



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Desafios da Descarbonização da Economia - Tecnologias Sustentáveis para Economias de Baixo Carbono

Bruno Francisco da Cunha Almeida

Dissertação

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Paulo Moisés Almeida da Costa
Professor Doutor Paulo Rogério Perfeito Tomé

Janeiro de 2023



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Desafios da Descarbonização da Economia - Tecnologias Sustentáveis para Economias de Baixo Carbono

Bruno Francisco da Cunha Almeida

Dissertação

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica - Energia e Automação

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Paulo Moisés Almeida da Costa

Professor Doutor Paulo Rogério Perfeito Tomé

Janeiro de 2023

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto PTDC/GES-AMB/0934/2020

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

AGRADECIMENTOS

A dissertação é o resultado de um percurso que não teria sido possível realizar sem o precioso apoio e colaboração de várias pessoas que me rodeiam e às quais desejo expressar neste espaço os meus sinceros agradecimentos por me ajudarem a dar um passo importante no meu percurso académico.

Agradeço à instituição que tornou possível a realização desta dissertação, a Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

Dirijo também um agradecimento ao meu orientador Professor Doutor Paulo Moisés e ao meu coorientador Professor Doutor Paulo Tomé, pelos riquíssimos conhecimentos que souberam ministrar e cujo a sua contribuição foi imprescindível para a qualidade desta dissertação.

Aos meus amigos pela compreensão manifestada perante as dificuldades encontradas, e por todo o apoio prestado.

À minha namorada um muito obrigado não só por me ter ajudado a ultimar a versão final do relatório, que, em parte, contribuiu para o sucesso desta dissertação, como também pela disponibilidade e carinho demonstrado ao longo de todo este percurso.

E por fim, um bem-haja especial à minha família que sempre primou pela minha educação.

A todos, agradeço.

RESUMO

O fenómeno do aquecimento global e as conseqüentes alterações climáticas torna inevitável a reestruturação dos atuais sistemas energéticos, intensivos em carbono. Ao longo dos últimos anos, muita investigação sobre políticas e tecnologias para a descarbonização tem vindo a ser desenvolvida, resultando num elevado volume de artigos científicos, projetos de investigação e patentes. Este volume torna complexa a compreensão da relevância das diversas tecnologias e estratégias de descarbonização que a comunidade científica tem vindo a propor.

O presente trabalho, desenvolvido no âmbito do projeto Transições Transformativas Sustentáveis - Conciliar a Aceleração das Transições para Baixo Carbono com Transformações do Sistema (PTDC/GES-AMB/0934/2020), apresenta uma metodologia que permite perceber as tendências tecnológicas, no âmbito da descarbonização, presentes na literatura científica, projetos e patentes. Esta metodologia, baseada em análise bibliométrica, utiliza de dois programas informáticos de mineração de texto, especificamente, o “Tools for Innovation Monitoring” (TIM) e o VOSviewer.

A aplicação da metodologia desenvolvida, sobre bases de dados de publicações científicas (SCOPUS e Web Of Science), de patentes (PATSTAT) e projetos de investigação (CORDIS), evidencia que as tecnologias de captura e armazenamento de carbono, o H₂, o armazenamento de energia, as fontes renováveis de energia e a mobilidade elétrica foram, no período 2011-2021, aquelas que mais atenção receberam por parte da comunidade científica. Não obstante, outras tecnologias foram também identificadas, incluindo tecnologias de resposta da procura, microrredes e redes inteligentes. Os domínios de tecnologias promissoras identificados são enquadrados em três grupos fundamentais: tecnologias do lado da oferta (exemplo: eletricidade, H₂), tecnologias do lado da procura (exemplo: mobilidade elétrica, resposta da procura) e tecnologias relacionadas com infraestruturas (exemplo: redes inteligentes e microrredes). As tecnologias mais relevantes que foram identificadas são descritas, evidenciando-se a sua maturidade e custo.

Ainda que dependentes das bases de dados consideradas, os resultados apontam para uma ênfase nas tecnologias do lado da oferta, podendo abordagens mais distribuídas e com grande potencial de descarbonização, nomeadamente do lado da procura, não estarem a ser suficientemente investigadas. Outra conclusão retirada é que não existe um caminho “mágico” universal para a transição energética, o que se deve ao facto de os recursos energéticos disponíveis em diferentes regiões serem diversos e de se encontrarem em diferentes proporções.

Assim, países com abundância de recursos renováveis tendem a centrar esforços nesses recursos, enquanto países com recursos fósseis tendem a optar por tecnologias de captura e armazenamento de carbono. A maturidade das tecnologias e a sua relação custo-benefício também influenciam os decisores, uma vez que as opções por tecnologias são condicionadas pela maturidade destas a qual tende a reduzir os respectivos custos.

Palavras-chave: Descarbonização; mineração de texto; transição sustentável; tecnologias de descarbonização.

ABSTRACT

The phenomenon of global warming and consequent climate change makes the restructuring of current carbon-intensive energy systems inevitable. Over the last few years, much research on policies and technologies for decarbonisation has been developed, resulting in a high volume of scientific articles, research projects and patents. This volume makes it complex to understand the relevance of the different technologies and decarbonisation strategies that the scientific community has been proposing.

The present work, developed within the project titled Sustainable Transformative Transitions - Reconciling the Acceleration of Transitions to Low Carbon with System Transformations (PTDC/GES-AMB/0934/2020), presents a methodology that allows the perception of technological trends, within the scope of decarbonisation, in the scientific literature, projects and patents. The process is based on bibliometric analysis, using two text-mining computer programs, specifically the "*Tools for Innovation Monitoring - TIM*" and the VOSviewer.

The developed methodology was applied in databases of scientific publications (*SCOPUS* and *Web Of Science*), patents (*PATSTAT*) and research projects (*CORDIS*). The result shows that carbon capture and storage technologies, hydrogen, energy storage, renewable energy sources and electric mobility were, in the period 2011-2021, those that received the most attention from the scientific community. However, other technologies have also been identified, including demand response technologies, microgrids and smart grids. The identified promising technology domains fall into three key groups: supply-side technologies (e.g. electricity, hydrogen), demand-side technologies (e.g. electric mobility, demand response) and infrastructure-related technologies (e.g. smart grids and microgrids). The most relevant technologies identified are then described, showing their maturity and cost.

Although dependent on the databases considered, the results emphasise supply-side technologies, with more distributed approaches with great potential for decarbonisation, namely on the demand side, possibly not being sufficiently investigated. Another conclusion drawn is that there is no universal "magic" path for energy transition because the energy resources available in different regions are diverse and found in different proportions. Thus, countries with abundant renewable resources tend to focus on these resources, while countries with fossil resources tend to opt for carbon capture and storage technologies. The technologies' maturity

and cost-benefit ratio influence decision-makers since the options for technologies are conditioned by their maturity, which tends to reduce the respective costs.

Keywords: Decarbonization; decarbonization technologies; sustainability transitions; text mining.

ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objetivos da investigação	3
1.3	Estrutura da dissertação	4
1.4	Publicação.....	4
2.	REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1.	Sistema Energético	6
2.2.	Softwares de mineração de texto	9
2.2.1	TIM – “Tools for Innovating Monitoring”	9
2.2.2	VOSviewer	15
2.2.2.1	Web of Science	20
2.3	Trabalhos similares existentes na literatura.....	21
2.4	Nível de prontidão tecnológico de tecnologias.....	23
3.	METODOLOGIA	26
3.1	Construção da <i>string</i> de pesquisa e identificação do conjunto de dados.....	27
3.2	Análise do conjunto de dados	29
3.3	Tratamento das listas de palavras-chave	31
3.4	Resultados.....	33
4.	CARACTERIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS MAIS RELEVANTES RESULTANTES DA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA	40
4.1	Tecnologias do lado da oferta.....	40
4.1.1	Produção renovável de energia.....	40
4.1.2	Bioenergia.....	49
4.1.3	Produção de eletricidade por via fóssil com captura de carbono	52

4.1.4	Nuclear	61
4.2	Hidrogénio	64
4.3	Lado da procura	67
4.3.1	Eficiência energética	67
4.3.2	Veículos elétricos	76
4.4	Infraestruturas e tecnologias transversais	79
4.4.1	Armazenamento.....	79
4.4.2	Interconexão Energética Global	83
5.	CONCLUSÃO	85
5.1	Trabalhos futuros	93
	REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS	94
6.	ANEXO A	123

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Campos mais utilizados na pesquisa no TIM.....	11
Tabela 2 – Visualizações disponíveis.....	12
Tabela 3 – Termos relacionados com descarbonização resultantes da revisão da literatura	27
Tabela 4 – Lista dos 10 artigos mais citados no WoS para a <i>string</i> de pesquisa	34
Tabela 5 - Emissões por tipo de tecnologia PV.....	45
Tabela 6 - Caracterização da tecnologia fotovoltaica.....	45
Tabela 7 – Caracterização da energia eólica	49
Tabela 8 – Caracterização da bioenergia.....	52
Tabela 9 - Comparação dos vários meios de transporte	59
Tabela 10 - Características das técnicas de captura.....	60
Tabela 11 - Características dos processos de separação.....	61
Tabela 12 – Caracterização da tecnologia CCS	61
Tabela 13 – Caracterização da energia nuclear	64
Tabela 14 – Caracterização da utilização de hidrogénio	67
Tabela 15 - COP dos diferentes tipos de bombas de calor	72
Tabela 16 - Comparação de bombas de calor com soluções equivalentes a combustível fóssil	73
Tabela 17 - Investimento inicial em BEVs e FCEVs.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Evolução do consumo de energia fóssil e o PIB.....	1
Figura 2 - Artigo publicado	5
Figura 3 - Fluxos de energia no sistema energético	6
Figura 4 – Consumo mundial de energia por fonte de energia.....	7
Figura 5 - Reservas de petróleo no mundo (lado esquerdo) vs Consumo anual de petróleo por região (lado direito).....	8
Figura 6 - Capacidade instalada de fontes renováveis e não renováveis.....	9
Figura 7 – Pesquisa no TIM	10
Figura 8 – Exemplo do conjunto de dados correspondente à <i>string</i> pesquisada	12
Figura 9 - Exemplo de uma lista de palavras-chave relevantes de um conjunto de dados específico.....	15
Figura 10 - Escolha do tipo de mapa	16
Figura 11 – Inserção dos dados no VOS	17
Figura 12 - Seleção do tipo de análise.....	17
Figura 13 - Layout do VOS	18
Figura 14 – Mapa de rede.....	18
Figura 15 – Mapa de sobreposição	19
Figura 16 - Mapa de densidade	19
Figura 17 – Pesquisa na WoS	20
Figura 18 - Exportação do WoS	20
Figura 19 -Esquema de obtenção do conjunto de dados	21
Figura 20 – Escala TRL adotada pela AIE.....	25
Figura 21 - Metodologia utilizada	26
Figura 22 – Extrato dos documentos devolvidos pelo WoS com a <i>string</i> de pesquisa	28

Figura 23 – Extrato dos documentos devolvidos pelo TIM com a <i>string</i> de pesquisa (2018)	29
Figura 24 - Lista de termos/palavras-chave obtidas com o VOS e respetiva ocorrência	30
Figura 25 - Lista de termos/palavras-chave obtidas com o TIM e respetiva relevância	30
Figura 26 – Extrato do dicionário de sinónimos	31
Figura 27 – Excerto do algoritmo de filtragem implementado em VBA	32
Figura 28 – Funcionamento esquemático do algoritmo implementado	33
Figura 29 - Número de documentos devolvidos pelo TIM e pelo WoS.....	33
Figura 30 - Países com mais publicações na WoS no âmbito da <i>string</i> de pesquisa ...	34
Figura 31 - Resultados do TIM	35
Figura 32 - Resultados do VOS.....	36
Figura 33 - Metodologia adotada para obter a classificação	37
Figura 34 – Classificação obtida	38
Figura 35 - Classificações acumuladas.....	39
Figura 36 - Eficiência de células fotovoltaicas.....	43
Figura 37 - Tendência do custo de produção de eletricidade através de células fotovoltaicas	43
Figura 38 - Capacidade solar fotovoltaica acumulada	44
Figura 39 - Estruturas para turbinas eólicas offshore.....	47
Figura 40 – Evolução do custo da eletricidade produzida por via eólica e fotovoltaica	48
Figura 41 - Esquema de captura pós-combustão	54
Figura 42 - Técnica pré-combustão	55
Figura 43 – Captura por oxi-combustão.....	55
Figura 44 - Captura por looping químico	56

Figura 45 – Processo de absorção química.....	57
Figura 46 - Adsorção por pressão.....	58
Figura 47 - Processo de separação por membrana	59
Figura 48 – Central nuclear termoelétrica	62
Figura 49 - Tendência da intensidade energética dos edifícios por região.....	69
Figura 50 – NZEB	70
Figura 51 – a) Bomba de calor geotérmica de formato vertical; b) Bomba de calor geotérmica em vala horizontal; c) Bomba de calor de água subterrânea	72
Figura 52 - Acoplamento do setor dos transportes e de produção de energia através da tecnologia V2G	74
Figura 53 – Percentagem de BEV e FCEV no total de vendas de carros em 2019 e espectável, de acordo com o Cenário de Desenvolvimento Sustentável.....	77
Figura 54 - Mediana das emissões do poço-às-rodas	78
Figura 55 - Síntese de CH ₄	82
Figura 56 - Hipotética super-rede europeia	84
Figura 57 - Emissões anuais de diferentes países no ano de 2011 e 2021	86
Figura 58 – <i>Ranking</i> acumulado.....	87
Figura 59 – Gráfico com as 20 tecnologias mais relevantes em valor absoluto.....	88
Figura 60 - Gráfico com as 20 tecnologias com mais ocorrência em valor absoluto...	89
Figura 61 - Vislumbre de um sistema hipotético futuro de energia	91

LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS

BEV - Veículo Elétrico a Bateria

CCS – Captura e Armazenamento de Carbono

CH₄ – Metano

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

LCOE - Custo Nivelado de Eletricidade

FCEV – Veículo Elétrico a Célula de Combustível

GEE – Gases de Efeito de Estufa

H₂ - hidrogénio

PV – Energia Solar Fotovoltaica

SMR – Small Modular Reactors

TIM – Tools for Innovating Monitoring

TRL – Technological Readiness Level

WoS – Web of Science

UE – União Europeia

VE – Veículo Elétrico

VOS – VOSviewer

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo faz o enquadramento do presente trabalho, apresenta os objetivos da investigação e a forma como esta dissertação está estruturada. O capítulo termina com a apresentação da publicação científica resultante da investigação.

1.1 Enquadramento

O contínuo crescimento económico, juntamente com o rápido crescimento populacional, tem levado a um aumento considerável no consumo global de energia (Olabi & Abdelkareem, 2022). Este aumento do consumo tem intensificado o uso de combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural), geograficamente limitados e de difícil acesso (Esily et al., 2022), como espelha a Figura 1. Esta figura ilustra ainda a evolução do produto interno bruto (PIB) mundial, permitindo perceber que a separação entre as duas curvas diminui ao longo dos anos, e, por conseguinte, a intensidade energética também diminui (ou seja, a razão entre consumo de energia e PIB diminui).

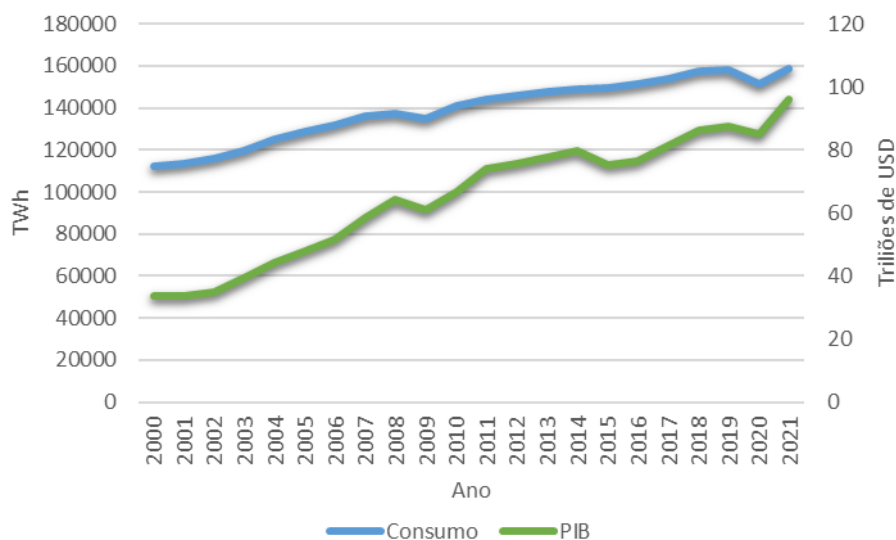


Figura 1- Evolução do consumo de energia fóssil e o PIB

Fonte: (GDP (2022))

A disponibilidade dos combustíveis fósseis está a atingir níveis preocupantes (Belostotskaya, 2019) e concludentemente, o preço do barril de petróleo tem atingido máximos históricos nos mercados globais (Sönnichsen, 2022). A tendência é que esse valor continue a

aumentar nas próximas décadas (Amadeo, 2022), agravado também pelo conflito armado que perdura em solo ucraniano.

Além das dificuldades económicas, há outra grande preocupação da humanidade relacionada com a utilização de combustíveis fósseis. Segundo a NASA, a temperatura média da Terra aumentou mais de 1,2 graus Celsius desde o final do século XIX (NASA Earth Observatory, 2021). Este aumento, em grande parte, é devido ao incremento das emissões de gases de efeito de estufa que se acentuou a partir do fim da segunda revolução industrial (1945), derivada da queima de combustíveis fósseis na produção de energia (calor e eletricidade) (Center for Climate and Energy Solutions, 2020). Como consequência desse aquecimento global, registaram-se nas últimas duas décadas fenómenos climáticos extremos (inundações, secas, incêndios, tempestades, elevação do nível do mar, etc.) que continuam a aumentar de intensidade e frequência (NASA, 2019), (National Centers for Environmental Information, 2018). Para além dos desafios climáticos e económicos, a utilização intensiva de energia fóssil tem outras consequências não desejadas, nomeadamente ao nível da saúde das pessoas, por força dos poluentes libertados com a sua utilização.

Face ao exposto, é imperativa a consciencialização de que o crescimento infinito com base em recursos finitos não é possível (European Commission, 2020). Nesse sentido, a comunidade científica vem procurando alternativas que permitam descarbonizar os atuais sistemas energéticos intensivos em carbono, a fim de se evitarem consequências nefastas para o futuro das populações e dos ecossistemas (Costa et al., 2022).

Em 2015 foi assinado o Acordo de Paris o qual estabelece, como um dos seus objetivos de longo prazo, a limitação do aumento da temperatura média global em 2 graus centígrados acima dos níveis pré-industriais (United Nations, 2022b). Este acordo determina ainda que se prossigam esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5 graus centígrados, reconhecendo que isso reduzirá significativamente os riscos e impactos das alterações climáticas (United Nations, 2022b).

Várias abordagens de descarbonização têm sido propostas para possibilitar o cumprimento dos objetivos traçados, nomeadamente relacionadas, por exemplo, com: i) a melhoria da eficiência na conversão (Borasio & Moret, 2022) e utilização de energia (Obrist et al., 2022), (Andrei et al., 2021); ii) a utilização crescente de tecnologias de emissão reduzida ou nula para produzir energia (Y. Zhang et al., 2022); iii) ou tecnologias para captura de carbono (Bistline & Blanford, 2021).

O elevado volume de pesquisa relacionado com tecnologias e estratégias de descarbonização pode dificultar a compreensão da relevância das propostas apresentadas. Em consequência, neste trabalho, utilizam-se duas ferramentas de mineração de texto em simultâneo com o objetivo de identificar inovações tecnológicas em publicações científicas, projetos e patentes. Em concreto, são utilizadas as ferramentas TIM da Comissão Europeia (“Tools for Innovation Monitoring”) (European Commission, 2022c) e o VOSviewer da Leiden University (VOSviewer, 2022) visando identificar as tendências tecnológicas que podem ser mais promissoras para o processo de descarbonização. O trabalho desenvolvido pretende ainda apresentar um vislumbre sobre o que poderá ser o sistema energético do futuro, descrevendo algumas das tecnologias que o poderão constituir.

1.2 Objetivos da investigação

O presente relatório, realizado no âmbito do projeto de investigação Transições Transformativas Sustentáveis - Conciliar a Aceleração das Transições para Baixo Carbono com Transformações do Sistema (PTDC/GES-AMB/0934/2020), em concreto do workpackage 2, compreende três objetivos fundamentais:

- o primeiro objetivo consiste na utilização de dois *softwares* de mineração de texto disponíveis, em concreto o TIM da Comissão Europeia - "Tools for Innovating Monitoring" - e o VOSviewer da Universidade de Leiden, para identificar das tendências tecnológicas para a descarbonização presentes na literatura científica, projetos e patentes. Assim, pretende-se, numa primeira fase, identificar as inovações tecnológicas (mais ou menos disruptivas) com potencial para suportar o necessário processo de transição energética, o qual é essencial à mitigação das alterações climáticas. Neste processo de identificação é considerado um período temporal de 11 anos (período entre 2011 e 2021).
- o segundo objetivo traçado para este trabalho consiste na caracterização das tecnologias identificadas mais relevantes, evidenciando o respetivo princípio de funcionamento e a forma como podem contribuir para a descarbonização.
- o terceiro objetivo fundamental do trabalho centra-se na caracterização das tecnologias mais relevantes em termos do seu potencial para descarbonizar bem como do seu estado de prontidão e custo, por meio de uma revisão estruturada/sistemática da literatura.

Assim, no final, este trabalho pretende melhorar a compreensão das tendências tecnológicas que, de acordo com a comunidade científica, emergem como as mais promissoras para a descarbonização. Pretende-se ainda compreender os prazos realistas para a disseminação de tecnologias disruptivas. Consequentemente, este trabalho servirá de suporte à definição de políticas para a descarbonização tendo em consideração as características da tecnologia disponível, potenciando a elaboração de casos de estudo que permitam antecipar direções futuras.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é composta por 5 capítulos, incluindo este que contextualiza o trabalho desenvolvido, apresenta os objetivos propostos e descreve a organização do documento.

O segundo capítulo é dedicado ao estado da arte, abordando: i) o estado atual do sistema energético; ii) a descrição do funcionamento dos dois *softwares* de mineração de texto utilizados no presente trabalho, em concreto o TIM e o VOS, iii) a caracterização da escala *Technology Readiness Level* utilizada para avaliar a maturidade das tecnologias identificadas; iv) e, por fim, são revistos e apresentados trabalhos da literatura científica idênticos a este.

O terceiro capítulo evidencia a metodologia adotada, mostrando como os dados foram obtidos, analisados e filtrados para se chegar ao resultado final.

O quarto capítulo apresenta a caracterização das tecnologias identificadas no capítulo anterior. É realizada uma descrição das tecnologias mais relevantes, avaliado o respetivo estado de maturidade e realçado o custo de cada tecnologia.

O quinto e último capítulo expõe as conclusões do trabalho e fornece perspetivas de trabalho futuro.

1.4 Publicação

No âmbito do presente trabalho foi publicado um artigo científico intitulado “*A Bibliometric based Analysis to Identify Promising Domains of Decarbonisation Technologies*”. Esta publicação ocorreu no âmbito da *7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, ocorrida em julho de 2022, como pode ser observado na Figura 2. Os autores foram ainda convidados a submeter um trabalho revisto e mais completo para possível

publicação em “*Mitigation and Adaptation Strategies Towards Decarbonization of Built Environment*” in *Energy and Buildings journal* (IF:7.201, Q1).

A Bibliometric based Analysis to Identify Promising Domains of Decarbonisation Technologies

Publisher: IEEE

Cite This

PDF

Paulo Moisés Costa ; Paulo Tomé ; Bruno Almeida ; Nuno Bento [All Authors](#)

60

Full

Text Views



Abstract	Abstract:
Document Sections	The high volume of research outputs related to technologies and strategies for decarbonisation can make it challenging to understand the relevance of the presented proposals. In this paper, a bibliometric-based analysis is proposed to understand better the domains and subdomains of decarbonisation technologies that have given more attention by the scientific community. The results show that carbon capture technologies, renewable energy sources, electric mobility, green hydrogen, and storage systems are the technology innovations that have received the most attention in the period 2013 to 2021. These results confirm the traditional supply-side orientation of research on technology innovations.
I. Introduction	
II. Methodology	
III. Application	
IV. Conclusion	Published in: 2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)
Authors	Date of Conference: 05-08 July 2022
Figures	INSPEC Accession Number: 21990626
References	Date Added to IEEE Xplore: 19 August 2022
Keywords	DOI: 10.23919/SpliTech55088.2022.9854282
Metrics	Print on Demand(PoD) ISBN: 978-1-6654-8828-0
	Publisher: IEEE
	Conference Location: Split / Bol, Croatia

Figura 2 - Artigo publicado

Fonte:(Costa et al., 2022)

2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo revê o sistema energético atual e o trabalho que tem vindo a ser desenvolvido na comunidade científica a cerca do tema desta dissertação. Além disso, são apresentados dois softwares utilizados na investigação.

2.1. Sistema Energético

O Pacto Ecológico Europeu (European Commission, 2021a) coloca a União Europeia numa trajetória de cumprimento da neutralidade climática até 2050, através da descarbonização profunda de todos os setores da economia, e de uma maior redução das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) até 2030. O sistema energético é fundamental para alcançar estes objetivos, já que este engloba a produção, transformação, armazenamento, transporte, distribuição, comercialização e consumo de energia, independentemente da forma que esta assuma.

Apesar das evoluções nos últimos anos, em particular no sistema elétrico, o sistema energético ainda se caracteriza por ser um sistema fundamentalmente unidirecional que liga determinados recursos energéticos a certos setores de utilização final, tal como ilustra a Figura 3. Assim, os produtos petrolíferos continuam a ser predominantes no setor dos transportes e como matéria-prima industrial, enquanto o carvão e o gás natural são utilizados principalmente para produzir eletricidade e calor. Este modelo unidirecional tende a ser técnica e economicamente ineficiente, e com o acentuar da crise climática torna-se necessário reformular a forma como a energia é produzida e utilizada.

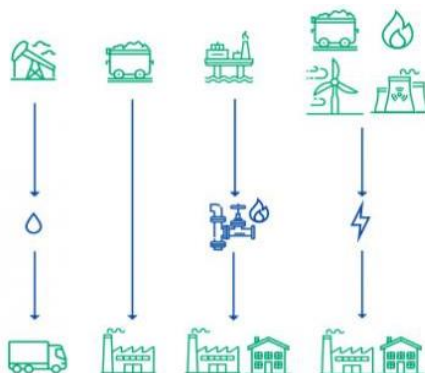


Figura 3 - Fluxos de energia no sistema energético

Fonte: (European Comission, 2022d)

A matriz energética global é ainda, apesar dos investimentos feitos nos últimos anos, muito baseada em combustíveis fósseis (Esily et al., 2022). Na realidade, os combustíveis fósseis ainda representam mais de 80% da produção global de energia (BP, 2022), tal como se pode observar na Figura 4.

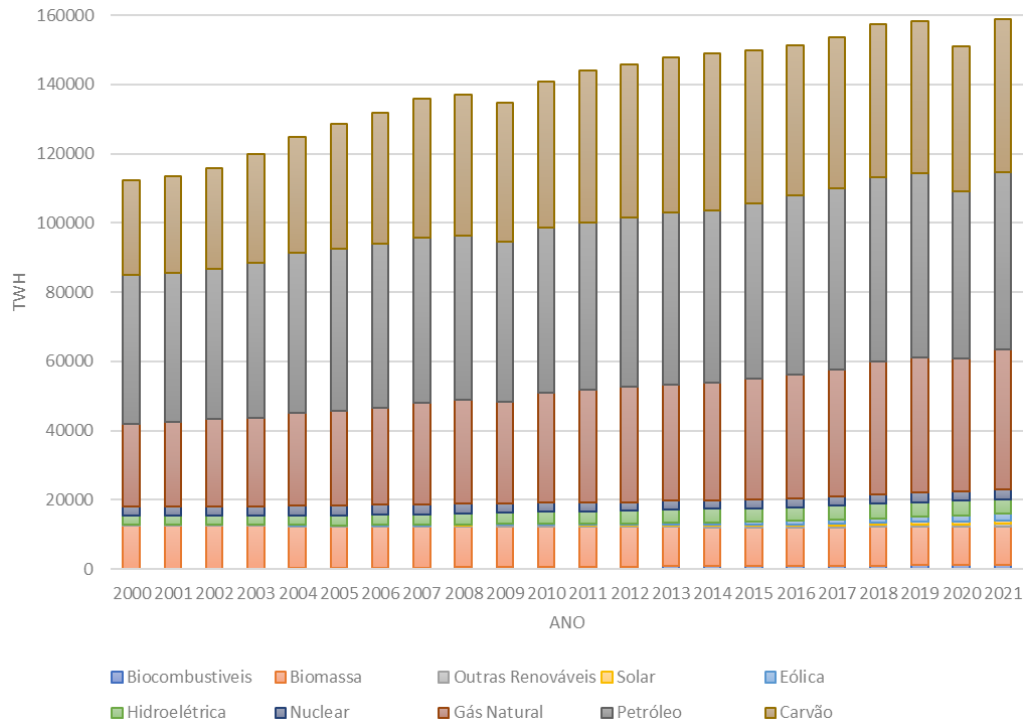


Figura 4 – Consumo mundial de energia por fonte de energia

Fonte: (BP, 2022)

Por outro lado, a distribuição das reservas de combustíveis fósseis pelo mundo não coincide com as necessidades de cada região (Gaspar, 2014), como se observa na Figura 5. Cerca de 80% da população global vive em países importadores de combustíveis fósseis, tornando essas pessoas vulneráveis a crises geopolíticas (United Nations, 2022a)

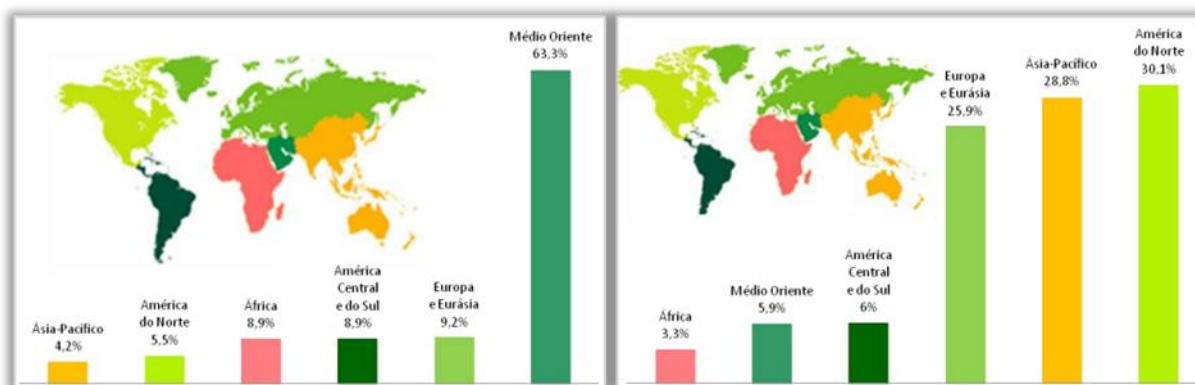


Figura 5 - Reservas de petróleo no mundo (lado esquerdo) vs Consumo anual de petróleo por região (lado direito)

Fonte: (BBC, 2014)

Além disso, como a taxa de consumo é muito maior que a taxa de formação, as reservas de combustíveis fósseis começam a atingir mínimos alarmantes (Belostotskaya, 2019), com fortes impactos na economia global (Amadeo, 2022).

Conclui-se do exposto que é necessário reduzir significativamente a atual dependência das economias face aos combustíveis fósseis, investindo em fontes alternativas de energia que sejam limpas, acessíveis, sustentáveis e confiáveis, como as fontes de energia renovável (energia solar, eólica, etc.), que estão disponíveis em abundância ao nosso redor e são reabastecidas pela natureza (Kamran & Fazal, 2021), (United Nations, 2022a). Só desta forma, será possível proteger os países das variações imprevisíveis dos preços dos combustíveis fósseis (United Nations, 2022a).

A redução do custo das tecnologias de produção de energia com recurso a fontes renováveis, a digitalização da economia e a inovação em diferentes tecnologias, como baterias, bombas de calor, veículos elétricos (VE) e tecnologias relacionadas com a produção, armazenamento e utilização de hidrogénio (H₂), representam uma oportunidade para impulsionar uma profunda transformação do sistema energético (European Commission, 2020).

Os desenvolvimentos tecnológicos e a cooperação internacional permitiram mover as fontes de energia renovável dos seus nichos de mercado e, nos últimos sete anos, a adição de fontes de energia renovável prevaleceu face às fontes de base fóssil. Como mostra a Figura 6, em 2021, foram adicionados 260 gigawatts de capacidade de geração de energia renovável, quatro vezes mais do que a capacidade adicionada de outras fontes (IRENA, 2022b).

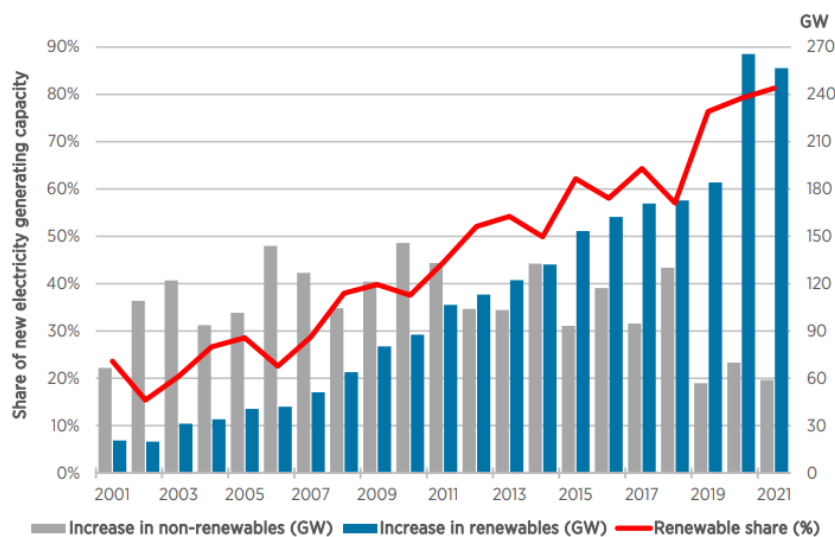


Figura 6 - Capacidade instalada de fontes renováveis e não renováveis

Fonte: (IRENA, 2022)

Compreende-se assim que o futuro energético deverá assentar numa quota crescente de energia de fontes renováveis distribuídas e integrar diferentes vetores energéticos de forma flexível, mantendo a eficiência na utilização dos recursos, sendo essencial a integração do sistema energético (European Commission, 2020). Na realidade, as fontes de energia renováveis estão a ganhar terreno e produzem já cerca de 29% de toda a eletricidade (BP, 2022).

2.2. Softwares de mineração de texto

A bibliometria é amplamente utilizada na análise quantitativa de publicações científicas, nomeadamente para identificar e prever tendências em determinados campos de investigação, e revela ser um método eficaz de revisão da literatura, principalmente à medida que o número de publicações aumenta (X.-C. Meng et al., 2021). Os programas de mineração de texto são utilizados como ferramentas de suporte à aplicação do método bibliométrico.

2.2.1 TIM – “Tools for Innovating Monitoring”

O TIM é um *software* de mineração de texto que permite o tratamento de conjuntos de dados complexos e o rastreamento de tecnologias estabelecidas e emergentes (Moro et al., 2018). Pode ser usado para contar níveis de atividade em publicações científicas (artigos ou livros), patentes e projetos financiados pela União Europeia. Portanto, o TIM pode ser usado

para identificar modificações/evoluções tecnológicas, potencialmente analisando a progressão de palavras-chave ao longo do tempo. Para isso, o TIM recupera dados bibliométricos de várias fontes, nomeadamente: de revistas científicas com revisão por pares (base de dados SCOPUS); da base de dados de projetos de investigação da União Europeia (UE) (CORDIS); e de uma base de dados de patentes (PATSTAT) (Moro et al., 2018). Consequentemente, o TIM pode monitorizar as tendências de desenvolvimento tecnológico identificando palavras-chave relevantes e os principais envolvidos por país (European Commission, 2016).

Como se pode observar na Figura 7, para definir o conjunto de dados a analisar, o TIM utiliza uma *string* que permite realizar uma solicitação de informações às bases de dados, podendo, de acordo com as necessidades, ampliar ou delimitar os resultados, a um determinado período temporal e/ou língua, a uma área de conhecimento específica.

A *string* é composta por uma combinação de termos, que definem o que se pretende pesquisar, campos, que indicam o local da pesquisa, e operadores, nomeadamente “AND”, “OR” e “NOT”, que possibilitam pesquisas mais específicas combinando vários campos e/ou vários termos. A Tabela 1 mostra os campos mais frequentemente utilizados em pesquisas no TIM.

Create dataset

Dataset

Type of search: Search on solar ✓

Model: normal ✓

Dataset name:

Query:

Quick Guide for Search

Query examples

ti:((nuclear OR radioactive) AND risk)

topic:(low-dose radiation* AND protect*) AND emm_year:[2002 TO 2004]

ti_abs_key:soil AND org:(joint research centre* OR JRC)

Fields

Name	Description
topic	Title, Abstract, Author Keywords and Automatic Keywords
ti_abs_key	Title, Abstract and Author Keywords
ti_abs	Title and Abstract
ti	Title
emm_year	Year or year range
org	Organisation name
key	Author Keywords and Automatic Keywords
jr	Journal Title

Operators

AND, OR, NOT

Create Cancel

Figura 7 – Pesquisa no TIM

Tabela 1 - Campos mais utilizados na pesquisa no TIM

Campos	Local da pesquisa
ti_abs_key	Título, resumo, palavras-chave de autor
ti	Título
emm_year	Período de pesquisa
class	Filtro por tipo de documento (ex. patente, artigo)

Esta ferramenta aplica *stemming* aos termos de pesquisa, que é um processo que reduz a palavra ao seu radical. Por exemplo, uma pesquisa pelo termo “studying” encontrará documentos que contenham o radical “study”.

Podem também ser usados modificadores de termos, que permitem ao utilizador introduzir flexibilidade ou precisão nos termos de pesquisa. Essa flexibilidade é alcançada usando caracteres alfanuméricos especiais, como o asterisco (*) e o til (~). O primeiro é usado para representar um conjunto de caracteres sequenciais, por exemplo “electroly*” corresponderá a “electrolyte”, “electrolytic”, entre outros. Um termo de pesquisa seguido por um til e um valor numérico, indica que essas palavras podem ser separadas por uma distância máxima igual ao valor numérico, por exemplo (“captura de CO₂” ~ 5) inclui documentos que possuem o termo “captura de CO₂”, mas também o termo “captura, transporte, armazenamento e utilização de CO₂”.

O resultado da pesquisa, com base na *string* de pesquisa, é um conjunto de dados correspondente a uma agregação de documentos extraídos das bases de dados, como mostra o exemplo da Figura 8. Uma limitação deste *software*, está relacionada com o facto do conjunto de dados, poder conter no máximo 10.000 documentos. Portanto, se na página “*validate dataset*” o conjunto de dados corresponder a mais de 10.000 documentos, a *string* deve ser redefinida de modo a limitar o número de resultados, uma vez que de outra forma não é possível avançar para a análise e tratamento dos dados. Ainda nesta página, é possível obter uma primeira impressão do conjunto de dados (European Commission, 2016).

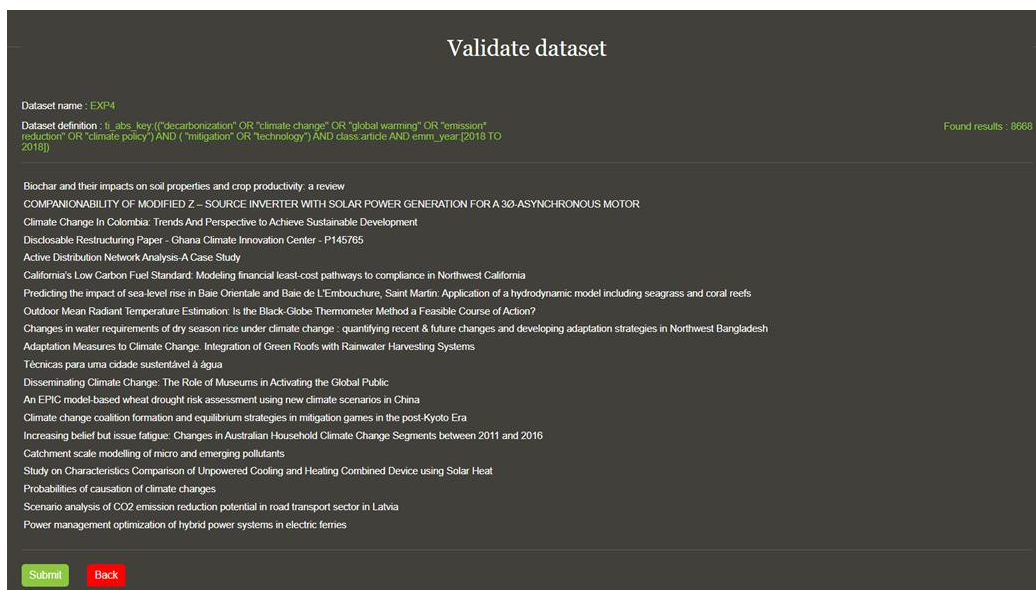


Figura 8 – Exemplo do conjunto de dados correspondente à *string* pesquisada

As informações no conjunto de dados podem ser apresentadas usando várias visualizações, conforme explicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Visualizações disponíveis

Fonte: (European Commission , 2022e)

Página	Subpágina	Descrição
<i>Space Page</i>	<i>Datasetgram</i>	Nós são os conjuntos de dados criados e o seu tamanho é proporcional ao número de documentos. As arestas representam os documentos em comum.
	<i>News Trends</i>	Tendências de notícias para todos os conjuntos de dados associados a uma categoria de notícias. Disponível se a categoria de notícias tiver sido criada anteriormente.
	<i>Dataset Matrix (L)</i>	Matriz exibindo todos os conjuntos de dados. A interseção de dois conjuntos de dados representa o número de documentos em comum. Uma lista de todos os conjuntos de dados também está disponível.
<i>Organization</i>	<i>Dataset Info</i>	Informações sobre o conjunto de dados, a saber: nome, <i>string</i> de pesquisa, data de criação e modificação, distribuição em tipos de documentos, tendência no tempo, etc.
	<i>Organizations</i>	Os nós são as 100 principais organizações. As arestas representam Co-patente e/ou Copublicação e/ou Co-participação em projeto(s) de pesquisa da UE.
<i>Location</i>	<i>Cities</i>	Os nós são as 100 principais cidades onde as Organizações (processadas) estão localizadas. As arestas representam Co-patente e/ou Co-publicação e/ou Coparticipação em projeto(s) de pesquisa da UE entre as organizações nessas cidades.
	<i>Countries</i>	Os nós são os países onde as Organizações estão localizadas. As arestas representam Co-patente e/ou Co-publicação e/ou Co-participação em projeto(s) de pesquisa da UE entre as organizações desses países.
	<i>EU/World</i>	Os nós são os países da UE (todos num único nó) ou os países do resto do mundo onde as Organizações (processadas) estão

		localizadas. As bordas representam Co-patente e/ou Co-publicação e/ou Co-participação em projeto(s) de pesquisa da UE entre as organizações desses países.
	<i>EU Countries</i>	Os nós são os países da UE onde as Organizações estão localizadas. As arestas representam Co-patente e/ou Co-publicação e/ou Co-participação em projeto(s) de pesquisa da UE entre as organizações nos países da UE.
	<i>NUTS2</i>	Os nós são as regiões do Nuts2 onde estão localizadas as Organizações (processadas). As arestas representam Co-patente e/ou Co-publicação e/ou Coparticipação em projeto(s) de pesquisa da UE entre as organizações nessas regiões da UE.
	<i>NUTS3</i>	Os nós são as regiões do Nuts3 onde estão localizadas as Organizações (processadas). As arestas representam Co-patente e/ou Co-publicação e/ou Coparticipação em projeto(s) de pesquisa da UE entre as organizações nessas regiões da EU.
	<i>Map</i>	A localização das Organizações (processadas) num mapa geográfico baseado na localização da cidade. Os no mapa indicam o número de documentos na área que aparece ao passar o rato.
	<i>EU/World Map</i>	Localização das Organizações (processadas) num mapa geográfico com toda a EU como uma localização. Os círculos no mapa indicam o número de documentos na área que aparece ao passar o rato. Documentos de organizações na UE são forçados a surgir como um local único em Bruxelas.
<i>Topic</i>	<i>Detailed patent classification</i>	Os nós são o símbolo de classificação CPC (versão completa) ao qual a patente é atribuída. As arestas representam a coocorrência de duas classes de CPC na mesma patente, ou seja, invenções pertencentes a ambos os assuntos. (Disponível apenas para patentes).
	<i>Author keywords (S)</i>	Os nós são as palavras-chave de Autor atribuídas pelos autores às suas publicações. As arestas representam a co-ocorrência de duas palavras-chave de autor na mesma publicação. (Disponível apenas para publicações científicas).
	<i>Automatic keywords</i>	Os nós são as palavras-chave automáticas geradas pelos algoritmos de processamento para todos os tipos de documentos. As arestas representam a co-ocorrência de duas palavras-chave automáticas no mesmo documento.
	<i>Relevant Keywords</i>	Palavras-chave mais relevantes no conjunto de dados e sua relevância. Algoritmos de processamento de linguagem geram essas palavras-chave para representar o conjunto de dados como um todo.
	<i>Patent classification (adv)</i>	Os nós são as subclasses do CPC (5 dígitos + nome) às quais a patente é atribuída. As arestas representam a coocorrência de duas classes de CPC na mesma patente, ou seja, invenções pertencentes a ambos os sujeitos. (Disponível apenas para patentes)
	<i>Author Keywords (Raw) (adv)</i>	Os nós são a versão bruta das palavras-chave do autor atribuídas pelos autores às suas publicações. As arestas representam a coocorrência de duas palavras-chave de autor na mesma publicação. (Disponível apenas para publicações científicas)
	<i>Clusters (adv)</i>	Os nós são agrupamentos de documentos baseados na sua similaridade semântica. O nome do <i>cluster</i> é a palavra-chave mais relevante do cluster de documentos. As arestas representam a semelhança semântica entre grupos de documentos.
	<i>Author Keywords List (Raw) (L)</i>	Lista de palavras-chave de Autor (<i>Raw</i>) atribuídas pelos autores às suas publicações.
	<i>Automatic Keyword List (L)</i>	Lista das palavras-chave automáticas atribuídas pelo TIM a todos os tipos de documentos.
<i>Quantitative Analysis</i>	<i>Type of documents (adv)</i>	Gráfico e tabela da distribuição de cada tipo de documento por ano no conjunto de dados.

	<i>Time series (adv)</i>	Gráfico e tabela da evolução no tempo do número de documentos por organização.
<i>News</i>	<i>News (adv)</i>	Últimas notícias para a categoria EMM atribuída ao conjunto de dados. (Disponível apenas se uma categoria de notícias tiver sido criada anteriormente.)
	<i>News Trends (adv)</i>	Evolução no tempo do número de notícias recuperadas (Disponível apenas se uma categoria de notícias tiver sido criada anteriormente.)
<i>Miscellaneous</i>	<i>Years</i>	Os nós são o ano de publicação da publicação, ano de prioridade da patente ou ano de início do projeto da UE. Não há arestas no gráfico, pois um documento não pode ter dois anos diferentes. Use este gráfico para fins de filtragem.
	<i>Type of documents</i>	Os nós são os tipos de documentos no conjunto de dados. Não há arestas no gráfico, pois um documento não pode ser de dois tipos diferentes. Use este gráfico para fins de filtragem.
	<i>Data source</i>	Os nós são a base de dados original de onde vêm os documentos. Não há arestas no gráfico, pois um documento não pode vir de duas bases de dados diferentes. Use este gráfico para fins de filtragem.
	<i>Documents</i>	Lista de documentos no conjunto de dados.
<i>Data (adv)</i>	<i>Field Viewer (adv)</i>	Todos os campos e valores do conjunto de dados são exibidos de forma amigável e filtrável.
	<i>Main fields (L)</i>	Os campos principais (título e descrições) e os valores do conjunto de dados são exibidos de forma amigável e filtrável.

A visualização "*Topic Page*" é particularmente relevante para o trabalho desenvolvido neste projeto, uma vez que permite obter informações, entre outras, sobre:

- "*Palavras-chave do autor*": esta visualização mostra as informações com base nas palavras-chave atribuídas pelos autores às suas publicações.
- "*Palavras-chave relevantes*" exhibe as palavras-chave mais relevantes no conjunto de dados, geradas por algoritmos de processamento de linguagem para representar o conjunto de dados como um todo. Essas palavras-chave têm uma classificação associada que mede a "relevância" de cada termo, a qual é calculada por:

$$\text{Relevância (Rank)} = \text{frequência} \times \text{IDF} \times \text{modificador de campo} \quad (1)$$

onde frequência é o número de vezes que o conceito aparece no conjunto de dados, o modificador de campo é um valor que dá mais ou menos peso aos termos dependendo do local onde são encontrados (título – 1; resumo – 0,5; e palavra-chave - 2) (European Commission, 2021b) e a IDF é a Frequência Inversa do Documento, calculada por:

$$\text{IDF} = \log (\text{n}^\circ \text{ de documentos que contêm a palavra-chave}) / (\text{n}^\circ \text{ total de documentos}) \quad (2)$$

A Figura 9 mostra um exemplo da lista de palavras-chave relevantes para um conjunto de dados obtido anteriormente seguindo o procedimento descrito acima.

Entries: 104878

Keyword	Relevance
carbon emission (CE)	337
low carbon (LC)	337
2030	250
2050	190
emission reduction (ER)	190
global warming (GW)	174
sustainable energy	145
de carbonization	119
global warming potential ...	94
renewable energy (RE)	93
paris agreement (PA)	89
sustainable developmen...	89
energy system (ES)	87
fossil fuel (FF)	85
carbon capture storage (...)	83
electric vehicle (EV)	78
kilo watt hours (KWH)	70

Figura 9 - Exemplo de uma lista de palavras-chave relevantes de um conjunto de dados específico

2.2.2 VOSviewer

No VOSviewer (VOS), o conjunto de dados a ser analisado deve ser previamente extraído de uma das seguintes bases de dados: Web of Science (WoS), Scopus, PubMed, RIS ou Crossref JSON. O método de exportação do conjunto de dados da WoS é explicado na secção 2.2.2.1.

Depois de obtido o conjunto de dados, e já no VOS, é necessário definir que tipo de mapa se pretende criar. Como mostra a Figura 10, o VOS permite criar três tipos de mapas: mapa baseado em dados de rede, mapa baseado em dados bibliográficos ou mapa baseado em texto. A escolha do mapa depende do tipo de análise pretendida, da base de dados escolhida e do tipo de ficheiro em que ela devolve os resultados.

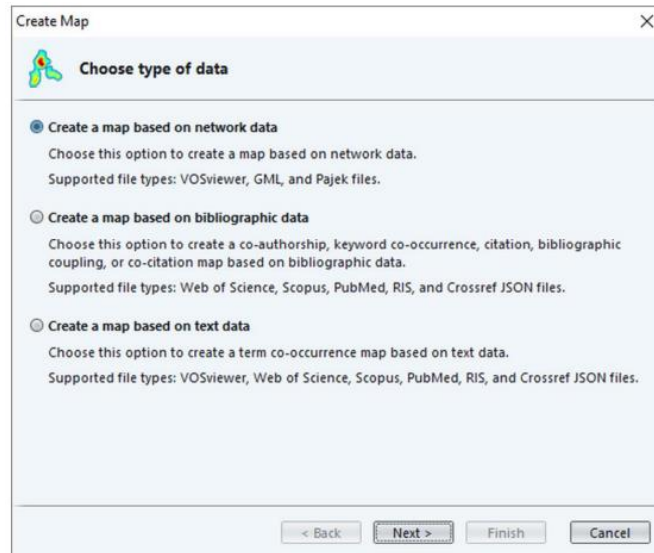


Figura 10 - Escolha do tipo de mapa

Após a seleção do tipo de mapa, selecionam-se os ficheiros extraídos da base de dados, como observado na Figura 11, e escolhe-se a análise desejada. O *software* permite a contagem de níveis de atividade, através do rastreamento de palavras-chave (análise de coocorrência). Além disso, esta ferramenta permite ainda analisar mapas de coautoria de autores ou países, o que é uma valiosa base de evidências para dissecar a relação entre diferentes conceitos e estudar a sua importância em diferentes regiões geográficas, Figura 12.

O *software* VOS oferece uma escolha entre dois métodos de contagem, sendo que o método “*full counting*” é aquele definido por defeito. O método de contagem fracionária (“*Fractional counting*”) é uma alternativa cujo objetivo é reduzir a influência de documentos com muitos autores. Neste método de contagem, a força de ligação entre dois autores por exemplo, é determinada pelo inverso do número de autores de um documento. No caso da contagem total, cada uma das ligações de coautoria tem uma força de 1. Assim, a diferença entre os dois métodos de contagem está apenas na força das ligações.

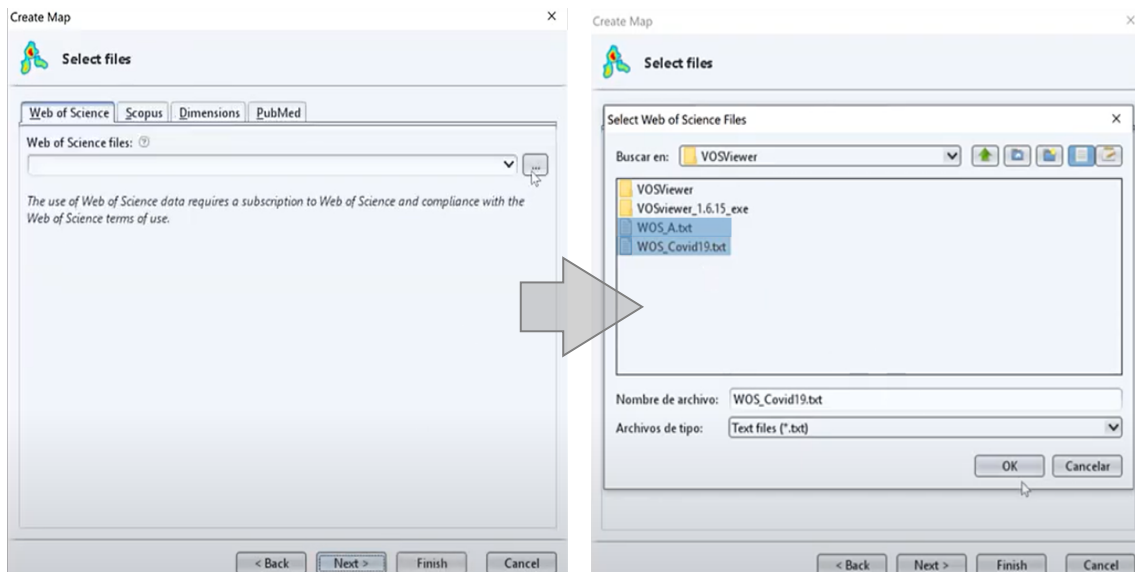


Figura 11 – Inserção dos dados no VOS

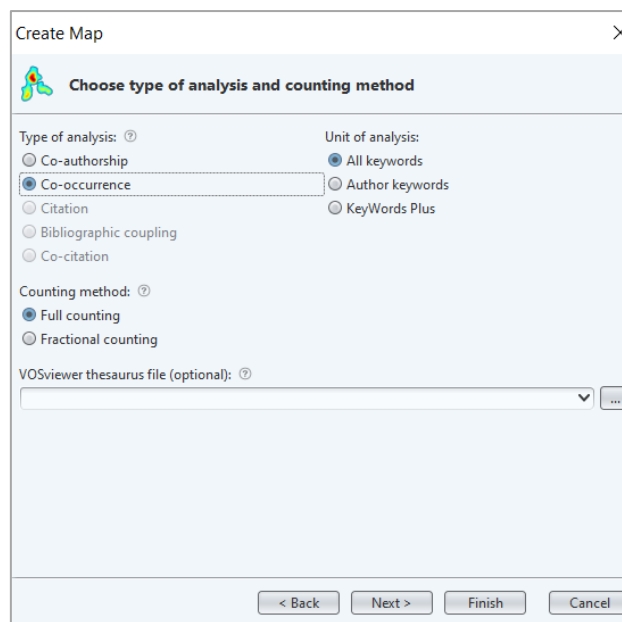


Figura 12 - Seleção do tipo de análise

Por fim, o mapa é criado e, após isso, pode ser utilizado para tratamento no *software* VOS, o qual contém quatro painéis, conforme mostrado na Figura 13, a saber:

1. O painel principal: apresenta uma visualização do mapa atualmente ativo.
2. Painel de opções: utilizado para fazer ajustes na visualização.
3. Painel de visão geral: indica a área do mapa mostrada no painel principal.

4. Painel de ações: permite realizar diferentes ações, como criar um novo mapa, abrir ou gravar um mapa existente, fazer uma captura de tela, etc.

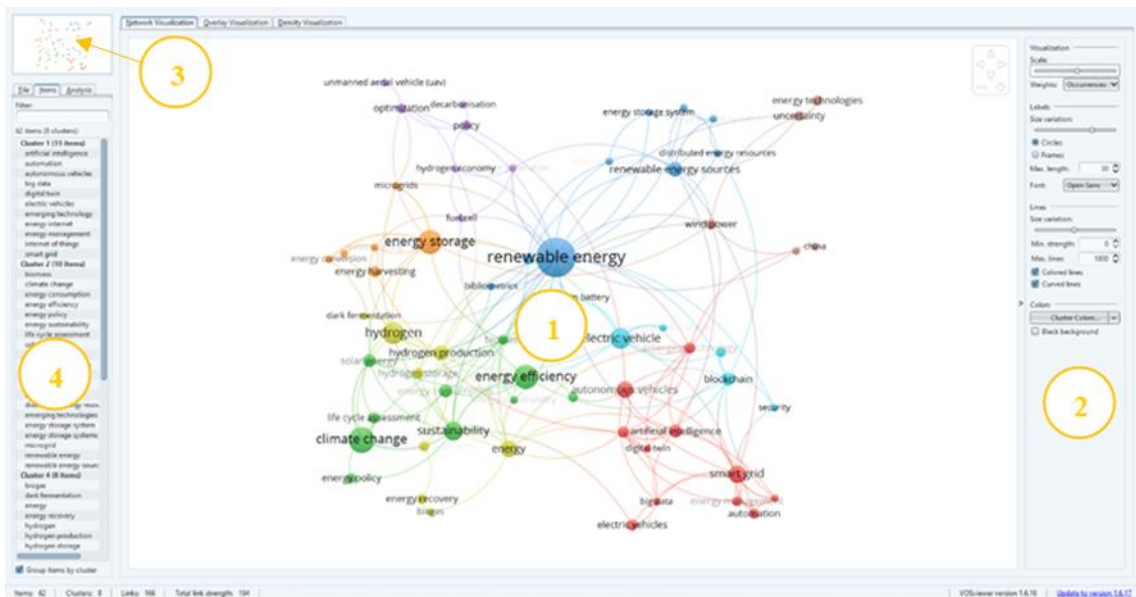


Figura 13 - Layout do VOS

O programa permite, após criado o mapa, analisar os dados usando três visualizações: a visualização de rede, a visualização de sobreposição e a visualização de densidade.

Na visualização da rede, tal como se observa na Figura 14, os itens são representados por um círculo e têm um peso associado o qual corresponde ao número de documentos. Assim, um item com um peso maior tem um tamanho maior e é considerado mais importante do que um item com um peso menor. A cor do item é determinada pelo *cluster* (grupos de palavras-chave que se formam por afinidade ou proximidade) ao qual pertence.

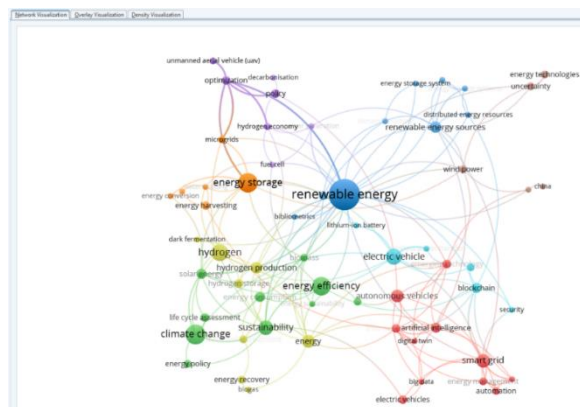
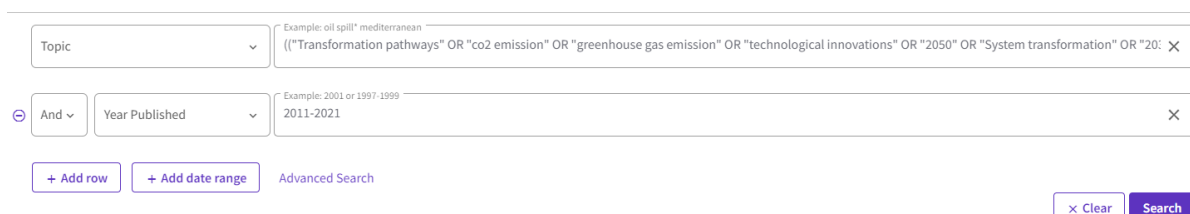


Figura 14 – Mapa de rede

2.2.2.1 Web of Science

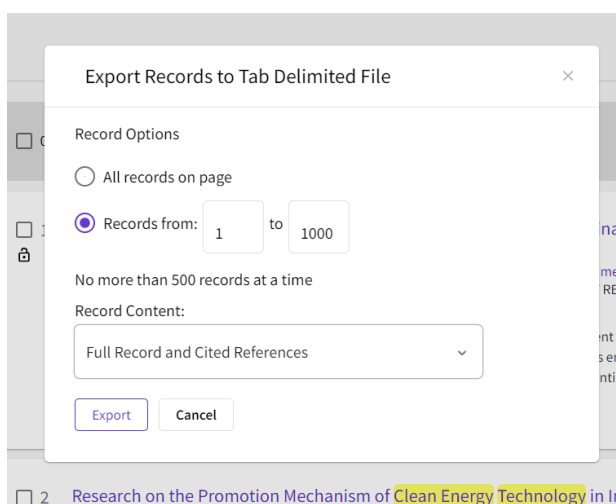
A base de dados WoS fornece dados essenciais para análises bibliométricas, incluindo títulos de publicações, autores, instituições, países, resumos, palavras-chave, entre outros. A pesquisa nesta base de dados pode ser realizada utilizando uma *string*, conforme apresentado na Figura 17.



The screenshot shows the WoS search interface. It features a search bar with a dropdown menu for 'Topic' and a text input field containing a complex search string: ("Transformation pathways" OR "co2 emission" OR "greenhouse gas emission" OR "technological innovations" OR "2050" OR "System transformation" OR "20:"). Below the search bar, there are two more dropdown menus: 'And' and 'Year Published', with a date range of '2011-2021' entered. At the bottom, there are buttons for '+ Add row', '+ Add date range', 'Advanced Search', 'x Clear', and 'Search'.

Figura 17 – Pesquisa na WoS

A pesquisa devolve um conjunto de dados que respeita a condição de pesquisa estabelecida na *string*, o qual pode ser descarregado, utilizando o formato de arquivo delimitado por tabulações e a opção “*Full record and cited references*”, conforme mostra a Figura 18.



The screenshot shows the 'Export Records to Tab Delimited File' dialog box. It has a title bar with a close button. Under 'Record Options', there are two radio buttons: 'All records on page' (unselected) and 'Records from: 1 to 1000' (selected). Below this, it says 'No more than 500 records at a time'. Under 'Record Content', there is a dropdown menu with 'Full Record and Cited References' selected. At the bottom, there are 'Export' and 'Cancel' buttons. The background shows a list of search results, with the first one partially visible: '2 Research on the Promotion Mechanism of Clean Energy Technology in In'.

Figura 18 - Exportação do WoS

Importa ressaltar, que a WoS impõe que o *download* dos dados contenham informações de no máximo 500 documentos. Portanto, quando o conjunto de dados possui mais de 500 documentos, o *download* deve ser feito por partes, em ficheiros separados. A

Figura 19 esquematiza os passos para a obtenção do conjunto de dados a inserir no *software* VOS, de acordo com a descrição realizada nesta secção.

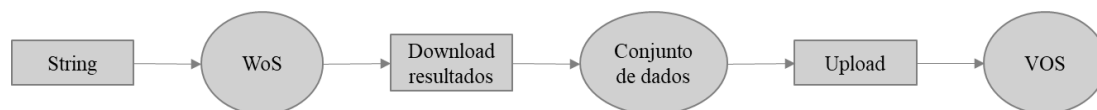


Figura 19 -Esquema de obtenção do conjunto de dados

2.3 Trabalhos similares existentes na literatura

Alguns trabalhos na literatura científica usam *software* de mineração de texto para rastrear tecnologias e políticas de descarbonização. Por exemplo, em Reza et al. (2021) os autores analisam a literatura sobre armazenamento de energia e a sua importância na descarbonização. Para o efeito os autores pesquisaram na base de dados *Scopus* por artigos publicados em revistas científicas indexadas no período compreendido entre 2011 e 2021 e relacionados com o referido tema (armazenamento de energia e respetiva utilização no âmbito da descarbonização). A principal conclusão deste trabalho é que o armazenamento de energia e a sua integração nas redes podem desempenhar um papel importante no que concerne à descarbonização do setor elétrico. Os autores concluem ainda que o armazenamento de energia associado à integração de mais energias renováveis pode não só substituir combustíveis convencionais utilizados na produção de eletricidade como também dotar o sistema elétrico da flexibilidade necessária para fazer face a problemas relacionados com a dependência da produção renovável face às condições climáticas (vento, sol, etc.). Além disso, os autores concluem que a integração de armazenamento de energia no processo de descarbonização pode ser uma peça importante no que concerne à redução dos custos totais relacionados com esse processo (investimento, manutenção e operação). O estudo concentra-se apenas numa base de dados de artigos científicos (*Scopus*) e apenas no assunto do armazenamento de energia.

O mesmo tipo de análise é usada em Camarasa et al. (2019) para avaliar o impacto da difusão de tecnologias de eficiência energética na descarbonização em edifícios habitacionais na Europa. Neste caso, os autores optaram por usar a base de dados *Web of Science* para pesquisar a literatura científica acerca do tema em questão. O período adotado foi de 10 anos (2008-2018) e a pesquisa foi restringida apenas a artigos em inglês. Da pesquisa resultou um total de 954 artigos científicos revistos, os quais permitiram a criação de uma rede de co-citação no *software* de mineração *RStudio*. A rede criada permitiu concluir que existe uma atividade de pesquisa assimétrica na Europa, já que certos estados-membros mostram ter uma atividade de pesquisa ativa, enquanto outros têm pouca ou nenhuma publicação. Além disso, os autores concluem que, apesar da eficiência energética ter presenciado um crescimento exponencial no

número de publicações desde 2008, mais pesquisas são necessárias para quantificar e monetizar os seus impactos. Tal como o estudo anterior, este estudo foca-se apenas no estudo de uma área específica com recurso a um *software* de mineração de texto.

Jiang & Ashworth, (2021) apresentam uma perspetiva bibliométrica acerca do desenvolvimento de pesquisas sobre Captura, Armazenamento e Utilização de Carbono (CCUS) na China. Este artigo examina 1.202 artigos científicos, publicados entre 2002 e 2019, retirados da base de dados *Web of Science* e utiliza o *software Citespace* para mapear a informação contida nesses documentos, nomeadamente os focos de pesquisa, organizações mais produtivas e principais autores. Por fim, os autores destacam que o estabelecimento de políticas governamentais em torno do CCUS influenciou a tendência da pesquisa na China. Também esta análise bibliométrica se foca no estudo de uma tecnologia específica com recurso a uma única ferramenta.

Em Raman et al. (2022), os autores objetivam examinar as tendências de pesquisa em torno do H₂ verde. Para isso, recorrem ao *software VOSviewer* para realizar uma análise bibliométrica e analisar as publicações extraídas da base de dados *Scopus*. Os autores adotaram o período de 2016 a 2021. Os autores destacam o número de artigos publicados no período adotado, as organizações e países mais férteis. Além disso, realizam uma análise co-ocorrência de palavras-chave que lhes permitiu destacar quatro grandes temáticas acerca do H₂ verde: armazenamento, produção, eletrólise e economia do H₂. Os autores estudam uma tecnologia específica utilizando dois *softwares* para o efeito.

O estudo Wimbadi & Djalante (2020) tem como objetivo fazer a revisão da literatura dos principais conceitos relacionados à mitigação das alterações climáticas, examinando o progresso da literatura ao longo do tempo, identificando o foco geográfico e setorial e determinando as inter-relações entre os conceitos-chave. Para o efeito os autores utilizaram a base de dados *Scopus* para a obtenção do conteúdo científico e o *software VOSviewer* para o analisar. Os autores denotam que a literatura é maioritariamente oriunda dos países que mais emitem dióxido de carbono (CO₂) e que a China é o país com maiores publicações e autores afiliados. Além disso, a maioria dos artigos explora o tema a nível nacional. Por fim, três conceitos-chave são identificados pelos autores para explicar o processo de obtenção de emissões líquidas zero de CO₂: descarbonização, desenvolvimento de baixo carbono e transição de baixo carbono. Este estudo destaca-se dos demais por estudar a descarbonização em geral e não uma tecnologia ou setor em específico, ainda que para isso use apenas um *software*.

Com uma abordagem semelhante, o artigo X.-C. Meng et al. (2021) recorre ao *software CiteSpace* para realizar uma análise bibliométrica dos desenvolvimentos na área de produção de energia de baixo carbono, com base em 1.419 artigos recuperados na base de dados *Scopus*, no período de 1983 a 2021. Com a análise, os autores descobriram que o número de publicações aumentou nos últimos 33 anos e que a China e os Estados Unidos lideram as publicações neste tema. Além disso concluem, de acordo com os *hotspots* de pesquisa, que os recursos de energia renovável são o principal foco, e que a capacidade de armazenamento de energia também é uma direção predominante.

L. Wang et al. (2017) recorrem às bases de dados *Science Citation Index Expanded* e *Social Sciences Citation Index* para reunirem a literatura existente sobre a descarbonização do sistema elétrico em escala global. Utilizam também a análise quantitativa de títulos de artigos, resumos e palavras-chave, e concluem que a dependência de carvão e combustíveis nucleares na década de 1990 estimulou a procura por alternativas mais limpas, resultando no aumento de publicações sobre CCS e energia eólica na primeira década do século XXI. Na segunda década, as publicações continuaram a aumentar e destacam-se o crescimento do gás natural e energia. Além disso, os autores terminam concluindo que o foco constante na eficiência energética continuará. Neste estudo os autores não especificam o *software* que suportou a análise bibliométrica, mas utilizam dados de mais do que uma fonte.

Desta forma, grande parte da literatura existente apresenta análises bibliométricas sustentadas numa só ferramenta e/ou concentra-se na avaliação de tecnologias ou medidas específicas, revelando-se necessária a elaboração de um estudo mais abrangente das tecnologias mais promissoras para o processo de descarbonização e com o auxílio de mais do que um *software* de mineração de texto de forma a haver comparação de resultados. Esta dissertação pretende preencher essa lacuna (Costa et al., 2022).

2.4 Nível de prontidão tecnológico de tecnologias

Vários métodos são usados para aferir o atual estado de maturidade das tecnologias. O método mais amplamente utilizado na literatura científica é o Nível de Prontidão Tecnológico (TRL – *Technological Readiness Level*). Este é um método consistente que permite comparar a maturidade de diferentes tecnologias e envolve nove níveis de desenvolvimento tal como apresentado em (Vishnyakov et al., 2020):

- TRL 1 - Princípios básicos observados.

- TRL 2 - Conceito de tecnologia formulado.
- TRL 3 - Prova experimental de conceito.
- TRL 4 - Tecnologia validada em laboratório.
- TRL 5 - Tecnologia validada em ambiente relevante.
- TRL 6 - Tecnologia demonstrada em ambiente relevante.
- TRL 7 - Demonstração do protótipo do sistema em ambiente operacional.
- TRL 8 - Sistema completo e aprovado.
- TRL 9 - Sistema real comprovado em ambiente operacional.

Nos níveis de um a três são consideradas tecnologias em que a pesquisa básica já foi efetuada, o conceito fundamental foi investigado e uma prova do conceito foi desenvolvida (Vishnyakov et al., 2020). Nos níveis quatro e cinco engloba-se o desenvolvimento de protótipos, a que se segue a respetiva validação da tecnologia com demonstrações da sua capacidade em ambiente operacional, correspondente aos TRL de nível seis e sete. Os níveis TRL mais elevados, em concreto os níveis oito e nove, envolvem a produção efetiva, comprovando-se o correto funcionamento da tecnologia (Vishnyakov et al., 2020).

Assim, as tecnologias emergentes encontram-se nos valores de TRL mais baixos, enquanto as tecnologias comercialmente disponíveis se posicionam nos valores TRL mais elevados. Além disso, é de realçar que uma tecnologia pode ser implementada com diferentes soluções, pelo que, frequentemente, a uma determinada tecnologia pode ser atribuído um intervalo de valores TRL, ao invés de um único nível (Vishnyakov et al., 2020). Um intervalo estreito, entre 8 e 9 por exemplo, indica que dificilmente haverá uma inovação na tecnologia em questão. Pelo contrário, quando para uma determinada tecnologia se verifica a existência de uma gama de valores de TRL ampla, 2 a 9 por exemplo, isso significa que mesmo existindo alguns produtos já disponíveis no mercado, outros têm ainda uma margem substancial de inovação e desenvolvimento (TWI, 2022).

Uma escala diferente é usada pela Agência Internacional de Energia (AIE) para caracterizar a maturidade das tecnologias, designada por Energy Technologies Perspectives (ETP) (IEA, 2022a). Esta escala é dividida em 11 níveis, como ilustra a Figura 20.



Figura 20 – Escala TRL adotada pela AIE

Fonte: (IEA, 2022a)

Estas escalas fornecem informações importantes para o processo de tomada de decisão sobre o investimento em determinadas tecnologias. Por exemplo tecnologias caracterizadas por uma gama de TRL/ETP alargada são mais afetadas pela incerteza e por isso existe um maior risco para o investimento. Pelo contrário, tecnologias com gamas TRL/ETP estreitas e com valores médios de TRL/ETP elevado caracterizam-se por uma melhor definição da tecnologia (TWI, 2022).

3. METODOLOGIA

Os *softwares* de mineração de texto podem ser usados para estudar de forma abrangente as tendências tecnológicas na literatura científica, projetos de investigação e patentes. No presente trabalho são utilizados dois *softwares* de mineração de texto disponíveis, em concreto o TIM da Comissão Europeia e o VOS da *Leiden University*, com o objetivo de evidenciar as tecnologias que se mostram mais promissoras para a descarbonização do sistema energético.

A utilização dos dois *softwares* referidos permite uma maior confiança nos resultados uma vez que: i) o TIM permite obter informação com origem numa base de dados de publicações científicas (SCOPUS), uma base de projetos de investigação (CORDIS) e uma base de dados sobre patentes (PATSTAT); ii) o VOS requer que a informação seja obtida de forma independente de uma base de dados. Das várias bases de dados possíveis, como descrito na secção 2.2.2, a base de dados de publicações científicas escolhida foi a WoS, por ser diferente da utilizada pelo TIM, e dessa forma permitir complementar a pesquisa, e por ser juntamente com a Scopus, as bases de dados mais difundidas em diferentes áreas científicas (Zakari et al., 2022).

A Figura 21 evidencia a abordagem utilizada para a pesquisa de informações bibliográficas relevantes em bases de dados de publicações científicas, de projetos de investigação e de patentes. As várias etapas do procedimento adotado são explicadas nas subsecções a seguir.

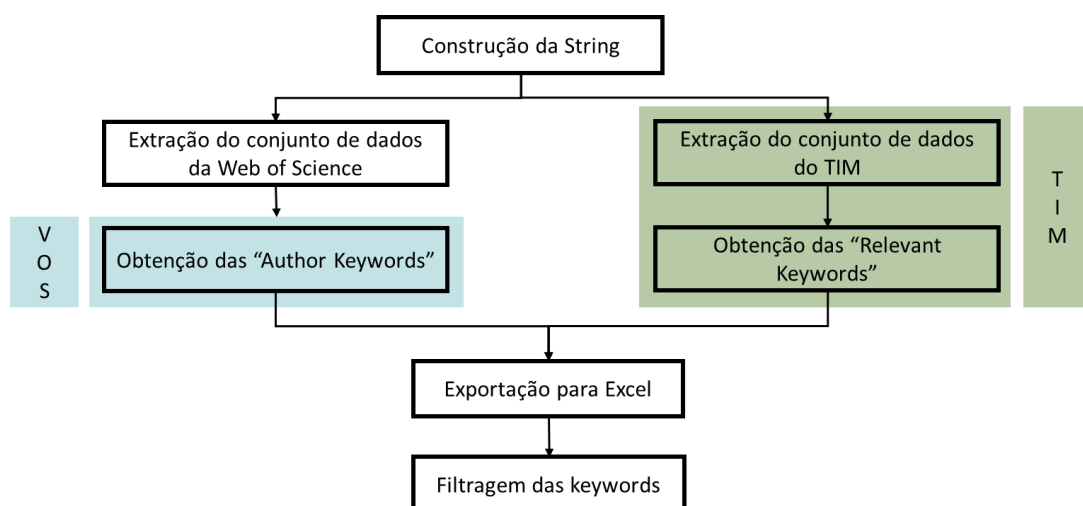


Figura 21 - Metodologia utilizada

3.1 Construção da *string* de pesquisa e identificação do conjunto de dados

A *string* de pesquisa foi construída com base numa revisão de literatura anterior sobre descarbonização do setor de energia, a qual permitiu definir um conjunto de termos relacionados ao tema, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Termos relacionados com descarbonização resultantes da revisão da literatura

<i>Transformation pathways</i>	<i>Co₂ emission</i>	<i>Greenhouse gas emission</i>	<i>Technological innovations</i>
<i>2050</i>	<i>System transformation</i>	<i>2030</i>	<i>Global warming</i>
<i>Climate solution</i>	<i>Climate target</i>	<i>Climate policy</i>	<i>Displace fossil fuels</i>
<i>1.5°</i>	<i>Ghg emission</i>	<i>Greenhouse gas</i>	<i>Paris Agreement</i>
<i>Transition in electricity</i>	<i>Energy transition</i>	<i>Clean energy</i>	<i>Sustainable energy</i>
<i>New energy</i>	<i>Carbon emission</i>	<i>Climate change</i>	<i>Mitigation</i>
<i>Technology</i>	<i>Disruptive</i>	<i>Decarbonization</i>	<i>Carbon reduction</i>
<i>Low carbon</i>	<i>Emission reduction</i>	<i>Zero carbon</i>	<i>Decarbonised</i>

Considerando os termos obtidos na revisão inicial da literatura foi construída uma expressão de pesquisa composta por dois filtros: i) o “*ti_abs_key*” que impõe a pesquisa no “título”, “resumo” e “palavras-chave de autor” dos documentos; ii) e o “*emm_year*” que limita a pesquisa a um determinado período. Adicionalmente, na construção da expressão de pesquisa foram utilizados os operadores lógicos “AND” e “OR” para vincular os termos a pesquisar da forma que se julgou mais adequada. Assim, a expressão de pesquisa final, utilizada nas pesquisas realizadas nos *softwares* TIM e WoS, foi a seguinte:

ti_abs_key:(("Transformation pathways" OR "co2 emission" OR "greenhouse gas emission" OR "technological innovations" OR "2050" OR "System transformation" OR "2030" OR "global warming" OR "climate solution" OR "climate target" OR "climate policy" OR "displace fossil fuels" OR "1.5°" OR "ghg emission" OR "green house gas" OR "Paris Agreement" OR "transition in electricity" OR "energ* transition" OR "clean energ*" OR "sustainable energy" OR "new energ*" OR "carbon emission" OR "climate change" OR "mitigation" OR "technology" OR "disruptive") AND ("decarbonization" OR "carbon

reduction" OR "low carbon" OR "emission reduction" OR "zero carbon" OR "decarbonised") AND emm_year:[2011 TO 2021])

Note-se, que a dupla utilização do operador lógico “AND”, na expressão de pesquisa, força cada documento, no conjunto de dados recuperado, a conter pelo menos um dos termos de ambas as partes da expressão de pesquisa, minimizando assim a recuperação de dados irrelevantes e evitando ultrapassar o limite de 10.000 documentos imposto pelo *software* TIM.

As figuras 22 e 23 mostram extratos dos documentos obtidos após utilização da *string* de pesquisa definida na WoS e no TIM, respetivamente.

Search > Results for ("Transformation pathways" OR "co2 emission" OR "greenhouse...
19,443 results from Web of Science Core Collection for:

Q ("Transformation pathways" OR "co2 emission" OR "greenhouse gas emission" OR "technological innovations" OR "2050" OR "System tran... Analyze Results Citation Report Create Alert

Copy query link

Publications You may also like...

Refine results

Search within results...

Filter by Marked List

Quick Filters

- Highly Cited Papers 453
- Hot Papers 32
- Review Article 1,261
- Early Access 83
- Open Access 8,018
- Enriched Cited References 1,762

Citation Topics Meso

- 6.115 Sustainability Science 7,234
- 4.18 Power Systems & Electric Vehicles 1,615
- 4.84 Supply Chain & Logistics 804
- 7.70 Thermodynamics 760
- 7.139 Energy & Fuels 571

0/19,443 Add To Marked List Export

Sort by: Relevance < 1 of 389 >

1 A systematic bibliometric review of **clean energy** transition: Implications for **low-carbon** development
Zhang, W., Li, B.S. (-); Cao, W.
Dec 3 2021 | PLOS ONE 16 (12)
8 Citations
119 References

More voices are calling for a quicker transition towards **clean energy**. The exploration and exploitation of **clean energy** such as wind energy and solar energy are effective means to optimise energy structure and improve energy efficiency. To provide in-depth understanding of **clean energy** transition, this paper utilises a combination of multiple bibliometric mapping techniques, including HistCite, ... Show more

Services Free Full Text from Publisher

Related records

2 DETERMINANTS OF THE **ENERGY TRANSITION**: EMPIRICAL EVIDENCE FOR OECD COUNTRIES
Alfonso, T.J.; Marouas, A.C. and Fuinhas, J.A.
4th International Conference on Energy and Environment - Bringing together Engineering and Economics (ICEE) 2019 | PROCEEDINGS OF THE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY & ENVIRONMENT (ICEE 2019): BRINGING TOGETHER ENGINEERING AND ECONOMICS , pp.92-97
10 References

The **energy transition** is a requirement to accomplish the objectives of the international agreements. Since the Kyoto protocol that countries increased the share of renewable energy by replacing fossil sources. The concept of **energy transition** depends on the nuclear role in the **energy transition**. Consider different types of **energy transition**, this paper analyses the determinants of the low carbo ... Show more

Related records

Figura 22 – Extrato dos documentos devolvidos pelo WoS com a *string* de pesquisa

Validate dataset

Dataset definition : ti_abs_key:(("Transformation pathways" OR "co2 emission" OR "greenhouse gas emission" OR "technological innovations" OR "2050" OR "System transformation" OR "2030" OR "global warming" OR "climate solution" OR "climate target" OR "climate policy" OR "displace fossil fuels" OR "1.5°" OR "ghg emission" OR "green house gas" OR "Paris Agreement" OR "transition in electricity" OR "energ+ transition" OR "clean energ+" OR "sustainable energy" OR "new energ+" OR "carbon emission" OR "climate change" OR "mitigation" OR "technology" OR "disruptive") AND ("decarbonization" OR "carbon reduction" OR "low carbon" OR "emission reduction" OR "zero carbon" OR "decarbonised") AND emm_year:[2018 TO 2018])

Found results : 4660

Energy System Challenges of Deep Global CO 2 Emissions Reduction Under the World Energy Council's Scenario Framework
 Effects of hybridization and hybrid fibre dispersion on the mechanical properties of woven flax-carbon epoxy at low carbon fibre volume fractions
 Characterization of Carbon Emissions from the Construction Activities: A Case Study of Shenzhen, China
 Scenario analysis of CO2 emission reduction potential in road transport sector in Latvia
 Power management optimization of hybrid power systems in electric ferries
 Analysing the water and greenhouse gas effects of soya bean-based biodiesel in five different regions
 Energy Infrastructures for the Low-Carbon Transformation in Europe
 Measuring emission-reduction and energy-conservation efficiency of Chinese cities considering management and technology heterogeneity
 Land management change greatly impacts biofuels' greenhouse gas emissions
 Low-carbon technologies, national innovation systems, and global production networks: the state of play
 Facilitating Low-Carbon Living? A Comparison of Intervention Measures in Different Community-Based Initiatives
 Integrated assessment modelling as a positive science: private passenger road transport policies to meet a climate target well below 2 °C
 Grid Load Shifting and Performance Assessments of Residential Efficient Energy Technologies, a Case Study in Japan

Submit Back

Figura 23 – Extrato dos documentos devolvidos pelo TIM com a *string* de pesquisa (2018)

3.2 Análise do conjunto de dados

A *string* de pesquisa é então usada no *software* TIM e na base de dados WoS para obter os conjuntos de dados, como explicado na secção 3.1. Após a extração dos conjuntos de dados, os *softwares* TIM e VOS tornarão possível realizar várias análises.

Note-se que, no caso do *software* VOS, o conjunto de dados foi previamente extraído da base de dados WoS e, em seguida, importado para o *software* VOS. Neste *software* é possível realizar uma análise de coocorrência e, a partir dela obter as “*author keywords*” dos documentos e a sua ocorrência, conforme mostrado na Figura 24. A ocorrência corresponde ao número de vezes que o conceito aparece no conjunto de dados

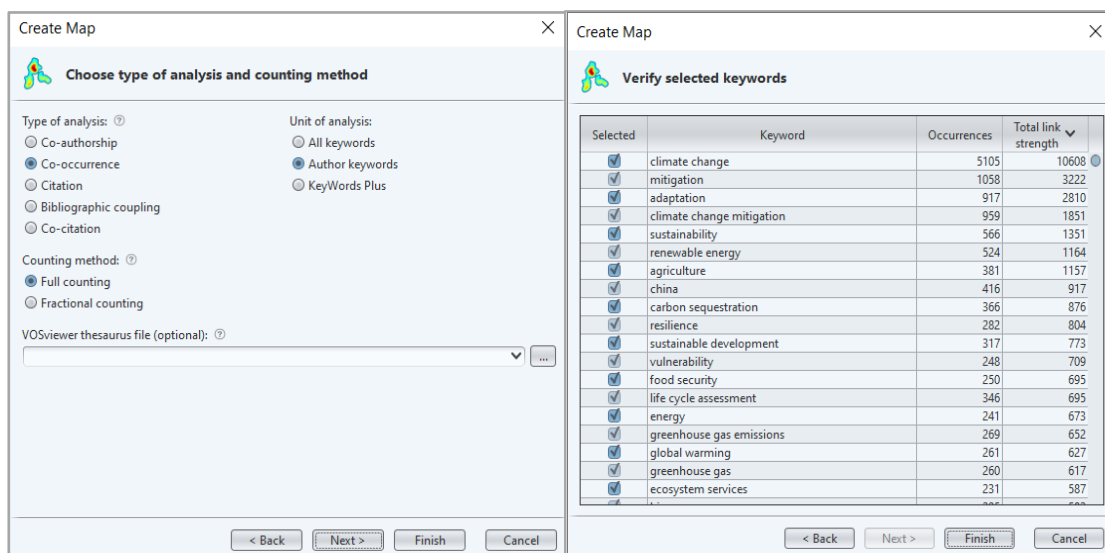


Figura 24 - Lista de termos/palavras-chave obtidas com o VOS e respectiva ocorrência

No *software* TIM o procedimento foi um pouco diferente, uma vez que este *software* não impõe uma extração prévia do conjunto de dados. Conforme explicado na secção 3.1, o próprio *software* recupera automaticamente o conjunto de dados, das bases de dados às quais tem acesso, que respeita a condição definida pela *string* de pesquisa. Assim, após a identificação do conjunto de dados, basta seleccionar-se a página "*Relevant Keywords*", que exhibe as palavras-chave mais relevantes no conjunto de dados, Figura 25.

Entries: 93249

Keyword	Relevance
climate change (CC)	237
co2 emission (CE)	231
ghg emissions	204
greenhouse gas emissio...	169
green house gas (GHG)	159
mitigating climate change	128
greenhouse gas	88
fossil fuel (FF)	88
carbon capture storage (...)	87
carbon emission (CE)	82
global warming (GW)	82
low carbon (LC)	82
mitigation and adaptation	80

Figura 25 - Lista de termos/palavras-chave obtidas com o TIM e respectiva relevância

Estas palavras-chave são geradas pelo algoritmo "*Relevant Keywords*" descrito na secção 2. Portanto, o significado deste valor de relevância não deve ser comparado diretamente com a ocorrência obtida no *software* VOS.

3.3 Tratamento das listas de palavras-chave

As listas de palavras-chave recuperadas pelos *softwares* TIM e VOS incluem muitos conceitos que são irrelevantes para o estudo pretendido. Por exemplo, ao usar a *string* de pesquisa apresentada na seção 3.1, obtemos na lista de palavras-chave recuperadas pelo *software* TIM o termo “*climate change*”, conforme visto na Figura 25. No entanto, este termo não é relevante para o contexto do estudo uma vez que não se refere a uma tecnologia de descarbonização ou domínio de tecnologias. Por esse motivo, é necessário filtrar a lista de palavras-chave utilizando um dicionário semântico.

Um dicionário semântico personalizado foi criado para ser a base do processo de filtragem. Este dicionário agrega várias versões da mesma palavra / sinónimos, já que muitas vezes ocorre que uma tecnologia pode ser descrita por uma grande variedade de termos (por exemplo, sistema fotovoltaico, fotovoltaico, solar fotovoltaico, etc.). Desta forma, o dicionário permite não considerar termos irrelevantes para a análise desejada (por exemplo, “*low carbon*”, “*carbon emissions*”, etc.).

A construção do dicionário envolveu sucessivas iterações para garantir a maximização de termos tidos como sinónimos. Abreviaturas e singular ou plural dos termos usados mesmo que não encontrados, foram utilizados. A Figura 26 mostra um extrato do dicionário criado.

	A	B	C	D
1	renewable energy source	renewable energy	renewable source	variable renewables
2	renewable electricity	renewable electricity (re)	renewable power	
3	solar energy	solar panel	solar power	solar energy (se)
4	photo voltaic (pv)	photovoltaic	solar photovoltaic	solar pv
5	solar thermal	solar thermal (st)	concentrated solar thermal	
6	wind power	wind energy	wind plant	wind power (wp)
7	onshore wind			
8	horizontal axis wind turbine (hawt)			
9	offshore wind	offshore wind (ow)	floating offshore wind turbi	offshore renewable

Figura 26 – Extrato do dicionário de sinónimos

O dicionário semântico filtra a lista de palavras, obtida através dos *softwares* TIM e VOS, com um algoritmo implementado em VBA e executado no programa Microsoft Excel. Um excerto desse algoritmo é apresentado na Figura 27, sendo que o algoritmo completo pode ser encontrado no Anexo A.

```

' *****
' Identificar o tamanho da tabela do TIM e do dicionário de sinónimos:
' *****

Worksheets("Relevant").Select ' -----Seleciona o separador "relevant" = lista de palavras do TIM
i_l = 2 ' -----Começa na linha 2 (linha 1 = cabeçalho)
While Not IsEmpty(Cells(i_l, 1)) ' ----Enquanto não encontrar uma célula vazia incrementa 1 ao n° de linhas
    i_l = i_l + 1
Wend
i_l = i_l - 1
l = Range("A2" & ":b" & i_l).Value ' --Tamanho da lista de palavras do TIM
Worksheets("Dicionario").Select ' -----Seleciona o separador "folha 1" = dicionário de sinónimos
i_k = 2
While Not IsEmpty(Cells(i_k, 1)) ' ----Enquanto não encontrar uma célula vazia incrementa 1 ao n° de linhas
    i_k = i_k + 1
Wend
i_k = i_k - 1
k = Range("A1" & ":as" & i_k).Value ' -Tamanho do dicionário de sinónimos
iencont = 1

' *****
' Identificar palavras da lista do TIM no dicionário de sinónimos e respetiva soma no separador "resultado"
' *****

For i = 1 To i_l - 1 ' -----Corre todas as linhas da lista do TIM
    pal = l(i, 1) ' -----Lê a palavra da linha i

    For j = 1 To i_k - 1 ' -----Corre todas as linhas do dicionário de sinónimos

        For m = 1 To 41 ' -----Corre todas as colunas do dicionário de sinónimos
            If pal = k(j, m) Then ' ----Compara se a palavra da lista do TIM pertence ao dicionário
                Worksheets("resultado").Select
                Sheets("resultado").Cells(j, 2) = Sheets("resultado").Cells(j, 2) + l(i, 1) ' Se existir, soma na
                ' linha j de uma página de "resultados" criada, o valor da linha i, coluna 2 da lista do TIM
                Sheets("resultado").Cells(j, 3) = Sheets("resultado").Cells(j, 3) + 1 ' verifica quantas vezes foi
                'somado um valor naquela linha/palavra
                Worksheets("encontrado").Select ' Seleciona o separador "encontrado"
                Cells(iencont, 1) = pal ' Copia a palavra encontrada para a 1ª coluna do separador "encontrado"
                iencont = iencont + 1 ' Incrementa 1 para escrever na linha de baixo da próxima vez
            End If
        Next
    Next
Next

```

Figura 27 – Excerto do algoritmo de filtragem implementado em VBA

A Figura 28 esquematiza o procedimento que é realizado pelo algoritmo implementado. Na prática, o algoritmo lê a lista de palavras-chave “*keywords*” recuperadas pelo *software* TIM ou VOS e verifica se há correspondência no dicionário. Quando existe uma correspondência, o valor de relevância/ocorrência da palavra-chave é adicionado ao valor existente. As palavras-chave sem correspondência são armazenadas numa folha específica do ficheiro Excel. Portanto, o algoritmo desenvolvido agrupa as várias versões da mesma palavras-chave, permitindo obter uma visão mais clara e realista da ocorrência/relevância de cada palavra-chave.

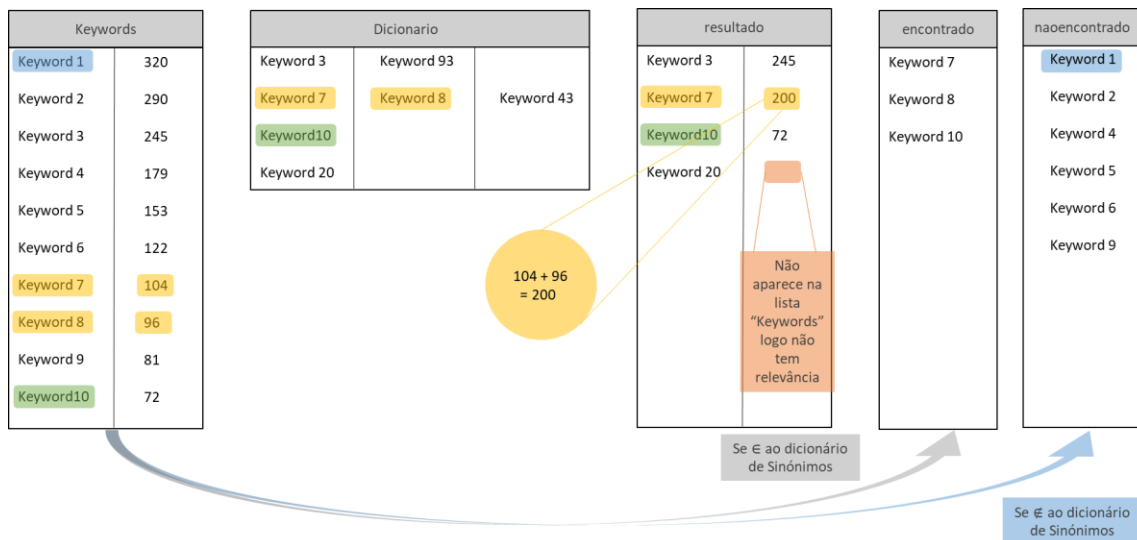


Figura 28 – Funcionamento esquemático do algoritmo implementado

3.4 Resultados

A metodologia descrita nas seções anteriores, foi utilizada para explorar bases de dados relevantes de publicações, patentes e projetos com o intuito de identificar tecnologias apontadas pela comunidade científica como as mais promissoras para a descarbonização do setor energético. A Figura 29 mostra, para o período compreendido entre 2011 e 2021, a evolução do número de referências recuperadas pelo *software* TIM e pela base de dados WoS, que respeitam a *string* de pesquisa utilizada. Como esperado, e de forma geral, o número de referências aumentou ao longo dos anos. No caso do *software* TIM, as referências recuperadas não são apenas artigos científicos, mas também projetos de pesquisa e registro de patentes.

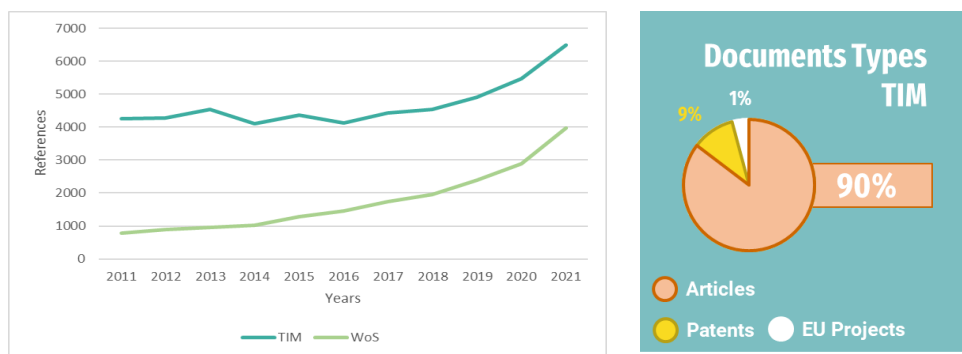


Figura 29 - Número de documentos devolvidos pelo TIM e pelo WoS

Na base de dados WoS foram realizadas algumas análises extra. A Figura 30, evidencia os 10 países com maior número de referências (publicações) no âmbito da *string* utilizada na pesquisa efetuada. De acordo com a análise, a China é o país com maior contribuição,

totalizando 7957 artigos publicados em matéria de descarbonização, ou seja 42,4% dos documentos. Os Estados Unidos e Inglaterra seguem-se nesta lista com uma contribuição também ela significativa, correspondendo a 14,1% e 12,8% dos documentos respetivamente. Os países europeus presentes representam um total de 27,4% das referências.

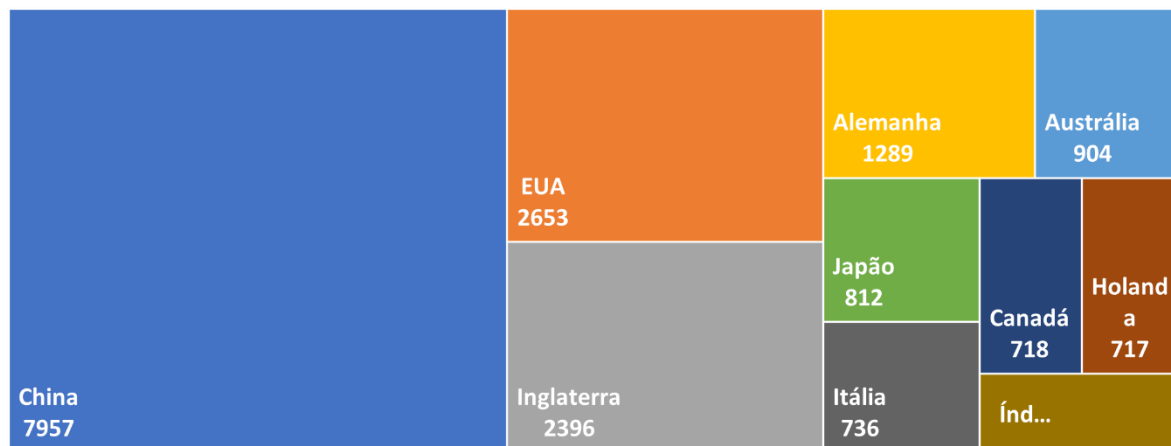


Figura 30 - Países com mais publicações na WoS no âmbito da *string* de pesquisa

O número de vezes que um artigo é citado, é uma métrica essencial para medir o seu impacto não apenas no estudo de uma matéria específica, como também nos autores. A Tabela 4 lista os 10 artigos mais citados no âmbito da *string* de pesquisa supramencionada.

Tabela 4 – Lista dos 10 artigos mais citados no WoS para a *string* de pesquisa

Authors	Article Title	Year	Citations
van Vuuren, DP; (...); van Ruijven, B	RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2 degrees C	2011	3622
Leung, DYC; (...); Maroto-Valer, MM	An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies	2014	1504
Anantharaj, S; (...); Kundu, S	Recent Trends and Perspectives in Electrochemical Water Splitting with an Emphasis on Sulfide, Selenide, and Phosphide Catalysts of Fe, Co, and Ni: A Review	2016	1364
Bui, M; (...); Mac Dowell, N	Carbon capture and storage (CCS): the way forward	2018	1256
Steffen, W; (...); Schellnhuber, HJ	Trajectories of the Earth System in the Anthropocene	2018	921
Zheng, B; (...); Zhang, Q	Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions	2018	902
Holmberg, K; (...); Erdemir, A	Global energy consumption due to friction in passenger cars	2012	808
Minasny, B; (...); Winowiecki, L	Soil carbon 4 per mille	2017	768

Hawkins, TR; (...); Stromman, AH	Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles	2013	711
Geels, FW	Regime Resistance against Low-Carbon Transitions: Introducing Politics and Power into the Multi-Level Perspective	2014	692

As Figuras 31 e 32 apresentam extratos dos resultados da pesquisa no TIM e VOS, respectivamente, após o processo de filtragem descrito na secção 3.3. Note-se que os resultados evidenciam o conjunto das 20 tecnologias (ou domínios de tecnologias) com maiores valores de relevância (TIM) ou maior número de ocorrências (VOS).

É essencial esclarecer que pode haver alguma sobreposição nos valores de relevância/ocorrência obtidos para vários dos termos das figuras 31 e 32. Por exemplo os resultados para o termo “PV” podem incluir contribuições de documentos que também são contabilizados em termos como “Storage”, “Wind power”, “Hydropower”, etc. (e vice-versa).

TIM	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
CCS	283	178	291	288	181	167	345	252	277	205	3	2471
PV	29	29	40	64	61	70	99	71	99	75	2	639
Evs	21	38	42	40	43	58	63	65	86	75	2	533
Energy transmitter	14	13	19	21	27	39	50	74	86	67	4	414
NZEB	20	23	25	38	36	39	43	46	52	81	2	404
Wind power	41	32	34	31	36	37	46	33	44	30	2	366
Hydrogen	18	12	19	14	31	31	40	46	74	77	3	365
Nuclear power	34	27	43	29	30	38	29	26	33	24	0	315
Energy efficiency	20	24	39	23	29	30	30	28	27	20	1	270
Biofuels	27	25	26	28	24	22	32	34	24	22	1	266
Storage	11	12	17	20	21	26	33	39	39	33	2	254
Biomass	22	20	22	26	25	23	20	30	35	24	0	248
Heat pump	11	15	18	18	21	21	30	28	35	21	1	220
Smart grid	13	20	21	21	17	19	23	18	17	10	0	180
Hydropower	12	8	11	13	10	21	17	12	14	15	0	133
Fuel cell	10	7	11	6	14	11	16	14	20	15	0	123
BECCS	4	2	5	6	11	5	14	15	28	25	0	113
Circular economy	9	4	6	3	7	3	12	14	20	18	0	95
Demand response	4	7	5	9	10	9	13	9	9	11	0	85
Microgrids	3	8	7	6	8	5	15	11	9	10	0	81

Figura 31 - Resultados do TIM

VOS	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
CCS	41	23	42	62	50	39	64	55	61	69	158	664
Energy efficiency	30	19	22	29	33	39	38	60	59	56	111	496
Evs	1	8	9	10	19	14	25	26	32	48	74	266
Hydrogen	10	8	9	7	5	9	10	17	29	51	99	254
PV	4	6	8	15	12	14	23	16	27	36	43	204
Wind power	8	5	13	10	12	17	15	28	28	34	34	204
Biomass	4	6	11	13	13	13	18	19	19	27	32	175
Storage	4	1	5	6	5	6	18	14	20	39	47	165
NZEB	8	13	4	15	7	9	11	9	5	13	23	117
Nuclear power	8	7	7	9	5	6	15	6	5	9	34	111
Smart grid	5	9	6	11	9	9	14	6	9	9	19	106
Biofuels	2	7	5	4	7	13	10	10	11	13	23	105
Circular economy	0	1	4	1	1	1	6	5	19	18	38	94
Heat pump	3	4	4	4	8	6	10	7	10	8	25	89
Demand response	1	1	2	0	8	5	10	10	10	6	18	71
Fuel cell	1	0	0	1	3	1	2	3	11	11	16	49
Smart city	0	0	0	1	3	2	10	7	8	6	11	48
Microgrids	1	3	1	3	4	0	10	2	4	8	12	48
Hydropower	1	0	2	4	3	0	4	7	3	7	9	40

Figura 32 - Resultados do VOS

Conforme explicado anteriormente, o valor de relevância recuperado pelo *software* TIM não deve ser comparado diretamente com o valor de ocorrência obtido no *software* VOS. Portanto, uma abordagem baseada na classificação dos resultados do TIM e VOS é adotada neste trabalho. Este procedimento é realizado em duas etapas. Na primeira etapa, os resultados recuperados pelos *softwares* TIM e VOS são classificados de acordo com a sua relevância ou ocorrência, respectivamente. Assim, o termo mais relevante no TIM ocupa a primeira posição no *ranking*, o segundo mais relevante a segunda posição e assim sucessivamente. Um procedimento semelhante é usado para o caso do *software* VOS, mas a classificação é baseada no parâmetro de ocorrência. Na segunda etapa, os diferentes termos recuperados pelo *software* TIM e VOS são classificados de acordo com a soma das classificações individuais. No entanto, agora o termo que ocupa a primeira posição é aquele com a menor soma desses valores. É importante destacar que caso duas palavras-chave tenham a mesma classificação, prevalece a ordenação do TIM, pois este *software* valoriza o local onde as palavras são encontradas. A Figura 33 evidencia a abordagem utilizada.

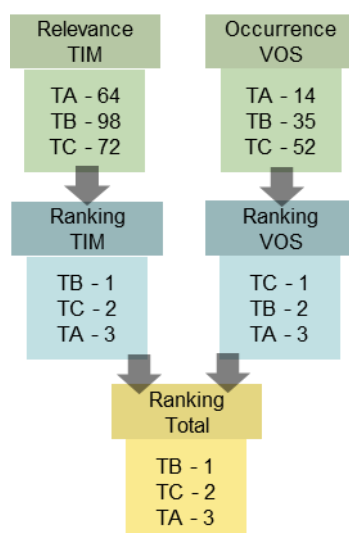


Figura 33 - Metodologia adotada para obter a classificação

A Figura 34 foi construída com base nas informações apresentadas nas figuras Figura 3131 e 32, e seguindo a metodologia representada na Figura 33. Assim foi possível perceber as tecnologias associadas à descarbonização que têm merecido maior atenção da comunidade científica nos últimos anos. Como podemos ver na Figura 34, há tecnologias que têm recebido mais atenção (no topo do *ranking*) e outras, cujo interesse foi menor (na parte inferior do *ranking*). Algumas conclusões relevantes que se podem extrair são as seguintes:

- Tecnologias de captura de carbono, H₂ verde, sistemas de armazenamento, sistemas fotovoltaicos e mobilidade elétrica ocupam as cinco principais tecnologias que receberam mais atenção da comunidade científica em 2021;
- As tecnologias de captura de carbono continuam a ser o principal ponto de interesse de pesquisa para a comunidade científica ao longo dos anos;
- O H₂ e os sistemas de armazenamento ganharam um interesse significativo na comunidade científica.
- A pesquisa sobre o tema *smart grids* diminuiu significativamente até 2020, mas parece estar em recuperação. Embora menos expressiva, situação semelhante ocorre com as microrredes, eficiência energética, edifícios de energia zero e resposta da procura.
- O interesse da comunidade científica pela mobilidade elétrica diminuiu nos últimos três anos.

Os resultados revelam uma ênfase excessiva nas grandes tecnologias do lado da oferta. Assim, abordagens mais distribuídas, nomeadamente do lado da procura com grande potencial

de descarbonização, podem estar a ser negligenciadas pela investigação. A dependência de literatura, projetos e patentes pode explicar esse potencial viés de análise.

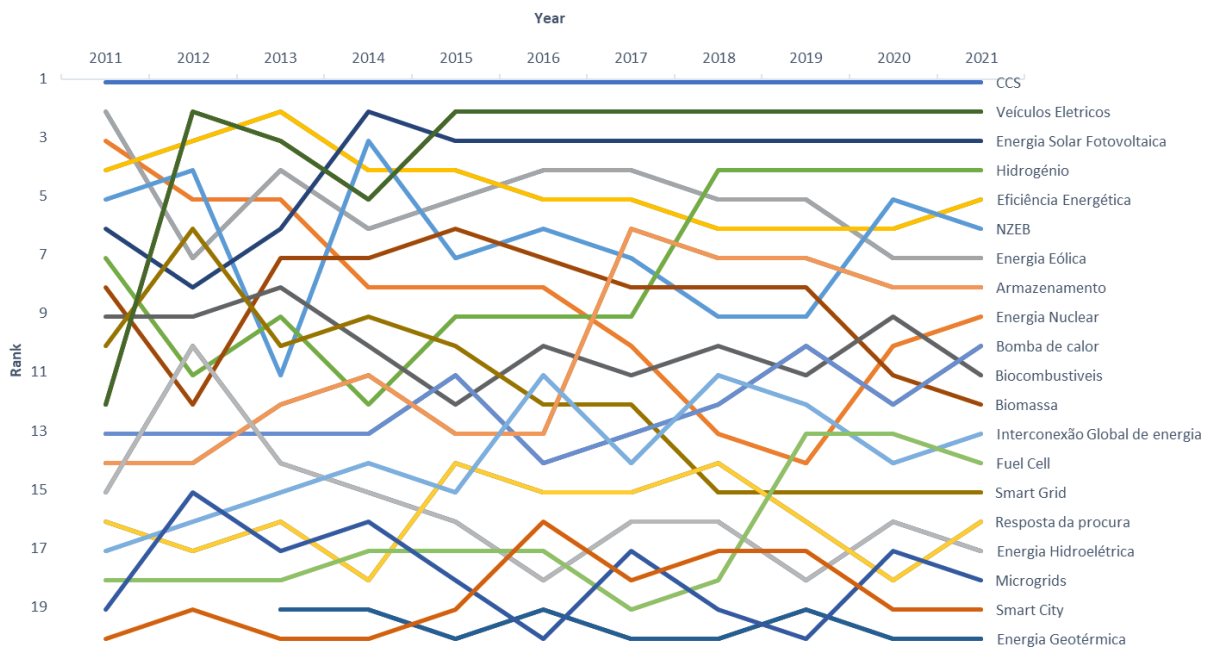


Figura 34 – Classificação obtida

É essencial destacar que tecnologias promissoras podem ser agrupadas em três grupos principais: o lado da geração de energia (por exemplo, geração de eletricidade e H₂), o lado da procura de energia (por exemplo, mobilidade elétrica ou resposta da procura) e o lado das infraestruturas (por exemplo, redes inteligentes ou microrredes).

Além disso, vale salientar que a menor produção científica em torno de algumas tecnologias pode ser decorrente do facto de a comunidade científica ter concluído que não são tecnologias viáveis ou porque já são tecnologias maduras e, portanto, o número de pesquisas é menor.

A Figura 35 agregou as informações utilizadas para construir o gráfico da Figura 34, por exemplo, as informações correspondentes ao período 2011-2014 contemplam todos as informações anteriormente refletidas nos anos 2011 a 2014 inclusive. Esta agregação permite mitigar eventuais variações anuais que possam dever-se a razões conjunturais.

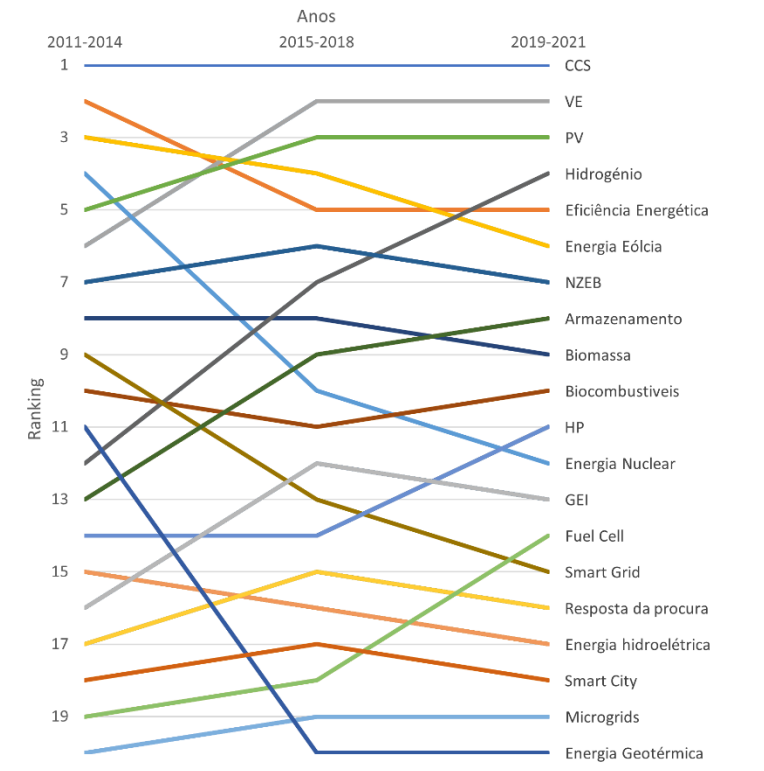


Figura 35 - Classificações acumuladas

4. CARACTERIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS MAIS RELEVANTES RESULTANTES DA ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

A metodologia desenvolvida e aplicada no capítulo 3 permitiu identificar um conjunto de tecnologias (ver Figura 34 da secção 3.4) que têm sido alvo de maior interesse por parte da comunidade científica, evidenciando-se como as tecnologias mais promissoras para o processo de descarbonização. Estas tecnologias podem ser enquadradas em três grupos fundamentais, a saber: tecnologias do lado da oferta (exemplo: produção, de eletricidade e H₂, centrais de captura e armazenamento de carbono), tecnologias do lado da procura (exemplo: mobilidade elétrica, resposta da procura) e tecnologias do lado da infraestrutura (exemplo: redes inteligentes, microrredes).

A caracterização destas tecnologias é determinante para se entender melhor qual o real impacto que cada uma poderá ter na descarbonização. As subsecções seguintes apresentam o princípio de funcionamento das tecnologias identificadas, o seu potencial de descarbonização e maturidade.

4.1 Tecnologias do lado da oferta

4.1.1 Produção renovável de energia

As tecnologias de energia renovável aproveitam a energia de fontes naturais que se renovam permanentemente, como por exemplo o sol (energia solar), o vento (energia eólica), as plantas (bioenergia), as chuvas (energia hidroelétrica) ou mesmo o oceano (energia das ondas e das marés).

A energia dessas fontes excede muitas vezes as necessidades energéticas atuais e futuras do mundo, não significando, contudo, que estas possam fornecer toda a energia nos futuros sistemas de energia de baixo carbono. Efetivamente, os recursos renováveis tendem a variar ao longo das horas do dia e dos períodos do ano, o que poderá impor a utilização de outras fontes de energia para assegurar a contínua satisfação dos consumos de energia. Assim, outras fontes de energia, como a energia nuclear ou fóssil com captura e armazenamento das emissões de CO₂ tendem a ser necessárias para manter a estabilidade do sistema energético, pelo menos durante mais alguns anos.

Os recursos renováveis estão relativamente bem distribuídos pelo globo, ainda que as suas quantidades variem geograficamente. Em consequência deste facto, a utilização de uma

determinada fonte de energia renovável pode ser mais intensa numas regiões que em outras. Por exemplo países mais próximos dos polos poderão utilizar parcelas relativamente maiores de energia eólica em comparação com países próximos da linha do Equador, nos quais a energia solar fotovoltaica tenderá a ser predominante.

4.1.1.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica (PV) é obtida através da transformação da luz solar em eletricidade, utilizando uma tecnologia baseada no efeito fotoelétrico (Ellabban et al., 2014).

São vários os fatores que determinam a quantidade de eletricidade gerada por uma célula fotovoltaica, mais especificamente, o tipo de material, o seu tamanho e a intensidade da fonte de luz. É relevante destacar a existência de diversos tipos de tecnologias PV, com níveis de desenvolvimento compreendidos entre os níveis 3 e 9 na escala de TRL (De Luca et al., 2020), nomeadamente, silício, perovskites, células de multijunção e células orgânicas.

No que diz respeito ao silício cristalino, tal como demonstrado na Figura 37, apresenta eficiências compreendidas entre os 18% e os 22%, sendo que é a tecnologia mais implementada, e que engloba cerca de 95% de participação de mercado (*U. S. Department of Energy, 2015*). Uma das suas vantagens prende-se com o facto do silício ser um elemento abundante na crosta terrestre (*U. S. Department of Energy, 2015*). Esta tecnologia é hoje considerada como a mais madura, apresentando uma vida útil longa, superior a 25 anos, e com baixa degradação a longo prazo (*U. S. Department of Energy, 2015*). É de ressaltar que esta tecnologia tem assumido uma tendência de custo decrescente na última década. Contudo, existem desvantagens, mais especificamente, o facto do processo químico necessário para purificar, reduzir e cristalizar o silício ser poluente e requerer grandes quantidade de energia (Vidal et al., 2021). Também o próprio material da célula se torna um problema por se constituir um fraco absorvedor de luz e obrigar inerentemente o silício a ter uma espessura considerável (Ibn-Mohammed et al., 2017). Além disso, é uma tecnologia que já se encontra altamente otimizada, deixando pouca margem para que haja melhorias de eficiência e, conseqüentemente, uma maior produção de energia.

Recentemente, têm emergido novas tecnologias fotovoltaicas, cujo principal objetivo é o de tentar alcançar melhores eficiências. Neste sentido, destacam-se os módulos de perovskites, que alcançaram rápidas melhorias de eficiência nos últimos anos, sendo que a eficiência atual ronda os 25%, tal como se constata na Figura 37. No entanto, a presente tecnologia apresenta ainda algumas barreiras. Primeiramente, apesar dos seus níveis de

eficiência, é possível apontar-se o facto do seu tempo de vida útil se situar na ordem dos cinco anos, tornando a tecnologia inviável (L. Meng et al., 2018). Além disso, estas células apresentam ainda uma estabilidade limitada, uma vez que não resistem à humidade e a longos períodos de exposição solar e ao oxigénio. Nessa perspetiva, tem-se vindo a trabalhar sobre técnicas de encapsulamento do presente tipo de células (Ibn-Mohammed et al., 2017).

As células de multijunção destacam-se por serem compostas por camadas de duas ou mais células de junção única com diferentes larguras de banda, de modo a absorverem um espectro solar mais amplo (Ghosh & Yadav, 2021). Assim sendo, a primeira célula absorve uma faixa específica do espectro solar e converte em energia elétrica, deixando que a restante parte do espectro seja absorvida pela(s) célula(s) abaixo (*U. S. Department of Energy*, 2015), contemplando uma eficiência compreendida entre 22% e 48%, observável na Figura 37. Embora tecnicamente promissora, esta tecnologia requer um custo avultado no processo de fabrico, constituindo uma barreira à implantação da mesma.

Outro tipo de células em desenvolvimento, são as células orgânicas que se caracterizam por eficiências de conversão acima dos 18% tal como demonstrado na Figura 37, (NREL, 2022). Esta tecnologia apresenta várias vantagens, de que se destacam a baixa espessura das células, o facto dos semicondutores orgânicos serem baseados em matérias-primas abundantes e não tóxicas, sendo possível a sua implementação num versátil leque de aplicações (Riede et al., 2021). Porém, é ainda necessário efetuar mais estudos de modo a procurar melhorar o desempenho deste tipo de tecnologia e reduzir o seu custo de produção (Fusella et al., 2019). O custo de produção de eletricidade com recurso à tecnologia PV tem diminuído significativamente (Lazard, 2021), tal como apresentado na Figura 37, que mostra a evolução do custo nivelado médio da eletricidade (LCOE) produzida ao longo da vida útil do gerador. Outra referência na literatura, fornece o custo de 0,048 USD/kWh para a eletricidade produzida a partir de um painel fotovoltaico (IRENA, 2022c).

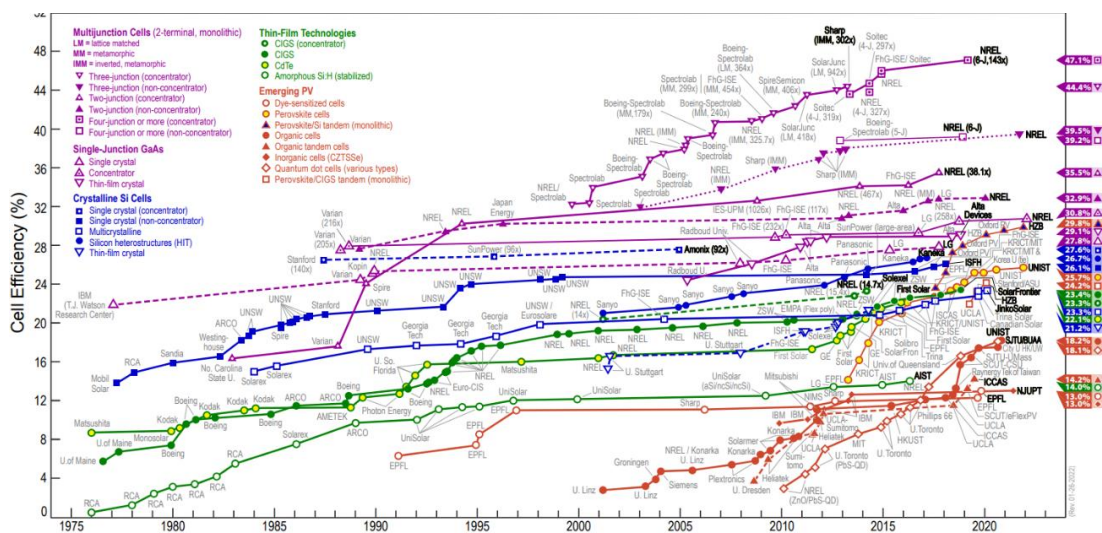


Figura 36 - Eficiência de células fotovoltaicas

Fonte: (NREL, 2022)

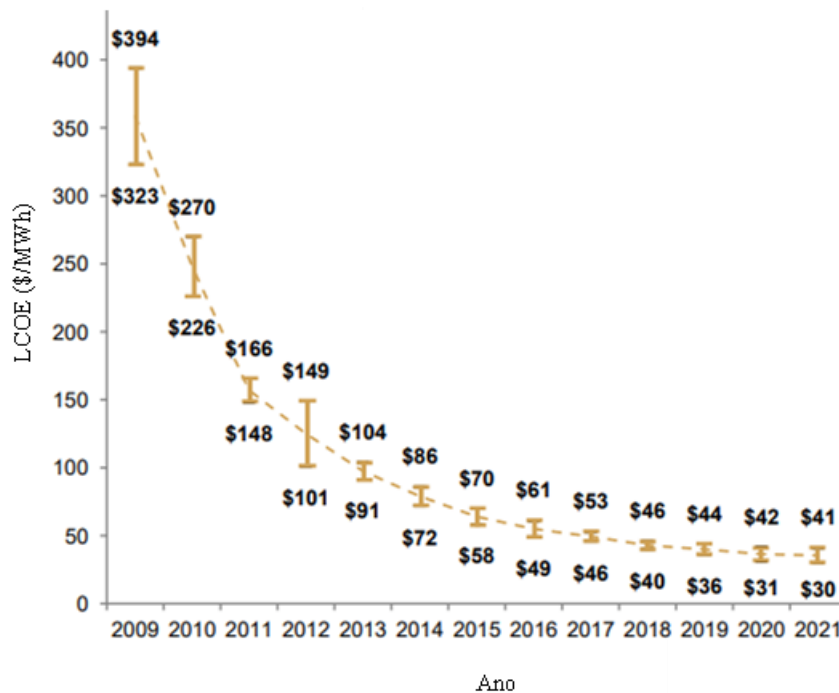


Figura 37 - Tendência do custo de produção de eletricidade através de células fotovoltaicas

Fonte: (Lazard, 2021)

A tendência de custo decrescente anteriormente descrita tem acompanhado a rápida massificação da tecnologia, tal como a Figura 38 evidencia (BloombergNEF, 2022), (Arthur D. Little, 2015). Conclui-se deste facto que as instalações fotovoltaicas são motivadas, maioritariamente, por benefícios económicos e não por benefícios ambientais (Lew et al., 2021).

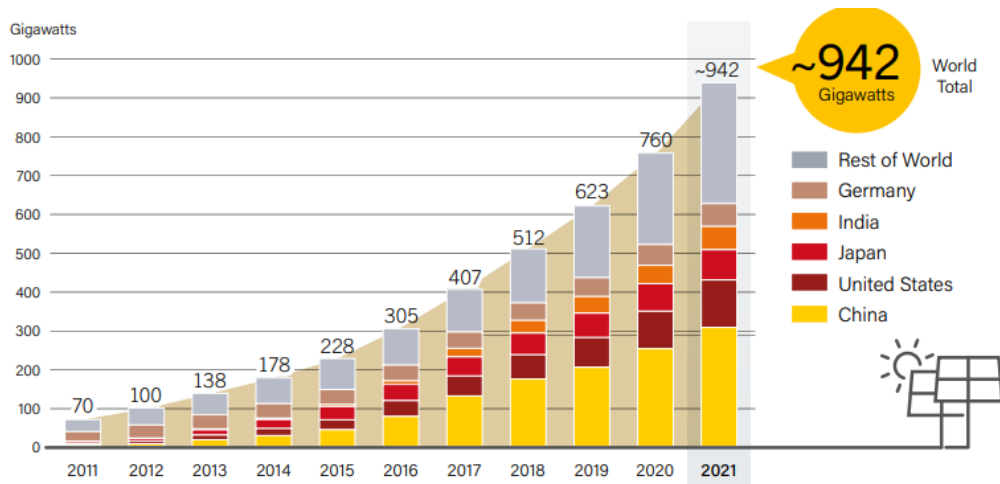


Figura 38 - Capacidade solar fotovoltaica acumulada

Fonte: (REN21, 2022)

Em apenas uma década, verificou-se que, tal como mostra a Figura 38, a capacidade global de energia solar fotovoltaica passou de 70 GW para 942 GW, com 182 GW de capacidade adicionada em 2021 (REN21, 2022), (*Solar PV – Analysis*, 2021). Em 2021, a China liderou a expansão da capacidade solar fotovoltaica adicionada com 54,9 GW, seguindo-se o resto do mundo (incluindo vários países europeus) e os EUA com maior capacidade instalada. Assim sendo, espera-se que, até ao ano de 2050, a capacidade instalada em sistemas fotovoltaicos aumente para cerca de 7000 GW (IRENA, 2018d).

Um fator particularmente interessante da tecnologia PV é a sua elevada granularidade/modularidade, que permite a construção de geradores com potências instaladas numa gama alargada (de W a MW) e facilmente ajustadas às necessidades. Este facto contribui para uma maior velocidade de difusão em comparação com outras tecnologias (Victoria et al., 2021).

A energia fotovoltaica apresenta emissões que variam consoante a tecnologia PV e a disponibilidade de radiação incidente ao longo do período de funcionamento do gerador, sendo, contudo, que a quase totalidade das emissões é registada durante o fabrico dos módulos (Sovacool & Monyei, 2021). Os valores de emissões encontrados na literatura científica apresentam valores diferenciados. Por exemplo, Sovacool & Monyei, (2021) referem que, com base na análise ao ciclo de vida, a energia fotovoltaica apresenta emissões médias de aproximadamente 49,9 tCO₂-eq/GWh, podendo esse valor variar entre 1 e 218. De acordo com o autor Wild-Scholten et al. (2014), os valores na Europa, variam entre as 38 tCO₂-eq/GWh

para o Chipre, com uma alta irradiação, e as 89 tCO₂-eq/GWh para a Islândia, dada a sua baixa irradiação. A Tabela 5 mostra, de acordo com Ludin et al. (2018) a gama de variação da emissão de GEE para diferentes tecnologias fotovoltaicas. As emissões do ciclo de vida permitem avaliar o desempenho ambiental das tecnologias fotovoltaicas, quantificando as emissões totais de CO₂ desde a extração das matérias-primas até ao desmantelamento no fim da vida útil (Ren & Kan, 2021).

Tabela 5 - Emissões por tipo de tecnologia PV

Fonte: (Ludin et al., 2018)

Tipo de tecnologia fotovoltaica	Emissões de CO ₂ (g-eqCO ₂ /kWh)
Silício	12,1-671
Perovskite	56,65-497,2
Orgânicas	10-80

A perspetiva para o futuro é de que as emissões específicas da tecnologia PV sejam reduzidas, estimando-se que em 2050 as emissões do ciclo de vida possam ser reduzidas para 10 tCO₂-eq/GWh ou menos (Pehl et al., 2017).

Apesar da sua vertente renovável, a produção de energia fotovoltaica está significativa e sistematicamente dependente não só da localização geográfica dos sistemas de produção, como também das horas do dia e das condições climáticas. Estas situações, em particular as condições climáticas, fazem com que, ao contrário do que acontece nas centrais convencionais, a produção de eletricidade em sistemas PV apresente alguma incerteza e intermitência. Consequentemente, a produção PV é não programável, não sendo, por isso, capaz de suprir a procura de energia em qualquer momento, introduzindo incerteza que importa ser mitigada (Ikäheimo et al., 2022).

Em jeito de conclusão, a Tabela 6, resume a caracterização da tecnologia fotovoltaica.

Tabela 6 - Caracterização da tecnologia fotovoltaica

TRL	Custo médio (USD/kWh)	Granularidade	Potencial para descarbonização	Emissões médias de CO ₂ (tCO ₂ -eq/GWh)
3-9	0,048	Elevada	Elevado	49,9

4.1.1.2 Energia Eólica

As pás das turbinas eólicas captam a energia cinética do vento para gerar energia mecânica de rotação, que posteriormente é transferida para um gerador que a converte em eletricidade (Ellabban et al., 2014).

As turbinas eólicas podem ser classificadas com base no tipo de eixo, em turbinas de eixo horizontal ou turbinas de eixo vertical. É de salientar que o primeiro tipo é o mais difundido pela sua capacidade de produzir mais eletricidade a partir de uma determinada quantidade de vento. Por outro lado, o segundo tipo não requer que a turbina esteja na direção do vento e podem ser usadas turbinas de pequena dimensão (por exemplo: turbinas instaladas em telhados de edifícios) (WindPower, 2009).

Os parques eólicos podem também ser divididos em dois tipos com base no local de instalação, mais especificamente, *onshore* e *offshore*. No caso do primeiro tipo utilizam-se turbinas eólicas em terra para capturar a energia eólica. Já o segundo tipo utilizam-se turbinas eólicas instaladas em ambiente marinho (oceano), onde a velocidade do vento é maior e mais constante (Díaz & Guedes Soares, 2020), apresentando assim melhores características para produção de eletricidade (Bosch et al. 2018). Em contrapartida a turbina requer materiais com outras exigências, além de que a instalação da turbina e a sua manutenção é mais difícil (Bonou et al., 2016).

As turbinas do tipo *offshore* podem ainda ser caracterizadas com base no tipo de fundação, como demonstrado na Figura 39, nomeadamente em turbinas com base fixa e turbinas com base flutuante (Pérez-Collazo et al., 2015). As turbinas com base flutuante oferecem vantagens económicas e ambientais face à alternativa de base fixa, devido a uma atividade menos invasiva no fundo do mar durante o momento de instalação, e ao facto de poderem ser instalados em águas mais profundas (IRENA, 2019), onde o potencial eólico é mais elevado, já que este aumenta com a distância à costa (Esteban et al., 2011). O tipo de fundações aplicado (monopilar, tripé e flutuantes) difere consoante a profundidade a que a turbina seja instalada, conforme discutido em (Oh et al., 2018).

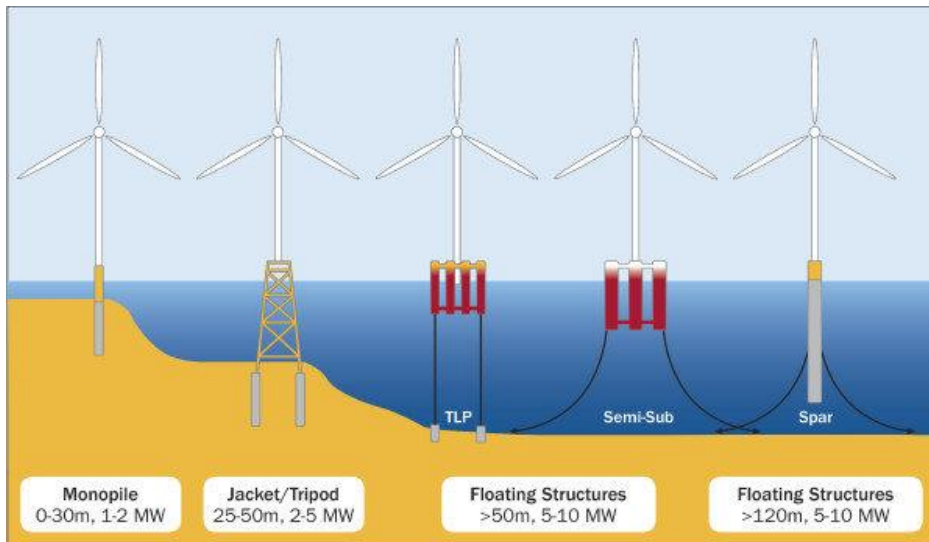


Figura 39 - Estruturas para turbinas eólicas offshore

Fonte: (Bailey et al., 2014)

De acordo com GWEC (2022), em 2021 registou-se um aumento de 93,6 GW na capacidade eólica instalada, sendo que o mercado eólico *onshore* contribuiu com 72,5 GW e o mercado *offshore* com 21,1 GW, elevando a capacidade eólica acumulada global para 837 GW.

À semelhança de outras energias renováveis, esta apresenta também inúmeras vantagens. Primeiramente, aponta-se o facto de as turbinas eólicas usarem o vento (recurso renovável e limpo) para gerar energia, permitindo, assim, substituir a utilização de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, reduzir as emissões de CO₂. A sua maturidade é igualmente um grande trunfo (Luca et al., 2020), já que o TRL das turbinas eólicas de eixo horizontal é 9, tanto em *onshore* como em *offshore* (Watson et al., 2019). Além disso, é importante salientar que apresenta características complementares à utilização de energia solar fotovoltaica. Por fim, a eficiência de conversão de 50% constitui também ela uma vantagem (Kinha, 2022).

Por outro lado, a tecnologia eólica também apresenta desvantagens, incluindo os impactos técnicos nas redes decorrentes da intermitência na produção (Lucas et al. 2012). O ruído, o impacto paisagístico e os efeitos negativos sobre o habitat e movimentos dos animais, resultando na morte de aves e morcegos por colisões com as pás, são outras desvantagens desta tecnologia (Lucas et al. 2012). No que diz respeito à última desvantagem apontada, o estudo das trajetórias de voo das aves pode ajudar a prever áreas potencialmente perigosas para o desenvolvimento de parques eólicos, mitigando assim os efeitos negativos (Lucas et al. 2012). Também a pintura das extremidades das pás, tornando-as mais perceptíveis, ou o uso de

transmissores acústicos para dissuadir aves, pode ajudar a mitigar os efeitos nos habitats (Lucas et al. 2012).

Os parques eólicos não emitem CO₂ (e outros gases poluentes) durante a sua fase de operação. No entanto, algumas emissões ocorrem devido à fabricação das turbinas eólicas e outros equipamentos necessários para construir um parque eólico, ao transporte desses equipamentos, à construção do parque eólico e ao desmantelamento no fim de vida (Mishnaevsky 2021). Na literatura, os valores das emissões de CO₂ encontrados variam entre 0,4 gCO₂-eq/kWh e 364,8 gCO₂-eq/kWh, com valor médio de 12 gCO₂-eq/kWh (Amponsah et al., 2014 e Sovacool & Monyei, 2021). A turbina eólica *offshore* tem maiores emissões durante o ciclo de vida (S. Wang et al., 2019).

Em relação aos custos da energia eólica, a alternativa *onshore* apresenta custos de produção de eletricidade de 0,033 USD/kWh, menores do que a solução *offshore* que apresenta um custo de 0,075 USD/kWh, devido aos maiores custos de construção, manutenção e transmissão de energia no oceano. Ainda assim, ambas as tecnologias têm apresentado uma tendência decrescente do custo ao longo do tempo (IRENA, 2022c), conforme mostra a Figura 40. Na Figura 40 é também observável a curva do custo relativa à tecnologia fotovoltaica, já descrita na secção anterior.

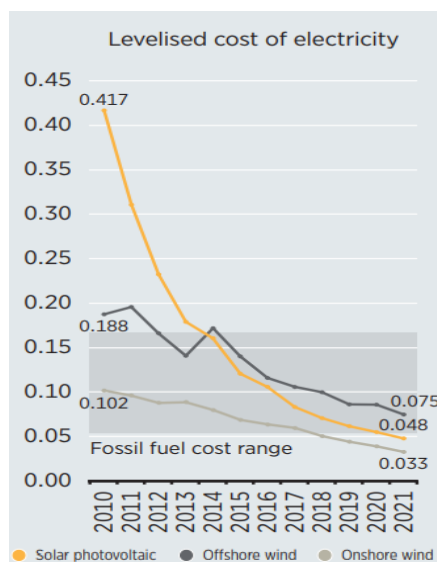


Figura 40 – Evolução do custo da eletricidade produzida por via eólica e fotovoltaica

Fonte: (IRENA, 2022)

Em jeito de conclusão, a Tabela 7, resume a caracterização da energia eólica acima descrita.

Tabela 7 – Caracterização da energia eólica

TRL	Custo médio (USD/kWh)	Granularidade	Potencial para descarbonização	Emissões médias de CO2 (gCO2-eq/kWh)
9	0.033-0.075	Baixa	Elevado	12

4.1.2 Bioenergia

A bioenergia representa uma quota de quase 60% da energia renovável da União Europeia, sendo que os processos de aquecimento e de refrigeração utilizam cerca de 75% dessa energia (Biomass, 2021).

A biomassa é o recurso usado para a produção de bioenergia e é designado na literatura científica como sendo toda a matéria orgânica que pode ser utilizada como fonte de energia, incluindo resíduos, plantações florestais, culturas energéticas, entre outras (Toklu, 2017).

Em consonância com o roteiro da Comissão Europeia (IEA, 2021b), a biomassa é limitada na quantidade disponível e é sujeita a uma competição inerente com a cadeia de valor alimentar. Portanto, o seu uso deve ser restrito a setores prioritários, onde não existem opções alternativas, como por exemplo, o uso de biocombustíveis no setor dos transportes (Sladjana Djunicic, 2021). Além disso, a obtenção de biomassa deve restringir-se ao uso de resíduos e/ou à produção de culturas energéticas em solos degradados ou marginais, a fim de evitar, por exemplo, o desmatamento ou o esgotamento dos solos (Energy Transitions Commission, 2021).

A exploração sustentada da bioenergia poderá tornar-se numa contribuição valiosa para a descarbonização em termos de flexibilidade (Mandley et al., 2020), dado que pode ajudar a compensar a intermitência de outras fontes de energia renovável como a solar e a eólica (Röder et al., 2020). Deste modo, é de extrema importância fazer o melhor uso da energia da biomassa, de acordo com critérios de sustentabilidade (Poluzzi et al., 2021), a saber: i) a biomassa deve ter baixas emissões de GEE no seu ciclo de vida, desde a colheita à queima (Pickard et al., 2014); ii) e o impacto na biodiversidade e na saúde do ecossistema deverá ser tido em consideração (Z. Wang et al., 2020).

A partir de diversos processos é possível converter a biomassa em múltiplos portadores de energia, nomeadamente eletricidade, calor e/ou biocombustíveis líquidos, gasosos e sólidos (Toklu, 2017). Os processos de conversão de biomassa em bioenergia podem ser divididos em processos termoquímicos (que inclui pirólise, gaseificação e combustão) e bioquímicos (que abrange a digestão anaeróbia e a fermentação). A escolha do processo tem em consideração

vários fatores como o tipo de energia final desejada, as propriedades da matéria-prima e a quantidade de biomassa disponível (Ferreira, 2015).

4.1.2.1 Processos de conversão bioquímica

Este tipo de processos é caracterizado pela utilização de agentes biológicos, como microrganismos ou enzimas, para converter biomassa em açúcares e posteriormente em biocombustíveis líquidos ou gasosos (Moreira, 2012). As tecnologias de conversão bioquímica incluem fermentação para a produção de etanol e digestão anaeróbia para produção de biogás rico em metano (CH₄) (Moreira, 2012).

A fermentação consiste na produção de bioetanol a partir da extração do açúcar da matéria-prima. Para a obtenção do produto final é necessário misturar a biomassa com água e deixar fermentar num ambiente quente (Ferreira, 2015). Pela ação de microrganismos (geralmente leveduras), o açúcar das plantas é convertido em etanol (Ferreira, 2015). Após este processo o bioetanol é purificado por destilação e pode ser utilizado como biocombustível no estado puro ou misturado com outros compostos (Ferreira, 2015).

A digestão anaeróbia consiste na conversão da biomassa em biogás por intermédio de microrganismos num ambiente pobre em oxigénio (Marques, 2015). Primeiramente as enzimas convertem os compostos orgânicos insolúveis em açúcares e posteriormente são convertidos em CO₂, H₂, ácido acético, etanol, entre outros, por intermédio de bactérias acetogénicas (Marques, 2015). Por fim, bactérias metanogénicas permitem a formação de biogás por duas vias distintas: i) pela decomposição do ácido acético em biogás, CO₂ e outros gases; ii) ou pela reação do CO₂ com o H₂ (Marques, 2015). O biogás é composto maioritariamente por CH₄ (cerca de 50% a 75%), contendo também outros gases em pequenas quantidades, como por exemplo o CO₂ (Ferreira, 2015). Assim, o produto final em questão pode ser utilizado para produzir eletricidade e/ou calor, ser integrado em redes de gás natural ou usado como combustível em meios de transporte (Marques, 2015). A produção de biogás é vantajosa em relação a outro tipo de energias renováveis, uma vez que apresenta um poder calorífico semelhante ao do gás natural, emitindo contudo menores quantidade de GEE (Ferreira, 2015).

4.1.2.2 Processos termoquímicos

A conversão termoquímica ocorre quando a energia “quimicamente armazenada” na biomassa é convertida em calor. A pirólise, combustão e gaseificação são os processos termoquímicos abordados sendo a temperatura e a quantidade de oxigênio presente ao longo do processo, o fator que difere entre eles.

A pirólise da biomassa é o processo de decomposição termoquímica da matéria orgânica a temperaturas entre 500°C e 800°C, num ambiente de total, ou quase total, ausência de oxigênio (Ferreira, 2015). O resultado obtido é uma mistura de gases, líquidos e sólidos com altos poderes caloríficos, que variam em quantidade consoante o tipo de pirólise envolvido. A fração sólida deste processo é o carvão vegetal, constituído essencialmente por cinza e carbono, o produto líquido é o bio óleo e o gás típico é composto por gases como o H₂, monóxido de carbono (CO), CO₂, CH₄, entre outros (Moreira, 2012).

Os vários tipos de pirólise podem ser diferenciados com base na temperatura e tempo de submissão da biomassa a essa mesma temperatura, a saber: a pirólise lenta baseia-se no aquecimento da biomassa a temperaturas de 500°C, durante um período de tempo elevado, o que favorece a formação de carvão vegetal (Moreira, 2012); na pirólise rápida, a biomassa é aquecida a uma temperatura da ordem dos 500°C durante aproximadamente 1 segundo e de seguida submetida a um arrefecimento rápido de modo a condensar o vapor formado durante a queima, originando o bio óleo (Ferreira, 2015); a pirólise flash, caracterizada por longos períodos e elevadas temperaturas (cerca de 800 °C), maximiza a conversão da biomassa em gás, que pode ser utilizado para a produção de calor e eletricidade ou sintetizado para a produção de CH₄ ou amoníaco (CH₄) (Ferreira, 2015).

A gaseificação consiste na conversão termoquímica da biomassa em biogás através da oxidação parcial da biomassa a elevadas temperaturas (800°C a 1200°C) sendo necessária a presença de um agente gaseificador (ar, vapor de água, oxigênio ou uma combinação de ambos) (Marques, 2015). O biogás, é constituído maioritariamente por CO e H₂, além de CH₄ e outros gases (Ferreira, 2015). Assim, a gasificação apresenta-se atualmente como uma tecnologia de interesse crescente devido ao gás que produz, o qual é rico em H₂, podendo ser usado em pilhas de combustível (Ferreira, 2015).

A combustão consiste na queima da biomassa a uma temperatura compreendida entre 800 e 1000 °C, na presença de oxigênio, libertando assim a sua energia química armazenada

(Marques, 2015). Os gases quentes resultantes podem ser utilizados diretamente para fornecer calor ou produzir eletricidade numa turbina a gás (Ferreira, 2015).

4.1.2.3 Considerações finais

As tecnologias de bioenergia apresentam valores de TRL compreendidos entre 6, para a tecnologia de gaseificação e pirólise, e 9 para a digestão anaeróbica e combustão (Dovich Filho et al., 2021). No entanto, são necessários mais estudos, por parte da comunidade científica, de modo a compreender-se a quantidade de biomassa que pode ser produzida por cultivo de forma sustentável (Johansson et al., 2019).

O LCOE da presente tecnologia é de 0,067 USD por quilowatt hora de eletricidade, valor superior ao de outras fontes de energia renovável abordadas nas secções anteriores (IRENA, 2022).

A Tabela 8 resume a caracterização da bioenergia acima descrita.

Tabela 8 – Caracterização da bioenergia

TRL	Custo médio (USD/kWh)	Granularidade	Potencial para descarbonização	Emissões médias de CO2 (gCO2-eq/kWh)
6-9	0,067	Moderado	Moderado	49-230 *

* (WNA (2022) e Spath & Mann (2004))

4.1.3 Produção de eletricidade por via fóssil com captura de carbono

4.1.3.1 Conceito

A comunidade científica aponta que a tecnologia de captura e armazenamento de carbono (CCS) assumirá um papel crítico na descarbonização de determinadas indústrias, como cimenteiras e siderurgias, em centrais de produção de eletricidade com base em combustíveis de origem fóssil (carvão ou a gás) e também em sistemas de emissões negativas, nomeadamente, centrais de biomassa (Boot-Handford et al., 2014a).

Nas centrais de produção de energia fóssil, ainda que aumente o custo da eletricidade produzida, a tecnologia de CCS pode permitir a continuação da utilização de combustíveis fósseis enquanto a economia se torna neutra em carbono (Global CCS Institute, 2020; Lau et al., 2021). Assim, a vantagem da utilização da tecnologia CCS resulta da comparação da

quantidade de CO₂ emitida pelas centrais convencionais com e sem a tecnologia em questão (Budinis et al., 2018).

O estudo Budinis et al. (2018), concluiu que em cenários sem CCS é possível consumir 26% das reservas de combustíveis fósseis até ao ano de 2050, contra 37% quando a CCS é aplicada, de modo a fazer-se cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris. Em 2100, a diferença é substancialmente maior, estimando-se que cenários sem CCS poderão consumir 33% das reservas de combustíveis fósseis, pouco mais do que em 2050. Contrariamente as instalações com CCS poderão consumir o dobro, cerca de 70% (Budinis et al., 2018).

Nesse contexto, a importância da tecnologia supracitada prende-se com a possibilidade de se incluírem centrais a combustíveis fósseis no mix de energia, com baixas emissões de GEE e, conseqüentemente, conseguir-se desbloquear ativos que de outra forma ficariam ociosos, em concreto algumas centrais alimentadas com combustíveis fósseis (Clark & Herzog, 2014).

A tecnologia CCS é um processo que pode envolver até cinco etapas, mais especificamente, a captura, a separação, o transporte e o armazenamento e/ou utilização de CO₂.

4.1.3.2 Captura de CO₂

A captura de CO₂, aplicada a centrais de produção de eletricidade, pode ser conseguida a partir de diferentes processos, incluindo pós-combustão, pré-combustão, oxi-combustão e looping químico (Lau et al., 2021; Kenarsari et al., 2013; Boot-Handford et al., 2014b).

4.1.3.2.1 Pós-combustão

As centrais de energia usam ar para realizar a combustão e geram um gás à pressão atmosférica com uma concentração de CO₂ entre os 13% e os 15% para centrais a carvão e 7% a 8% para centrais a gás (Mohammad, M., et al., 2020; Global CCS Institute, 2015). A captura do CO₂ recorrendo ao processo de pós-combustão consiste na separação desse gás relativamente aos restantes gases que resultam da combustão, sendo essa separação efetivada após a queima do combustível, tal como ilustrado na Figura 41 (Mondal et al., 2012). A recuperação do CO₂ é efetivada utilizando os métodos de separação descritos na secção Figura 41, em concreto o método de absorção ou adsorção (Global CCS Institute, 2015; Mohammad, M., et al., 2020).

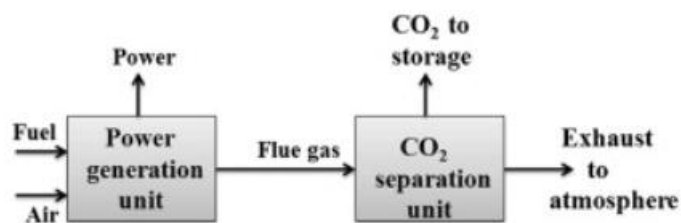


Figura 41 - Esquema de captura pós-combustão

Fonte: (Mondal et al., 2012)

Esta técnica de captura é já uma tecnologia madura, aplicada na indústria e em centrais de produção de energia, nomeadamente, carvão pulverizado (PC) ou de ciclo combinado de gás natural (NGCC) (Hong, 2022).

As principais desvantagens deste processo de captura são a grande quantidade de energia necessária para remover o CO₂, resultante da reduzida quantidade de CO₂ no gás de combustão, conduzindo a custos relativamente altos (Mohammad, M., et al., 2020).

4.1.3.2.2 Pré-combustão

No método de pré-combustão, evidenciado na Figura 42, o combustível (nomeadamente o carvão ou o gás natural), é parcialmente oxidado, sob um ambiente de baixo oxigénio, para formar um gás de síntese, constituído principalmente por H₂ e CO). No passo seguinte, é adicionado vapor de água ao gás de síntese, ocorrendo uma reação de deslocamento água-gás que converte o CO em CO₂ e aumenta a concentração de H₂ (Lau et al., 2021), (Mohammad, M., et al., 2020). O fluxo de CO₂ e H₂ resultante apresenta, tipicamente, concentrações de CO₂ entre 15% a 60%, podendo este ser separado do H₂ através do processo de adsorção por diferença de pressão, descrito na secção 4.1.3.3.2, ou por membrana, descrito na secção 4.1.3.3.3 (Hong, 2022). O H₂ é usado para produção de energia, alimentando, por exemplo, células de combustível, de forma a aumentar significativamente a eficiência do processo de captura pré-combustão (Yang et al., 2008).

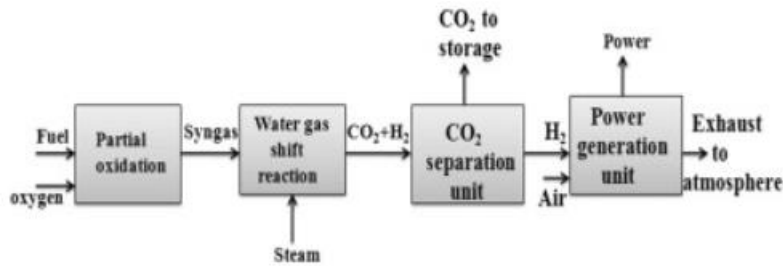


Figura 42 - Técnica pré-combustão
 Fonte: (Mondal et al., 2012)

A presente forma de captura é utilizada em processos industriais e em novas centrais de produção de energia, nomeadamente, as de ciclo combinado de gaseificação integrada (IGCC) (Global CCS Institute, 2015; Wilberforce et al., 2019).

4.1.3.2.3 Oxi-combustão

O processo de oxi-combustão é uma técnica promissora para a captura de CO₂ do gás de combustão ou para modificar o processo de combustão de modo a que o gás de combustão tenha uma maior concentração de CO₂ e, conseqüentemente, facilite a separação (Mondal et al., 2012), como observado na Figura 43.

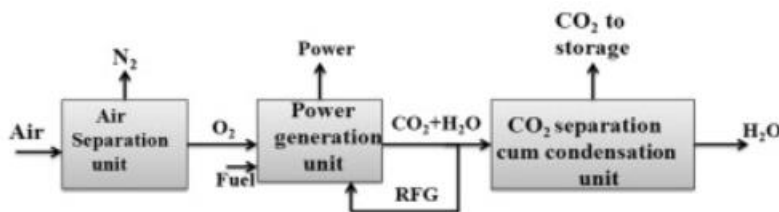


Figura 43 – Captura por oxi-combustão
 Fonte: (Mondal et al., 2012)

Neste processo utiliza-se uma unidade criogénica de separação de ar para fornecer oxigénio quase puro (concentrações de 95% a 99% de volume) à unidade de geração de energia, na qual ocorre o processo de combustão do combustível utilizado (Hong, 2022). Como consequência, resultam gases de combustão constituídos por CO₂ e vapor de água, sendo que o último pode ser removido através do processo de arrefecimento e compressão do fluxo de gás (Hong, 2022), (Global CCS Institute, 2015). O teor de CO₂ do gás seco de combustão varia na faixa de 70% a 95%, dependendo do combustível, do processo usado e da pureza do O₂ (Mondal et al., 2012).

Como resultado do aumento da concentração de CO₂ no gás de combustão, o custo da recuperação do carbono é menor do que nos restantes métodos. Não obstante, a quantidade de energia requerida e o custo associado à obtenção de oxigênio puro fazem aumentar o custo total deste processo de captura (Mohammad, M., et al., 2020), (Hong, 2022).

4.1.3.2.4 Looping químico

A tecnologia de looping químico utiliza dois reatores: um reator de ar e um reator de combustível. No primeiro, um “portador de oxigênio”, por exemplo, óxido de cálcio (CaO), é oxidado pelo oxigênio do ar e, conseqüentemente, são formados óxidos metálicos (Madejski et al., 2022). Estes óxidos são, de seguida, transportados para o segundo reator, onde reagem com o combustível, tal como se mostra na Figura 44 (Mondal et al., 2012). O metal oxida o gás comburente, num processo químico de redução do metal e, posteriormente, o metal regressa ao primeiro reator, de forma a que as emissões gasosas, resultantes do segundo reator, consistam apenas em CO₂ e H₂O (Mondal et al., 2012). Por fim, de modo a isolar o CO₂, basta recorrer ao processo de evaporação da água (Lau et al., 2021).

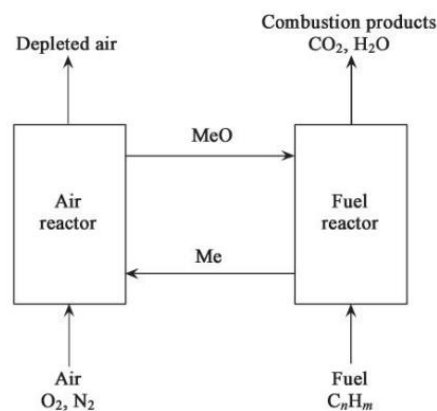


Figura 44 - Captura por looping químico
Fonte: (Mondal et al., 2012)

4.1.3.3 Separação de CO₂

Algumas das técnicas de captura anteriormente mencionadas requerem uma posterior etapa de separação de CO₂, H₂ ou O₂ de um fluxo de gás (IPCC, 2005). Portanto, essa etapa de separação, pode ser realizada através de vários processos, nomeadamente, absorção, adsorção, por membranas e destilação criogénica (Lau et al., 2021).

4.1.3.3.1 Absorção

Na captura por absorção química, ilustrada na Figura 45, o gás de combustão reage com um solvente líquido como, por exemplo, a monoetanolamina (MEA). Esta reação dissolve o gás de combustão, formando um composto rico em CO₂, o qual é transportado para uma coluna de regeneração, onde é aquecido. Nesta, e por ação do aumento da temperatura dá-se a libertação do fluxo de CO₂ (Madejski et al., 2022). Este tipo de absorção é adequada para fluxos gasoso com baixa concentração de CO₂, como os que resultam dos processos de captura do tipo pós-combustão (Mondal et al., 2012).

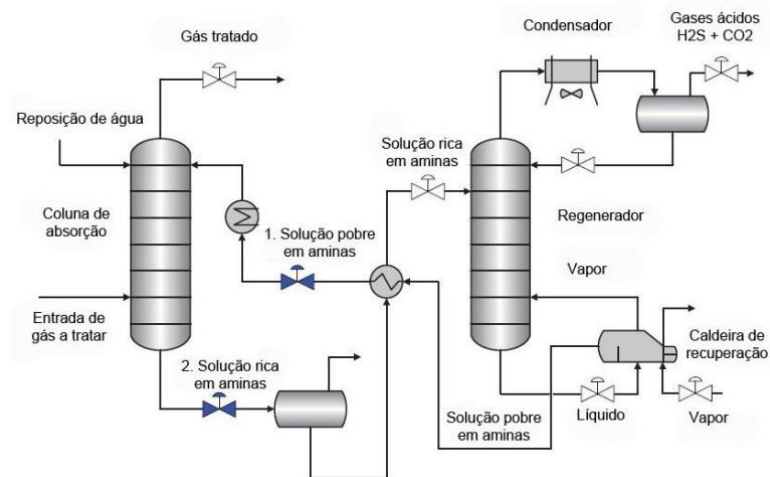


Figura 45 – Processo de absorção química

Fonte: (Metso, 2011)

4.1.3.3.2 Adsorção

A adsorção é um processo físico que envolve a ligação de um gás, neste caso CO₂, à superfície de um solvente sólido, como carvão ativado (Mohammad, M., et al., 2020). Como a adsorção é um processo exotérmico, a regeneração do adsorvente e separação do CO₂ do adsorvente pode ser realizada pela oscilação de pressão, como ilustrado na Figura 46 (Mohammad, M., et al., 2020).

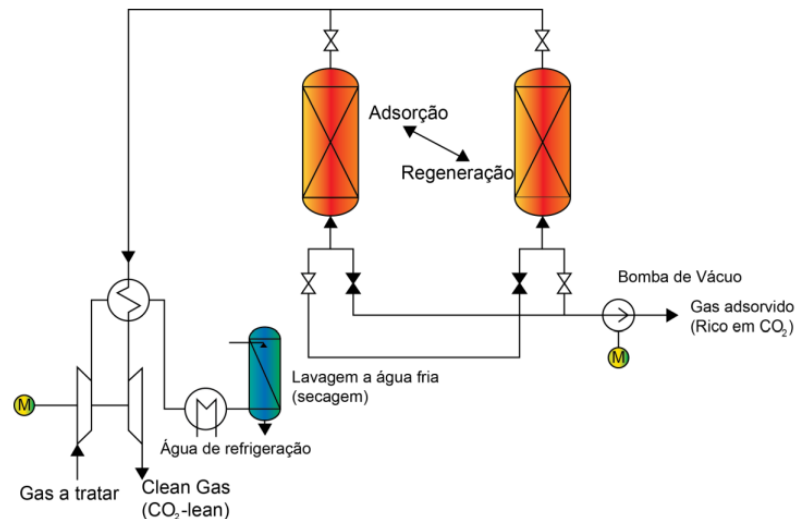


Figura 46 - Adsorção por pressão

4.1.3.3.3 Separação por membrana

A separação por membrana baseia-se na diferença de permeabilidade e pode ser usada para separar seletivamente o CO₂ do gás de síntese através de um material permeável ou semipermeável por mecanismos químicos ou físicos, como transporte de difusão de solução, peneiramento molecular, transporte iônico entre outros (Hong, 2022).

Para haver fluxo através da membrana é necessário existir uma diferença de pressão entre os dois lados da membrana. Assim, o gás com CO₂ é introduzido a pressão elevada no processo de separação por membrana (Salim & Ho, 2018). Ao passar pela membrana o CO₂ perde pressão sendo recuperado a pressão reduzida no fim do processo, como esquematizado na Figura 47.

A energia necessária por unidade de massa de CO₂ separada é menor, na faixa de 0,5–6 MJ/kg de CO₂, em comparação com outras tecnologias existentes (Mondal et al., 2012). No entanto, a baixa eficiência do processo e a diminuta pureza do CO₂ constituem algumas das desvantagens do processo.

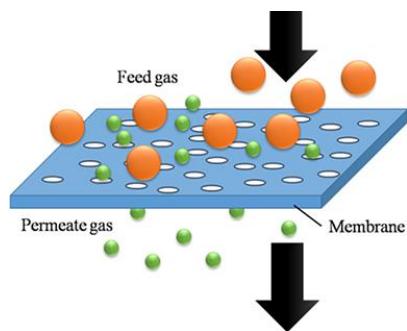


Figura 47 - Processo de separação por membrana

Fonte: (Ji & Zhao, 2017)

4.1.3.4 Transporte, armazenamento e utilização de CO₂

Após a captura e separação do CO₂, o mesmo pode ser comprimido até se encontrar em estado líquido para ser mais facilmente transportado por via de oleodutos (*onshore* ou *offshore*) ou transporte marítimo até ao local de armazenamento. Os custos do transporte variam de acordo com o modo de transporte selecionado, a capacidade de transporte de CO₂ e a distância até ao local de armazenamento ou utilização, tal como se ilustra na Tabela 9.

Tabela 9 - Comparação dos vários meios de transporte

Fonte: (Hong, 2022)

	Quantidade de CO ₂ transportada	Oleodutos		Navios
		Onshore	Offshore	
Custo de transporte (USD/t CO ₂ /180km)	2,5 Mt CO ₂ / ano	6,21	10,69	9,43
	20 Mt CO ₂ / ano	1,72	3,91	12,76
Custo de transporte (USD/t CO ₂ /1500km)	2,5 Mt CO ₂ / ano	NA	59,43	16,67
	20 Mt CO ₂ / ano	NA	18,74	18,51

(Legenda: NA - não aplicável)

Após o transporte, o CO₂ deve ser sujeito a um processo de compressão, de modo a atingir a forma de fluido supercrítico (a temperatura e pressão acima do seu ponto crítico, no qual não existe distinção entre as fases líquida e gasosa), antes de ser armazenado permanentemente. As opções de armazenamento de CO₂ incluem armazenamento geológico, armazenamento oceânico e mineralização (Pires et al., 2011), sendo o primeiro o mais desenvolvido e usado atualmente.

O armazenamento de CO₂ geológico apresenta uma capacidade de armazenamento máxima teórica de 10000 Gt CO₂, sendo 80% dessa capacidade baseada em aquíferos salinos,

geograficamente restritos (IPCC, 2022a). Portanto, sendo a capacidade de armazenamento de CO₂ limitada, uma alternativa viável ao processo, poderá assentar na utilização, imediatamente após o transporte de CO₂, como matéria-prima, por exemplo, para produção de biocombustíveis. Deste modo, os últimos poderão tornar-se importantes futuramente e fazer parte de um portfólio de soluções para enfrentar o problema dos altos preços do petróleo e do esgotamento das reservas de combustíveis fósseis (Rahman et al., 2017).

4.1.3.5 Considerações Finais

Alguns dos processos necessários para a captura e armazenamento de carbono encontram-se já disponíveis comercialmente. Contudo existem outros que requerem mais investimento para poderem alcançar o mesmo patamar (Global CCS Institute, 2021). Além disso, e apesar do potencial da CCS relatado na literatura, o custo do CCS representa um obstáculo significativo a curto e médio prazo, podendo variar consoante o tipo de processo, tecnologia de separação, técnica de transporte e local de armazenamento (Budinis et al., 2018). Nesse sentido, e de acordo com o Global CCS Institute, o número total de projetos de CCS de grande escala caiu de 75 em 2012 para 39 em 2017, tendo o número de projetos em fase operacional aumentado de 8 para 17 no mesmo período, refletindo a viabilidade técnica da presente tecnologia (Budinis et al., 2018).

De forma a ajudar a compreender melhor o nível de prontidão tecnológica e outras características das tecnologias CCS, as Tabela 10 e 11, apresentam uma breve comparação das técnicas de captura e separação de CO₂, relativamente à eficiência de remoção de CO₂, ao consumo de energia utilizado no processo, ao custo da captura de CO₂ e ainda quanto à sua maturidade, segundo a escala de TRL.

Tabela 10 - Características das técnicas de captura

Fonte: (Hong, 2022 e IEA, 2022a)

	Pós-combustão	Pré-combustão	Oxi-combustão	Looping químico
Eficiência de remoção de CO₂ (% vol.)	90	90	> 90	96 a 99
Consumo de energia para captura de CO₂ (GJ/t CO ₂)	4	3,35	4,05	0,95
Custo da captura de CO₂ (USD/t CO ₂)	34 a 61	46 a 74	52	< 60
TRL	6-9	7	5-7	7

Tabela 11 - Características dos processos de separação

Fonte: (Hong, 2022)

	Absorção	Adsorção	Membrana
Eficiência de separação de CO ₂ (% vol.)	85 a 90	88 a 95	70 a 90
Consumo de energia para separação de CO ₂ (GJ/t CO ₂)	3,8	1,2	1,3
Custo da separação de CO ₂ (USD/t CO ₂)	62,8	89,7	80,5
TRL	3-11	5-8	-

É ainda de destacar que a comunidade científica deve continuar o estudo desta tecnologia e procurar encontrar maneira de aumentar a eficiência dos processos de captura de CO₂ e verificar a sustentabilidade ambiental do armazenamento de CO₂ (Rahman et al., 2017).

A Tabela 12 resume a caracterização da tecnologia CCS.

Tabela 12 – Caracterização da tecnologia CCS

TRL	Aumento médio do custo da eletricidade (USD/kWh)	Granularidade	Potencial para descarbonização	Emissões médias de CO ₂ (gCO ₂ -eq/kWh)
2-9	0,19-75 (Rubin et al., 2015)	Baixa	Elevado	-*

*embora existam emissões com a construção das centrais, as emissões desta tecnologia são negativas, já que a mesma remove CO₂ da atmosfera.

4.1.4 Nuclear

O processo de descarbonização em curso implica uma crescente utilização de fontes de energia renovável isentas de emissões durante a respetiva operação. Contudo, muitas destas fontes caracterizam-se pela sua dependência relativamente a condições climatéricas e, portanto, apresentam características de produção intermitente. Por outro lado, o processo de descarbonização tenderá a eletrificar muitas das utilizações de energia que hoje utilizam outras formas de energia, como é o caso dos transportes, o que aumentará significativamente a procura de eletricidade. Assim, pelo menos no curto prazo, tenderá a ser necessário o recurso a outras formas de obtenção de energia (elétrica, em particular) para que se satisfaça o previsível aumento da procura, bem como para estabilizar o sistema elétrico face à intermitência da produção com origem renovável (o armazenamento de energia poderá também aqui desempenhar um papel importante).

A energia nuclear, apesar de permanecer altamente controversa devido aos riscos associados (acidentes nucleares e gestão dos resíduos radioativos) é referida na literatura como uma dessas possíveis soluções (Právǎlie & Bandoc, 2018). Existem dois processos para obtenção de energia por via nuclear, mais especificamente, a fusão nuclear e a fissão nuclear.

O processo de fusão nuclear consiste em juntar núcleos de átomos de elementos leves, como o H_2 , a altas temperaturas, formando hélio e libertando uma enorme quantidade de energia na forma de calor, replicando, assim, o processo de produção de energia no Sol.

Relativamente à fissão nuclear trata-se do processo atualmente utilizado nas centrais de produção de eletricidade em operação, consistindo na divisão do núcleo pesado de uma matéria (como o urânio) em dois núcleos mais leves, com conseqüente libertação de grandes quantidades de energia térmica. Nas centrais nucleares termoelétricas, a energia térmica produzida nos reatores nucleares é utilizada para a produção de vapor que ao ser expandido em turbinas produz energia mecânica de rotação. Esta energia é em seguida aplicada a geradores elétricos que a convertem em eletricidade, como ilustrado na Figura 48. O combustível mais comumente utilizado nos reatores das centrais nucleares é o urânio, o qual apesar de não ser um mineral muito abundante (constituindo apenas duas partes por milhão na crosta terrestre), apresenta uma alta densidade de energia (Gonçalves, 2022).

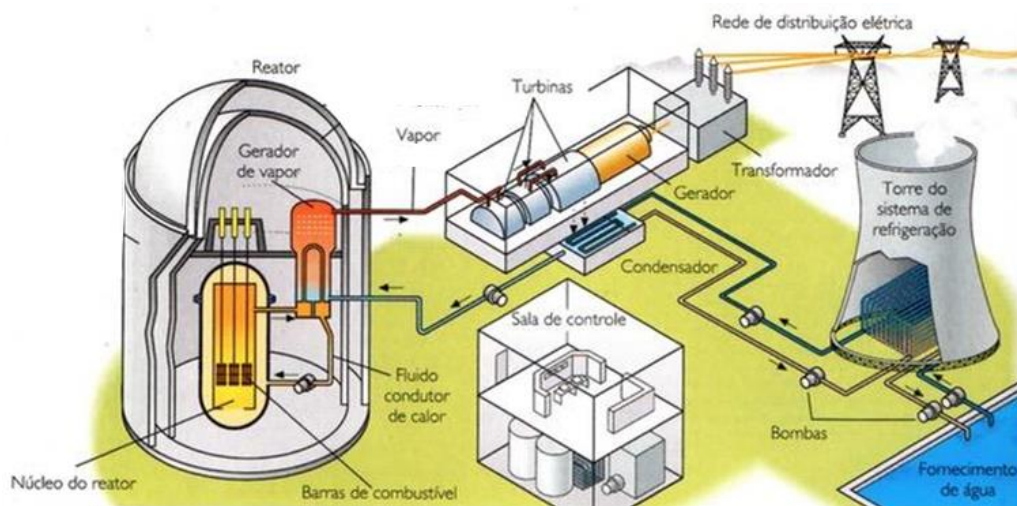


Figura 48 – Central nuclear termoelétrica

Fonte: (Costatore, 2022)

O risco de acidentes nucleares e a quantidade de resíduos altamente radioativos gerados em todo o mundo têm imposto a necessidade de melhorias na energia atômica baseada em fissão (Právǎlie & Bandoc, 2018). Assim, ao longo dos anos, a indústria nuclear tem vindo a

desenvolver e a melhorar a tecnologia de reatores, sendo, neste momento, os reatores de Geração III a tecnologia mais segura em operação.

Os reatores de Geração IV, também conhecidos por pequenos reatores modulares (*SMR* – *Small Modular Reactor*), começaram já a ser projetados, visando conseguir-se uma solução nuclear que seja fiável, económica, segura e com resíduos radioativos mínimos (Gonçalves, 2022). Contudo, não se perspetiva que possam estar operacionais na próxima década. Os SMR são reatores nucleares com capacidade de produção de energia de até 300 MW, exigindo menor investimento inicial e menor tempo de construção do que as centrais nucleares convencionais (DeCotis & Cartwright, 2022). Além disso, devido ao seu menor tamanho, o SMR possui maior escalabilidade e flexibilidade de localização (DeCotis & Cartwright, 2022). Até ao momento, o reator de sal fundido (*Molten Salt Reactor* - MSR) é a tecnologia mais promissora entre esses reatores (Zheng et al., 2018), uma vez que, é adequado para o ciclo do combustível tório, matéria-prima abundante e mais barata que o urânio. Além disso, o rendimento na produção de eletricidade é superior, quando comparado com as centrais convencionais, e a produção de resíduos é substancialmente menor (IAEA, 2022). Uma definição mais detalhada dos vários reatores de geração IV pode ser encontrada em Zheng et al. (2018).

A fissão nuclear, ainda que possa não ser uma solução de longo prazo, é uma tecnologia madura (TRL 7-9) (Nicholas et al., 2021) e pode ser crucial para se ganhar tempo até que a fusão nuclear, atualmente com TRL entre 2 e 3, se torne uma realidade (Gonçalves, 2022). Atualmente existe uma motivação clara para a fusão nuclear, dadas as vantagens sobre a fissão (Nicholas et al., 2021). Contudo, quando o reator de fusão chegar ao mercado, a sua contribuição para o processo de descarbonização poderá já não ser a que teria na atualidade (Nicholas et al., 2021).

UNECE (2021) indica que a energia nuclear é, entre a tecnologias limpas, a que faz menos uso de terreno no seu ciclo de vida. Lazard (2021) realça que o custo nivelado da energia produzida a partir de centrais nucleares é de 0,13 dólares americanos por quilowatt-hora de eletricidade. No entanto, Prävālie & Bandoc, (2018) assinalam a existência de estudos que mostram que as centrais nucleares produzem emissões médias de CO₂ que podem chegar a 66 gCO₂/kWh. Em consonância, Pomponi & Hart, (2021) revelam que as emissões do ciclo de vida para a energia nuclear estão compreendidas entre 8 a 64 gCO₂/kWh. Mesmo considerando o valor de 66 gCO₂/kWh, as emissões da energia nuclear são muito inferiores às dos combustíveis fósseis, e, portanto, utilizar energia atómica e fontes renováveis num contexto

misto pode ser uma solução viável a curto e médio prazo para a eliminação global dos combustíveis fósseis.

A Tabela 13 resume a caracterização da tecnologia Nuclear.

Tabela 13 – Caracterização da energia nuclear

TRL	Custo da eletricidade (USD/kWh)	Granularidade	Potencial para descarbonização	Emissões médias de CO ₂ (gCO ₂ -eq/kWh)
2-9	0,13	Moderada	Moderado	8-66

4.2 Hidrogénio

O H₂ é o elemento mais abundante do universo. No entanto, não está disponível na forma de moléculas isoladas na Terra, sendo necessária energia para o extrair de outros elementos aos quais se liga, como o oxigénio (IRENA, 2022a), (Scita et al., 2020).

Os diferentes métodos de extração de H₂ são caracterizados por um código de cores as quais variam em função do consumo de energia e emissões de CO₂ (Scita et al., 2020). Cerca de 95% do H₂ usado atualmente é H₂ cinzento, obtido pela reforma a vapor do CH₄. Neste caso, a obtenção do H₂ é concretizada a partir de combustíveis fósseis e, por isso, não é compatível com a descarbonização (IRENA, 2022a). Um método alternativo, sugere a adaptação de um sistema de captura e armazenamento de carbono ao procedimento anterior, dando origem a um H₂ com menos emissões e, simultaneamente, mais intensivo em energia, designado por H₂ azul (Esily et al., 2022). Por fim, existe o chamado H₂ verde, livre de emissões, que usa eletricidade renovável para fazer a eletrólise da água (IRENA, 2022a), segundo a equação:



O processo de obtenção de H₂ verde apresenta rendimentos compreendidos entre 60% e 70% (UNECE, 2021e Zhang & Huang, 2012).

Após ser produzido, o H₂ deve ser transportado até ao local de consumo, no estado gasoso ou líquido, ou através da sua conversão noutra combustível (Scita et al., 2020).

No caso do primeiro, pode ser transportado em gasodutos, camiões ou barcos. O transporte de H₂ em gasodutos levanta algumas questões em termos de segurança, relacionadas com as propriedades químicas e físicas do próprio gás, em particular: a capacidade de reagir e fragilizar materiais; a possibilidade de fuga, devido ao reduzido tamanho das suas moléculas; a sua inflamabilidade; e a reduzida quantidade de energia necessária para incendiá-lo (Gerboni,

2016). Ressalva-se que, de forma a mitigar as questões levantadas, o H₂ pode ser misturado com outros gases ou inibidores. Além disso, o H₂ pode ser misturado com o gás natural e transportado em infraestruturas de gás natural existentes sem necessidade de investimento numa infraestrutura dedicada (Guandalini et al., 2017), (Panfilov, 2016). A existência de baixas proporções de H₂ na mistura, compreendidas entre 10 e 20%, são consideradas seguras, afetando apenas negativamente a qualidade do gás em termos do seu poder calorífico bruto (Gondal, 2019). As preocupações surgem quando a fração volumétrica de H₂ excede esses mesmos valores (Altfeld & Dave Pinchbeck, 2013). O H₂ também pode ser distribuído na forma gasosa em tanques a pressões padrão.

Na forma líquida, normalmente, é transportado em camiões ou barcos, que possuam tanques refrigerados com bons isolamentos para manterem o H₂ a temperaturas inferiores aos 253°C negativos, o que evita a passagem das moléculas do estado líquido para o gasoso (IPCC, 2022a).

Assim, problemas no armazenamento continuam a ser um obstáculo à implementação do H₂, sendo necessários outros meios de armazenamento indireto para armazenar e distribuir o H₂ de forma eficiente. A conversão noutra combustível, nomeadamente o CH₄ é uma das soluções possíveis, como abordado na secção 4.4.1.3.

Comparativamente, ao nível da distribuição local de hidrogénio, os camiões provavelmente serão a opção mais barata, porém, até distâncias inferiores a 1500 km também podem ser utilizados gasodutos. Para distâncias mais longas, a conversão em CH₄ pode ser uma opção mais económica (IEA, 2019b).

O H₂ é um transportador de energia sustentável, uma vez que não emite diretamente GEE, e versátil, já que pode ser usado numa ampla gama de aplicações, incluindo indústria, transporte rodoviário de longa distância, transporte marítimo, aviação, aquecimento e armazenamento sazonal (IRENA, 2022a).

Assim, o H₂, em especial o H₂ verde, pode desempenhar um papel fundamental na transição energética, tendo a capacidade de substituir os combustíveis fósseis em setores difíceis de descarbonizar/eletrificar (Scita et al., 2020). Contudo, existem ainda várias barreiras que impedem a contribuição plena do mesmo para a transição energética, a saber:

- Custo: O custo do H₂ verde ainda é alto em relação ao H₂ cinzento, assumindo normalmente valores entre 3,75 e 1,5 dólares por quilo, respetivamente (Scita et al.,

2020). Estima-se que o custo do H₂ verde venha a ser equivalente ao custo do H₂ cinza até ao ano de 2035 (Esily et al., 2022).

- Maturidade tecnológica: Algumas tecnologias na cadeia de valor do H₂ ainda têm um baixo nível de prontidão tecnológica, por exemplo, turbinas a gás que operem exclusivamente com H₂ (IRENA, 2022a).
- Baixa densidade energética: A baixa densidade do H₂ torna-o mais difícil de armazenar do que os combustíveis fósseis (Kovač et al., 2021).
- Uso de água: O H₂ verde pode ser produzido onde houver água e eletricidade. Porém, aceder a água em locais não marítimos pode ser uma preocupação, especialmente porque a escassez de água já é um problema sério e crítico que pode crescer como resultado das alterações climáticas (Esily et al., 2022). Assim, a dessalinização pode vir a ser uma solução para potenciar a produção de H₂ verde num planeta cada vez mais seco, embora exija consumos adicionais de energia num percurso já penalizado por uma baixa eficiência de conversão (IRENA, 2022).
- Segurança: o H₂ é um elemento altamente volátil e inflamável.
- Eficiência: A produção, o transporte e a conversão de H₂ incorrem em perdas significativas de energia. Converter eletricidade em H₂ e depois convertê-lo novamente em eletricidade, tem perdas de eficiência que podem ser de mais de 70%, ou seja, por cada unidade de entrada de eletricidade, apenas conseguimos voltar a obter cerca de 30% dessa mesma unidade (Scita et al., 2020).
- Eletricidade renovável suficiente: O uso de H₂ verde em detrimento de H₂ cinzento, economizaria cerca de 830 milhões de toneladas de CO₂ emitidas anualmente. Por outro lado, esta mudança exigiria 3.000 TWh/ano de eletricidade renovável (Iberdola, 2022). Quanto mais os setores de uso final são eletrificados, mais a falta de eletricidade renovável se pode tornar um gargalo para o H₂ verde.
- Incerteza política e regulatória: Embora vários países se tenham comprometido a alcançar as emissões líquidas zero, a velocidade com que esses objetivos serão alcançados permanece incerta (IRENA, 2022a).
- Infraestruturas e investimentos: A construção de infraestruturas necessárias, por exemplo, para reabastecimento de veículos a H₂, só poderá ser viável, se houver um determinado número de veículos deste tipo, caso contrário, os investimentos são arriscados (IRENA, 2022a).

Atualmente, o H₂ verde representa menos de 1% da quantidade total de H₂ produzido (Sustainability for all, 2019). No entanto, espera-se que a procura global por H₂ verde aumente exponencialmente nos próximos 20 anos, ao mesmo tempo que o seu custo diminuirá e se tornará competitivo com o preço do H₂ cinzento (Sustainability for all, 2019).

As emissões dependem quase inteiramente da eletricidade utilizada como insumo energético, que no caso do H₂ verde, diz respeito a eletricidade produzida por fontes renováveis, e por isso o valor pode variar consoante o tipo de fonte.

A Tabela 14 resume parâmetros que abrangem a produção e utilização de H₂.

Tabela 14 – Caracterização da utilização de hidrogénio

TRL	Custo do H ₂ (\$/kg)	Granularidade	Potencial para descarbonização	Emissões médias de CO ₂ (gCO ₂ -eq/kWh)
2-9	2,15	Moderada	Alto	-*

* As emissões no caso do hidrogénio verde, dependem das emissões associadas à produção da energia primária. Supondo a produção de eletricidade produzida a partir de fontes renováveis, as emissões do hidrogénio são próximas de zero, existindo apenas as emissões associadas à produção dos equipamentos de produção, armazenamento e reconversão de hidrogénio.

4.3 Lado da procura

4.3.1 Eficiência energética

A transição para uma economia verdadeiramente sustentável impõe que, para além da alteração das fontes de energia, se desenvolva uma utilização da energia mais eficiente, justa e equitativa. O Cenário de Desenvolvimento Sustentável da IEA aponta a eficiência energética como tendo o potencial necessário para representar mais de 40% da redução necessária de emissões de gases de efeito de estufa até 2040 (How Energy Efficiency Will Power Net Zero Climate Goals – Analysis, 2022).

A utilização eficiente da energia envolve a redução do consumo desnecessário em muitos usos finais, reduzindo o consumo de energia primária. Deste modo, a eficiência energética contribui para a redução das contas de energia e, concomitantemente, para minimizar os efeitos da volatilidade dos preços (IEA, 2021a), para a redução das emissões de CO₂ e para a menor necessidade de importação de energia (Zakari et al., 2022). A eficiência na utilização dos materiais é também crítica, sendo necessário privilegiar uma economia circular onde a redução dos consumos vem acompanhada da necessidade de reutilizar e reciclar (E-Redes, 2022).

A eficiência energética pode ser alcançada através de várias medidas, tomando como exemplos, a eletrificação, a mudança de comportamento e a substituição de equipamentos pelos seus equivalentes mais eficientes (IEA, 2021a).

4.3.1.1 Eficiência na indústria

Na indústria pesada, por exemplo, parte das emissões de CO₂ poderia ser evitada reutilizando aço, alumínio e plásticos de forma mais eficaz. Também durante o processo de fabrico dos materiais supramencionados é possível melhorar a eficiência na utilização de energia. Por exemplo, a melhoria da eficiência energética do processo de fabricação de ferro e aço de 64,00% para 68,20%, permite reduzir o consumo de energia de 15,76 GJ/t para 12,31 GJ/t, e consequentemente as emissões de CO₂ associadas (Na et al., 2022).

O hidrogénio verde, abordado na secção 4.2, é também um portador de energia que poderá ganhar dimensão na indústria, e ajudar a reduzir as emissões provenientes da utilização do gás natural em vários processos industriais.

Ao nível tecnológico, espera-se que várias tecnologias, incluindo as bombas de calor abordadas na secção 4.3.1.2.2, possam ajudar a substituir equipamentos intensivos em energia, nomeadamente para a produção de calor.

4.3.1.2 Eficiência nos edifícios

A redução da pegada de carbono de edifícios comerciais ou residenciais é relevante, já que este setor é responsável por um terço do consumo global de energia e, consequentemente, pelas emissões de carbono relacionadas a essa energia (Becqué, R. et al., 2019). No entanto, nos últimos anos verificou-se uma diminuição da intensidade energética dos edifícios, tal como apresentado na Figura 49 (Ürge-Vorsatz et al., 2020).

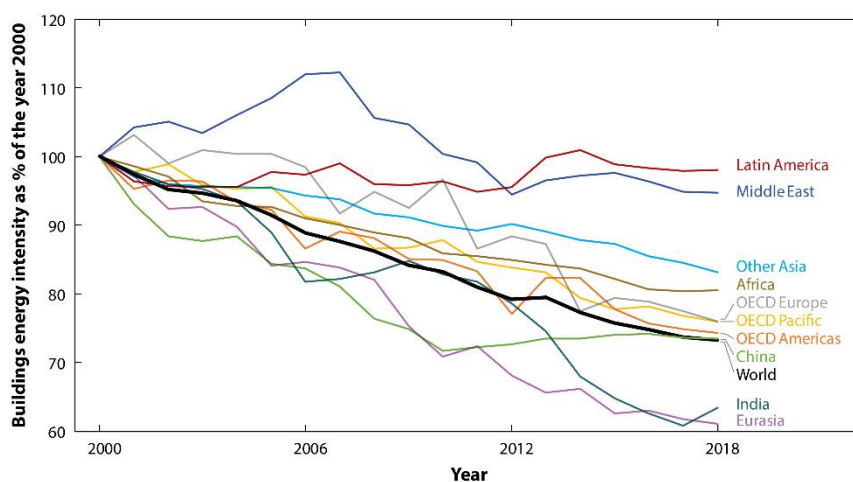


Figura 49 - Tendência da intensidade energética dos edifícios por região
 Fonte: (Ürge-Vorsatz et al., 2020)

4.3.1.2.1 NZEB

Os edifícios de emissão quase zero (NZEB) têm várias definições globalmente aceites. Casini (2016) define os NZEB como edifícios com desempenho energético muito elevado, caracterizados por uma necessidade energética anual muito baixa ou quase nula que é totalmente ou muito significativamente coberta por energias renováveis, incluindo energia de fontes renováveis produzidas no local ou nas proximidades. Similarmente, Shirinbakhsh & Harvey (2021), caracterizam os NZEB como sendo edifícios altamente eficientes, em termos energéticos, que produzem quase tanta energia a partir de fontes renováveis, seja em autoconsumo ou em comunidade de energia, quanto aquela que consomem durante um período de tempo específico, geralmente um ano (Shirinbakhsh & Harvey, 2021). Uma representação de um NZEB pode ser observada na Figura 50.

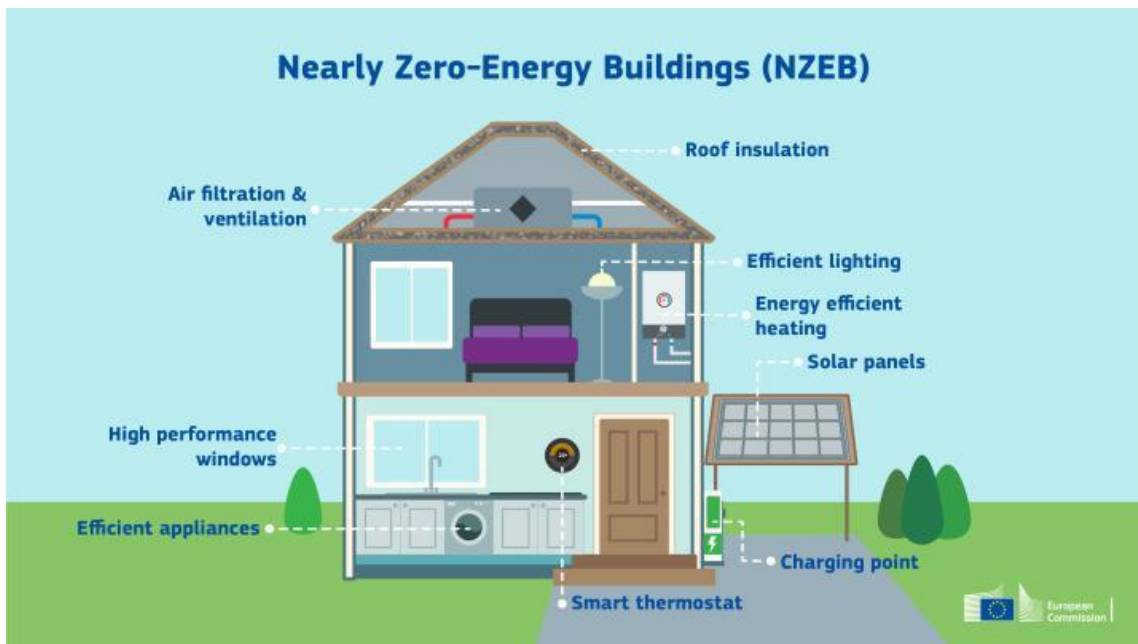


Figura 50 – NZEB

Fonte: (European Commission, 2022b)

Embora o conceito NZEB seja aplicável a uma ampla gama de recursos, nomeadamente água, resíduos e energia, entre outros, a energia é, geralmente, o recurso ao qual é dada maior atenção, já que é mais caro, tem uma pegada de carbono mais elevada e já existem meios bem estabelecidos para reduzir significativamente o seu uso (Steven Winter Associates, 2016).

O leque de componentes que pode integrar um NZEB é vasto e diferente para cada caso. Paoletti et al. (2017) apresentam um estudo que revela que a ventilação mecânica e os sistemas de recuperação de calor (capazes de suprir as necessidades de aquecimento e arrefecimento ambiente e águas quentes sanitárias) são as tecnologias mais recorrentes em 411 edifícios europeus de alto desempenho energético. No entanto, existem várias outras tecnologias e medidas que permitem mitigar as emissões associadas a este setor e que podem fazer parte de um NZEB, como a instalação de bombas de calor, melhores isolamentos de paredes, janelas com classe de eficiência superior, iluminação natural ou de baixo consumo, entre outras ((Steven Winter Associates (2016) e Chen Austin et al. (2021)).

Deste modo, um NZEB apresenta uma série de vantagens, como: obter equidade, melhorando o acesso à energia para todos (Becqué, R. et al., 2019); reduzir a pobreza energética (Becqué, R. et al., 2019); aumentar a eficiência energética e, conseqüentemente, diminuir as emissões de CO₂. Além disso, a produção local de energia torna-os mais resilientes a falhas na rede de energia (Shirinbakhsh & Harvey, 2021).

Ao mesmo tempo, a baixa densidade das energias renováveis constitui uma dificuldade à implementação deste tipo de tecnologias em edifícios. Tal facto, justifica-se pela área disponível para instalação destas infraestruturas em edifícios (prédios ou arranha-céus) ser limitada (Shirinbakhsh & Harvey, 2021). Por esse motivo, dever-se-á enfatizar uma abordagem focada na eficiência energética.

Estimativas de 2017 indicam que existiam apenas cerca de 2500 NZEBs em todo o mundo, 500 edifícios comerciais e 2000 unidades habitacionais (Becqué, R. et al., 2019). Este número está longe do esperado e muito deve ser feito nos próximos anos, a fim, de se continuar a verificar uma diminuição da intensidade energética dos edifícios.

4.3.1.2.2 Bomba de calor

As bombas de calor utilizam um fluido e eletricidade para extrair energia térmica de uma fonte de baixa temperatura (ar, solo ou água) e, de seguida, fornecer calor num dissipador de alta temperatura (Y. Wang et al., 2022). A presente tecnologia, pode ser classificada, tendo em consideração a fonte de calor e o fluido de transferência de calor que utiliza, sendo designadas por bombas de calor aerotérmicas e geotérmicas, como observado na Figura 51.

No caso das bombas de calor aerotérmicas, com custos de instalação menores face aos restantes tipos, estas usam o ar externo como fonte de calor. Além disso, podem ser divididas em bombas de calor ar-ar e ar-água de acordo com o fluido de transferência de calor (Carvalho, 2015). Porém, este sistema tem sido pouco adotado em climas frios, já que a sua eficiência diminui à medida que a diferença de temperatura, entre a fonte de calor e o dissipador de calor, aumenta. (Carvalho, 2015). Relativamente bombas geotérmicas, estas podem ser subdivididas em bombas de calor de fonte de água e bombas de calor de fonte de solo. As que dependem de água de poços ou lagos como fonte de calor são ainda subdivididas em bombas água-ar e água-água de acordo com o fluido de transferência de calor (Carvalho, 2015). Apesar de se constituir como um sistema de baixa ocupação do solo (Rocha, 2016), vários fatores restringem seriamente a ampla aplicação destes sistemas, tal como, a disponibilidade limitada de grandes corpos d'água próximos à instalação (Gaur et al., 2021), o alto custo de manutenção devido à corrosão nas tubulações e equipamentos (Sarbu & Sebarchievici, 2014), o risco de seca ou a passagem da água ao estado sólido em climas mais extremos e a exigência de permissão regulatória para a instalação (Gaur et al., 2021). Já as que dependem do solo como fonte de calor, utilizam o ar ou um fluido anticongelante como permutadores de calor (Carvalho, 2015).

Este sistema beneficia do facto da temperatura do solo ao longo do ano permanecer, aproximadamente, constante (Carvalho, 2015), sendo que a sua instalação pode ser em furos verticais e valas horizontais (Sarbu & Sebarchievici, 2014). O formato vertical, constitui-se como um dos mais comuns, uma vez que necessita de uma baixa área de ocupação (Rocha, 2016). Contrariamente, o método de instalação horizontal representa uma solução mais económica, apesar de ocupar uma área significativamente superior (Rocha, 2016) e ser inadequado para edifícios urbanos (Y. Wang et al., 2022).

Face ao exposto, a melhor solução depende das condições locais, como as características hidrológicas, geológicas e espaciais do terreno (Carvalho, 2015).

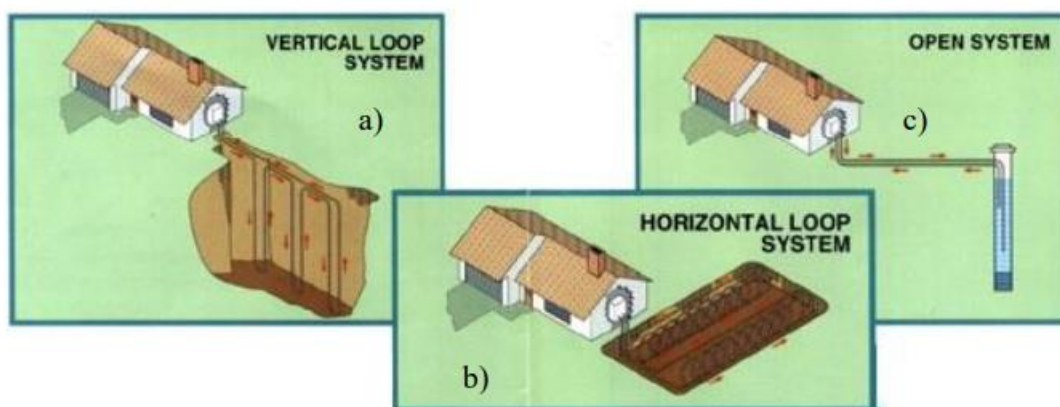


Figura 51 – a) Bomba de calor geotérmica de formato vertical; b) Bomba de calor geotérmica em vala horizontal; c) Bomba de calor de água subterrânea

Fonte: (Rocha, 2016)

Os presentes equipamentos são caracterizados pelo coeficiente de desempenho (COP – Coefficient of Performance), definido como a razão entre a energia térmica útil e a energia elétrica consumida (IRENA, 2013). As bombas de calor supramencionadas apresentam diferentes valores de COP, como observável na Tabela 15 - COP dos diferentes tipos de bombas de calor.

Tabela 15 - COP dos diferentes tipos de bombas de calor

Fonte: (IRENA, 2013)

Tecnologia	Custo de instalação	COP médio
Bomba de calor de fonte de ar	+	2-4
Bomba de Calor de fonte de água	+++	3,5-5,5
Bomba de Calor de fonte de solo	+++	3-5

As principais barreiras ao uso generalizado de bombas de calor prendem-se com os altos custos de investimento face às soluções equivalentes (IRENA, 2013). No entanto, esses custos são contrabalançados por economias durante a fase de operação e ganhos ambientais, que no limite poderão ser zero, dependendo das emissões associadas à energia primária (Y. Wang et al., 2022), (Gaur et al., 2021), como evidenciado na Tabela 16.

Tabela 16 - Comparação de bombas de calor com soluções equivalentes a combustível fóssil

Fonte: (Sarbu & Sebarchievici, 2014)

Sistema	Eficiência	Emissão de CO ₂ por kWh de calor útil (kg CO ₂ /kWh)
Caldeira a gasóleo	0,8	0,35
Caldeira a gás natural	0,8	0,24
Bomba de calor	3 - 5,5	0 - 0,19

4.3.1.3 Eficiência nos transportes

O consumo de eletricidade deverá aumentar até ao ano de 2030, sendo que o maior responsável será, tendencialmente, o setor dos transportes (IEA, 2022b). Até ao final da década, estima-se a existência de 65 milhões de VE nas estradas da Europa, um número que deve chegar a 130 milhões em 2035 (EY & Eurelectric, 2022).

O carregamento não controlado de VE pode criar problemas para a rede local e para a qualidade da energia. Caso se presenciem aumentos rápidos e imprevisíveis na procura de eletricidade para carregamento de VE, provavelmente serão causadas flutuações na tensão e perdas de energia, resultando num aumento dos preços da eletricidade.

O desafio é exacerbado quando os períodos de ponta de carregamento dos VE coincidem com os atuais períodos de ponta do sistema elétrico. Desta forma, é crítico o papel ativo por partes dos consumidores e do auxílio de ferramentas e tecnologias inovadoras de gestão do lado da procura, que permitirão controlar o momento e duração do carregamento (Sovacool & Hirsh, 2009). O carregamento inteligente ajudará a mitigar o impacto da ligação de milhares de VE à rede, reduzindo a ponta, o congestionamento da rede e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da energia (Sovacool & Hirsh, 2009).

Destaca-se que à medida que a adoção de VEs aumenta, estes podem desempenhar um papel importante no suporte à operação do sistema energético, a partir da tecnologia *vehicle-to-grid* (V2G) (Sovacool & Hirsh, 2009). O conceito V2G possibilita um fluxo elétrico

bidirecional controlável entre os VE e a rede (Zhou et al., 2020). Em consequência, atendendo a que a maioria dos VE circula apenas uma a duas horas por dia (Sovacool & Hirsh, 2009), estes poderão ser utilizados para armazenar energia quando esta for excedentária e apresentar um menor custo, desde que os VE estejam equipados com tecnologia V2G e se encontrem ligados à rede. Assim, os VE poderão carregar as respectivas baterias com energia que poderá ser utilizada, posteriormente, na sua função de locomoção ou para disponibilizar para a rede quando a mesma for escassa e mais dispendiosa (Zhou et al., 2020). Neste cenário, os VE passam a ser perspetivados enquanto dispositivos de armazenamento distribuído, podendo ajudar a integrar elevadas penetrações de fontes renováveis na matriz elétrica. Ou seja, como é exemplificado na Figura 52, ocorrerá um maior acoplamento entre o setor dos transportes e da produção de energia (Zhou et al., 2020).

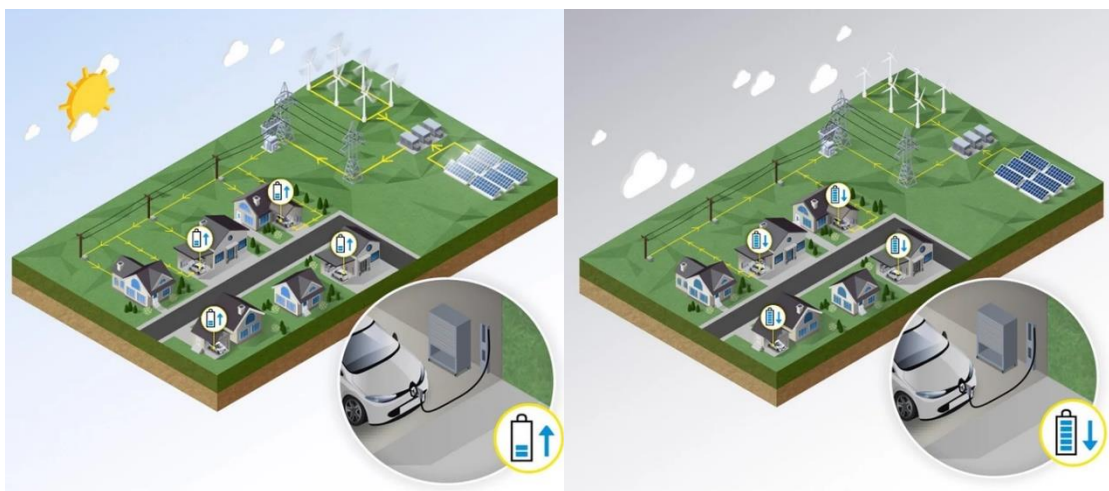


Figura 52 - Acoplamento do setor dos transportes e de produção de energia através da tecnologia V2G
Fonte: (blueauto, 2019)

Os proprietários dos VE deixariam de ser agentes passivos e passariam a poder entrar no mercado de energia (Zhou et al., 2020). Deste modo, seria apenas necessário que o tarifário refletisse, em cada instante, o equilíbrio entre a oferta e a procura de energia e essa informação fosse difundida em tempo-real (Zhou et al., 2020).

Ao nível das baterias, a utilização de mais ciclos de carga e descarga, diminui a sua capacidade de forma mais rápida, comparativamente, à estratégia de carregamento apenas quando necessário (D. Wang et al., 2016), o que denota uma desvantagem do uso da tecnologia V2G. Contudo, o desempenho das baterias e os ciclos de vida podem ser alargados e o processo

tornado mais eficiente através do controlo adequado da bateria durante a sua carga e descarga, por exemplo, com algoritmos de antienvelhecimento da bateria (Li et al., 2020).

4.3.1.4 Digitalização na eficiência de energia

A digitalização tem um impacto ao longo de toda a cadeia de valor da energia, desde a produção ao consumo. As tecnologias digitais tornarão os sistemas de energia mais interligados, inteligentes, eficientes, confiáveis e sustentáveis (European Commission, 2022a). Tecnologias de informação e comunicação (TIC), sensores, *big data*, inteligência artificial, *blockchain* e a internet das coisas (IoT), são alguns exemplos de tecnologias digitais.

Assim, a digitalização oferece o potencial de aumentar a eficiência energética através de uma combinação de tecnologias que executam três tarefas essenciais, a saber (Jeremy Sung, 2019): i) aquisição de dados, incluindo tecnologias como sensores e contadores inteligentes, que adquirem dados relativos ao consumo de energia e outras condições que o afetam (por exemplo o clima); ii) análise de dados, sendo que os algoritmos permitem o processamento e a análise dos dados para produzir perspetivas sobre a forma como a energia pode ser usada de forma mais eficiente. Por exemplo, a previsão do consumo de energia pode melhorar a resposta à procura de energia (European Commission, 2022a) e/ou capacitar os consumidores, dando-lhes um papel mais ativo na gestão do seu consumo de energia (*Digitalization as a key Enabler for the Energy Transition*, 2020); iii) atuação no meio físico, sendo que os equipamentos incorporados com tecnologias digitais e atuadores, podem otimizar o uso de energia instantaneamente, com base em sinais digitais (IEA, 2022d). Por exemplo, equipamentos de aquecimento de água e ar condicionado podem ser programados para otimizar o uso de energia, dependendo da hora do dia, dos níveis de ocupação do espaço, entre outros. Assim, é possível reduzir o desperdício e equilibrar a oferta e a procura em diversos períodos. Isto é especialmente útil à medida que a participação de fontes renováveis intermitentes de energia aumenta (Xu et al., 2022).

As tecnologias como o *blockchain*, não terão impacto direto na descarbonização, contudo, podem permitir, por exemplo, o comércio de energia ponto a ponto, impulsionando dessa forma a adoção de fontes de energia renovável (Wongthongtham et al., 2021).

Outro exemplo é o teletrabalho, que pode permitir reduzir as emissões e energia gastas no transporte casa-trabalho e vice-versa, através da redução da deslocação de e para o local de trabalho (Zakeri et al., 2022).

No entanto, o impacto da digitalização no lado da procura é complexo. Por um lado, os dispositivos digitais oferecem um potencial de melhoria na eficiência energética, por outro, mais dispositivos, traduzem-se num aumento do consumo de energia. Deste modo, se o uso da digitalização não for ponderado, em vez da eficiência de energia, o uso destas tecnologias pode mesmo fazer aumentar o seu consumo (Lange et al., 2020). A aliar a isso, a digitalização e o uso extensivo de dados trazem um conjunto de desafios de armazenamento de dados e segurança dos mesmos (European Commission, 2022a).

4.3.2 Veículos elétricos

A eletrificação do setor dos transportes está a ocorrer devido ao agravamento das alterações climáticas e à escassez de petróleo (Muthukumar et al., 2021). No entanto, o setor continua a ser dominado pelos combustíveis fósseis (Benjamin Leard & Virginia McConnell, 2020), respondendo por cerca de um quarto das emissões totais de GEE, a nível mundial (IEA, 2019a). Cerca de 70% dessas emissões estão associadas a veículos rodoviários, enquanto 1%, 11% e 12% dizem respeito aos transportes ferroviário, marítimo e aviação, respetivamente (IPCC, 2022a).

À medida que o futuro da indústria automóvel se afasta do motor de combustão interna, surgem várias alternativas, designadamente, os veículos elétricos a célula de combustível (FCEV) e os veículos elétricos a bateria (BEV). Os primeiros, utilizam o H₂ como combustível e convertem o mesmo em eletricidade. Os segundos são alimentados por uma bateria que é carregada quando ligada à rede elétrica. O carregamento dos BEV representará um desafio para a rede elétrica, na medida em que, no caso de não ser controlado, pode provocar sobrecargas no sistema elétrico nos horários de ponta, como anteriormente mencionado.

O número global de BEV tem assumido uma tendência crescente, tendo registado no início do ano de 2021, mais de 11 milhões de veículos (Plötz, 2022). Comparativamente, os FCEV não são ainda uma tecnologia comercializada de forma significativa. Assim, a partir destes números, percebe-se que existe uma clara tendência para a adoção de BEV, como observado na Figura 53. A perspetiva é de que os BEV venham a dominar o setor dos transportes nos próximos anos, devido à tendência de custo decrescente (BloombergNEF, 2021), ao TRL compreendido entre 8 e 9 (IEA, 2020) e ao desenvolvimento das baterias (Ritchie, 2021).

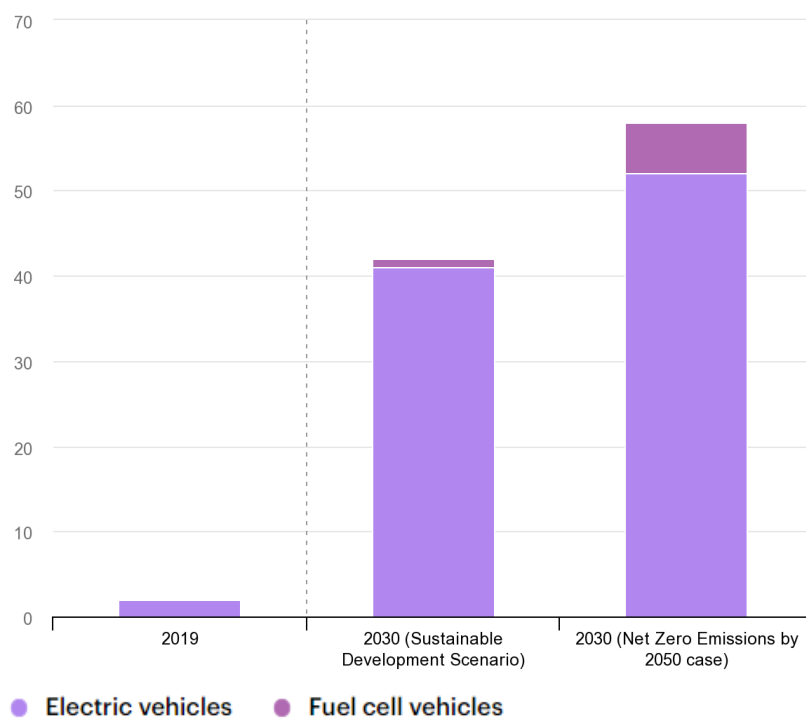


Figura 53 – Percentagem de BEV e FCEV no total de vendas de carros em 2019 e espectável, de acordo com o Cenário de Desenvolvimento Sustentável

Fonte: (IEA, 2022c)

No que diz respeito às emissões associadas, a fabricação das baterias é o principal contribuinte para as emissões de GEE durante a fase de produção de BEVs (Xia & Li, 2022). Na fase de uso, as emissões dependem do *mix* de energia usado para carregar as baterias, sendo que se o carregamento for feito com recurso a energia renovável, as emissões serão nulas e podem compensar o impacto ambiental causado durante a fase de produção do BEV. No entanto, os BEV podem exacerbar ainda mais as emissões na fase de transição, onde a energia é produzida a partir de combustíveis fósseis, como mostra a Figura 54 (Xia & Li, 2022), (Athanasopoulou et al., 2018).

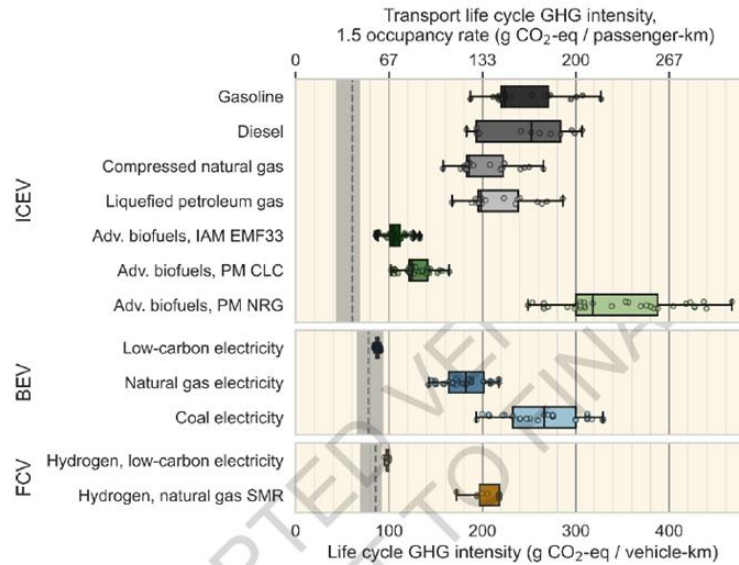


Figura 54 - Mediana das emissões do poço-às-rodas

Fonte: (Xia & Li, 2022)

Além das emissões, há preocupações com a disponibilidade de recursos e custos de minerais críticos necessários para produzir baterias de lítio, pelo que a padronização de módulos de baterias, a reutilização e reciclabilidade das mesmas, devem ser tidas em consideração para reaproveitar os minerais supracitados (IPCC, 2022a).

As desvantagens mais significativas dos carros elétricos são a sua autonomia e o tempo de carregamento. Dependendo do tamanho da bateria e da potência da estação de carregamento, a autonomia e os tempos de carregamento podem ser maiores ou menores, dificultando o uso de um BEV, principalmente em viagens longas. No entanto, as baterias têm vindo a alcançar maiores densidades de energia e, caso essa tendência permaneça, podem ser a tecnologia eleita para aplicação em camiões (IRENA, 2020).

No entanto, devido à dificuldade de eletrificação de veículos pesados, transporte marítimo e aviação, o combustível de futuro destes transportes permanece em aberto. Face ao exposto, o H₂ poderá ter um papel pertinente no setor dos transportes, no sentido de complementar a eletrificação.

O H₂ pode ser viável no transporte pesado de longas distâncias, pois permite autonomias semelhantes e rapidez de carregamento idêntica à de um veículo pesado movido a combustíveis fósseis. Deste modo, a construção de postos de abastecimento de H₂ torna-se um passo fundamental. Embora se espere que o custo de implementação diminua à medida que mais postos de abastecimento são construídos, estas infraestruturas apresentam custos por veículo

três a quatro vezes superiores às infraestruturas de reabastecimento de BEV (IRENA, 2021). Além disso, estas infraestruturas requerem um número mínimo de FCEVs, ao contrário das estações de carregamento para BEV que podem ser implantadas para um único veículo. Portanto, o investimento em postos de abastecimento de H₂ é arriscado, sem garantir que haverá procura no médio e longo prazo. Num momento inicial, o H₂ pode ser produzido localmente em estações menores, para abastecimento de frotas de autocarros e camiões (IRENA, 2021).

Em jeito de conclusão, os desenvolvimentos em baterias e tecnologias de carregamento rápido, aliados ao custo inferior dos BEVs face aos FCEV, como evidencia a Tabela 17, podem tornar os últimos supérfluos no transporte rodoviário (Plötz, 2022),.

Tabela 17 - Investimento inicial em BEVs e FCEVs

	BEVs	FCEVs
Custo capital (€)	> 25482 (REF)	> 36883 (REF)

4.4 Infraestruturas e tecnologias transversais

4.4.1 Armazenamento

Uma questão a ter em conta quando se fala de energias renováveis é a discrepância temporal entre a oferta e a procura, uma vez que a produção de energia renovável nem sempre ocorre de forma sincronizada com o consumo. Espera-se que essa discrepância aumente devido ao aumento da utilização de fontes renováveis distribuídas para a produção de eletricidade (Koirala et al., 2018). Portanto, são necessárias soluções que proporcionem flexibilidade e possibilitem o desacoplamento entre produção e utilização da energia. O armazenamento de energia pode ser utilizado para possibilitar essa flexibilidade temporal, permitindo que a energia possa não ser utilizada no mesmo período em que é produzida (Sisternes et al., 2016; Gallo et al., 2016).

Na literatura científica é possível encontrar diversos estudos relacionados com o armazenamento de energia, tais como (Evans et al. (2012) , Hall & Bain (2008) , Ferreira et al. (2013) e Zakeri & Syri, (2015)). Os autores descrevem algumas características técnicas dos sistemas de armazenamento, como potência estipulada, tempo de descarga, eficiência, densidade de energia, densidade de potência, vida útil, custo e maturidade. As características assinaladas podem ser consideradas uma ferramenta valiosa para selecionar sistemas de armazenamento adequados para uma aplicação particular (Gallo et al., 2016). Por exemplo, uma maior densidade de energia - energia acumulada por unidade de volume ou massa - permite que

o sistema de armazenamento responda a interrupções mais longas, enquanto uma maior densidade de potência - taxa de transferência de energia por unidade de volume ou massa - possibilita o fornecimento de fluxos de maior amplitude (Lund et al., 2015).

O leque de tecnologias de armazenamento é vasto, podendo incluir armazenamento hidroelétrico bombeado, supercondensadores, baterias, entre outras, em diferentes escalas. A predominância no uso de armazenamento de hidroeletricidade bombeada (PHS) tem permanecido ao longo dos últimos anos, contudo, recentemente, maior atenção da comunidade científica tem sido dada às baterias e ao *power-to-gas* (PTG).

4.4.1.1 Armazenamento hidroelétrico bombeado

O armazenamento hidroelétrico bombeado (PHS) é o sistema de armazenamento de larga escala mais maduro (TRL=9) e implementado em todo o mundo, compreendendo cerca de 97% da capacidade global de armazenamento de energia (EIA, 2018), (IRENA, 2017) (Sandia National Laboratories, 2021). O presente sistema armazena energia na forma de energia potencial gravítica, bombeando água entre dois reservatórios localizados em cotas diferentes. Quando existe produção de eletricidade renovável em excesso, a água é bombeada do reservatório inferior para o reservatório de água superior. Quando a procura de energia elétrica é alta, o fluxo de água é invertido e a água acumulada no reservatório superior é libertada em direção ao reservatório inferior, fazendo girar as pás de uma turbina, que ao estar mecanicamente acoplada a um gerador, produz eletricidade (Chen et al., 2009). O potencial hidroelétrico é assim diretamente proporcional à diferença de cota entre os dois reservatórios e ao caudal de água que passa pela turbina (Gallo et al., 2016).

O PHS pode operar várias horas e armazenar grandes quantidades de energia ao longo de vários meses, com emissões típicas do ciclo de vida de cerca de 145 gCO₂/kWh (UNECE, 2021). Além disso, é um sistema que apresenta custos de armazenamento de 186 \$/kWh (2019; Mongird et al., 2020), eficiência energética entre 70 e 80% (Jafari et al., 2022) e uma vida útil de 40 a 60 anos (Gallo et al., 2016).

Apesar das vantagens supramencionadas, a construção do PHS pode causar transtornos à comunidade e ao meio ambiente em caso de rutura de um dos reservatórios (Hayes et al., 2019). Além disso o investimento inicial é elevado (IPCC, 2022b), exige topografia adequada (Kapsali et al., 2012, Javed et al., 2020), pode ser inviável em locais com escassez de água e

apresenta densidade de energia baixa, 0,5-1,5 Wh/l, o que explica o tamanho dos reservatórios (Gallo et al., 2016).

O desenvolvimento futuro de PHS inclui sistemas de funcionamento em ciclo fechado, o que permite a sua aplicação mesmo em climas com escassez de água.

4.4.1.2 Baterias

De uma forma geral, uma célula de bateria recarregável é carregada usando eletricidade para conduzir iões de um elétrodo para outro, ocorrendo o inverso na descarga, produzindo uma corrente elétrica utilizável (Crabtree et al., 2015).

As baterias são modulares, pois resultam da associação de duas ou mais células interligadas em série e/ou em paralelo, de forma a obter-se a tensão desejada, e normalmente caracterizam-se por tempos de resposta curtos (IPCC, 2022b). Entre os vários tipos de baterias, as baterias de lítio são a opção mais popular, controlando mais de 90% do mercado global de armazenamento baseado em bateria (EESI, 2019).

A eficiência do presente sistema de armazenamento encontra-se compreendida entre os 70 e os 90% (Jafari et al., 2022), sendo 86% o valor típico para baterias de iões de lítio (Augustine & Blair, 2021). As desvantagens das baterias incluem a vida útil relativamente curta (5 a 15 anos) (Jafari et al., 2022), preocupações com a disponibilidade de recursos a longo prazo (Sun et al., 2017) e o custo elevado (285\$/kWh) (Mongird et al., 2020), apesar deste apresentar tendência para rápida diminuição (Schmidt et al., 2017).

Outros tipos de baterias têm surgido na literatura científica, resultando num TRL vasto entre 3 e 9 (Luca et al., 2020), a saber: as baterias de lítio-enxofre, para se conseguir atingir densidades de energia maiores (Blomgren, 2017); as baterias de fluxo redox, por apresentarem ciclos de vida longos (EESI, 2019); as baterias de sódio, uma vez que o sódio é um elemento mais abundante que o lítio (Hwang et al., 2017); e as baterias de estado sólido (Janek & Zeier, 2016), onde o eletrólito líquido convencional, reativo ao ar e, portanto, fonte de vários problemas de segurança, é substituído por um eletrólito sólido, estável e seguro.

As baterias de lítio apresentam valores de emissões de cerca de 175 gCO₂/kWh segundo a UNECE (2021). Embora não abordados neste trabalho, outros pontos de pesquisa importantes estão relacionados com a melhoria dos métodos anti degradação de baterias e reciclagem das

mesmas, o que pode ajudar a mitigar os impactos no ambiente e a prolongar a vida útil da presente tecnologia.

4.4.1.3 Power-to-gas

A conversão de eletricidade noutros portadores de energia (Power-to-Gas - P2G), representa outra solução de armazenamento (Inderwildi et al., 2020). A eletricidade em excesso é convertida num gás, normalmente H_2 , através da utilização de eletrolisadores com perdas de 30 a 40% (UNECE, 2021). O gás pode depois ser armazenado em cavernas subterrâneas durante vários meses e transformado novamente em eletricidade, usando turbinas a gás de ciclo combinado com um rendimento total de 28% (Gallo et al., 2016) ou através de células de combustível com rendimentos a rondar os 37% (Augustine & Blair, 2021, IPCC, 2022). Além disso, o H_2 pode ser integrado noutros mercados, como combustível para aquecimento e transporte, ou ainda como matéria-prima para a indústria, possibilitando o acoplamento setorial (Maeder et al., 2021). No entanto, apesar da sua flexibilidade, ainda não é uma tecnologia madura (TRL 3-7) (Luca et al., 2020), limitando-se a 95 projetos piloto com alta concentração na Europa (Maeder et al., 2021). Os custos desta tecnologia são ainda incertos, por não se encontrar comercialmente disponível, estimando-se que os mesmos possam aproximar-se dos 210\$/kWh (2019; Mongird et al., 2020).

A conversão de H_2 noutro combustível, nomeadamente o CH_4 é outra solução possível. Este gás é composto por um átomo de nitrogénio e três de H_2 . O primeiro constituinte pode ser conseguido através da separação dos elementos do ar. O segundo pode ser obtido a partir do eletrólise da água, como descrito anteriormente (IRENA and AEA, 2022). Finalmente, estes dois gases podem ser combinados e convertidos em CH_4 como ilustra a Figura 55 (The Royal Society, 2020).

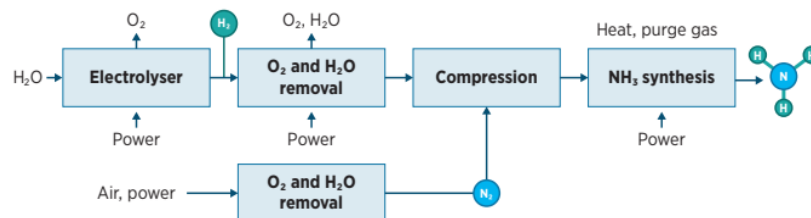
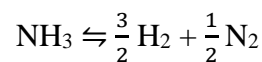


Figura 55 - Síntese de CH_4

Fonte: (Cardoso et al., 2021)

O CH₄ tem uma densidade de energia acima da do H₂ líquido e à pressão atmosférica pode ser armazenado a -33 °C, consumindo por isso muito menos energia que o armazenamento de H₂ (Valera-Medina et al., 2018). Além disso, o transporte de CH₄ é facilitado pela infraestrutura existente resultante do amplo uso deste componente na indústria de fertilizantes (Cardoso et al., 2021). A produção de CH₄ apresenta valores de TRL com níveis compreendidos entre 5 e 9 (The Royal Society, 2020) e custos estimados de produção compreendidos entre os 720 e 1.400 dólares americanos por tonelada (AEA, 2022). Perspetiva-se uma diminuição dos mesmos até 2050 para cerca de 355 dólares americanos por tonelada, dado que o preço das energias renováveis tende a diminuir (AEA, 2022). Além disso, e por resultar de H₂ verde, o CH₄ pode ser produzido e consumido sem emissões de CO₂ (The Royal Society, 2020).

Quando necessário, o CH₄ pode ser usado diretamente ou decomposto para se readquirir novamente H₂. A equação seguinte traduz a reação inversa da síntese de CH₄ (Cardoso et al., 2021).



4.4.2 Interconexão Energética Global

Um dos principais desafios relacionados às fontes de energia renováveis, como solar e eólica, é a variabilidade na produção de energia como referido na secção 4.1.1. As tecnologias de armazenamento complementam a alta variabilidade temporal na produção de eletricidade a partir de fontes renováveis, nomeadamente, eólica e solar (Van Hertem et al., 2016a). No entanto, o papel dos sistemas de armazenamento por si só não é capaz de fornecer toda a flexibilidade que o sistema necessita, uma vez que estes apenas possibilitam alterar o momento em que a energia é fornecida (Van Hertem et al., 2016b). Assim, e dado que as áreas de maior potencial de energia renovável por vezes se encontram a grandes distâncias dos locais de consumo, podem e devem ser reforçadas as infraestruturas de transmissão, no sistema energético do futuro, de forma a mover a energia na dimensão espacial (Bompard et al., 2018).

A interconexão energética global (GEI) é o sistema de transmissão de energia que visa conectar as principais áreas de produção renovável (como o Ártico para a energia eólica e as regiões equatoriais para a solar) às principais zonas de consumo, através de linhas de energia de ultra alta tensão (normalmente a rondar os 1600 kV) de longa distância e da criação ou reforço de interconexões elétricas transfronteiriças (European Commission, 2019), como

mostra a Figura 56. Desta forma, será possível interligar o sistema energético de vários países, formando um sistema macro capaz de garantir segurança no abastecimento de energia, o acesso a recursos remotos e integrar mais energias renováveis (Imdadullah et al., 2021). Assim, os benefícios deste sistema são essencialmente a possibilidade de importar energia limpa de outras regiões para complementar o próprio *mix* de energia ou de a exportar no caso de países ricos em recursos endógenos, maximizando a utilização dos últimos. No entanto, a aplicação desta tecnologia requer a cooperação entre os diferentes países, podendo isto constituir-se num verdadeiro obstáculo (Imdadullah et al., 2021).

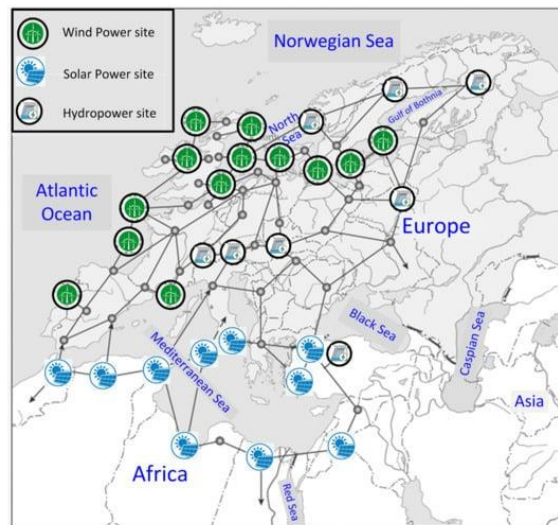


Figura 56 - Hipotética super-rede europeia

Fonte: (Imdadullah et al., 2021)

5. CONCLUSÃO

As alterações climáticas que têm vindo a ocorrer nos últimos anos tornam inevitável a reestruturação dos atuais sistemas energéticos, os quais permanecem intensivos em carbono. O Pacto Ecológico Europeu coloca a UE numa trajetória de cumprimento da neutralidade climática até 2050, através da descarbonização profunda de todos os setores da economia e de uma maior redução das emissões de GEE até 2030 (European Commission, 2022a).

O cumprimento dos objetivos traçados está fortemente condicionado pela adoção de transformações significativas no sistema energético, as quais devem possibilitar a “desfossilização”, com consequente redução das emissões de carbono, e, simultaneamente, garantir a satisfação de forma fiável e acessível da crescente procura por energia (Bogdanov et al., 2021).

A forma como a energia é produzida, transportada, distribuída, comercializada e consumida tem vindo a ser reformulada, em particular devido à adoção de novas tecnologias e à implementação de uma variedade de medidas e políticas. Neste contexto, ao longo dos últimos anos, muita investigação sobre políticas e tecnologias para a descarbonização tem vindo a ser desenvolvida, resultando num elevado volume de artigos científicos, projetos de investigação e patentes. Este volume torna complexa a compreensão da relevância das diversas tecnologias e estratégias de descarbonização que a comunidade científica tem vindo a propor.

O presente trabalho, desenvolvido no âmbito do projeto Transições Transformativas Sustentáveis - Conciliar a Aceleração das Transições para Baixo Carbono com Transformações do Sistema (PTDC/GES-AMB/0934/2020), apresenta uma metodologia que permitiu perceber as tendências tecnológicas, no âmbito da descarbonização, presentes na literatura científica, projetos e patentes. Esta metodologia, baseada em análise bibliométrica, utiliza dois programas informáticos de mineração de texto, especificamente, o “Tools for Innovation Monitoring” (TIM) e o VOSviewer.

A aplicação da metodologia desenvolvida, considerando o período de 2011 a 2021, revelou um total de 71.066 registos obtidos das bases de dados WoS, Scopus, PATSTAT e CORDIS. Com base na análise bibliométrica realizada, algumas conclusões podem ser retiradas, a saber:

- Durante os últimos 11 anos, o número de publicações em matéria de descarbonização foi, de uma forma geral, crescente;

- A China destacou-se e liderou o número de publicações científicas, seguida pelos Estados Unidos e Europa, como já visto na Figura 30 da secção 3.4. Por outro lado a Figura 57 revela os principais emissores de CO₂, de 2011 a 2021, onde se destacam a China e os Estados Unidos como os maiores emissores. Assim é possível concluir que os maiores emissores de CO₂, têm procurado modos mais limpos de obter energia essencial para alimentar a sua economia.

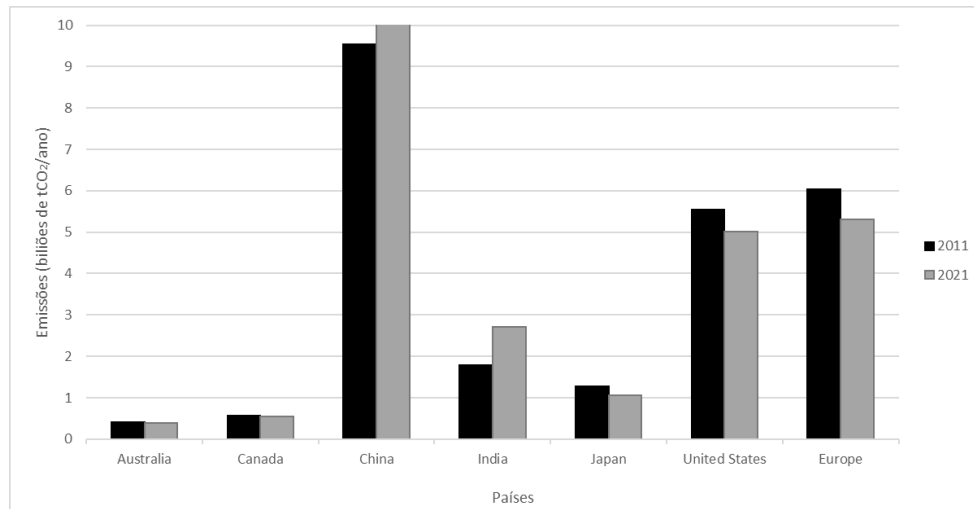


Figura 57 - Emissões anuais de diferentes países no ano de 2011 e 2021

Fonte: (Ritchie et al., 2020)

- Os resultados, observados na Figura 58, mostram que um vasto conjunto de tecnologias tem sido estudado ao longo do tempo na tentativa de se descarbonizar o setor energético. A tecnologia em maior destaque é a CCS, que se manteve no topo da lista desde 2011 a 2021. Durante o mesmo período, o hidrogénio e o armazenamento registaram um aumento substancial face às restantes opções, tendo esse aumento sido mais íngreme na primeira metade do período. Uma tendência oposta verificou-se na energia nuclear, smart grids e energia geotérmica, com uma perda consecutiva de posições no *ranking*. Embora de forma mais discreta, a eficiência energética perdeu relevância relativamente a outras tecnologias, entre as quais, os VE e PV, que assinalaram uma subida no *ranking* na primeira parte do período e estabilizaram no segundo e terceiro lugar do *ranking*, respetivamente. No entanto, a eficiência energética mantém-se nas 5 cinco tecnologias mais relevantes.

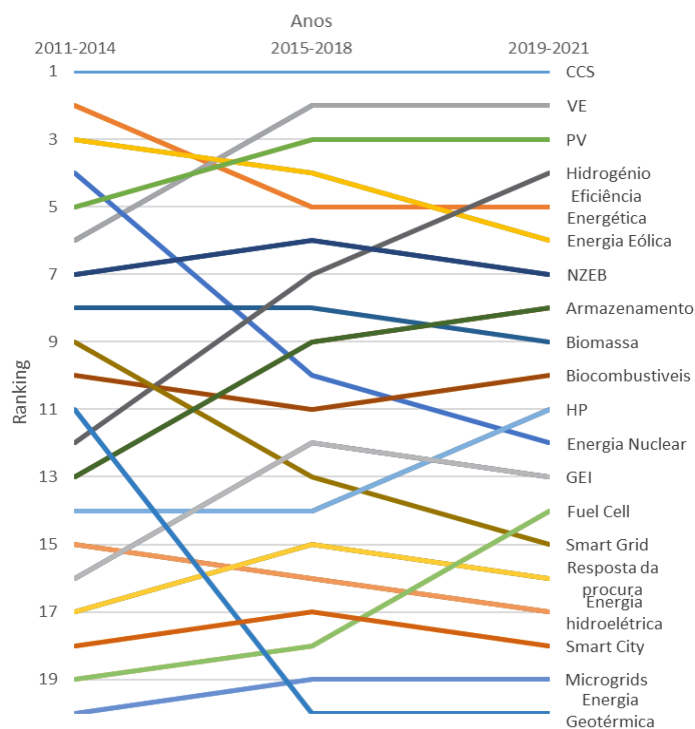


Figura 58 – *Ranking* acumulado

- Estes resultados vão de encontro com o descrito na secção 4 do presente trabalho. Por exemplo, o crescimento dos biocombustíveis e do hidrogénio, pode assinalar a procura de novas soluções para setores de difícil eletrificação. Outro exemplo, é o registo tido pelo armazenamento que pode resultar da procura de soluções para complementar a variabilidade das fontes de energia renovável, em concreto a solar fotovoltaica e eólica.
- Por fim, é de salientar que a perda de posições no *ranking* não significa, necessariamente, um decréscimo no interesse por parte da comunidade científica. O posicionamento de uma tecnologia no *ranking*, indica a sua posição relativamente às outras tecnologias seleccionadas. Por exemplo, analisando o gráfico dos resultados obtidos do TIM (Figura 59) e do VOS (Figura 60) em separado, é possível perceber que a energia eólica que apresentou um perda de posições no *ranking* (Figura 58), na verdade continua a receber interesse da comunidade científica.

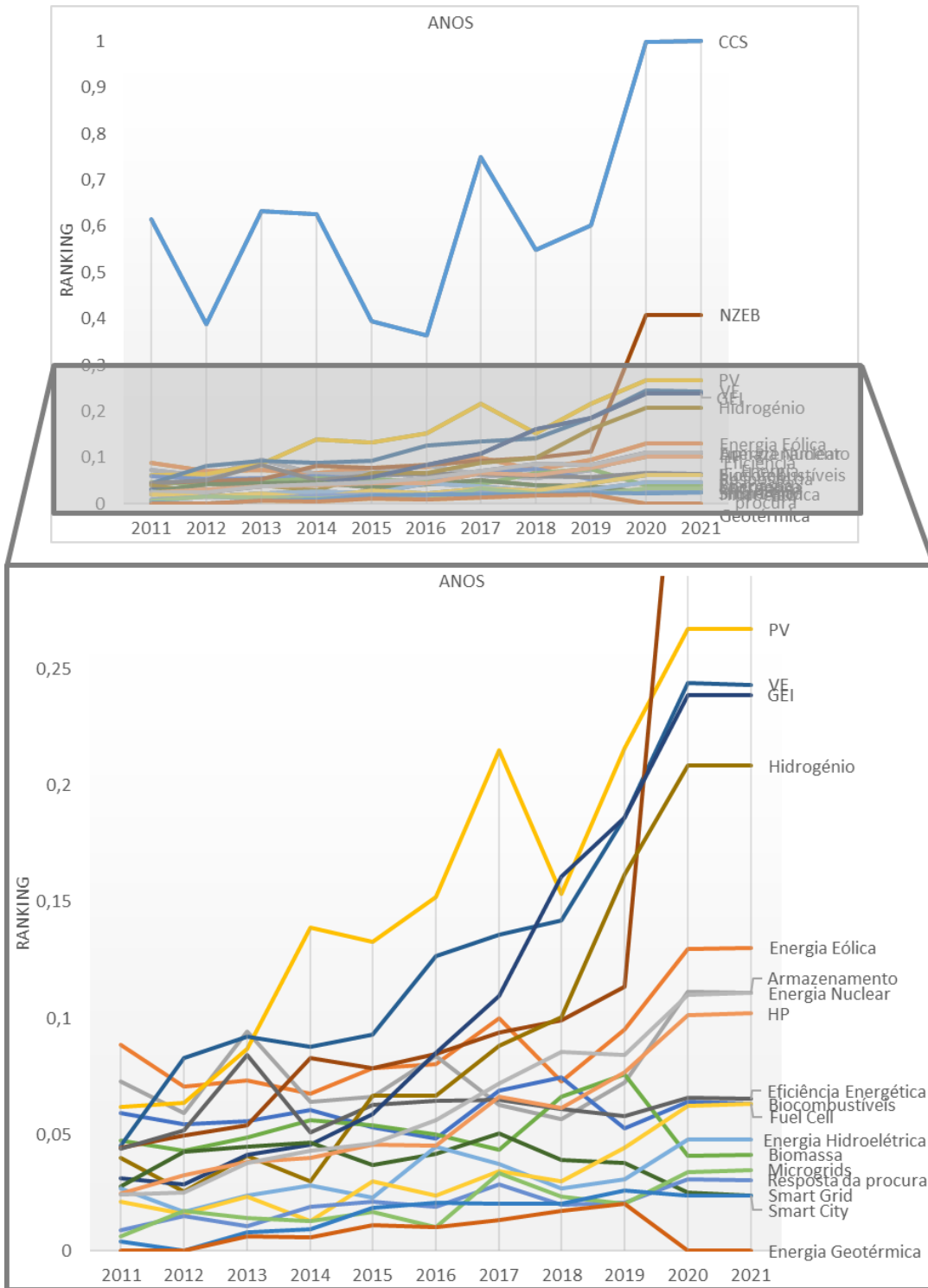


Figura 59 – Gráfico com as 20 tecnologias mais relevantes em valor absoluto

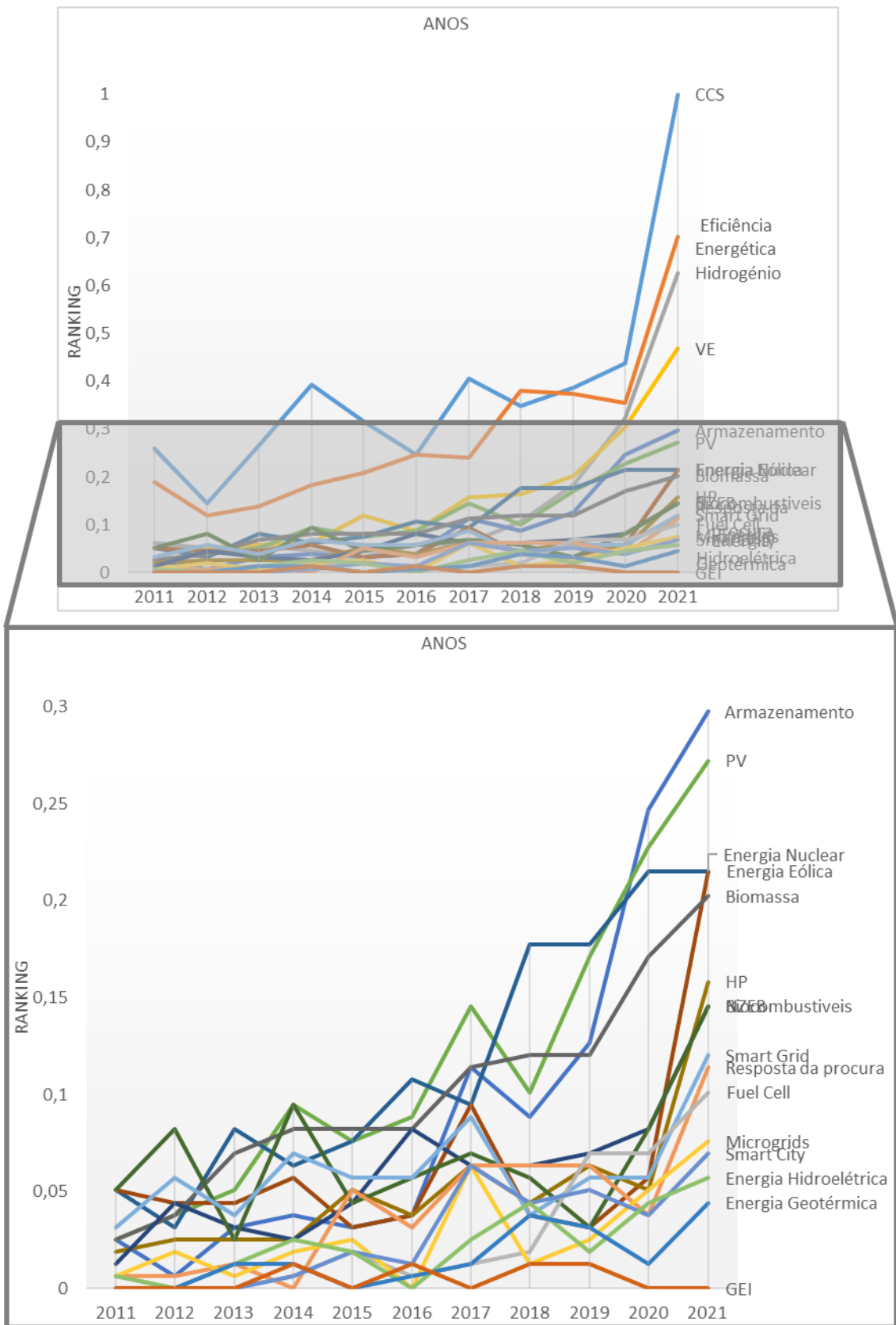


Figura 60 - Gráfico com as 20 tecnologias com mais ocorrência em valor absoluto

- Os resultados também mostram alguma preponderância de tecnologias associadas ao lado da oferta. Assim, tecnologias mais granulares, principalmente do lado da procura com grande potencial de descarbonização, podem estar a ser desvalorizadas pela investigação, sendo este resultado também encontrado em outros trabalhos como Wilson et al. (2012) e Wilson et al. (2020).

Embora não exista um caminho “mágico” para a transição energética que possa ser usado universalmente, a Figura 61 mostra um vislumbre de um hipotético futuro sistema de energia, caso as tecnologias identificadas se tornassem predominantes. Algumas destas tecnologias são já fulcrais no sistema energético atual, como as fontes de energia renovável. Outras começam também a impor-se, como mostra o crescimento no número de veículos elétricos (ver secção 4.3.2).

As várias opções tecnológicas identificadas neste trabalho permitirão a cada país reconstruir o seu sistema energético e reajustar o seu *mix* de energia. As opções tecnológicas escolhidas deverão depender dos recursos renováveis disponíveis no país, do custo e maturidade das tecnologias e de uma série de outras valências ambientais, como a pegada carbónica, a compatibilidade da tecnologia com os ecossistemas existentes nos locais de implantação, o uso do solo, o consumo de água, e o desmantelamento, não desconsiderando a possibilidade de reciclagem de componentes e a produção de resíduos (APEnergia, 2022). Por exemplo, países com abundância de recursos renováveis, como o sol e o vento, provavelmente dependerão mais desses recursos, contrariamente aos países ricos em combustíveis fósseis que, à priori, optarão por caminhos que usem tecnologias de captura e armazenamento de carbono. Uma especial atenção deve ser dada também à relação inversa que tende a existir entre a maturidade e o custo das tecnologias (tipicamente o custo diminui à medida que as tecnologias amadurecem). Significa isto que, em função dessa evolução, a escolha das opções tecnológicas para o processo de descarbonização poderá mudar ou ter de ser ajustado. Além disso, também o financiamento e políticas de apoio poderão direcionar a transição energética por caminhos diferentes em vários países.

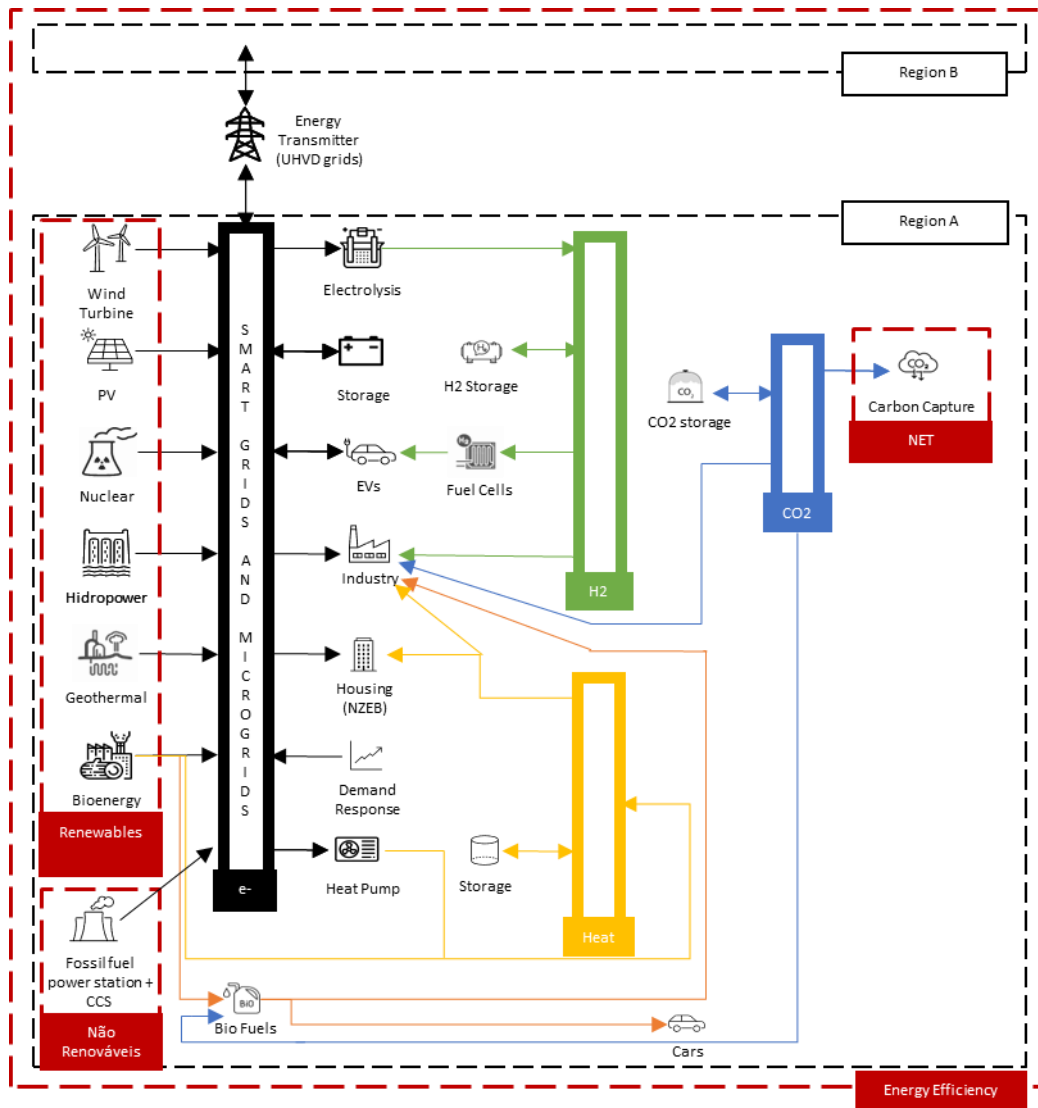


Figura 61 - Vislumbre de um sistema hipotético futuro de energia

As tecnologias identificadas neste trabalho são referidas como peças chave para a descarbonização. Contudo, mudanças não tecnológicas (mas que podem ser suportadas na tecnologia, nomeadamente na crescente digitalização das sociedades) poderão também ser adotadas. Por exemplo, o teletrabalho, pela redução na movimentação de pessoas de e para os locais de trabalho ou a adoção de modos de transporte mais sustentáveis e suaves (transportes públicos, bicicletas, etc.) poderá ter uma significativa contribuição para a redução das emissões de GEE. Além disso, a informação clara e facilmente acessível, por exemplo, sobre as opções tecnológicas disponíveis e respetiva pegada carbónica, é fundamental para que a sociedade possa alterar os seus padrões de consumo de energia e adote tecnologias que promovam a redução de emissões de GEE.

Nos últimos anos, tem-se verificado uma transformação no sistema energético, procurando que o mesmo seja mais integrado, circular, eficiente, descentralizado, digital, multidirecional e diversificado. A partir de um sistema com estas características, será possível alcançar a descarbonização do sistema energético em consonância com o Acordo de Paris.

A integração do sistema energético refere-se ao planeamento e ao funcionamento do sistema energético como um todo, permitindo assim fornecer serviços energéticos mais fiáveis, de forma mais eficiente em termos de recursos e ao menor custo possível para a sociedade.

Um sistema energético circular, reutiliza resíduos inevitáveis para fins energéticos e explora sinergias em todos os setores, permitindo deste modo diminuir as emissões de CO₂. Um exemplo prático de circularidade é a utilização de resíduos para produção de energia.

Um sistema cujo cerne é a eficiência energética, ou seja, em que se priorizam as escolhas com menor utilização de energia, por exemplo a substituição dos sistemas de aquecimento doméstico convencionais por bombas de calor, poderá ajudar a reduzir as emissões de GEE e a quantidade de energia necessária. Nesse sentido, soluções do lado da procura, devem ser preferidas sempre que sejam mais eficazes em termos de custos, devendo naturalmente ser utilizadas em complementaridade com as soluções do lado da oferta.

O uso descentralizado de tecnologias granulares permite uma difusão mais rápida das tecnologias e, conseqüentemente, custos menores. Além disso, torna o sistema energético mais resiliente e eficiente, na medida em que um apagão num determinado local, não afetará de forma tão significativa locais vizinhos. Alguns exemplos de tecnologias granulares incluem sistemas solares fotovoltaicos e baterias, os quais, quando integrados em microrredes e redes inteligentes, permitem aumentar a resiliência do sistema elétrico.

Por outro lado, a descentralização do setor energético, implica consumidores mais capazes e responsáveis. Nesse sentido, as ferramentas digitais podem possibilitar a partilha de dados em tempo quase real e ajudar no processo de tomada de decisão, permitindo a gestão e otimização do consumo. Uma atenção especial deve ser dada neste tipo de sistemas, já que a digitalização acarreta também possíveis problemas de privacidade e o aumento do consumo de energia.

Por último, espera-se um sistema energético multidirecional, em que os consumidores de energia possam contribuir para o equilíbrio e flexibilidade do sistema. Esta flexibilidade pode ser conseguida, por exemplo, introduzindo na rede eletricidade que produzem individualmente ou enquanto participantes em comunidades de energia, ou ainda através do uso

da tecnologia V2G, explorando sinergias entre os setores da eletricidade e de utilização final (Koirala et al., 2018).

5.1 Trabalhos futuros

Ao longo da realização deste trabalho foram identificados alguns assuntos que se constituem como elementos de estudo futuro importantes, nomeadamente:

- Elaboração de casos de estudo que permitam, com base em modelos, perceber o impacto esperado na descarbonização para cada tecnologia abordada;
- Melhorar a caracterização de algumas tecnologias e compreender de que forma as políticas definidas centralmente pelos países podem influenciar a maior ou menor progressão destas no âmbito da constituição de um sistema energético descarbonizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2022 *Toyota Mirai Review, Pricing, and Specs*. (2022, janeiro 6). Car and Driver.
<https://www.caranddriver.com/toyota/mirai>
- Amponsah, N. Y., Troldborg, M., Kington, B., Aalders, I., & Hough, R. L. (2014). Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 461–475.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.087>
- Andrei, M., Thollander, P., Pierre, I., Gindroz, B., & Rohdin, P. (2021). Decarbonization of industry: Guidelines towards a harmonized energy efficiency policy program impact evaluation methodology. *Energy Reports*, 7, 1385–1395.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.02.067>
- AP Energia. (2022). *O impacto ambiental da descarbonização do sistema elétrico português: Avaliação do Ciclo de Vida*.
- Arthur D. Little. (2015). *Emerging technologies in Solar PV: identifying and cultivating potential winners*.
- Athanasopoulou, L., Bikas, H., & Stavropoulos, P. (2018). Comparative Well-to-Wheel Emissions Assessment of Internal Combustion Engine and Battery Electric Vehicles. *Procedia CIRP*, 78, 25–30. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.169>
- Augustine, C., & Blair, N. (2021). *Storage Futures Study: Storage Technology Modeling Input Data Report* (p. NREL/TP-5700-78694, 1785959, MainId:32611).
<https://doi.org/10.2172/1785959>
- Bailey, H., Brookes, K. L., & Thompson, P. M. (2014). Assessing environmental impacts of offshore wind farms: Lessons learned and recommendations for the future. *Aquatic Biosystems*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.1186/2046-9063-10-8>

- BBC. (2014). *BBC Portuguese / Petróleo no mundo*.
https://www.bbc.com/portuguese/especial/1642_petroleo
- Becqué, R., D. Weyl, E. Stewart, E. Mackres, L. Jin, & X. Shen. (2019). *Accelerating Building Decarbonization: Eight Attainable Policy Pathways to Net Zero Carbon Buildings for All*. World Resources Institute. <https://www.wri.org/publication/data-and-ambition-loops>
- Belostotskaya, A. (2019). ReThinking the Future of Energy: Scenarios for 2050. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3450437>
- Benjamin Leard & Virginia McConnell. (2020). *Progress and Potential for Electric Vehicles to Reduce Carbon Emissions*.
- NREL. (2022). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. (2022). <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- Biomass*. (2021). European Commission. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomass_en
- Bistline, J. E. T., & Blanford, G. J. (2021). Impact of carbon dioxide removal technologies on deep decarbonization of the electric power sector. *Nature Communications*, 12(1), 3732. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23554-6>
- Blomgren, G. E. (2017). The Development and Future of Lithium Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 164(1), A5019–A5025. <https://doi.org/10.1149/2.0251701jes>
- BloombergNEF. (2021, novembro 30). Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite. *BloombergNEF*. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>

- BloombergNEF. (2022, janeiro 26). *Solar—10 Predictions for 2022*.
<https://about.bnef.com/blog/solar-10-predictions-for-2022/>
- Blueauto. (2019, maio 1). *Carregamento bidirecional de veículos elétricos*. blueauto.
<https://www.blueauto.pt/single-post/2019/05/01/carregamento-bidirecional-de-veiculos-eltricos>
- Bogdanov, D., Ram, M., Aghahosseini, A., Gulagi, A., Oyewo, A. S., Child, M., Caldera, U., Sadovskaia, K., Farfan, J., De Souza Noel Simas Barbosa, L., Fasihi, M., Khalili, S., Traber, T., & Breyer, C. (2021). Low-cost renewable electricity as the key driver of the global energy transition towards sustainability. *Energy*, 227, 120467.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120467>
- Bompard, E., Grosso, D., Huang, T., Profumo, F., Lei, X., & Li, D. (2018). World Decarbonization through Global Electricity Interconnections. *Energies*, 11(7), 1746.
<https://doi.org/10.3390/en11071746>
- Bonou, A., Laurent, A., & Olsen, S. I. (2016). Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy—from theory to application. *Applied Energy*, 180, 327–337.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.058>
- Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Mac Dowell, N., Fernández, J. R., Ferrari, M.-C., Gross, R., Hallett, J. P., Haszeldine, R. S., Heptonstall, P., Lyngfelt, A., Makuch, Z., Mangano, E., Porter, R. T. J., Pourkashanian, M., Rochelle, G. T., Shah, N., ... Fennell, P. S. (2014a). Carbon capture and storage update. *Energy Environ. Sci.*, 7(1), 130–189. <https://doi.org/10.1039/C3EE42350F>
- Boot-Handford, M. E., Abanades, J. C., Anthony, E. J., Blunt, M. J., Brandani, S., Mac Dowell, N., Fernández, J. R., Ferrari, M.-C., Gross, R., Hallett, J. P., Haszeldine, R. S., Heptonstall, P., Lyngfelt, A., Makuch, Z., Mangano, E., Porter, R. T. J., Pourkashanian,

- M., Rochelle, G. T., Shah, N., ... Fennell, P. S. (2014b). Carbon capture and storage update. *Energy Environ. Sci.*, 7(1), 130–189. <https://doi.org/10.1039/C3EE42350F>
- Borasio, M., & Moret, S. (2022). Deep decarbonisation of regional energy systems: A novel modelling approach and its application to the Italian energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 153, 111730. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111730>
- BP. (2022). *Statistical Review of World Energy | Energy economics | Home*. Bp Global. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Budinis, S., Krevor, S., Dowell, N. M., Brandon, N., & Hawkes, A. (2018). An assessment of CCS costs, barriers and potential. *Energy Strategy Reviews*, 22, 61–81. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.08.003>
- Camarasa, C., Nægeli, C., Ostermeyer, Y., Klippel, M., & Botzler, S. (2019). Diffusion of energy efficiency technologies in European residential buildings: A bibliometric analysis. *Energy and Buildings*, 202, 109339. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109339>
- WNA. *Carbon Dioxide Emissions From Electricity*. (2022). World Nuclear Association. https://www.world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/carbon-dioxide-emissions-from-electricity.aspx?_gl=1*1fkwfg6*_ga*NTExNTQyMTUxLjE2NzQ5MTU0ODc.*_ga_PVQKRCXXT2*MTY3NDkxNTQ5Mi4xLjAuMTY3NDkxNTQ5Mi4wLjAuMA..
- Cardoso, J. S., Silva, V., Rocha, R. C., Hall, M. J., Costa, M., & Eusébio, D. (2021). Ammonia as an energy vector: Current and future prospects for low-carbon fuel applications in internal combustion engines. *Journal of Cleaner Production*, 296, 126562. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126562>

- Carvalho, A. D. (2015). *High efficiency ground source heat pump systems for sustainable building space conditioning*. Universidade de Coimbra.
- Case Study: Artificial Intelligence for Building Energy Management Systems – Analysis*. (2020). IEA. <https://www.iea.org/articles/case-study-artificial-intelligence-for-building-energy-management-systems>
- Casini, M. (2016). Designing the third millennium's buildings. Em *Smart Buildings* (pp. 3–54). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100635-1.00001-0>
- Center for Climate and Energy Solutions. (2020). *Global Emissions*. <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>
- Chen Austin, M., Chung-Camargo, K., & Mora, D. (2021). Review of Zero Energy Building Concept-Definition and Developments in Latin America: A Framework Definition for Application in Panama. *Energies*, *14*(18), 5647. <https://doi.org/10.3390/en14185647>
- Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, *19*(3), 291–312. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2008.07.014>
- Compare Electric Cars: EV Range, Specs, Pricing & More*. (2022). InsideEVs. <https://insideevs.com/reviews/344001/compare-evs/>
- Comparing the Costs of Long Duration Energy Storage Technologies*. (2019). Navigant Consulting.
- Costa, P. M., Tome, P., Almeida, B., & Bento, N. (2022). A Bibliometric based Analysis to Identify Promising Domains of Decarbonisation Technologies. *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 1–6. <https://doi.org/10.23919/SpliTech55088.2022.9854282>

- Crabtree, G., Kócs, E., & Trahey, L. (2015). The energy-storage frontier: Lithium-ion batteries and beyond. *MRS Bulletin*, 40(12), 1067–1078. <https://doi.org/10.1557/mrs.2015.259>
- U. S. Department of Energy. (2015) *Crystalline Silicon Photovoltaics Research*. (2015). Energy.Gov. <https://www.energy.gov/eere/solar/crystalline-silicon-photovoltaics-research>
- De Luca, E., Zini, A., Amerighi@Enea.It, O., Coletta, G., Oteri, M. G., Giuffrida, L. G., & Graditi, G. (2020). A technology evaluation method for assessing the potential contribution of energy technologies to decarbonisation of the Italian production system. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 41-56 Pages. <https://doi.org/10.5278/IJSEPM.4433>
- de Sisternes, F. J., Jenkins, J. D., & Botterud, A. (2016). The value of energy storage in decarbonizing the electricity sector. *Applied Energy*, 175, 368–379. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.014>
- de Wild-Scholten, M., Groet, G., Cassagne, V., & Huld, T. (2014). *SOLAR RESOURCES AND CARBON FOOTPRINT OF PHOTOVOLTAIC POWER IN DIFFERENT REGIONS IN EUROPE*. 10.
- DeCotis, P. A., & Cartwright, E. D. (2022). The Role of Small Modular Reactors in Decarbonization. *Climate and Energy*, 38(11), 12–17. <https://doi.org/10.1002/gas.22290>
- Díaz, H., & Guedes Soares, C. (2020). Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms. *Ocean Engineering*, 209, 107381. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107381>

- Digitalization as a key Enabler for the Energy Transition*. (2020, novembro 3). Capgemini Norge. <https://www.capgemini.com/no-no/2020/11/digitalization-a-key-enabler-for-energy-transition/>
- Dovich Filho, F. B., Castillo Santiago, Y., Silva Lora, E. E., Escobar Palacio, J. C., & Almazan del Olmo, O. A. (2021). Evaluation of the maturity level of biomass electricity generation technologies using the technology readiness level criteria. *Journal of Cleaner Production*, 295, 126426. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126426>
- EIA. (2018). *World Energy Outlook 2018*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/77ecf96c-5f4b-4d0d-9d93-d81b938217cb/World_Energy_Outlook_2018.pdf
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., & Blaabjerg, F. (2014). Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 748–764. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- IEA. (2022d). *Energy efficiency and digitalisation – Analysis*. (2022). IEA. <https://www.iea.org/articles/energy-efficiency-and-digitalisation>
- Energy Transitions Commission. (2021). Demand for Biomass likely to exceed sustainable supply, we must reprioritise uses \textbar ETC. Em *Energy Transitions Commission*. <https://www.energy-transitions.org/energy-transitions-commission-warns-demand-for-biomass-likely-to-exceed-sustainable-supply/>
- E-Redes. (2022). *ATEP - Descarbonizar*. Atep. <https://atep.e-redes.pt>
- Esily, R. R., Chi, Y., Ibrahiem, D. M., & Chen, Y. (2022). Hydrogen strategy in decarbonization era: Egypt as a case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(43), 18629–18647. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.012>

- Esteban, M. D., Diez, J. J., López, J. S., & Negro, V. (2011). Why offshore wind energy? *Renewable Energy*, 36(2), 444–450. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.07.009>
- European Commission. (2022d). *EU strategy on energy system integration*. (2022). https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/eu-strategy-energy-system-integration_en
- European Commission. (2016). *Technology Innovation Monitoring (TIM) for mapping emerging photovoltaics and offshore wind energy technologies*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/39001>
- European Commission. (2020). *Powering a climate-neutral economy: An EU Strategy for Energy System Integration*.
- European Commission. (2021a). *Pacto Ecológico Europeu* [Text]. Comissão Europeia - European Commission. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_pt
- European Commission. (2021b). *Text Processing algorithms for keywords—TimDocs 0.3 documentation*. <https://www.timanalytics.eu/TimOpenAccessDocs/kwdAlgorithms.html#relevant-keywords>
- European Commission. (2022a). *Digitalisation of the energy system*. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/digitalisation-energy-system_en
- European Commission. (2022b). *Nearly zero-energy buildings*. European Commission. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en

- European Commission. (2022c). *TIM analytics | Knowledge for policy*.
https://knowledge4policy.ec.europa.eu/text-mining/tim_analytics_en
- European Commission. Directorate General for Energy. (2019). *Electricity interconnections with neighbouring countries: Second report of the Commission expert group on interconnection targets*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/092722>
- Evans, A., Strezov, V., & Evans, T. J. (2012). Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 4141–4147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.048>
- EY, & Eurelectric. (2022). *Power sector accelerating e-mobility*.
<https://evision.eurelectric.org/event/2022/report/>
- Ferreira, D. (2015). *Culturas energéticas: Produção de biomassa e bioenergia*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Ferreira, H. L., Garde, R., Fulli, G., Kling, W., & Lopes, J. P. (2013). Characterisation of electrical energy storage technologies. *Energy*, 53, 288–298.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.037>
- Fusella, M. A., Lin, Y. L., & Rand, B. P. (2019). Organic photovoltaics (OPVs): Device physics. Em *Handbook of Organic Materials for Electronic and Photonic Devices* (pp. 665–693). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102284-9.00020-6>
- Gallo, A. B., Simões-Moreira, J. R., Costa, H. K. M., Santos, M. M., & Moutinho dos Santos, E. (2016). Energy storage in the energy transition context: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 800–822.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.028>

- Gaur, A. S., Fitiwi, D. Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>
- GDP. (2022). World Bank Group. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?end=2021&start=2001>
- Ghosh, S., & Yadav, R. (2021). Future of photovoltaic technologies: A comprehensive review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101410. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101410>
- Gil Caldeira Ferreira Rocha. (2016). *APROVEITAMENTO ENERGÉTICO COM BOMBA DE CALOR EM CORRENTE GEOTÉRMICA*. Univeridade de Coimbra.
- Global CCS Institute. (2015). *Capturing CO2*.
- Global CCS Institute. (2020). *THE VALUE OF CARBON CAPTURE AND STORAGE (CCS)*.
- Global CCS Institute. (2021). *TECHNOLOGY READINESS AND COSTS OF CCS*.
- IRENA. (2018d). *Global Energy Transformation: A roadmap to 2050*. (2018). IRENA.
- Gonçalves, B. S. (2022). *Fusão Nuclear na era das alterações climáticas*.
- GWEC. (2022). *Global Wind Report 2022*.
- Hall, P. J., & Bain, E. J. (2008). Energy-storage technologies and electricity generation. *Energy Policy*, 36(12), 4352–4355. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.037>
- Hannah Ritchie. (2021). *The price of batteries has declined by 97% in the last three decades*. Our World in Data. <https://ourworldindata.org/battery-price-decline>
- Hayes, D., Moreira, M., Boavida, I., Haslauer, M., Unfer, G., Zeiringer, B., Greimel, F., Auer, S., Ferreira, T., & Schmutz, S. (2019). Life Stage-Specific Hydropeaking Flow Rules. *Sustainability*, 11(6), 1547. <https://doi.org/10.3390/su11061547>

- Hong, W. Y. (2022). A techno-economic review on carbon capture, utilisation and storage systems for achieving a net-zero CO₂ emissions future. *Carbon Capture Science & Technology*, 3, 100044. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100044>
- Hwang, J.-Y., Myung, S.-T., & Sun, Y.-K. (2017). Sodium-ion batteries: Present and future. *Chemical Society Reviews*, 46(12), 3529–3614. <https://doi.org/10.1039/C6CS00776G>
- IAEA. (2022). *Molten salt reactors (MSR)*. <https://www.iaea.org/topics/molten-salt-reactors>
- Ibn-Mohammed, T., Koh, S. C. L., Reaney, I. M., Acquaye, A., Schileo, G., Mustapha, K. B., & Greenough, R. (2017). Perovskite solar cells: An integrated hybrid lifecycle assessment and review in comparison with other photovoltaic technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1321–1344. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.095>
- IEA. (2019a). *Emissions by sector – Greenhouse Gas Emissions from Energy: Overview – Analysis*. <https://www.iea.org/reports/greenhouse-gas-emissions-from-energy-overview/emissions-by-sector>
- IEA. (2019b). *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*. https://read.oecd-ilibrary.org/energy/the-future-of-hydrogen_1e0514c4-en
- IEA. (2020). *Energy Technology Perspectives 2020: Special Report on Clean Energy Innovation Accelerating technology progress for a sustainable future*.
- IEA. (2021a). *Energy Efficiency 2021*.
- IEA. (2021b). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*.
- IEA. (2022a). *ETP Clean Energy Technology Guide – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>

IEA. (2022b). *Global electricity demand by scenario, 2010-2030 – Charts – Data & Statistics*.

IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-demand-by-scenario-2010-2030>

IEA. (2022c). *Share of electric and fuel-cell vehicles in total cars and light trucks sales in the*

Sustainable Development Scenario and Net Zero Emissions by 2050 case, 2019-2030 –

Charts – Data & Statistics. IEA. [https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-](https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-electric-and-fuel-cell-vehicles-in-total-cars-and-light-trucks-sales-in-the-sustainable-development-scenario-and-net-zero-emissions-by-2050-case-2019-2030)

[of-electric-and-fuel-cell-vehicles-in-total-cars-and-light-trucks-sales-in-the-](https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-electric-and-fuel-cell-vehicles-in-total-cars-and-light-trucks-sales-in-the-sustainable-development-scenario-and-net-zero-emissions-by-2050-case-2019-2030)

[sustainable-development-scenario-and-net-zero-emissions-by-2050-case-2019-2030](https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/share-of-electric-and-fuel-cell-vehicles-in-total-cars-and-light-trucks-sales-in-the-sustainable-development-scenario-and-net-zero-emissions-by-2050-case-2019-2030)

Ikäheimo, J., Weiss, R., Kiviluoma, J., Pursiheimo, E., & Lindroos, T. J. (2022). Impact of

power-to-gas on the cost and design of the future low-carbon urban energy system.

Applied Energy, 305, 117713. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117713>

Imdadullah, Alamri, B., Hossain, Md. A., & Asghar, M. S. J. (2021). Electric Power Network

Interconnection: A Review on Current Status, Future Prospects and Research Direction.

Electronics, 10(17), 2179. <https://doi.org/10.3390/electronics10172179>

Instituto de Estudos Ambientais e Energéticos (EESI). (2019). *Ficha Informativa*

/Armazenamento de energia (2019). [https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-](https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019)

[2019](https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019)

IPCC. (2005). *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by*

Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O.

Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University

Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.

IPCC. (2022a). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change*.

IPCC. (2022b). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working*

Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change. P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley.

IRENA. (2013). *Heat Pumps—Technology Brief*. <http://www.irena.org/>

IRENA. (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*.

IRENA. (2019). *Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper)*.

IRENA. (2020). *Renewables Increasingly Beat Even Cheapest Coal Competitors on Cost*. Em </Newsroom/pressreleases/2020/Jun/Renewables-Increasingly-Beat-Even-Cheapest-Coal-Competitors-on-Cost>.

<https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2020/Jun/Renewables-Increasingly-Beat-Even-Cheapest-Coal-Competitors-on-Cost>

IRENA. (2021). *Sector coupling in facilitating integration of variable renewable energy in cities*. <https://www.irena.org/publications/2021/Oct/Sector-Coupling-in-Cities>

IRENA. (2022a). *Geopolitics of the Energy Transformation The Hydrogen Factor*.

IRENA. (2022b). *Renewable capacity highlights*.

IRENA. (2022c). *Renewable power generation costs in 2021*. <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>

IRENA and AEA. (2022). *Innovation Outlook: Renewable Ammonia, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, Ammonia Energy Association, Brooklyn*.

- Jafari, M., Botterud, A., & Sakti, A. (2022). Decarbonizing power systems: A critical review of the role of energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *158*, 112077. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112077>
- Janek, J., & Zeier, W. G. (2016). A solid future for battery development. *Nature Energy*, *1*(9), 16141. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.141>
- Javed, M. S., Ma, T., Jurasz, J., & Amin, M. Y. (2020). Solar and wind power generation systems with pumped hydro storage: Review and future perspectives. *Renewable Energy*, *148*, 176–192. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.157>
- Jeremy Sung. (2019). *How digitalisation is modernising energy efficiency*. <https://www.europeanenergyinnovation.eu/Articles/Autumn-2019/How-digitalisation-is-modernising-energy-efficiency>
- Ji, G., & Zhao, M. (2017). Membrane Separation Technology in Carbon Capture. Em Y. Yun (Ed.), *Recent Advances in Carbon Capture and Storage*. InTech. <https://doi.org/10.5772/65723>
- Jiang, K., & Ashworth, P. (2021). The development of Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS) research in China: A bibliometric perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *138*, 110521. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110521>
- Johansson, V., Lehtveer, M., & Göransson, L. (2019). Biomass in the electricity system: A complement to variable renewables or a source of negative emissions? *Energy*, *168*, 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.112>
- Kamran, M., & Fazal, M. R. (2021). Fundamentals of renewable energy systems. Em *Renewable Energy Conversion Systems* (pp. 1–19). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823538-6.00009-9>

- Kapsali, M., Anagnostopoulos, J. S., & Kaldellis, J. K. (2012). Wind powered pumped-hydro storage systems for remote islands: A complete sensitivity analysis based on economic perspectives. *Applied Energy*, 99, 430–444. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.054>
- Kenarsari, S. D., Yang, D., Jiang, G., Zhang, S., Wang, J., Russell, A. G., Wei, Q., & Fan, M. (2013). Review of recent advances in carbon dioxide separation and capture. *RSC Advances*, 3(45), 22739. <https://doi.org/10.1039/c3ra43965h>
- Kinhal, V. (2022). *Efficiency of Wind Energy*. LoveToKnow. https://greenliving.lovetoknow.com/Efficiency_of_Wind_Energy
- Koirala, B. P., van Oost, E., & van der Windt, H. (2018). Community energy storage: A responsible innovation towards a sustainable energy system? *Applied Energy*, 231, 570–585. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.163>
- Lange, S., Pohl, J., & Santarius, T. (2020). Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand? *Ecological Economics*, 176, 106760. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106760>
- Lau, H. C., Ramakrishna, S., Zhang, K., & Radhamani, A. V. (2021). The Role of Carbon Capture and Storage in the Energy Transition. *Energy & Fuels*, 35(9), 7364–7386. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00032>
- Lazard. (2021). *Lazard's Levelized Cost of Energy Analysis—Version 15.0*.
- Lew, G., Sadowska, B., Chudy-Laskowska, K., Zimon, G., & Wójcik-Jurkiewicz, M. (2021). Influence of Photovoltaic Development on Decarbonization of Power Generation—Example of Poland. *Energies*, 14(22), 7819. <https://doi.org/10.3390/en14227819>

- Li, S., Li, J., Su, C., & Yang, Q. (2020). Optimization of Bi-Directional V2G Behavior With Active Battery Anti-Aging Scheduling. *IEEE Access*, 8, 11186–11196. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964699>
- Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Hanafiah, M. M., Ibrahim, M. A., Asri Mat Teridi, M., Sepeai, S., Zaharim, A., & Sopian, K. (2018). Prospects of life cycle assessment of renewable energy from solar photovoltaic technologies: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.048>
- Lund, P. D., Lindgren, J., Mikkola, J., & Salpakari, J. (2015). Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 785–807. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057>
- Madejski, P., Chmiel, K., Subramanian, N., & Kuś, T. (2022). Methods and Techniques for CO2 Capture: Review of Potential Solutions and Applications in Modern Energy Technologies. *Energies*, 15(3), 887. <https://doi.org/10.3390/en15030887>
- Mandley, S. J., Daioglou, V., Junginger, H. M., van Vuuren, D. P., & Wicke, B. (2020). EU bioenergy development to 2050. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109858. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109858>
- Marques, A. L. de M. (2015). *Utilização Energética da Biomassa em Portugal Caso de estudo da Tratolixo*. Instituto Superior Técnico.
- Meng, L., You, J., & Yang, Y. (2018). Addressing the stability issue of perovskite solar cells for commercial applications. *Nature Communications*, 9(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07255-1>

- Meng, X.-C., Seong, Y.-H., & Lee, M.-K. (2021). Research Characteristics and Development Trend of Global Low-Carbon Power—Based on Bibliometric Analysis of 1983–2021. *Energies*, *14*(16), 4983. <https://doi.org/10.3390/en14164983>
- Metso. (2011). *Amine Plant—Absorption, Application Report*. http://valveproducts.metso.com/nelis/ApplicationReports/2721_Refinery/2721_22_01_en.pdf
- Mohammad, M., Isaifan, R.J., Weldu, Y.W., Rahman, M.A., & Al-Ghamdi, S.G. (2020). *Progress on carbon dioxide capture, storage and utilisation*.
- Mondal, M. K., Balsora, H. K., & Varshney, P. (2012). Progress and trends in CO2 capture/separation technologies: A review. *Energy*, *46*(1), 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.006>
- Mongird, K., Viswanathan, V., Alam, J., Vartanian, C., Sprenkle, V., & Baxter, R. (2020). *2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment*. 117.
- Moreira Rafael, S. I. (2012). *A Conversão Energética de Biomassa Florestal e a Qualidade do Ar*. Universidade de Aveiro.
- Moro, A., Boelman, E., Joanny, G., & Garcia, J. L. (2018). A bibliometric-based technique to identify emerging photovoltaic technologies in a comparative assessment with expert review. *Renewable Energy*, *123*, 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.016>
- Muthukumar, M., Rengarajan, N., Velliyangiri, B., Omprakas, M. A., Rohit, C. B., & Kartheek Raja, U. (2021). The development of fuel cell electric vehicles – A review. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 1181–1187. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.679>

- Na, H., Sun, J., Qiu, Z., Yuan, Y., & Du, T. (2022). Optimization of energy efficiency, energy consumption and CO₂ emission in typical iron and steel manufacturing process. *Energy*, 257, 124822. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124822>
- NASA. (2019). *GMS: 2018 Was the Fourth Hottest Year on Record*. <https://svs.gsfc.nasa.gov/13142>
- NASA Earth Observatory. (2021). *2020 Tied for Warmest Year on Record* [Text.Article]. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147794/2020-tied-for-warmest-year-on-record>
- National Centers for Environmental Information. (2018). *Annual 2018 Global Climate Report*. <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201813>
- Nicholas, T. E. G., Davis, T. P., Federici, F., Leland, J., Patel, B. S., Vincent, C., & Ward, S. H. (2021). Re-examining the role of nuclear fusion in a renewables-based energy mix. *Energy Policy*, 149, 112043. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112043>
- Obrist, M. D., Kannan, R., Schmidt, T. J., & Kober, T. (2022). Long-term energy efficiency and decarbonization trajectories for the Swiss pulp and paper industry. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 101937. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101937>
- Oh, K.-Y., Nam, W., Ryu, M. S., Kim, J.-Y., & Epureanu, B. I. (2018). A review of foundations of offshore wind energy convertors: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 88, 16–36. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.005>
- Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112111>

- Paoletti, G., Pascual Pascuas, R., Perneti, R., & Lollini, R. (2017). Nearly Zero Energy Buildings: An Overview of the Main Construction Features across Europe. *Buildings*, 7(4), 43. <https://doi.org/10.3390/buildings7020043>
- Pehl, M., Arvesen, A., Humpenöder, F., Popp, A., Hertwich, E. G., & Luderer, G. (2017). Understanding future emissions from low-carbon power systems by integration of life-cycle assessment and integrated energy modelling. *Nature Energy*, 2, 7.
- Pickard, S. C., Daood, S. S., Pourkashanian, M., & Nimmo, W. (2014). Co-firing coal with biomass in oxygen- and carbon dioxide-enriched atmospheres for CCS applications. *Fuel*, 137, 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.078>
- Pires, J. C. M., Martins, F. G., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Simões, M. (2011). Recent developments on carbon capture and storage: An overview. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), 1446–1460. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.01.028>
- Plötz, P. (2022). Hydrogen technology is unlikely to play a major role in sustainable road transport. *Nature Electronics*, 5(1), 8–10. <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00706-6>
- Poluzzi, A., Guandalini, G., d'Amore, F., & Romano, M. C. (2021). The Potential of Power and Biomass-to-X Systems in the Decarbonization Challenge: A Critical Review. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 8(4), 242–252. <https://doi.org/10.1007/s40518-021-00191-7>
- Pomponi, F., & Hart, J. (2021). The greenhouse gas emissions of nuclear energy – Life cycle assessment of a European pressurised reactor. *Applied Energy*, 290, 116743. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116743>
- Práválie, R., & Bandoc, G. (2018). Nuclear energy: Between global electricity demand, worldwide decarbonisation imperativeness, and planetary environmental implications.

- Journal of Environmental Management*, 209, 81–92.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.043>
- Rahman, F. A., Aziz, M. M. A., Saidur, R., Bakar, W. A. W. A., Hainin, M. R., Putrajaya, R., & Hassan, N. A. (2017). Pollution to solution: Capture and sequestration of carbon dioxide (CO₂) and its utilization as a renewable energy source for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 112–126.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.011>
- Raman, R., Nair, V. K., Prakash, V., Patwardhan, A., & Nedungadi, P. (2022). Green-hydrogen research: What have we achieved, and where are we going? Bibliometrics analysis. *Energy Reports*, 8, 9242–9260. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.058>
- Ren, J., & Kan, Z. (2021). *Photovoltaic Sustainability and Management*. AIP Publishing.
<https://doi.org/10.1063/9780735423152>
- REN21. (2022). *RENEWABLES 2022: GLOBAL STATUS REPORT*.
- Gaspar. (2014). *Perspetivas para a Produção de Energia Renovável em Portugal*. Universidade de Lisboa.
- Reza, M. S., Mannan, M., Wali, S. B., Hannan, M. A., Jern, K. P., Rahman, S. A., Muttaqi, K. M., & Mahlia, T. M. I. (2021). Energy storage integration towards achieving grid decarbonization: A bibliometric analysis and future directions. *Journal of Energy Storage*, 41, 102855. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102855>
- Riede, M., Spoltore, D., & Leo, K. (2021). Organic Solar Cells—The Path to Commercial Success. *Advanced Energy Materials*, 11(1), 2002653.
<https://doi.org/10.1002/aenm.202002653>

- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- Röder, M., Mohr, A., & Liu, Y. (2020). Sustainable bioenergy solutions to enable development in low- and middle-income countries beyond technology and energy access. *Biomass and Bioenergy*, *143*, 105876. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105876>
- Rubin, E. S., Davison, J. E., & Herzog, H. J. (2015). The cost of CO₂ capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *40*, 378–400. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.05.018>
- Salim, W., & Ho, W. S. W. (2018). Hydrogen purification with CO₂-selective facilitated transport membranes. *Current Opinion in Chemical Engineering*, *21*, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2018.09.004>
- Sandia National Laboratories. (2021). *DOE Global Energy Storage Database*. Tableau Software. https://public.tableau.com/views/gesdb_visualizations_09_17_2021_running_power_and_capacity/RatedPowerandCapacity?:embed=y&:showVizHome=no&:host_url=http%3A%2F%2Fpublic.tableau.com%2F&:embed_code_version=3&:tabs=no&:toolbar=yes&:animate_transition=yes&:display_static_image=no&:display_spinner=no&:display_overlay=yes&:display_count=yes&:language=en-US&:loadOrderID=0
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2014). General review of ground-source heat pump systems for heating and cooling of buildings. *Energy and Buildings*, *70*, 441–454. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.068>
- Schmidt, O., Gambhir, A., Staffell, I., Hawkes, A., Nelson, J., & Few, S. (2017). Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal*

of Hydrogen Energy, 42(52), 30470–30492.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.045>

Scita, R., Raimondi, P. P., & Noussan, M. (2020). Green Hydrogen: The Holy Grail of Decarbonisation? An Analysis of the Technical and Geopolitical Implications of the Future Hydrogen Economy. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.3709789>

Shirinbakhsh, M., & Harvey, L. D. D. (2021). Net-zero energy buildings: The influence of definition on greenhouse gas emissions. *Energy and Buildings*, 247, 111118.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111118>

Sladjana Djunusic. (2021). *Biomass role in decarbonisation should be restricted, ETC says*. Renewables Now. <https://renewablesnow.com/news/biomass-role-in-decarbonisation-should-be-restricted-etc-says-746803/>

Solar PV – Analysis. (2021). IEA. <https://www.iea.org/reports/solar-pv>

Sönnichsen N. (2022). *Oil prices 1960-2021*. (2022). Statista.
<https://www.statista.com/statistics/262858/change-in-opec-crude-oil-prices-since-1960/>

Sovacool, B. K., & Hirsh, R. F. (2009). Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. *Energy Policy*, 37(3), 1095–1103.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.10.005>

Sovacool, B. K., & Monyei, C. G. (2021). Positive Externalities of Decarbonization: Quantifying the Full Potential of Avoided Deaths and Displaced Carbon Emissions from Renewable Energy and Nuclear Power. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 5258–5271. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00140>

- Spath, P. L., & Mann, M. K. (2004). *Biomass Power and Conventional Fossil Systems with and without CO₂ Sequestration – Comparing the Energy Balance, Greenhouse Gas Emissions and Economics*.
- Steven Winter Associates, INC. (2016). *Net Zero Energy Buildings*. WBDG. <https://www.wbdg.org/resources/net-zero-energy-buildings>
- Sun, X., Hao, H., Zhao, F., & Liu, Z. (2017). Tracing global lithium flow: A trade-linked material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 124, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.012>
- Sustainability for all. (2019). *Green hydrogen in the energy transition*. <https://www.activesustainability.com/sustainable-development/green-hydrogen-energy-transition/>
- The Royal Society. (2020). *Ammonia: Zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*.
- Toklu, E. (2017). Biomass energy potential and utilization in Turkey. *Renewable Energy*, 107, 235–244. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.008>
- Costa, P. M. T. (2022). *Usinas Nucleares*. Cola da Web. <https://www.coladaweb.com/fisica/eletricidade/usinas-nucleares>
- European Commission (2022e). *Tutorials & Documentation | Knowledge for policy*. (2022). European Commission. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/text-mining/TIM_documentation_en
- UNECE. (2021). *Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources*.
- United Nations. (2022a). *Renewable energy – powering a safer future*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>

- United Nations. (2022b). *The Paris Agreement*. United Nations; United Nations.
<https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
- Ürge-Vorsatz, D., Khosla, R., Bernhardt, R., Chan, Y. C., Vérez, D., Hu, S., & Cabeza, L. F. (2020). Advances Toward a Net-Zero Global Building Sector. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 227–269. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012420-045843>
- Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I. F., & Bowen, P. J. (2018). Ammonia for power. *Progress in Energy and Combustion Science*, 69, 63–102.
<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.07.001>
- Van Hertem, D., Gomis-Bellmunt, O., & Liang, J. (Eds.). (2016a). HVDC Grids in the Energy Vision of the Future. Em *HVDC Grids* (pp. 1–1). John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/9781119115243.part1>
- Van Hertem, D., Gomis-Bellmunt, O., & Liang, J. (Eds.). (2016b). HVDC Technology and Technology for Offshore Grids. Em *HVDC Grids* (pp. 43–43). John Wiley & Sons, Inc.
<https://doi.org/10.1002/9781119115243.part2>
- Victoria, M., Haegel, N., Peters, I. M., Sinton, R., Jäger-Waldau, A., del Cañizo, C., Breyer, C., Stocks, M., Blakers, A., Kaizuka, I., Komoto, K., & Smets, A. (2021). Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule*, 5(5), 1041–1056.
<https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005>
- Vidal, R., Alberola-Borràs, J.-A., Sánchez-Pantoja, N., & Mora-Seró, I. (2021). Comparison of Perovskite Solar Cells with other Photovoltaics Technologies from the Point of View of Life Cycle Assessment. *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2(5), 2000088.
<https://doi.org/10.1002/aesr.202000088>

- Vishnyakov, V., Suleimanov, B., Salmanov, A., & Zeynalov, E. (2020). EOR on site implementation. In *Primer on Enhanced Oil Recovery* (pp. 191–201). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817632-0.00016-5>
- VOSviewer. (2022). *VOSviewer—Visualizing scientific landscapes*. <https://www.vosviewer.com/>
- Wang, D., Coignard, J., Zeng, T., Zhang, C., & Saxena, S. (2016). Quantifying electric vehicle battery degradation from driving vs. Vehicle-to-grid services. *Journal of Power Sources*, 332, 193–203. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.09.116>
- Wang, L., Wei, Y.-M., & Brown, M. A. (2017). Global transition to low-carbon electricity: A bibliometric analysis. *Applied Energy*, 205, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.107>
- Wang, S., Wang, S., & Liu, J. (2019). Life-cycle green-house gas emissions of onshore and offshore wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 210, 804–810. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.031>
- Wang, Y., Wang, J., & He, W. (2022). Development of efficient, flexible and affordable heat pumps for supporting heat and power decarbonisation in the UK and beyond: Review and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 154, 111747. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111747>
- Wang, Z., Bui, Q., Zhang, B., & Pham, T. L. H. (2020). Biomass energy production and its impacts on the ecological footprint: An investigation of the G7 countries. *Science of The Total Environment*, 743, 140741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140741>
- Watson, S., Moro, A., Reis, V., Baniotopoulos, C., Barth, S., Bartoli, G., Bauer, F., Boelman, E., Bosse, D., Cherubini, A., Croce, A., Fagiano, L., Fontana, M., Gambier, A., Gkoumas, K., Golightly, C., Latour, M. I., Jamieson, P., Kaldellis, J., ... Wiser, R.

- (2019). Future emerging technologies in the wind power sector: A European perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109270>
- TWI. (2022). *What are Technology Readiness Levels (TRL)?* (2022). TWI. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/technology-readiness-levels.aspx>
- Amadeo K. (2022). *What's Affecting Oil Prices in 2022?* (2022). The Balance. <https://www.thebalance.com/oil-price-forecast-3306219>
- Wilberforce, T., Baroutaji, A., Soudan, B., Al-Alami, A. H., & Olabi, A. G. (2019). Outlook of carbon capture technology and challenges. *Science of The Total Environment*, 657, 56–72. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.424>
- Wilson, C., Grubler, A., Bento, N., Healey, S., De Stercke, S., & Zimm, C. (2020). Granular technologies to accelerate decarbonization. *Science*, 368(6486), 36–39. <https://doi.org/10.1126/science.aaz8060>
- Wilson, C., Grubler, A., Gallagher, K. S., & Nemet, G. F. (2012). Marginalization of end-use technologies in energy innovation for climate protection. *Nature Climate Change*, 2(11), 780–788. <https://doi.org/10.1038/nclimate1576>
- Wimbadi, R. W., & Djalante, R. (2020). From decarbonization to low carbon development and transition: A systematic literature review of the conceptualization of moving toward net-zero carbon dioxide emission (1995–2019). *Journal of Cleaner Production*, 256, 120307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120307>
- WindPower. (2009). *Vertical Axis Wind Turbines vs Horizontal Axis Wind Turbines*. <https://www.windpowerengineering.com/vertical-axis-wind-turbines-vs-horizontal-axis-wind-turbines/>

- Wongthongtham, P., Marrable, D., Abu-Salih, B., Liu, X., & Morrison, G. (2021). Blockchain-enabled Peer-to-Peer energy trading. *Computers & Electrical Engineering*, *94*, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107299>
- Xia, X., & Li, P. (2022). A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. *Science of The Total Environment*, *814*, 152870. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152870>
- Xu, Q., Zhong, M., & Li, X. (2022). How does digitalization affect energy? International evidence. *Energy Economics*, *107*, 105879. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.105879>
- Yang, H., Xu, Z., Fan, M., Gupta, R., Slimane, R. B., Bland, A. E., & Wright, I. (2008). Progress in carbon dioxide separation and capture: A review. *Journal of Environmental Sciences*, *20*(1), 14–27. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60002-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60002-9)
- Zakari, A., Khan, I., Tan, D., Alvarado, R., & Dagar, V. (2022). Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs). *Energy*, *239*, 122365. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122365>
- Zakeri, B., Paulavets, K., Barreto-Gomez, L., Echeverri, L. G., Pachauri, S., Boza-Kiss, B., Zimm, C., Rogelj, J., Creutzig, F., Ürge-Vorsatz, D., Victor, D. G., Bazilian, M. D., Fritz, S., Gielen, D., McCollum, D. L., Srivastava, L., Hunt, J. D., & Pouya, S. (2022). Pandemic, War, and Global Energy Transitions. *Energies*, *15*(17), 6114. <https://doi.org/10.3390/en15176114>
- Zakeri, B., & Syri, S. (2015). Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 569–596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>

- Zhang, Y., Davis, D., & Brear, M. J. (2022). The role of hydrogen in decarbonizing a coupled energy system. *Journal of Cleaner Production*, 346, 131082. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131082>
- Zhang, Y.-H. P., & Huang, W.-D. (2012). Constructing the electricity–carbohydrate–hydrogen cycle for a sustainability revolution. *Trends in Biotechnology*, 30(6), 301–306. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2012.02.006>
- Zheng, G., Wu, H., Wang, J., Chen, S., & Zhang, Y. (2018). Thorium-based molten salt SMR as the nuclear technology pathway from a market-oriented perspective. *Annals of Nuclear Energy*, 116, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.02.004>
- Zhou, Z., Wang, B., Dong, M., & Ota, K. (2020). Secure and Efficient Vehicle-to-Grid Energy Trading in Cyber Physical Systems: Integration of Blockchain and Edge Computing. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 50(1), 43–57. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2896323>

ANEXOS

6. ANEXO A

Código VBA usado para programar o dicionário de sinónimos

```

' *****
' Identificar o tamanho da tabela do TIM e do dicionário de sinónimos:
' *****

Worksheets("Relevant").Select ' -----Seleciona o separador "relevant" = lista de palavras do TIM
i_l = 2 ' -----Começa na linha 2 (linha 1 = cabeçalho)
While Not IsEmpty(Cells(i_l, 1)) ' ----Enquanto não encontrar uma célula vazia incrementa 1 ao nº de linhas
    i_l = i_l + 1
Wend
i_l = i_l - 1
l = Range("A2" & ":" & i_l).Value ' --Tamanho da lista de palavras do TIM
Worksheets("Dicionario").Select ' ----Seleciona o separador "folha 1" = dicionário de sinónimos
i_k = 2
While Not IsEmpty(Cells(i_k, 1)) ' ----Enquanto não encontrar uma célula vazia incrementa 1 ao nº de linhas
    i_k = i_k + 1
Wend
i_k = i_k - 1
k = Range("A1" & ":" & i_k).Value ' -Tamanho do dicionário de sinónimos
iencont = 1

' *****
' Identificar palavras da lista do TIM no dicionário de sinónimos e respetiva soma no separador "resultado"
' *****

For i = 1 To i_l - 1 ' -----Corre todas as linhas da lista do TIM
    pal = l(i, 1) ' -----Lê a palavra da linha i

    For j = 1 To i_k - 1 ' -----Corre todas as linhas do dicionário de sinónimos

        For m = 1 To 41 ' -----Corre todas as colunas do dicionário de sinónimos
            If pal = k(j, m) Then ' ----Compara se a palavra da lista do TIM pertence ao dicionário
                Worksheets("resultado").Select
                Sheets("resultado").Cells(j, 2) = Sheets("resultado").Cells(j, 2) + l(i, 2) ' Se existir, soma na
                ' linha j de uma página de "resultados" criada, o valor da linha i, coluna 2 da lista do TIM
                Sheets("resultado").Cells(j, 3) = Sheets("resultado").Cells(j, 3) + 1 ' verifica quantas vezes foi
                ' somado um valor naquela linha/palavra
                Worksheets("encontrado").Select ' Seleciona o separador "encontrado"
                Cells(iencont, 1) = pal ' Copia a palavra encontrada para a 1º coluna do separador "encontrado"
                iencont = iencont + 1 ' Incrementa 1 para escrever na linha de baixo da próxima vez
            End If
        Next
    Next

' *****
' Constrói lista de palavras não encontradas no dicionário de sinónimos
' *****

ine = 1
For i = 1 To i_l - 1 ' ----- Corre todas as linhas da lista do TIM
    pal = l(i, 1) ' ----- Lê a palavra da linha i
    Worksheets("encontrado").Select
    avanc = True
    nnenc = 1
    While avanc ' ----- Enquanto a variável avanc for verdadeira...
        If pal = Cells(nnenc, 1) Or IsEmpty(Cells(nnenc, 1)) Then ' Se a palavra da lista do TIM for = à do dicionário
            ' ou aparecer um espaço em branco
            avanc = False ' ----- Então avanc passa a falso
        Else
            nnenc = nnenc + 1
        End If
    Wend
    If IsEmpty(Cells(nnenc, 1)) Then
        Worksheets("naoencontrado").Select
        Cells(ine, 1) = pal ' ----- Escreve no separador "naoencontrado" a palavra da lista do TIM
        ine = ine + 1
    End If
Next
End Sub
```