)					
		Mulheres na força de trabalho setorial					
		Diferença salarial entre gêneros	X		X		X
	Saúde e Segurança	Taxa de acidentes não-fatais no local de trabalho					X
		Taxa de acidentes fatais no local de trabalho					X
		EVCi devido à poluição interna e externa do ar e da água					X
		Presença de medidas suficientes de segurança					X
		Trabalhadores afetados por desastres naturais				X	

Categoria	Subcategoria		Indicador	(Werker et al., 2019)	(Valente et al., 2021)	(Bargiacchi et al., 2022)	(Akhtar et al., 2023)	Presente artigo
Trabalhadores	Benefícios sociais, questões legais	Despesas previdenciárias				X		
		Evidência de violações de leis e regulamentos trabalhistas						
Intervenientes da cadeia de valor	Liberdade de associação e negociação coletiva	Densidade sindical	X			X	X	
		Direitos de Associação e de Negociação	X			X	X	
	Competição justa	Presença de comportamento anticompetitivo ou violação da legislação						
	Corrupção	Corrupção no setor público				X		
		Envolvimento ativo de empresas em corrupção e suborno						
	Promoção de responsabilidade social	Adesão a uma iniciativa que promove a responsabilidade ao longo da cadeia de abastecimento				X	X	
	Prevenção e mitigação de conflitos	Risco de conflitos						
	Sociedade	Contribuição para o desenvolvimento econômico	Contribuição do setor para o desenvolvimento econômico			X	X	X
			Gastos públicos com educação				X	
			Taxa de analfabetismo adulto (15+ anos), masculino					
Taxa de analfabetismo adulto (15+ anos), feminino								
Taxa de analfabetismo adulto (mais de 15 anos), total						X		
Taxa de analfabetismo juvenil, masculino								
Taxa de analfabetismo juvenil, feminino								
Taxa de analfabetismo juvenil, total								
Saúde e segurança		Gastos com saúde, total		X	X	X		
		Despesas com saúde, público						
	Despesas com saúde, individual							
	Despesas com saúde, recursos externos							
	Despesas domésticas e externas com saúde							

Categoria	Subcategoria	Indicador	(Werker et al., 2019)	(Valente et al., 2021)	(Bargiacchi et al., 2022)	(Akhtar et al., 2023)	Presente artigo
Sociedade	Saúde e segurança	Despesas de Saúde do Governo Geral Doméstico					
		Expectativa de vida no nascimento					
Comunidade Local	Acesso a recursos naturais	Nível de uso de água pela indústria (relacionado à retirada total)					
		Nível de uso de água pela indústria (relacionado a recursos hídricos renováveis)					
		Extração de combustíveis fósseis					
		Extração de biomassa (relacionada à população)					
		Extração de biomassa (relacionada à área)					
		Extração de minérios					
		Extração de minerais empregues na indústria e na construção					
		Sistemas de gestão ambiental certificados					
	Pegadas ambientais	Pegada de área agrícola incorporada					
		Pegada de área florestal incorporada					
		Pegada hídrica incorporada					
		Número de espécies ameaçadas					
	Pegadas de gases com efeito de estufa	Pegada de CO2 incorporado					
		Pegada de CO2-eq incorporada					
	Pegada do trabalho	Valor agregado incorporado total				X	
	Respeito aos direitos indígenas	Presença de população indígena					
		Problemas de direitos humanos enfrentadas pelos povos indígenas					
	Condições de vida, segurança e saúde	Nível de poluição do país					
		Cobertura de água potável				X	
		Cobertura de saneamento					

Categoria	Subcategoria	Indicador	(Werker et al., 2019)	(Valente et al., 2021)	(Bargiacchi et al., 2022)	(Akhtar et al., 2023)	Presente artigo
Comunidade Local	Emprego Local	Taxa de desemprego no país				X	
	Migração	Trabalhadores migrantes internacionais no setor					
		Stock de Migrantes Internacionais					
		Taxa de migração líquida					
		Taxa de procura de asilo					
		Taxa de emigração					
		Taxa de imigração					

Anexo B: Exemplificação dos cálculos para obtenção da quantidade total de hidrogénio produzido e água consumida no processo de produção de hidrogénio

1 kg de H₂ necessita cerca de 9 kg de H₂O

Tabela B. 1 - Dados necessários ao cálculo da quantidade total de hidrogénio produzido e da água consumida no processo de produção de hidrogénio

Variável	Símbolo	Valor
Tempo de vida (anos)	t	20
Percentagem de funcionamento (%)	η	61,1
Horas totais de produção (h)	T	107047
Potência nominal (MW)	P _n	100
Energia (MJ)	E	360 000
Consumo (kwh)	C	100 000
Consumo específico (kwh/ kg de H ₂ prod.) *	C _e	55
Massa de H ₂ produzida por hora (kg de H ₂ prod./ h)	m	1818,2
Produção de H ₂ (kg de H ₂ prod.)	M	1,95E+08
Consumo de água ao longo da vida (kg de H ₂ O)	M _{ág.}	1,75E+09

*(IEA, 2023c)

Lista de equações usadas nos cálculos:

Determinação das horas totais de produção:

$$T = \frac{t * \eta * 8760}{100}$$

Eq. B.1

Determinação da quantidade de energia:

$$E = P_n * 3600$$

Eq. B.2

Determinação do consumo energético:

$$C = \frac{E}{3.6}$$

Eq. B.3

Determinação da massa de H₂ produzida por unidade de tempo:

$$m = \frac{C}{C_e}$$

Eq. B.4

Determinação da massa de H₂ produzida no tempo vida de 20 anos:

$$M = m * T$$

Eq. B.5

Determinação da massa de água necessária no tempo de vida de 20 anos:

$$M_{ág} = M * 9$$

Eq. B.6

Anexo C – Referência bibliográfica das bases de dados da ProdCom usadas nos dados de inventário das etapas de extração e processamento dos materiais do eletrolisador e do sistema de osmose inversa

Tabela C. 1 - Referência bibliográfica das bases de dados da ProdCom por material

Material	Referência Bibliográfica	Link
ABS	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6501882/default/table?lang=en
Aço inoxidável	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6489753/default/table?lang=en
Betão	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6489856/default/table?lang=en
Carvão ativado	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6489768/default/table?lang=en
Cobre	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6489760/default/table?lang=en
Cola de poliuretano	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6501939/default/table?lang=en
Ferro	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6490476/default/table?lang=en
Ferro fundido	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6501907/default/table?lang=en
Fibra de plástico reforçado	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6501882/default/table?lang=en
Fibra de vidro com Resina de poliéster	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6501882/default/table?lang=en
Iridio	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6489773/default/table?lang=en
Material eletrónico	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6503665/default/table?lang=en
PA	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6502047/default/table?lang=en
PET	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6501926/default/table?lang=en
Plástico	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6490446/default/table?lang=en
Platina	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6489800/default/table?lang=en
PP	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6502031/default/table?lang=en
PSF	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6501882/default/table?lang=en
PVC	(Prodcom, 2023)	https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/DS-056120__custom_6490465/default/table?lang=en