

GUSTAVO HENRIQUE ROMEU DA SILVA

**Análise das políticas e perspectivas no contexto atual da transição energética: uma
abordagem técnico-científica e comparativa abrangendo Brasil, Alemanha, Áustria e
Liechtenstein**

Gustavo Henrique Romeu da Silva

Análise das políticas e perspectivas no contexto atual da transição energética: uma abordagem técnico-científica e comparativa abrangendo Brasil, Alemanha, Áustria e Liechtenstein

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia em Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Andreas Nascimento
Coorientador: Dr. Diego Nascimento

Guaratinguetá
2025

S586a	Silva, Gustavo Henrique Romeu da Análise das políticas e perspectivas no contexto atual da transição energética: uma abordagem técnico-científica e comparativa abrangendo Brasil, Alemanha, Áustria e Liechtenstein / Gustavo Henrique Romeu da Silva - Guaratinguetá, 2025. 94 f : il. Bibliografia: f. 82-92 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientador: Prof. Dr. Andreas Nascimento Coorientador: Prof. Dr. Diego Nascimento 1. Política energética. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Desenvolvimento sustentável. 4. Hidrogênio. I. Título. CDU 620.91(043)
-------	---

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa contribui significativamente para o campo da transição energética, fornecendo uma análise comparativa entre países com perfis econômicos e políticos distintos — Brasil, Alemanha, Áustria e Liechtenstein —, abordando políticas, estratégias e desafios associados à adoção de fontes renováveis e ao uso do hidrogênio como vetor energético. Ao identificar lacunas, oportunidades e boas práticas internacionais, a dissertação fornece subsídios técnicos e científicos relevantes para a formulação de políticas públicas e para o aprimoramento de iniciativas nacionais voltadas à descarbonização da matriz energética. Os resultados também podem orientar decisões estratégicas em órgãos de fomento, centros de pesquisa e empresas do setor energético, além de reforçar o papel do Brasil no cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa).

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This study makes a significant contribution to the field of energy transition, providing a comparative analysis between countries with different economic and political characteristics, namely Brazil, Germany, Austria, and Liechtenstein. It addresses policies, strategies, and challenges related to the adoption of innovative fonts and the use of hydrogen as an energy source. By identifying gaps, opportunities, and good practices abroad, the dissertation provides technical and scientific information that is pertinent to the formulation of public policies and the improvement of national initiatives aimed at decarbonizing the energy matrix. The results can also help guide strategic decisions in development organizations, research centers, and energy sector companies, as well as strengthen Brazil's role in achieving the Sustainable Development Goals, particularly ODS 7 (Affordable and Clean Energy).

GUSTAVO HENRIQUE ROMEU DA SILVA

**Análise das políticas e perspectivas no contexto atual da transição energética:
uma abordagem técnico-científica e comparativa abrangendo Brasil,
Alemanha, Áustria e Liechtenstein**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 27/02/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANDREAS NASCIMENTO**
Data: 28/02/2025 11:16:09-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ANDREAS NASCIMENTO
Orientador - UNIFEI

Documento assinado digitalmente
 **TEOFILO MIGUEL DE SOUZA**
Data: 28/02/2025 17:01:24-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. TEOFILO MIGUEL DE SOUZA
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **JULIAN DAVID HUNT**
Data: 28/02/2025 13:33:46-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. JULIAN DAVID HUNT
KAUST

DADOS CURRICULARES

GUSTAVO HENRIQUE ROMEU DA SILVA

NASCIMENTO	14.04.2001 - Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Antônio Geraldo Pereira da Silva Luci Aparecida Romeu da Silva
2019/2023	Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá - Universidade Estadual Paulista
2017/2018	Curso Técnico Fabricação Mecânica - Instituto Federal de São Paulo - Campus Hortolândia

Dedico este trabalho aos meus pais Antônio
Geraldo e Luci Aparecida e ao meu irmão
Gabriel Vinícius que sempre acreditaram em
mim.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Aos meus pais Antônio e Luci, e meu irmão Gabriel que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos. O apoio de vocês certamente contribuiu para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Andreas Nascimento, por ter desempenhado tal função com dedicação e amizade. Sua orientação enriqueceu meu trabalho e ampliou meu conhecimento na área. Sou profundamente grato pela dedicação e compromisso que teve, os quais tiveram um impacto muito positivo em minha jornada acadêmica. Sem a orientação, dedicação e assistência dele, este trabalho não teria sido possível.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento. Em especial, às funcionárias da biblioteca, pela presteza e, sobretudo, pela disposição em ajudar.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI, por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP/FAPESP 34.1 FEG/UNESP pelo apoio financeiro.

A todos que participaram, direta ou indiretamente, do desenvolvimento deste trabalho de pesquisa e contribuíram para enriquecer o meu processo de aprendizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2024/12511-4 e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Brasil. Processo nº 044419, PRH-ANP/FAPESP 34.1 FEG/UNESP.

“A loucura, longe de ser uma anomalia, é a condição normal humana. Não ter consciência dela, e ela não ser grande, é ser homem normal. Não ter consciência dela e ela ser grande, é ser louco. Ter consciência dela e ela ser pequena é ser desiludido. Ter consciência dela e ela ser grande é ser gênio.”

(Fernando Pessoa, Aforismo e afins. São Paulo. Companhia das Letras, 2006, p.12)

RESUMO

Países como a Alemanha e Áustria, assim como Liechtenstein, enfrentam reflexos econômicos resultantes do conflito entre a Ucrânia e a Rússia, iniciado na primavera europeia de 2022, além de alguns desafios inerentes às necessidades globais de unir esforços para garantir uma economia de baixo carbono. O Brasil, por sua vez, apresenta um contexto econômico e político distinto, o que permite uma análise comparativa sobre políticas de transição energética sob diferentes perspectivas. Esta pesquisa analisou políticas e estratégias para a expansão de fontes renováveis em quatro países, com base em revisão bibliográfica nas bases *Scopus* e *Web of Science*, utilizando a linguagem R via *RStudio*. Em termos quantitativos, o Brasil tem 44,8% de sua matriz energética composta por fontes renováveis, enquanto a Alemanha, Áustria e Liechtenstein possuem 20,4%, 33,0% e 54,2%, respectivamente. Os resultados mostram que o Brasil possui grande potencial em fontes hídricas, eólicas, solares e biomassa, além de avanços na produção de hidrogênio renovável, apoiado por programas como PROINFA e RenovaBio. Na Europa, Áustria e Alemanha seguem caminhos distintos: a primeira com foco em biocombustíveis sólidos e metas ambiciosas como a Missão 2030; a segunda, com forte investimento em biogás e biocombustíveis líquidos, guiada pela política *Energiewende*. Liechtenstein também avança na transição energética, buscando a neutralidade climática até 2050. Os quatro países contribuem, em diferentes níveis, para o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (Energia Acessível e Limpa).

PALAVRAS-CHAVE: políticas energéticas; energia renovável; hidrogênio; transição energética, desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Countries such as Germany and Austria, as well as Liechtenstein, face economic consequences resulting from the conflict between Ukraine and Russia, which began in the spring of 2022, in addition to some challenges inherent to the global needs to join efforts to ensure a low-carbon economy. Brazil, in contrast, presents a distinct economic and political context, offering a valuable basis for a comparative analysis of energy transition policies from different perspectives. This research examined policies and strategies for the expansion of renewable energy sources in four countries, based on a literature review using the Scopus and Web of Science databases, with data processing conducted in R via RStudio. In quantitative terms, Brazil has 44.8% of its energy matrix composed of renewable sources, while Germany, Austria and Liechtenstein have 20.4%, 33.0% and 54.2%, respectively. The results indicate that Brazil has significant potential in hydropower, wind, solar, and biomass, as well as notable progress in renewable hydrogen development, supported by national programs such as PROINFA and RenovaBio. In Europe, Austria and Germany have taken different approaches: Austria focuses on solid biofuels and targets such as the “Mission 2030,” while Germany has invested heavily in biogas and liquid biofuels under the “Energiewende” strategy. Liechtenstein, although a small country, is also making progress in its energy transition, aiming for climate neutrality by 2050. These four countries, each in their own way, contribute to the achievement of Sustainable Development Goal 7 (Affordable and Clean Energy).

KEYWORDS: energy policy; renewable energy; hydrogen; energy transition, sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes formas de produção de hidrogênio.	20
Figura 2 – Transição do sistema global de energia de 1850 a 2100.....	23
Figura 3 – Aumento das concentrações de GEE na atmosfera.....	24
Figura 4 – Fluxograma da pesquisa.	28
Figura 5 – Fluxograma da pesquisa (continuação).....	28
Figura 6 – Fluxograma da pesquisa (continuação).....	30
Figura 7 – Fluxograma da pesquisa (continuação).....	31
Figura 8 – Fluxograma da pesquisa (continuação).....	32
Figura 9 – Rede de coocorrência de palavras-chave, 2019–2023.	33
Figura 10 – Palavras-chave relevantes sobre a produção de hidrogênio, 2018-2022.....	35
Figura 11 – Comparação da participação de fontes renováveis no consumo energético final bruto entre países (2022).	45
Figura 12 – Consumo energético final bruto por fonte (2022).....	46
Figura 13 – Evolução da capacidade de energia hidrelétrica, eólica e solar no Brasil.....	47
Figura 14 – Comparação da geração de eletricidade interna entre países (2022).	50
Figura 15 – Consumo final bruto de eletricidade por fonte (2022).	51
Figura 16 – PERH/AM.	56
Figura 17 – Mapa do potencial bruto de recursos eólicos <i>offshore</i> do Brasil.	60
Figura 18 – Potencial de geração fotovoltaica: radiação solar e população.	62
Figura 19 – Cadeia produtiva de hidrogênio verde a partir do uso de etanol 2G e processos produtivos simultâneos.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais fontes de emissão dos GEE.....	25
Tabela 2 – Palavras-chaves relacionadas ao escopo da pesquisa.	29
Tabela 3 – Artigos de pesquisa e artigos revisão sobre o escopo da pesquisa.	29
Tabela 4 – Associação de palavras-chave com métodos de produção de hidrogênio.	36
Tabela 5 – Resumo dos resultados para os potenciais bruto, técnico, ambiental e social....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BML	Ministério Federal da Agricultura, Florestas, Meio Ambiente e Gestão de Recursos Hídricos (do alemão, <i>Bundesministerium für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft</i> – BML)
BMWK	Ministério Federal da Economia e Proteção Climática (do alemão, <i>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz</i>)
CBIOs	Créditos de descarbonização
CCS	Captura e armazenamento de carbono (do inglês, <i>Carbon Capture and Storage</i>)
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
Conab	Companhia Nacional de Abastecimento
CRE	Energia Renovável Comunitária
EEG 2021	Lei Alemã de Fontes de Energia Renovável revisada (do alemão, <i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i>)
EnSiG	Lei de Segurança Energética do Aprovisionamento (do alemão, <i>Energiesicherheitsgesetz</i>)
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FITs	Tarifas de alimentação (do inglês, <i>Feed-in Tariffs</i>)
GCM	Modelos Climáticos Globais (do inglês, <i>Global Climate Models</i>)
GEE	Gases de efeito estufa
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IEA	Agência Internacional de Energia (do inglês, <i>International Energy Agency</i>)
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (do inglês, <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável (do inglês, <i>International Renewable Energy Agency</i>)
KLIEN	Fundo para o Clima e Energia (do alemão, <i>Klima-und Energiefonds</i>)
KSP 2050	Plano Alemão de Proteção Climática 2050 (do alemão, <i>Deutscher Klimaschutzplan 2050</i>)
KVBG	Lei Alemã de Encerramento da Geração de Energia a Carvão (do alemão, <i>Kohleausstiegsgesetz</i>)

LKW	Usinas de Energia de Liechtenstein (do alemão, <i>Liechtensteinische Kraftwerke</i>)
MME	Ministério de Minas e Energia
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NEKP	Plano Nacional de Energia e Clima (do alemão, <i>Nationale Energie- und Klimaplan</i>)
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
ODS 7	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (do inglês, <i>SDG – Sustainable Development Goal 7</i>)
ONU	Organização das Nações Unidas
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ÖGEE	Agência de Energia Renovável da Áustria (do alemão, <i>Österreichische Gesellschaft für erneuerbare Energie</i>)
ÖSG	Sociedade Austríaca de Estudos em Tecnologia de Controle (do alemão, <i>Österreichische Studiengesellschaft für Regelungstechnik</i>)
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PERH/AM	Plano Estadual de Recursos Hídricos do Amazonas
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas
RenovaBio	Política Nacional de Biocombustíveis
SEMA	Secretaria do Estado do Meio Ambiente
SEPA	Sistema Estadual de Proteção Ambiental
SMR	Reforma a vapor do metano (do inglês, <i>Steam methane reforming</i>)
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança Climática (do inglês, <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>)
WMFP	Plano de Gestão de Recursos Hídricos (do inglês, <i>Water Management Framework Plan</i>)

LISTA DE SIMBOLOS

CO ₂	Gás carbônico
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
H ₂	Hidrogênio
HFCs	Hidrofluorcarbonos
MW	Megawatt
N ₂ O	Óxido de nitrogênio
PFCs	Perfluorcarbonos
ppm	Partes por milhão
ppb	Partes por bilhão
SF ₆	Hexafluorsulfúrico
TiO ₂	Dióxido de titânio
TWh	Terawatt-hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.1.1	Objetivos específicos.....	21
1.2	JUSTIFICATIVA.....	21
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1	DESCARBONIZAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA.....	23
2.1.1	Aquecimento global	24
2.1.2	Protocolo de Kyoto.....	25
2.1.3	Acordo de Paris	26
2.1.4	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7: Energia Acessível e Limpa	27
3	METODOLOGIA	28
4	RESULTADOS.....	33
4.1	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DAS PUBLICAÇÕES SOBRE O TEMA	33
4.2	O PAPEL DO HIDROGÊNIO NO SISTEMA ENERGÉTICO GLOBAL.....	34
4.2.1	Caminhos sustentáveis para o setor de hidrogênio entre Brasil e Europa.....	38
4.2.2	Análise comparativa: desafios e oportunidades na produção de hidrogênio entre Brasil e Europa	40
4.2.3	Armazenamento de hidrogênio: um componente essencial na transição para uma energia sustentável.....	42
4.3	ANÁLISE INTEGRADA DOS CENÁRIOS ENERGÉTICO E ELÉTRICO ENTRE BRASIL, ÁUSTRIA, ALEMANHA E LIECHTENSTEIN	44
4.3.1	Análise comparativa da matriz energética	44
4.3.2	Análise comparativa da matriz elétrica	49
4.3.3	Potencial de geração de energias renováveis	54
4.3.3.1	<i>Fonte hídrica</i>	<i>55</i>
4.3.3.2	<i>Fonte eólica</i>	<i>58</i>
4.3.3.3	<i>Fonte solar.....</i>	<i>61</i>
4.3.3.4	<i>Biomassa.....</i>	<i>65</i>

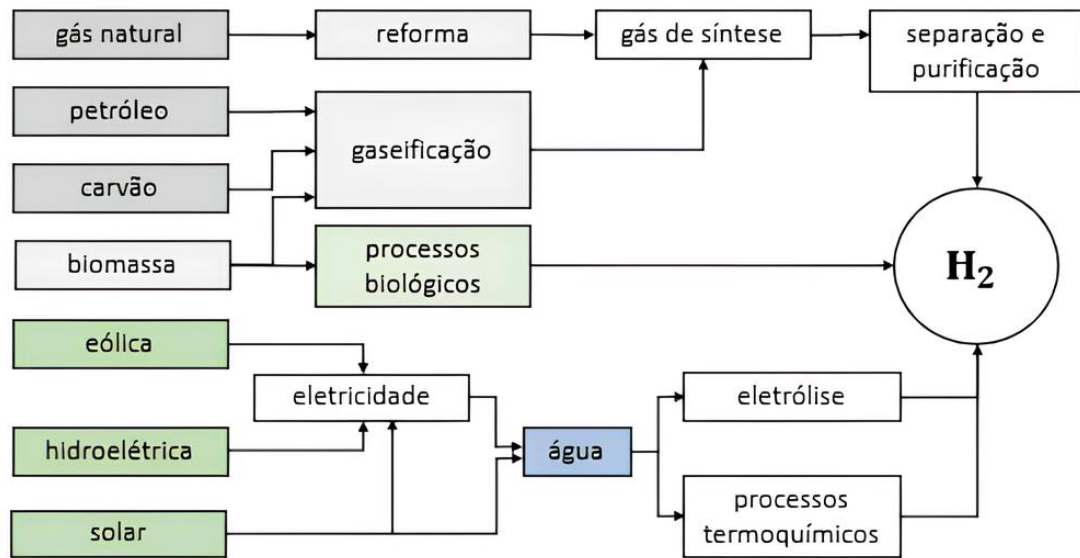
4.4	POLÍTICAS ENERGÉTICAS DE DESCARBONIZAÇÃO E CUMPRIMENTO DE METAS.....	68
4.4.1	Brasil	68
4.4.2	Áustria	70
4.4.3	Alemanha	74
4.4.4	Liechtenstein	77
4.4.5	Análise comparativa das políticas energéticas de descarbonização: desafios, implicações e direções futuras entre Brasil e Europa	78
5	CONCLUSÕES	80
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
	REFERÊNCIAS	82
	PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS E PUBLICAÇÕES DERIVADAS DA PESQUISA	93

1 INTRODUÇÃO

Países como a Alemanha e Áustria, assim como Liechtenstein, enfrentam reflexos econômicos resultantes do conflito entre a Rússia e a Ucrânia, iniciado na primavera europeia de 2022. Esse evento evidenciou a natureza volátil do comércio de energia transfronteiriço, caracterizado pela possibilidade de interrupções repentinas ou aumento expressivo nos preços. O uso de fontes fósseis ainda representa a maior parcela da matriz energética da maioria dos países. No Brasil, Alemanha e Áustria o consumo foi de 47,4%, 45,9% e 63,8%, respectivamente, no ano de 2022 (EPE, 2023; AG ENERGIEBILANZEN E.V, 2023; ENERGIE IN ÖSTERREICH, 2023). No caso de Liechtenstein, por ser um país de pequeno porte, grande parte de seu consumo energético depende de importações, principalmente da Suíça, cuja matriz energética combina fontes de energias renováveis, nucleares e fósseis. A dependência da importação de eletricidade implica que uma fração do consumo pode incluir energia de origem fóssil, a depender das fontes utilizadas pelos países exportadores para Liechtenstein.

Para suprir a escassez de energia e aumentar o uso de fontes energéticas sustentáveis, em conformidade com os acordos internacionais contra as mudanças climáticas, os governos buscam por meios cada vez mais ambiciosos para conter as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e diminuir sua dependência por combustíveis fósseis ou diversificar suas economias de energia (ZHONG & BRAZILIAN, 2018). Nesse cenário, o hidrogênio (H₂) vem sendo destacado como a fonte energética do futuro (SILVA *et al.*, 2025). Com o avanço das tecnologias de produção e distribuição, o H₂ poderá desempenhar um papel central na transição energética global, contribuindo para a redução das emissões de carbono e promovendo uma economia mais adaptável e sustentável. Os principais processos de produção de hidrogênio são ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Diferentes formas de produção de hidrogênio.



Fonte: SILVA (2023).

Atualmente, vários processos ocorrem na produção de H_2 (por exemplo, eletrólise e gaseificação), variando de acordo com a matéria-prima utilizada. As matérias-primas mais utilizadas na produção de H_2 são essencialmente combustíveis fósseis (por exemplo, gás natural, petróleo e carvão), biomassa e água. Cada uma dessas fontes exige processos distintos para a extração de hidrogênio. A reforma a vapor de gás natural é, de longe, o método mais utilizado, mas a eletrólise da água, embora menos difundida atualmente, é uma alternativa promissora. A eletricidade necessária para separar as moléculas de água (H_2O) em H_2 e oxigênio (O_2) é gerada exclusivamente a partir de fontes renováveis, como energia solar, eólica ou hidroelétrica. Esse método resulta em emissões nulas de dióxido e monóxido de carbono, tornando-o uma solução promissora para a transição energética e para a redução de emissões globais (ECKERT, 2021). A gaseificação de biomassa, por sua vez, oferece uma abordagem intermediária, utilizando resíduos orgânicos para produzir hidrogênio.

Esses diferentes processos deram origem à classificação do hidrogênio por "cores", que não se referem à aparência do gás, mas sim à forma como ele é produzido. O hidrogênio cinza é obtido a partir de combustíveis fósseis, com emissão significativa de CO_2 ; o azul segue o mesmo princípio, mas com captura e armazenamento de carbono (CCS); o verde é produzido por eletrólise da água com energia renovável, sendo considerado o mais limpo. Existem ainda outras classificações, como o hidrogênio turquesa, obtido por pirólise do metano, e o rosa, gerado com eletricidade de origem

nuclear. Esses métodos apresentam diferentes impactos ambientais e econômicos, e o avanço das tecnologias visa reduzir as emissões associadas e aumentar a eficiência dos processos.

Atualmente, cerca de metade da produção mundial de H_2 é a partir do gás natural, e a maior parte da produção em escala industrial é por meio do processo de reforma a vapor (48% da produção total de H_2 do mundo) ou como subproduto do refino de petróleo e da produção de compostos químicos (EPE, 2023). Portanto, sublinha a necessidade de esforços acelerados na transição para métodos de produção de H_2 mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é realizar uma análise da literatura sobre as políticas e perspectivas energéticas do Brasil, Alemanha, Áustria e Liechtenstein no contexto das energias renováveis, a fim de identificar semelhanças e diferenças das políticas dentre esses países, assim como realizar uma análise das estratégias de integração do hidrogênio como fonte energética sustentável.

1.1.1 Objetivos específicos

- Identificar as semelhanças e diferenças das políticas energéticas adotadas pela Alemanha, Áustria, Liechtenstein e Brasil, identificando os desafios e estratégias adotados por cada país para promover a transição para energias de fontes renováveis;
- Investigar as abordagens econômicas, políticas e ambientais na transição energética adotadas pelos quatro países;
- Identificar as contribuições de cada país para o conhecimento geral sobre políticas energéticas sustentáveis e sua relevância para a região e para o país.

1.2 JUSTIFICATIVA

A realização de uma revisão bibliográfica abrangente sobre as políticas e perspectivas energéticas do Brasil, Alemanha, Áustria e Liechtenstein no contexto da transição energética é de importância fundamental. Isso decorre da necessidade premente

de esclarecer as contribuições individuais de cada país para o conhecimento global em relação às políticas energéticas sustentáveis.

O Brasil apresenta um mercado econômico e político distinto da Áustria, Alemanha e Liechtenstein. Esse contraste permite uma análise das questões e soluções relacionadas ao uso das energias renováveis sob diferentes perspectivas, proporcionando uma visão mais abrangente sobre o tema.

A comparação das políticas energéticas e a exploração das estratégias para integrar o H₂ como fonte de energia revelarão percepções importantes sobre os principais desafios enfrentados por esses países, bem como as oportunidades para avançar na transição energética. Isso contribuirá para a criação de ações mais eficientes e soluções inovadoras na transição para fontes de energia renováveis. Esses discernimentos podem embasar o desenvolvimento de ações mais eficazes e soluções inovadoras no contexto da transição energética sustentável, sendo valioso para formuladores de políticas, pesquisadores e partes interessadas que desejam tomar decisões detalhadas sobre o futuro da produção de H₂ nesses locais.

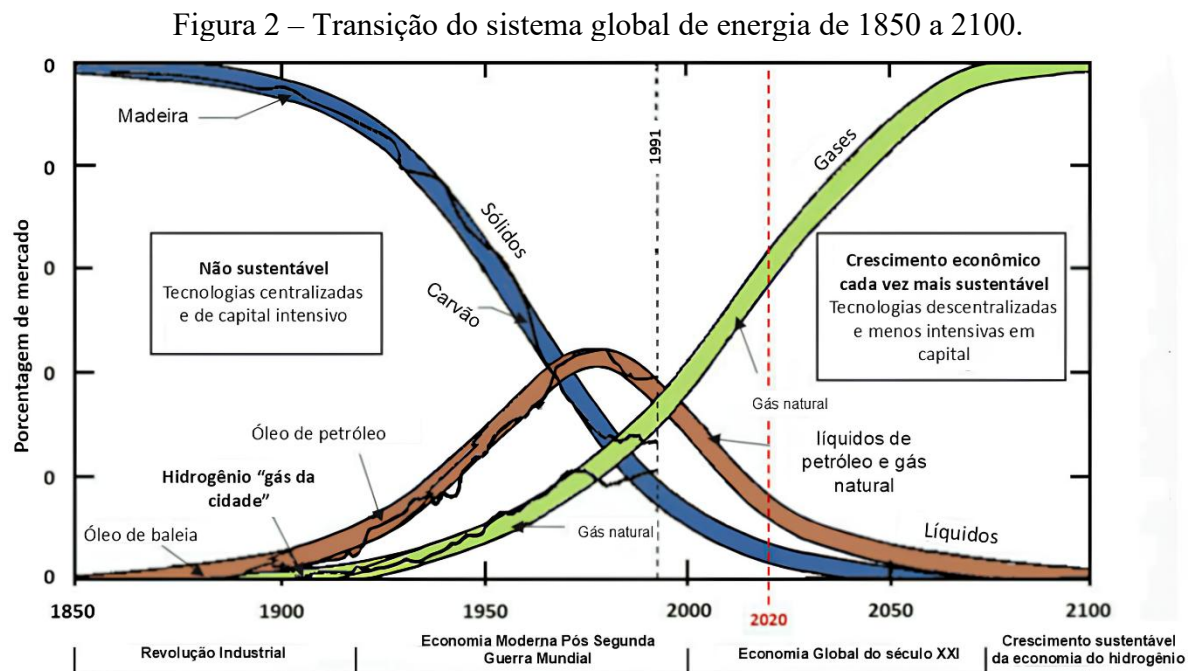
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

- O primeiro capítulo da dissertação apresenta a introdução, os objetivos e a justificativa do trabalho, além de descrever a estruturação da dissertação;
- O segundo capítulo aborda o referencial teórico, com foco no cenário de descarbonização das fontes de energia;
- O terceiro capítulo detalha a metodologia adotada para a condução da pesquisa;
- O quarto capítulo apresenta os resultados da pesquisa, incluindo uma revisão bibliográfica, análise bibliométrica de artigos técnico-científicos, estudo sobre o hidrogênio e o cenário energético, além da avaliação das políticas de descarbonização nos países analisados;
- Por fim, o capítulo final apresenta as conclusões do estudo e propõe direções para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DESCARBONIZAÇÃO DAS FONTES DE ENERGIA

No contexto da redução das emissões de carbono nas fontes de energia, é evidente que ao longo do tempo tem havido uma tendência de diminuição dos índices de carbono emitidos pelos veículos automotivos. Essa mudança reflete um compromisso crescente com a preservação ambiental e a busca por opções mais sustentáveis e eficientes no campo do transporte. A Figura 2 ilustra a perspectiva da transição do sistema global de energia desde 1850 até 2100.



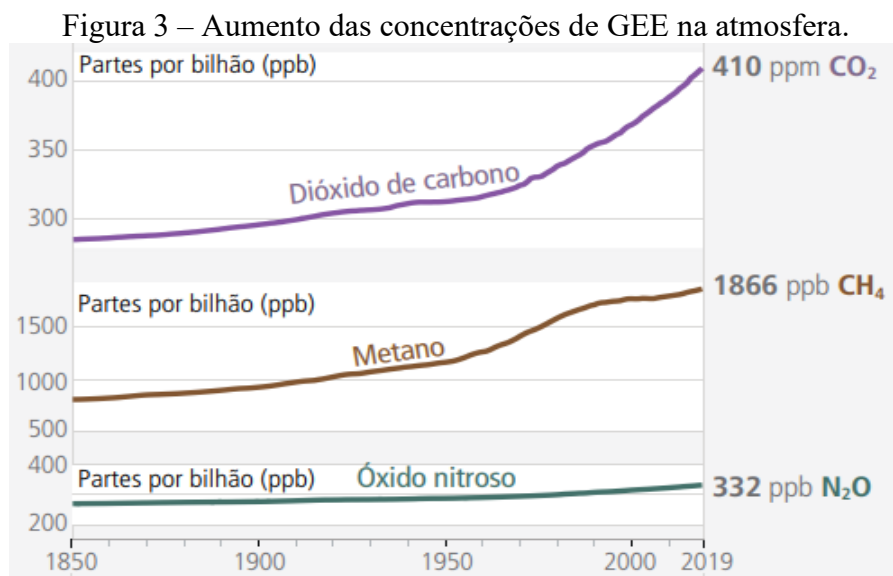
Fonte: Adaptado de MACEDO, SORIA & MADEIRA (2021).

Conforme ilustrado na Figura 2, até o final do século XIX, a madeira e o carvão eram amplamente utilizados. No século XX, conhecido como o século do petróleo, houve um aumento significativo no uso desse recurso natural não renovável, que tem uma menor proporção de carbono em comparação com o carvão. Posteriormente, na segunda metade do século XX, a utilização de gases para geração de energia, como o uso de gás natural, teve início. Nesse contexto, observa-se uma tendência de aumento no uso do hidrogênio, alinhado com a trajetória de descarbonização das fontes de energia.

2.1.1 Aquecimento global

Os Modelos Climáticos Globais (do inglês, *Global Climate Models – GCM*) têm calculado que as emissões originadas das atividades humanas estão provocando uma intensificação do efeito estufa. Como resultado, desde 1861, observa-se um aumento na temperatura média da Terra em cerca de $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,2$). Mesmo que as concentrações dos GEE cessassem de aumentar, eles ainda contribuiriam para uma tendência de aquecimento global, pois alguns desses gases possuem uma longa vida útil, permanecendo na atmosfera por um período considerável após sua emissão (XAVIER & KERR, 2004).

Entre as potenciais ramificações desse fenômeno de aquecimento global, destacam-se: o aumento dos níveis dos oceanos devido ao derretimento do gelo polar e à expansão térmica da água, a diminuição das geleiras e das coberturas de neve em montanhas, o incremento na formação de nuvens, vapor d'água e, conseqüentemente, no volume de precipitações, bem como a modificação das características ambientais em diversas regiões (XAVIER & KERR, 2004). Na Figura 3, são ilustrados os principais gases que contribuem para o efeito estufa, segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (do inglês, *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*).



Fonte: IPCC (2023).

Segundo o relatório do IPCC (2023), desde 1750, as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) aumentaram significativamente, atingindo níveis mais altos do que em qualquer momento nos últimos 2

milhões de anos para o CO₂ e 800 mil anos para CH₄ e N₂O. Especificamente, em 2019, as concentrações atingiram 410 ppm para o CO₂, 1866 ppb para o CH₄ e 332 ppb para o N₂O. Essas tendências evidenciam um aumento expressivo do CH₄ em comparação aos outros gases, amplamente atribuído a atividades humanas como agricultura, aterros sanitários e tratamento de águas residuais. As principais fontes de emissão de GEE são detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais fontes de emissão dos GEE.

Gases	Participação na área bruta de recursos eólicos (%)
CO ₂	Uso de combustíveis fósseis, deflorestação e alteração dos usos do solo 100.
CH ₄	Produção e consumo de energia (incluindo biomassa), atividades agrícolas, aterros sanitários e águas residuais.
N ₂ O	Uso de fertilizantes, produção de ácidos e queima de biomassa e combustíveis fósseis.
HFC, PFC e SF ₆	Indústria, refrigeração, aerossóis, propulsores, espumas expandidas e solventes.

Fonte: Adaptado de PENNA (1999).

A persistência desses aumentos ressalta que alcançar uma melhoria significativa na qualidade do ar e uma mitigação efetiva das mudanças climáticas ainda é um desafio, apesar de medidas globais como o Acordo de Paris. Portanto, é necessário que continuemos a buscar soluções inovadoras e a fortalecer a cooperação internacional para enfrentar esses desafios ambientais de maneira eficaz.

2.1.2 Protocolo de Kyoto

O Protocolo de Kyoto, também conhecido como COP3, 3ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (do inglês, *United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC*), é uma das mais significativas iniciativas internacionais para combater a degradação do meio ambiente, e requer que os países signatários mitiguem suas emissões de gases poluentes. As contribuições das partes signatárias são consideradas progressivas, sendo voluntárias e não vinculativas (ZAFAR *et al.*, 2020).

As metas do Protocolo de Kyoto incluem:

- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990 durante o período de 2008 a 2012;
- Estabelecer mecanismos de mercado, como o Comércio de Emissões, Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e Implementação Conjunta (IC), para ajudar os países a atingirem suas metas de redução de emissões;
- Promover a cooperação internacional para o desenvolvimento e transferência de tecnologias limpas e sustentáveis;
- Incentivar a implementação de políticas e medidas nacionais para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Desde a assinatura do Protocolo de Kyoto, as Nações Unidas têm promovido conferências anuais sobre mudanças climáticas. Na última edição, a COP26, 26ª Conferência das Partes da UNFCCC, sediada em Glasgow, Reino Unido, em 2021, os países participantes firmaram compromissos para aprimorar a qualidade ambiental (PATA & ERTUGRUL, 2023).

O Protocolo de Kyoto marcou o início de uma era na luta contra as mudanças climáticas. Posteriormente, o Acordo de Paris substituiu esse protocolo, conferindo um novo impulso à causa e estabelecendo metas mais abrangentes e ambiciosas para a ação climática global.

2.1.3 Acordo de Paris

No cenário global, a Conferência das Partes realizada em dezembro de 2015 resultou no histórico Acordo de Paris, onde 195 países se comprometeram coletivamente com ações climáticas urgentes. Este acordo estabeleceu o ambicioso objetivo de limitar o aquecimento global a bem menos de 2°C, com esforços para restringir ainda mais a 1,5°C. As contribuições determinadas a nível nacional surgiram como um resultado tangível, com os países a prometerem iniciativas como o aumento da utilização de fontes de energia renováveis, o aumento da eficiência energética e a redução das emissões de CO₂ em vários sectores, incluindo os transportes e a gestão de resíduos (FRAGKOS *et al.*, 2017).

O Acordo de Paris não apenas sucedeu o Protocolo de Kyoto, mas também marcou uma mudança significativa na abordagem dos acordos climáticos internacionais. Diferentemente de seu antecessor, ele estabeleceu metas obrigatórias tanto para países desenvolvidos quanto para aqueles em desenvolvimento, promovendo uma abordagem

inclusiva e universal. Além disso, ao introduzir objetivos mais ambiciosos e amplamente aceitos, o acordo reafirma o compromisso global com um futuro sustentável e resiliente às mudanças climáticas.

Com uma adesão significativa de países de todos os continentes, como Estados Unidos, China, Canadá, Alemanha, Áustria e Brasil, o Acordo de Paris demonstra a importância da cooperação internacional no enfrentamento das mudanças climáticas. Esse esforço conjunto busca não apenas reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas também incentivar a adoção de energias renováveis, promover a eficiência energética e assegurar o cumprimento das metas climáticas de longo prazo.

2.1.4 Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7: Energia Acessível e Limpa

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) são uma iniciativa global estabelecida pela Organização das Nações Unidas (ONU) como parte da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Entre os 17 ODS, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS 7) visa assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos. Este objetivo é fundamental para promover o desenvolvimento econômico, melhorar a qualidade de vida e combater as mudanças climáticas.

O ODS 7 foca em três principais metas:

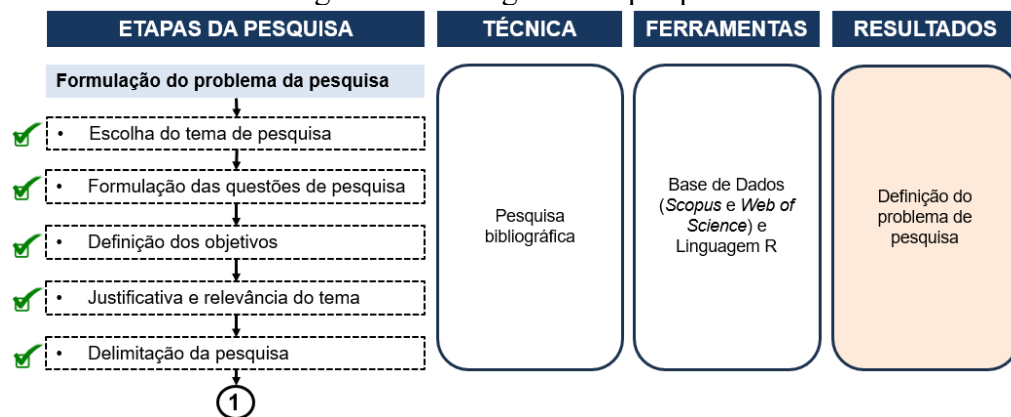
- Aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global;
- Duplicar a taxa global de melhoria da eficiência energética;
- Assegurar o acesso universal, confiável, moderno e a preço acessível a serviços de energia.

O cumprimento do ODS 7 é vital para o desenvolvimento sustentável global. A análise das matrizes energéticas de países como Brasil, Áustria e Alemanha mostra diferentes abordagens e progressos na adoção de fontes de energia renováveis. Cada país, aproveitando suas características e recursos naturais, está contribuindo para a meta global de assegurar energia acessível, confiável e sustentável. O Brasil, em particular, demonstra um potencial significativo para se tornar um líder em energia renovável, alinhando-se às metas do ODS 7 e promovendo um futuro energético mais limpo e sustentável.

3 METODOLOGIA

Conforme enfatizado por Köche (2011), a pesquisa bibliográfica desempenha um papel fundamental em qualquer investigação, uma vez que capacita o pesquisador a analisar e assimilar teorias e contribuições essenciais e preexistentes relacionadas ao tópico sob análise. A pesquisa teve início com a formulação do problema, definição dos objetivos, justificativa, relevância e delimitação do tema, conforme ilustrado na Figura 4.

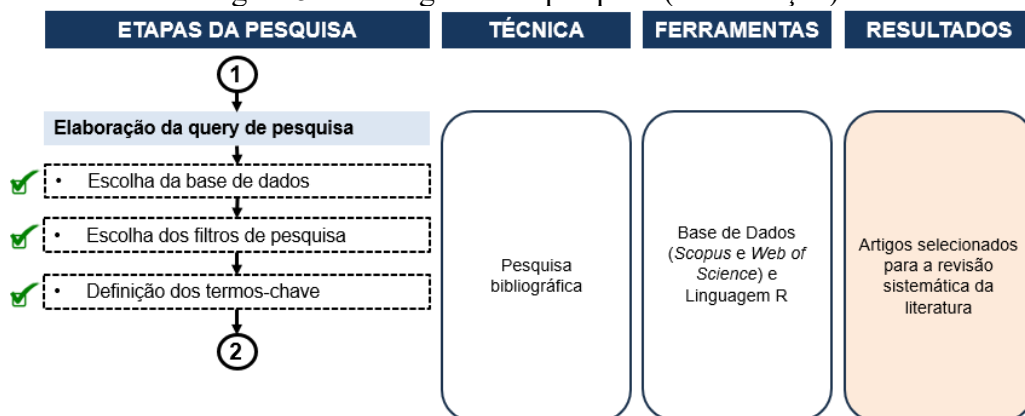
Figura 4 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A escolha das bases de dados Scopus e Web of Science para esta pesquisa fundamenta-se em sua reputação consolidada e abrangência multidisciplinar. A decisão foi respaldada pela confiabilidade e pela habilidade destas bases de dados em oferecer um panorama detalhado da produção científica atual sobre o tema em questão. Em seguida, Figura 5, prescindiu-se a escolha dos filtros de pesquisa e definição dos termos-chave.

Figura 5 – Fluxograma da pesquisa (continuação).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, realizaram-se análises das palavras-chave nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science*. Os filtros utilizados na pesquisa consideraram documentos redigidos em inglês, publicados entre 2018 e 2023, classificados como “*article*” ou “*review*” e buscados nos campos “*title-abstract-keywords*”. Foram encontrados diversos documentos, como mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Palavras-chaves relacionadas ao escopo da pesquisa.

Palavras-chave	Resultado	
	<i>Scopus</i>	<i>Web of Science</i>
“ <i>Energy transition</i> ” AND termos similares	137.879	96.056
AND “ <i>Policies</i> ” AND termos similares	20.867	17.920
AND “ <i>Germany</i> ” OR “ <i>Austria</i> ” OR “ <i>Liechtenstein</i> ”	792	826
AND “ <i>Brazil</i> ”	18	16

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Tabela 2, constata-se um grande volume de documentos, o que denota a relevância e atualidade do tema. Além disso, percebe-se uma pequena quantidade de documentos que realizam análises comparativas do Brasil com países europeus, apenas 18 documentos da *Scopus* e 16 na *Web of Science*.

Através do emprego da Linguagem R, consolidou-se os documentos obtidos nas bases *Scopus* e *Web of Science*, eliminando qualquer duplicidade de artigos e separando-os por país, conforme ilustrado na Tabela 3. Isso foi realizado com o propósito de aprofundar a compreensão do problema em questão e garantir a clareza nos resultados e discussões.

Tabela 3 – Artigos de pesquisa e artigos revisão sobre o escopo da pesquisa.

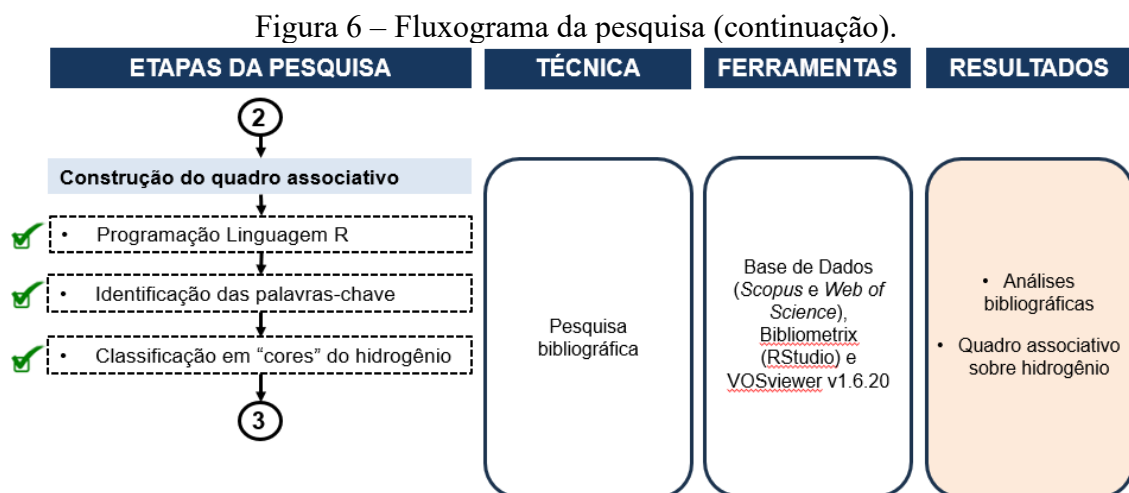
Países	Resultado		
	<i>Scopus</i>	<i>Web of Science</i>	União sem duplicidade
Brasil	420	365	562
Alemanha	735	779	1059
Áustria	92	75	118
Liechtenstein	0	0	0
Total de artigos	1184	1174	1670

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse contexto, como observado na Tabela 3, existe um número substancial de artigos relacionados ao tópico de pesquisa. Evidencia-se que o total de documentos encontrados seguindo os critérios de refinamento empregados foi de 1670, dos quais 1059 abordavam as políticas energéticas relacionadas a energias renováveis com foco na Alemanha, 562 no caso do Brasil e 118 no contexto da Áustria. Para Liechtenstein não foi encontrado nenhum documento, o que evidencia oportunidade de pesquisa.

As bases de dados selecionadas proporcionam uma visão abrangente das pesquisas sobre transição energética e produção de hidrogênio, permitindo a análise de tendências com o uso de métricas bibliométricas e ferramentas analíticas, incluindo *Bibliometrix*, desenvolvido na linguagem R e o *software* de visualização *VOSviewer*, versão 1.6.20.

Utilizando da ferramenta *Bibliometrix* foi possível a construção do quadro associativo, como evidenciado na Figura 6, classificando as principais palavras-chaves encontradas no escopo da pesquisa de acordo com os processos de obtenção de hidrogênio em escala de cores.

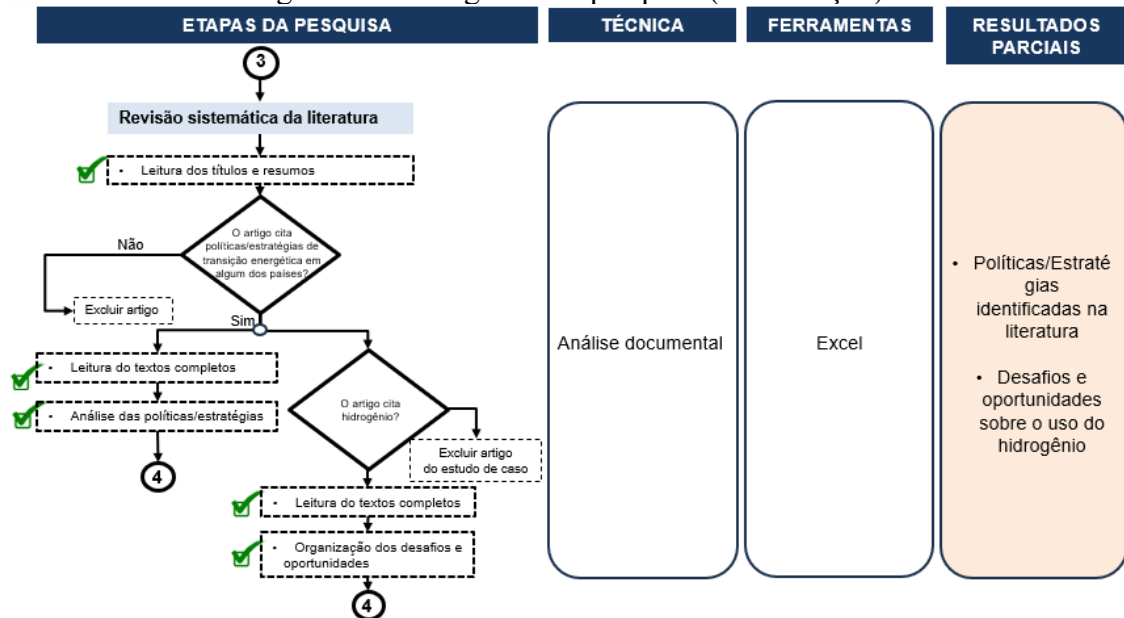


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a construção do quadro associativo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura e, para permitir a leitura e a revisão teórica individual dos artigos, foi empregado um critério adicional de refinamento constituído da seguinte forma: caso o conjunto de artigos (abrangendo o Brasil, Alemanha, Áustria ou Liechtenstein) exceda 100, a análise será focada nos 100 artigos mais citados. Portanto, a análise foi delimitada em 300 artigos.

Posteriormente, cada artigo foi analisado individualmente para verificar se mencionava políticas ou estratégias de transição energética em algum dos países delimitados pelo estudo, conforme esquematizado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma da pesquisa (continuação).

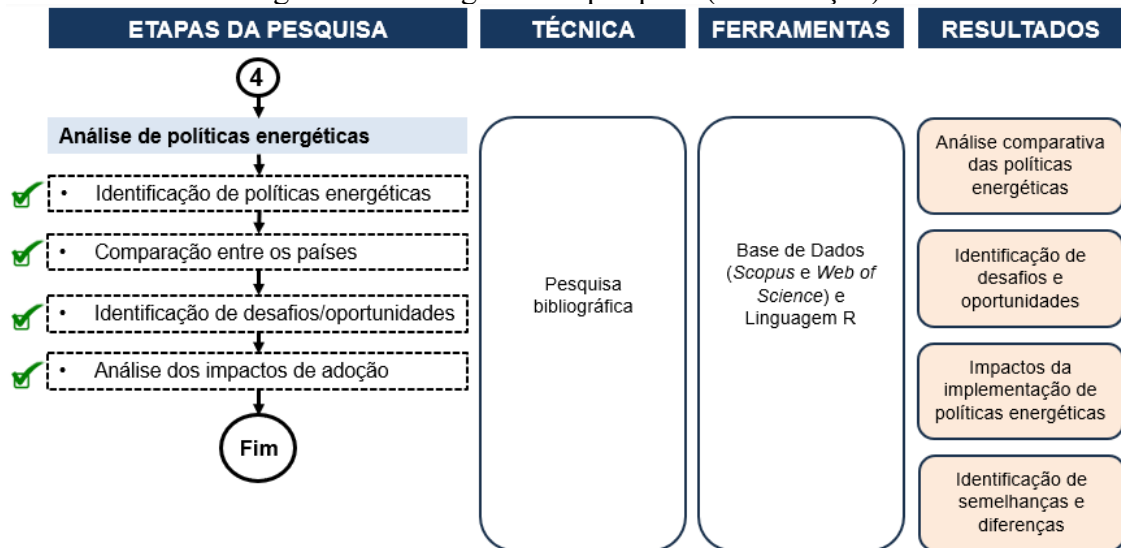


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, procedeu-se à leitura completa dos artigos selecionados, com o objetivo de identificar as políticas e estratégias relacionadas à transição energética discutidas na literatura, além de mapear os desafios e oportunidades associados ao uso do hidrogênio nesse contexto.

Na etapa de análise das políticas energéticas, conforme apresentado na Figura 8, foi realizado um processo detalhado de identificação e comparação das políticas adotadas por diferentes países. Esse procedimento teve como objetivo principal destacar os desafios mais relevantes enfrentados pelo setor, bem como identificar oportunidades estratégicas que possam ser exploradas. Além disso, buscou-se avaliar os impactos potenciais associados à adoção dessas políticas, considerando tanto os aspectos positivos quanto as possíveis limitações, de forma a fornecer uma visão abrangente sobre o cenário energético global.

Figura 8 – Fluxograma da pesquisa (continuação).



Fonte: Elaborado pelo autor.

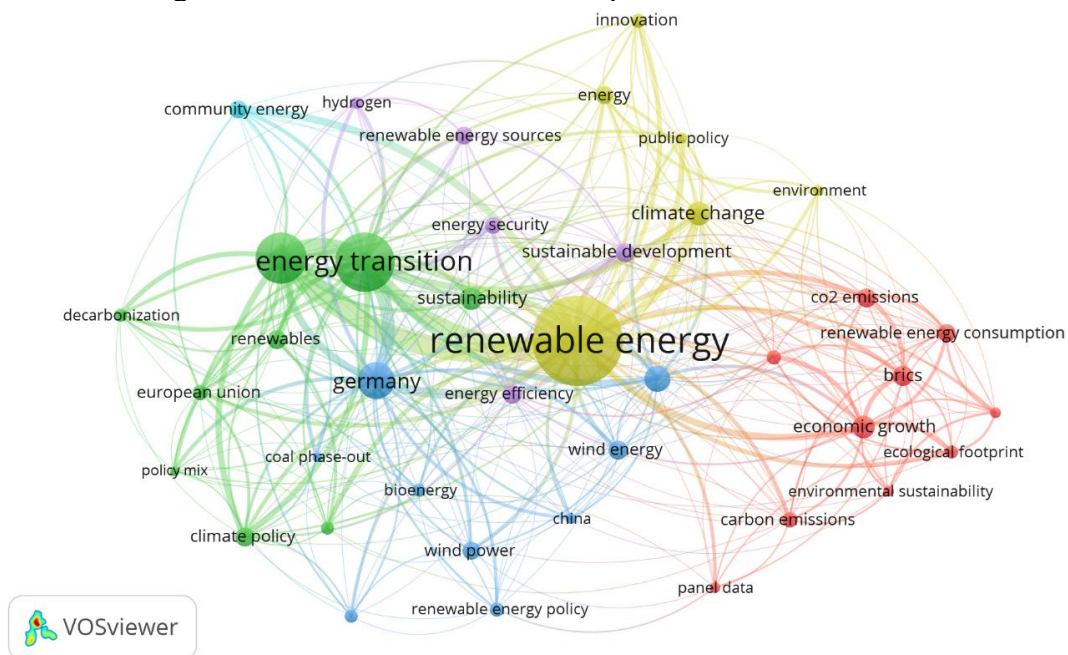
Além da revisão sistemática de artigos avaliados, esta pesquisa utilizou dados e informações provenientes de relatórios técnico-científicos de agências de fomento, como a Agência Internacional de Energia, a Empresa de Pesquisa Energética e a *Statistik Austria*, Enerdata entre outras fontes, incluindo dados governamentais relevantes. Para analisar o cumprimento das metas de energias renováveis, inicialmente foram coletados os dados sobre a participação de energias renováveis na matriz energética de cada país. Esses dados foram obtidos das bases de dados da Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2023) para o Brasil, da *Statistik Austria* (2023), *Enerdata* (2023) para a Alemanha e Áustria, e de *The Global Economy* (2023) e *Liechtensteinische Kraftwerke* (2024) para Liechtenstein, cobrindo o período de 2013 a 2022.

4 RESULTADOS

4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DAS PUBLICAÇÕES SOBRE O TEMA

Para identificar as tendências nas publicações sobre transição energética, é realizada uma análise das palavras-chave que aparecem com maior frequência nos artigos. A análise bibliométrica apresentada na Figura 9 revela uma rede de coocorrência de palavras-chave relacionadas ao tema da transição energética, abrangendo publicações científicas do período de 2019 a 2023. Essa análise visual destaca os principais conceitos e suas interconexões, evidenciando as tendências mais relevantes no campo das energias renováveis e da transição energética.

Figura 9 – Rede de coocorrência de palavras-chave, 2019–2023.



Fonte: O autor (2025).

O termo "*renewable energy*" (energia renovável) ocupa o centro da rede, reafirmando sua posição como tema predominante nos debates acadêmicos e políticos. Conectado diretamente a ele, "*energy transition*" (transição energética) destaca-se como conceito chave, envolvendo discussões sobre políticas públicas, eficiência energética e segurança energética. Tais tópicos são diretamente relevantes para o objetivo desta dissertação, que busca analisar as políticas e perspectivas atuais da transição energética em países como Brasil, Alemanha, Áustria e Liechtenstein.

Entre os termos relacionados, a Alemanha aparece em destaque, refletindo sua liderança e ampla produção científica no campo da transição energética, sendo frequentemente associada a conceitos como "*policy mix*" (mix de políticas) e "*climate policy*" (políticas climáticas). Isso evidencia a importância das combinações estratégicas de políticas no sucesso da transição energética, especialmente no contexto da descarbonização, outro termo central na rede. Este ponto é crucial, considerando que a redução de emissões de carbono é um objetivo comum entre os países analisados.

A análise também revela a inter-relação entre aspectos ambientais, sociais e econômicos da transição energética, evidenciada pela conexão entre palavras-chave como "*sustainability*" (sustentabilidade), "*climate change*" (mudança climática) e "*economic growth*" (crescimento econômico). Esses aspectos reforçam a natureza multifacetada do tema, integrando dimensões técnico-científicas e políticas.

Adicionalmente, tecnologias específicas de energia, como "*wind power*" (energia eólica), "*hydrogen*" (hidrogênio) e "*bioenergy*" (bioenergia), aparecem frequentemente nas publicações, indicando a relevância dessas fontes de energia renováveis no processo de transição energética. A Figura 11 também aponta a importância de contextos regionais e comparativos, destacando termos como "*European Union*" (União Europeia) e "BRICS" – sigla para um grupo de países emergentes composto por Brasil, Rússia, Índia, China e Sul (África do Sul), que refletem as tendências globais e os desafios enfrentados por países em diferentes níveis de desenvolvimento, como o Brasil.

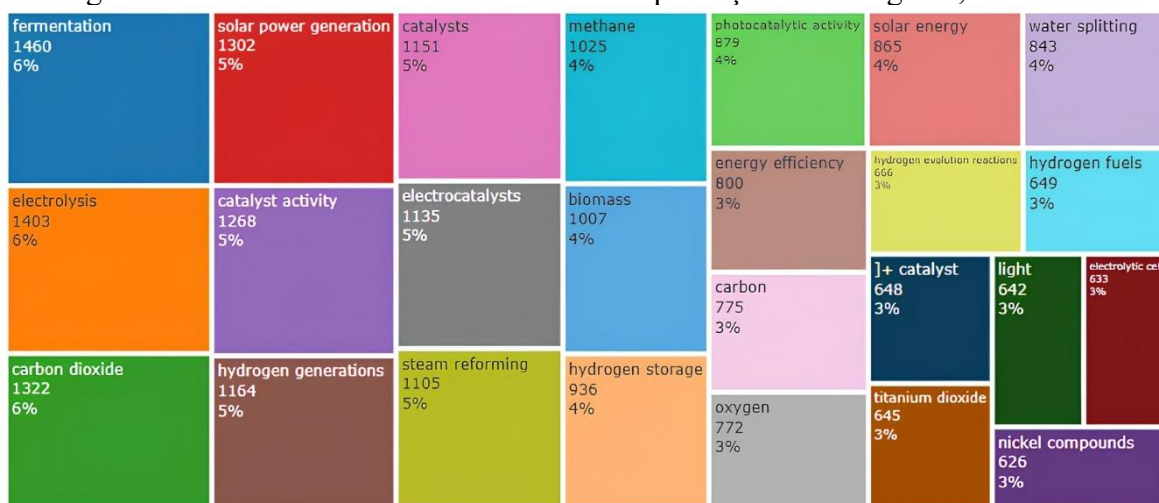
A partir dessa análise, é possível observar indícios de lacunas e convergências entre as discussões globais e os contextos específicos de Brasil, Alemanha, Áustria e Liechtenstein. A presença significativa da Alemanha na rede reforça seu papel como modelo de referência para a implementação de políticas voltadas à transição energética, enquanto os demais países podem oferecer abordagens complementares que enriquecem a análise comparativa proposta nesta dissertação.

4.2 O PAPEL DO HIDROGÊNIO NO SISTEMA ENERGÉTICO GLOBAL

Dentro das publicações envolvendo as três nações, um método utilizado para averiguar as tendências dos documentos é por meio da análise das palavras-chaves que aparecem com mais frequência nos artigos, ou seja, as palavras-chaves mais relevantes relacionadas a *query* de pesquisa. A visualização em mapa de árvore, apresentada na Figura

10, oferece uma visão abrangente das palavras-chave mais relevantes e suas frequências em uma compilação de artigos publicados entre 2018 e 2022 sobre a produção de hidrogênio. A análise considerou artigos e revisões em inglês, indexados na base Scopus, escolhida por sua ampla cobertura de periódicos científicos e relevância para estudos bibliométricos.

Figura 10 – Palavras-chave relevantes sobre a produção de hidrogênio, 2018-2022.



Fonte: DA SILVA *et al.* (2024).

Com base na análise da Figura 10, várias conclusões podem ser extraídas em relação às palavras-chave mais relevantes na literatura revisada. Notavelmente, a fração de referências correspondente a "*fermentation*" (fermentação), "*electrolysis*" (eletrólise) e "*carbon dioxide*" (dióxido de carbono), cada uma, equivale a 6% do número total de referências, indicando uma ênfase compartilhada em diversos métodos de produção de hidrogênio e um compromisso de abordar as preocupações ambientais, particularmente as emissões de carbono. As palavras relativas à "*catalyst activity*" (atividade catalítica), "*hydrogen generation*" (geração de hidrogênio) e "*electrocatalysts*" (eletro catalizadores), cada um com 5%, ressaltam o papel central dos catalisadores no aumento da eficiência dos processos de produção de hidrogênio.

"*Steam reforming*" (reforma a vapor) e "*methane*" (metano) em 5% e 4%, respectivamente, sugerem pesquisas sobre métodos alternativos de produção de hidrogênio e a utilização de metano como matéria-prima. Além disso, "*biomass*" (biomassa) e "*hydrogen storage*" (armazenamento de hidrogênio) a 4% destacam a importância de matérias-primas sustentáveis e soluções de armazenamento eficientes. As palavras-chave "*photocatalytic activity*" (atividade fotocatalítica) e "*energy efficiency*" (eficiência energética) em 4% e 3%, respectivamente, mostram a busca pela produção de hidrogênio

com eficiência energética e ecologicamente correta por meio de fotocatalise e inovações relacionadas ao carbono. A presença de "*solar energy*" (energia solar) e "*titanium dioxide*" (dióxido de titânio) a 3% cada significa interesse em aproveitar a energia solar para a divisão da água, muitas vezes utilizando dióxido de titânio como fotocatalisador.

A Tabela 4 representa a associação das palavras-chave com os métodos de produção de hidrogênio. Coletivamente, essas palavras-chave retratam uma abordagem multidisciplinar para avançar nas tecnologias de produção de hidrogênio, impulsionada por um compromisso com soluções energéticas sustentáveis e ambientalmente responsáveis.

Tabela 4 – Associação de palavras-chave com métodos de produção de hidrogênio.

(continua)

Palavras-chave	Formas de produção de hidrogênio					Descrição
	Verde	Cinza	Azul	Marrom	Branco	
Fermentação	x	x				Vários estudos na literatura utilizam processos de fermentação para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a produção de H ₂ , enquanto outros o consideram como cinza.
Eletrólise	x					Entre vários métodos de produção de hidrogênio, o hidrogênio ecológico e de alta pureza pode ser obtido através da eletrólise da água. O hidrogênio cinza é produzido através da reforma do metano a vapor (SMR), enquanto o hidrogênio azul é derivado do SMR com captura e armazenamento de CO ₂ (CCS).
Dióxido de carbono		x	x			A atividade do catalisador pode ser avaliada em vários processos de hidrogênio, incluindo processos cinza, branco, azul, marrom e verde. A tecnologia de geração de hidrogênio assume um papel central na determinação do curso da utilização do hidrogênio, exercendo uma profunda influência em suas aplicações multifacetadas em diversos setores.
Atividade catalítica	x	x	x	x	x	
Gerações de hidrogênio	x	x	x			

(continuação)

Palavras-chave	Formas de produção de hidrogênio					Descrição
	Verde	Cinza	Azul	Marrom	Branco	
Eletrocatalise	x					O desenvolvimento de eletrocatalisadores econômicos para eletrólise de água verde é um tópico de significativo interesse de pesquisa.
Reforma a vapor		x				O SMR de gás natural é atualmente a tecnologia mais madura e estendida para a produção de hidrogênio cinza.
Metano		x	x			Processos de SMR podem dar origem a hidrogênio cinza ou hidrogênio azul quando a captura de carbono é empregada, com vários estudos avaliando o efeito catalítico com a reforma do metano.
Biomassa	x		x			As vias azul-esverdeadas oferecem inúmeros benefícios e merecem uma consideração séria no esforço global de descarbonização, particularmente ao utilizar microrganismos como microalgas e cianobactérias, que são fontes significativas de biohidrogênio.
Armazenamento de hidrogênio	x	x	x	x	x	A tecnologia de armazenamento de hidrogênio é fundamental para o avanço dessa tecnologia, estando ligada a toda a sua cadeia produtiva.
Atividade fotocatalítica	x					O uso de um fotocatalisador potencializa aplicações prospectivas para a evolução do hidrogênio verde. A produção fotocatalítica de H ₂ é comprovadamente um dos métodos mais limpos para a coleta de hidrogênio e oxigênio.
Eficiência energética	x	x	x	x	x	A eficiência energética está ligada a todo o processo produtivo. Na eletrólise alcalina, por exemplo, a eficiência energética é de aproximadamente 70 a 80%.
Dióxido de titânio	x					O dióxido de titânio (TiO ₂) é um candidato promissor para a produção fotocatalítica de H ₂ devido às suas propriedades favoráveis, incluindo um grande intervalo de banda, baixo custo, não toxicidade e estabilidade química.

Fonte: DA SILVA *et al.* (2024).

Em última análise, as palavras-chave refletem um campo de pesquisa dinâmico e interdisciplinar, abordando não apenas questões técnicas, mas também considerações socioeconômicas, ambientais e políticas. Essa abordagem ampla é fundamental para compreender as políticas energéticas em um contexto global e integrado, especialmente ao considerar a transição para o hidrogênio como uma fonte energética sustentável.

Portanto, o hidrogênio desempenha um papel crucial na transição energética devido à sua capacidade de transporte. Pode ser transportado usando transportadores de energia intermediária como amônia, metilciclohexano, metanol e outros (HUNT *et al.*, 2022). O H₂ é amplamente reconhecido como um vetor energético de alto potencial no avanço da energia limpa.

O principal desafio associado a esta alternativa é a baixa densidade energética dos combustíveis e os desafios de produzir os combustíveis e transformá-los de volta em hidrogênio (HUNT *et al.*, 2022). No entanto, com o desenvolvimento de políticas energéticas e acordos de cooperação entre países visando à descarbonização de suas fontes de energia, é possível superar os desafios tecnológicos associados ao transporte e armazenamento de hidrogênio. Esse avanço pode abrir caminho para um cenário em que novas tecnologias de transporte e armazenamento serão desenvolvidas.

4.2.1 Caminhos sustentáveis para o setor de hidrogênio entre Brasil e Europa

No cenário atual, o Brasil se alinha à tendência mundial de produção de hidrogênio por meio da reforma do gás natural, visando principalmente os setores de refino e fertilizantes, que normalmente empregam processos com altas emissões de CO₂. A maioria das plantas de produção de hidrogênio está situada em regiões costeiras próximas à rede de gasodutos do Brasil (OLIVEIRA, 2022). O gás natural constitui a maior parte da produção de hidrogênio, com cerca de 48%, seguido do petróleo (30%), do carvão (18%) e da água (4%) (EPE, 2021). Consequentemente, apenas 4% da atual produção global de hidrogênio é considerada verde.

Em relação à descarbonização das fontes de energia, a Alemanha se esforça para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis, incluindo o petróleo, e aumentar sua participação de fontes de energia renováveis. Conforme descrito na Estratégia Nacional de Hidrogênio da Alemanha (BMW, 2020), o governo alemão prevê uma demanda de 90 a 110 TWh (terawatt-hora) de hidrogênio verde até 2030 para cumprir as metas de

descarbonização. Estudos como o de LIEBICH *et al.* (LIEBICH *et al.*, 2021a; LIEBICH *et al.*, 2021b), discutem categorias adicionais de impacto ambiental para a produção eletrolítica de hidrogênio em 2050. A relevância do estudo está em sua cobertura abrangente da Alemanha, variantes avaliadas, categorias de impacto e oportunidade. O estudo encontrou, numa consideração retrospectiva de 2015, contribuições significativamente mais elevadas da produção de eletricidade para os potenciais resultados do aquecimento global (BREUER *et al.*, 2022).

Em média, os estudos existentes indicam que a produção total de energia da Áustria pode ser inteiramente coberta por energias renováveis se o potencial técnico for plenamente explorado e as tecnologias energéticas finais forem adaptadas (TRATTNER *et al.*, 2022). O país pretende alcançar a neutralidade climática até 2040, exigindo a descarbonização em todos os setores. Por conseguinte, a produção de hidrogênio renovável é considerada essencial, tal como estipulado na estratégia nacional para o hidrogênio, em consonância com a Comissão Europeia (POVACZ & BHANDARI, 2023). O objetivo atual do governo austríaco é alcançar a neutralidade climática até 2040, uma década antes da meta estabelecida pela União Europeia (VILBERGSSON *et al.*, 2023). Um relatório encomendado pelo governo austríaco prevê uma procura mínima de hidrogênio de 16 TWh por ano na Áustria até 2040, salientando a necessidade de uma futura produção nacional de hidrogênio (BAUMANN *et al.*, 2021).

Liechtenstein, apesar de seu pequeno território e baixa demanda energética, tem demonstrado interesse crescente em integrar tecnologias de hidrogênio em sua estratégia de sustentabilidade. O país aposta na inovação e em colaborações com instituições europeias para desenvolver soluções energéticas eficientes e de baixo carbono. Além disso, políticas alinhadas com a União Europeia indicam que o país pretende incentivar pesquisas sobre aplicações industriais do hidrogênio e sua viabilidade econômica em pequena escala, fortalecendo sua posição como um modelo de transição energética na região alpina.

Em resposta ao cenário de escassez energética resultante do desastre de Fukushima, a Alemanha iniciou o processo de fechamento de suas usinas nucleares, com o desligamento das últimas três ocorrendo em abril de 2023. No entanto, os desafios à segurança energética obrigaram o país a reavaliar a sua política nuclear (ENERGY OUTLOOK, 2023). Enquanto isso, o Brasil, conhecido por seus abundantes recursos naturais, como hidrelétricas e biocombustíveis, enfrenta desafios como crescimento populacional, desenvolvimento econômico e expansão da infraestrutura, impactando o

equilíbrio entre oferta e demanda de energia. Por outro lado, por meio de investimentos em energias renováveis, como hidrelétrica, eólica, solar e biomassa, a Áustria pretende reduzir sua dependência de combustíveis fósseis e promover a sustentabilidade energética.

4.2.2 Análise comparativa: desafios e oportunidades na produção de hidrogênio entre Brasil e Europa

No cenário global, o hidrogênio é reconhecido por suas baixas emissões, mas enfrenta o desafio dos altos custos de produção (PFOSE; SCHAUER & COSTA, 2018). A Alemanha, pioneira em transições energéticas ambiciosas, está passando por uma mudança significativa para longe dos combustíveis fósseis e da energia nuclear até 2022 (STRUNZ, 2014). Adotando o hidrogênio como combustível alternativo, a Alemanha está expandindo estrategicamente sua infraestrutura, com as estações de combustível de hidrogênio desempenhando um papel crucial no abastecimento de veículos, especialmente aqueles movidos a células de combustível (FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY, 2016).

O notável projeto "H2-Bus Rhein-Main" exemplifica o compromisso da Alemanha com a implantação e comercialização em larga escala de ônibus de células de combustível, contribuindo para uma cadeia de valor de hidrogênio verde regional. Alinhada com o Plano Nacional de Energia e Clima da Alemanha (do alemão, *Nationale Energie- und Klimaplan* – NEKP), esta iniciativa centra-se na integração de tecnologias de hidrogênio nos sistemas de transportes públicos (COLEMAN *et al.*, 2020). A participação de diversas partes interessadas, como entidades governamentais, instituições de pesquisa, colaboradores da indústria e comunidades locais, tem desempenhado um papel fundamental na formação e impulsionamento do projeto. Por meio da colaboração sinérgica e do planejamento meticulosamente coordenado, essas partes interessadas assumiram responsabilidades cruciais na concepção, financiamento e implementação do projeto. Isso ressalta a importância da cooperação multissetorial na realização de objetivos ambiciosos relacionados a iniciativas energéticas e climáticas.

No Brasil, os métodos de produção de hidrogênio incluem processos baseados em combustíveis fósseis, utilização de biomassa e eletrólise da água. Atualmente, o hidrogênio é predominantemente produzido em refinarias de petróleo por meio de processos de reforma do metano, particularmente a reforma a vapor (IEA, 2019). Dados da Petrobras

revelam que mais de 70% das refinarias brasileiras, notadamente Paulínia e Mataripe, contribuem significativamente para a produção de hidrogênio, principalmente para processos internos dentro da indústria de refino de petróleo.

O Brasil segue a tendência mundial de produção de hidrogênio a partir do gás natural, com ênfase nos setores de refino e fertilizantes, frequentemente associados a altas emissões de CO₂ (OLIVEIRA, 2022). Reconhecendo o potencial do hidrogênio em cenários de energia renovável, o Brasil vê as tecnologias de hidrogênio como vitais para melhorar a eficiência da indústria do petróleo e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.

O Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) prevê crescimento substancial da energia eólica, posicionando-a como fonte primária de expansão no Brasil (EPE, 2021). O extenso potencial hidrelétrico brasileiro, concentrado na região Norte, contribui significativamente para a matriz energética, com 44% já em operação (REN *et al.*, 2020). Apesar de um maior consumo de fontes de energia não renováveis, o Brasil utiliza mais energias renováveis em relação à média mundial (REN *et al.*, 2020). Além disso, relatórios da Agência Internacional de Energia Renovável destacam um crescimento significativo da capacidade hidrelétrica brasileira, juntamente com um aumento substancial na evolução das energias solar e eólica em 2022 (IRENA, 2022). A realização deste plano envolve investimentos substanciais em infraestrutura de energia eólica, incluindo o desenvolvimento de parques eólicos e sistemas de transmissão associados. Esses investimentos são apoiados por financiamento dos setores público e privado, com uma parcela significativa alocada a partir de orçamentos governamentais e complementada por investimentos de empresas de energia e instituições financeiras.

Entidades governamentais brasileiras, como o Ministério de Minas e Energia (MME), em conjunto com agências reguladoras, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), têm assumido papéis fundamentais na formulação e supervisão da implementação do plano. As empresas de energia, que incluem empresas estatais e entidades privadas, assumiram a responsabilidade pela implantação e gestão de parques eólicos, enquanto as instituições de pesquisa têm contribuído ativamente para melhorias tecnológicas e inovações no setor.

Os desafios encontrados na transição para sistemas energéticos baseados em hidrogênio são multifacetados, englobando obstáculos tecnológicos, econômicos e de infraestrutura. Esses obstáculos se originam do imperativo de expandir a produção de

hidrogênio e, ao mesmo tempo, reduzir os custos e garantir a sustentabilidade ambiental. Além disso, a integração do hidrogênio nos quadros energéticos existentes exige investimentos substanciais em infraestruturas, nomeadamente a criação de redes de armazenamento e distribuição de hidrogênio.

As soluções potenciais para esses desafios estão enraizadas em esforços sustentados de pesquisa e desenvolvimento destinados a aumentar a eficiência e a relação custo-benefício das tecnologias de produção de hidrogênio. O progresso nos métodos de eletrólise, como a eletrólise de membrana trocadora de prótons e a eletrólise de óxido sólido, oferece perspectivas para reduzir o aporte de energia necessário para a geração de hidrogênio. Além disso, o aproveitamento de fontes de energia renováveis, como a energia eólica e solar, para a produção de hidrogênio pode aliviar as preocupações ambientais associadas a processos dependentes de combustíveis fósseis.

Intervenções políticas eficazes, incluindo incentivos financeiros e estruturas regulatórias de apoio à expansão da infraestrutura de hidrogênio, são fundamentais para promover a adoção generalizada de sistemas de energia baseados em hidrogênio. Iniciativas colaborativas e plataformas de compartilhamento de conhecimento em nível internacional podem acelerar os avanços na superação das barreiras tecnológicas e econômicas à implantação do hidrogênio.

4.2.3 Armazenamento de hidrogênio: um componente essencial na transição para uma energia sustentável

O hidrogênio, como um portador de energia limpa e versátil, tem um imenso potencial para enfrentar os desafios globais de energia. No entanto, soluções de armazenamento eficazes são essenciais para permitir sua ampla utilização em várias aplicações. As tecnologias de armazenamento de hidrogênio podem ser amplamente categorizadas em dois grupos principais: baseadas em física e baseadas em materiais (MORADI & GROTH, 2019). Cada técnica possui características únicas, incluindo densidade de energia, cinética e eficiência, tornando desafiador identificar uma solução universal para todas as necessidades de armazenamento (RIVARD; TRUDEAU; ZAGHIB, 2019). Os métodos de armazenamento estacionário são utilizados principalmente para armazenamento no local e produção de energia estacionária, enquanto as aplicações móveis

envolvem o transporte de hidrogênio para pontos de armazenamento ou utilização, incluindo aplicações para veículos (MORADI & GROTH, 2019).

À medida que os pesquisadores e engenheiros de todo o mundo se concentram cada vez mais no armazenamento e conversão de hidrogênio em diferentes formas de energia (ZIVAR; KUMAR & FOROOZESH, 2021), os esforços de colaboração e as abordagens interdisciplinares são cruciais para superar os desafios existentes e impulsionar a inovação na tecnologia de armazenamento de hidrogênio. Ao abordar as principais barreiras técnicas e aproveitar os avanços na eletrocatalise, hidretos químicos e infraestrutura de armazenamento, a realização de soluções de armazenamento de hidrogênio eficientes, seguras e escaláveis torna-se alcançável, abrindo caminho para a adoção generalizada do hidrogênio como uma fonte de energia limpa na transição para um futuro sustentável.

Um aspecto crítico no avanço da tecnologia de armazenamento de hidrogênio é o desenvolvimento de eletrocatalisadores altamente eficazes capazes de facilitar tanto a reação de evolução de hidrogênio (HER) quanto a reação de evolução de oxigênio durante a eletrólise da água (YAN *et al.*, 2024). Esses eletrocatalisadores desempenham um papel crucial no aumento da eficiência e estabilidade dos processos eletroquímicos de separação de água, que são parte integrante da produção de hidrogênio em escala (WANG *et al.*, 2024).

A metanólise de amoníaco borano surge como uma tecnologia integrada promissora tanto para o armazenamento como para a produção de hidrogênio, oferecendo elevada eficiência e segurança (LIAO *et al.*, 2023). No entanto, apesar dos progressos significativos, o armazenamento e o transporte eficientes e seguros de hidrogênio continuam a ser grandes desafios, dificultando as aplicações em larga escala (LIAO *et al.*, 2023). Entre as soluções potenciais, o armazenamento e transporte de hidrogênio na forma de hidretos químicos é promissor devido às suas características de eficiência e segurança (LIAO *et al.*, 2023).

A geração de hidrogênio a partir da metanólise de amoníaco borano tem despertado crescente interesse em pesquisa devido às suas características intrínsecas de alta portabilidade na produção de hidrogênio (FENG *et al.*, 2023). Isso destaca a importância de explorar métodos alternativos de armazenamento para superar as limitações existentes e impulsionar a tecnologia de armazenamento de hidrogênio.

4.3 ANÁLISE INTEGRADA DOS CENÁRIOS ENERGÉTICO E ELÉTRICO ENTRE BRASIL, ÁUSTRIA, ALEMANHA E LIECHTENSTEIN

4.3.1 Análise comparativa da matriz energética

O cenário energético mundial segue a tendência de produção de energia a partir de fontes de energia renováveis, objetivando-se, assim, cumprir com os acordos internacionais contra as mudanças climáticas causadas pela ação humana. Nessa perspectiva, para minimizar os efeitos oriundos do aquecimento global, os países buscam maximizar a relação de energias renováveis em suas respectivas matrizes energéticas.

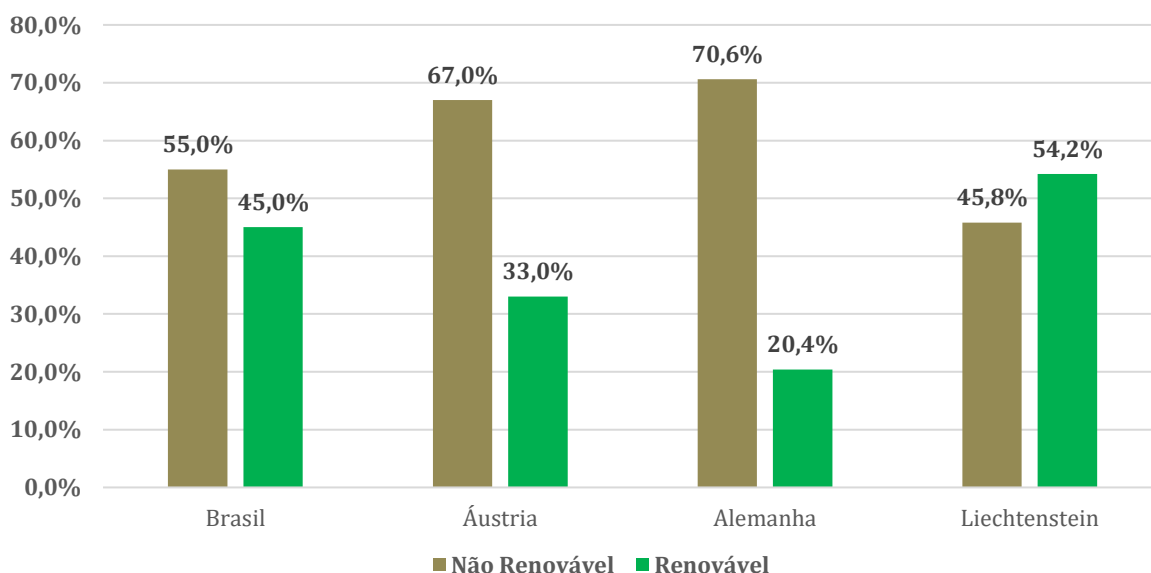
Além da necessidade de alinhamento com objetivos ambientais globais, os países enfrentam desafios únicos em suas transições energéticas. No contexto brasileiro, a ênfase recai sobre a diversidade de fontes de energia renováveis já incorporadas, como energia hidrelétrica, solar e eólica, aproveitando as condições geográficas e climáticas favoráveis. No entanto, o desafio reside na gestão eficiente da intermitência dessas fontes. Enquanto isso, na Alemanha, uma potência industrial, a transição energética (do alemão, *Energiewende*) é caracterizada por um movimento intenso em direção à energia solar e eólica, mas também pela necessidade de enfrentar a dependência histórica de combustíveis fósseis.

Em contrapartida, a Áustria, com sua ênfase em fontes renováveis e no uso eficiente da biomassa, exemplifica uma abordagem integrada, embora ainda apresente significativa dependência de fontes fósseis. A busca por resiliência e segurança energética impulsiona o investimento em biomassa, energia hidrelétrica e solar, evidenciando uma estratégia de diversificação adaptada às características do país.

Já Liechtenstein, apesar de seu pequeno território e baixa demanda energética, investe fortemente na geração hidrelétrica — que já supre parte relevante do consumo interno — e tem ampliado o uso de energia solar para diversificar sua matriz. Alinhado às diretrizes da União Europeia, o país também tem demonstrado interesse na integração do hidrogênio verde como alternativa energética sustentável, por meio de parcerias estratégicas com outros países europeus visando o desenvolvimento tecnológico e a segurança energética de longo prazo.

Como apresentado na Figura 11, a participação de fontes renováveis na matriz energética total varia significativamente entre os países analisados. O Brasil apresenta 45,0% de renováveis, destacando-se pela forte presença de hidrelétricas, mas ainda enfrenta desafios para expandir outras fontes limpas. Liechtenstein (54,2%) mostra uma diversificação relevante, enquanto a Áustria (33,0%) mantém dependência elevada de fontes fósseis, apesar dos avanços. A Alemanha, por sua vez, apresenta a menor participação de renováveis (20,4%), refletindo sua matriz ainda fortemente baseada em petróleo, gás natural e carvão. Essas diferenças evidenciam as distintas políticas energéticas e o potencial específico de cada nação na transição para uma matriz mais sustentável.

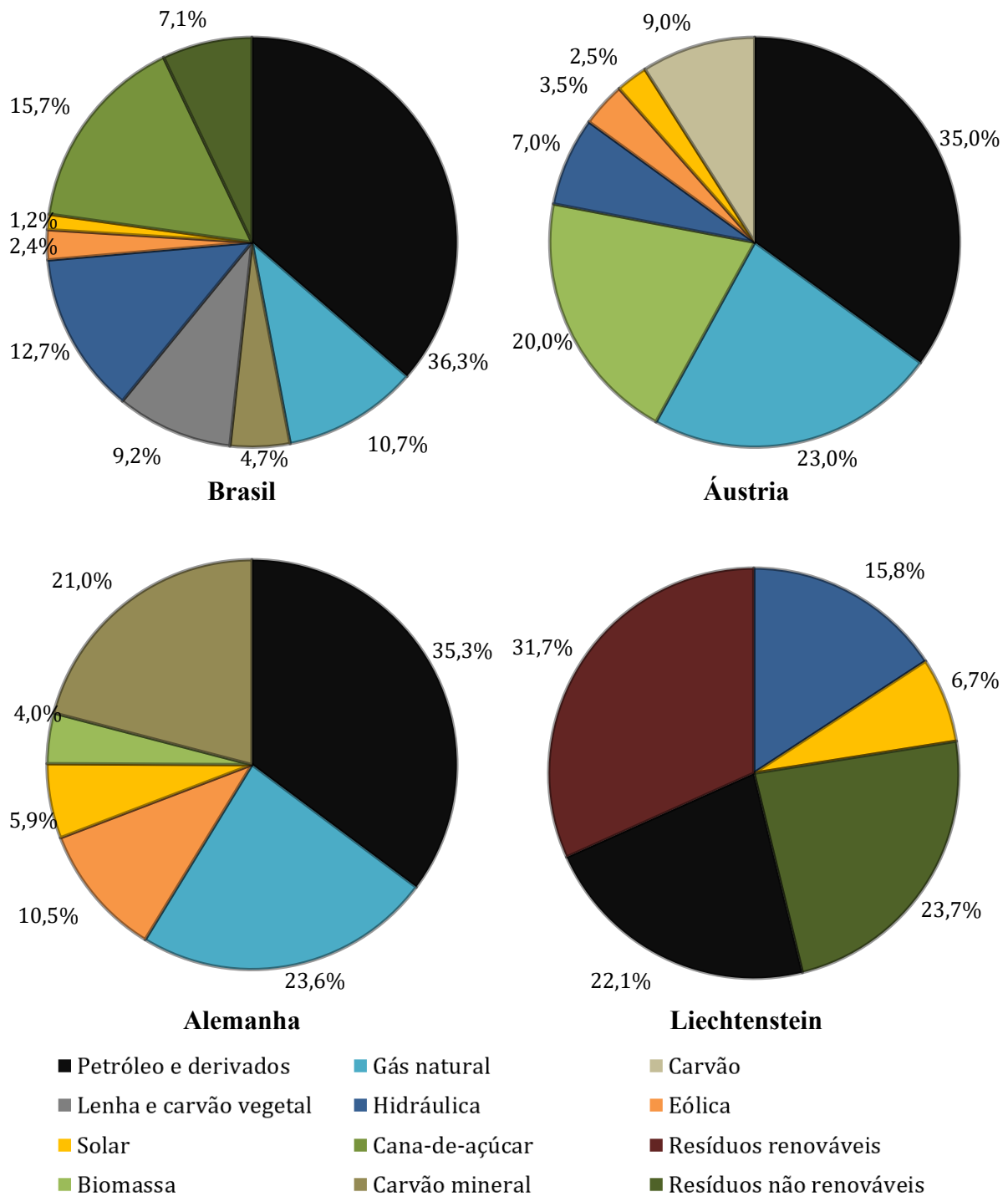
Figura 11 – Comparação da participação de fontes renováveis no consumo energético final bruto entre países (2022).



Fonte: Adaptado de EPE (2023); ENERDATA (2023); THE GLOBAL ECONOMY (2023); LKW (2023).

As diferenças na composição da matriz energética entre países refletem não apenas sua disponibilidade de recursos naturais, mas também as escolhas políticas e estratégicas voltadas à segurança energética e à transição para fontes mais sustentáveis. Ao observar a distribuição da oferta interna de energia por tipo de fonte, é possível identificar perfis distintos de dependência energética e de inserção de renováveis. A seguir, a Figura 26 apresenta um panorama comparativo entre Brasil, Áustria, Alemanha e Liechtenstein, destacando o peso relativo de fontes fósseis e renováveis em cada contexto nacional no ano de 2022.

Figura 12 – Consumo energético final bruto por fonte (2022).



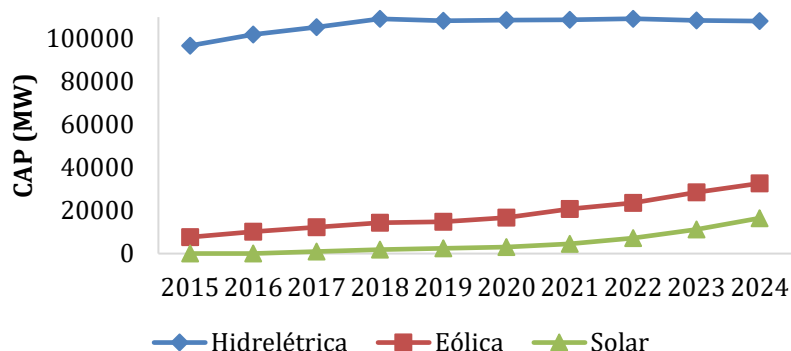
Fonte: Adaptado de EPE (2023); ENERDATA (2023); THE GLOBAL ECONOMY (2023); LKW (2023).

Como observado na Figura 15, a matriz energética brasileira é equilibrada entre fontes renováveis e não renováveis. O Brasil se destaca pela diversidade de sua matriz, com predomínio de cana-de-açúcar (15,7%), hidráulica (12,7%) e gás natural (10,7%), mas ainda com considerável presença de petróleo e derivados (36,3%).

O Brasil utiliza a cana-de-açúcar como sua principal fonte de energia renovável, ocupando uma posição de destaque nesse campo científico e sendo reconhecido como um dos líderes na produção de etanol. Além disso, a segunda maior contribuição para a matriz energética renovável do país vem da energia hidráulica, que é explorada principalmente nas regiões Centro-Oeste, Sul e Sudeste (ALFREDSEN *et al.*, 2022; DIAS *et al.*, 2018). O Brasil é o lar de algumas das maiores hidrelétricas do mundo, como as localizadas em Itaipu, com um potencial energético de 14.000 MW (megawatts), Belo Monte, com 11.233 MW, e Tocantins, com 8.370 MW. O potencial hidráulico total do país é estimado em 246,24 GW (gigawatts) (EPE, 2023).

O uso de energia renovável hidroelétrica, solar e eólica na produção de eletricidade tem um grande potencial nacional para reduzir os riscos climáticos e tem crescido significativamente ao longo dos anos na matriz energética brasileira. Conforme observado na Figura 13, há um crescimento considerável na capacidade das usinas hidrelétricas e uma alta evolução da energia solar e eólica no país durante os anos de 2015 a 2024.

Figura 13 – Evolução da capacidade de energia hidrelétrica, eólica e solar no Brasil.



Fonte: Adaptado de ONS (2025).

Em cenário europeu, a Áustria apresenta uma estrutura balanceada, com destaque para fontes renováveis como biomassa (20,0 %) e hidráulica (7%), embora ainda mantenha significativa participação de petróleo (35,0 %) e a gás natural (23,0 %). Além do foco em fontes de energia renováveis, principalmente em eletricidade, a Áustria tem implementado políticas que integram inovação tecnológica e infraestrutura sustentável. O governo austríaco promove incentivos para a ampliação da geração distribuída, como painéis solares em residências e pequenos negócios, além de investir em redes inteligentes para melhorar a eficiência no uso da energia. Outro destaque é o desenvolvimento de projetos de hidrogênio

verde, que visam complementar a matriz energética e reduzir ainda mais a dependência de combustíveis fósseis.

A matriz energética da Alemanha, por sua vez, mantém uma matriz fortemente dependente de fontes fósseis, com petróleo (35,3 %), gás natural (23,6 %) e carvão mineral (21,0 %) representando mais de 80 % da oferta interna de energia, apesar do crescimento das renováveis como eólica (10,5 %) e solar (5,9 %). A Alemanha, por meio do programa *Energiewende*, tem investido pesadamente na expansão da energia solar e eólica, tornando-se uma referência mundial em políticas de incentivo às energias renováveis. No entanto, apesar do crescimento dessas fontes, o país ainda enfrenta desafios na substituição completa de combustíveis fósseis, especialmente devido à necessidade de garantir estabilidade na geração elétrica e suprimento energético para a indústria.

Outro aspecto relevante é o papel do gás natural na matriz energética alemã, que historicamente desempenhou uma função estratégica na geração de eletricidade e aquecimento residencial. A crise energética europeia, intensificada pelo conflito entre Rússia e Ucrânia, impulsionou a busca por alternativas para reduzir a dependência do gás russo, acelerando investimentos em hidrogênio verde e infraestrutura para importação de gás natural liquefeito (GNL).

Essa distribuição diversificada de fontes energéticas na Alemanha reflete a complexidade da transição energética do país. Embora haja um crescimento contínuo das energias renováveis, desafios relacionados à intermitência da geração e ao armazenamento de energia ainda precisam ser superados. O modelo alemão demonstra a importância de estratégias multifacetadas para a descarbonização, combinando políticas de incentivo, inovação tecnológica e infraestrutura para garantir um sistema energético mais sustentável e resiliente.

Por fim, a matriz energética de Liechtenstein se distingue dos outros países analisados, principalmente devido ao seu pequeno território e à baixa demanda energética. Em 2022, a maior parte da oferta interna foi composta por fontes renováveis, com destaque para a energia hidráulica (15,8 %), solar (6,7 %) e resíduos renováveis (31,7 %). Ainda assim, observa-se a presença significativa de resíduos não renováveis (23,7 %) e de fontes fósseis, como o petróleo (22,1 %), evidenciando a dependência do país de importações com composições energéticas variadas.

Apesar de seu tamanho reduzido, Liechtenstein tem se alinhado às metas climáticas da União Europeia e busca ampliar o uso de fontes renováveis, investindo em tecnologias

como energia solar e eficiência energética. A transição energética do país destaca a importância da cooperação regional, uma vez que sua dependência de importação de eletricidade exige políticas integradas para garantir sustentabilidade e estabilidade no fornecimento de energia.

4.3.2 Análise comparativa da matriz elétrica

O cenário elétrico mundial está cada vez mais alinhado com a tendência de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis, visando cumprir os acordos internacionais voltados ao combate às mudanças climáticas induzidas pelas atividades humanas. Nesta perspectiva, para minimizar os impactos do aquecimento global, os países buscam maximizar a participação das energias renováveis em suas matrizes elétricas.

A Alemanha, por exemplo, tem avançado significativamente com sua política de transição energética, focando na substituição de fontes fósseis por energias renováveis e na redução das emissões de gases de efeito estufa. Contudo, enfrenta desafios como a dependência de gás natural para uso residencial e industrial, e a necessidade de expandir e modernizar a rede elétrica para integrar de forma eficiente as energias renováveis.

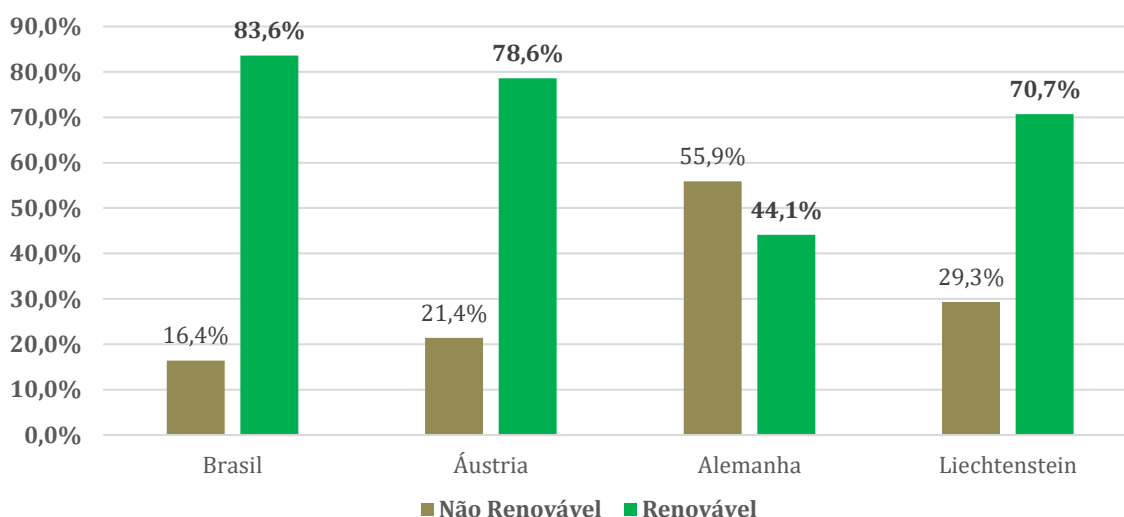
Na Áustria, a utilização predominante de energia hidrelétrica tem permitido ao país manter uma matriz energética limpa e sustentável. Contudo, a expansão de outras fontes renováveis, como eólica e solar, é crucial para atender às demandas energéticas futuras e diversificar ainda mais a matriz energética.

O Brasil, por sua vez, possui uma matriz energética singular, com uma alta participação de fontes renováveis, principalmente hidrelétricas. No entanto, o país enfrenta o desafio de diversificar suas fontes renováveis e de aumentar a participação de energias como a solar e eólica, além de investir em tecnologias de armazenamento de energia para lidar com a variabilidade dessas fontes.

Portanto, a percepção geral sobre o cenário mundial de energia elétrica aponta para um movimento crescente em direção à sustentabilidade e à redução das emissões de carbono. A realização dessa transição energética de forma eficaz requer colaboração internacional, políticas eficazes, incentivos econômicos, e um compromisso contínuo com a inovação tecnológica para superar os desafios e garantir um futuro energético sustentável para todos.

Como observado na Figura 14, em 2022 o Brasil liderava com 83,6% de fontes renováveis em sua matriz elétrica, seguido pela Áustria (78,6%), Liechtenstein (70,7%) e Alemanha (44,1%), evidenciando diferentes estágios de avanço na transição para fontes de energia limpa. No entanto, é importante destacar que a definição e a contabilização de energia renovável podem variar entre os países. Na Áustria, por exemplo, aproximadamente 30% da energia classificada como renovável provém de usinas hidrelétricas com sistema de bombeamento reverso (pumped-storage). Esse tipo de sistema utiliza energia da rede elétrica para bombear água a reservatórios elevados, armazenando-a como energia potencial. Parte dessa energia consumida para o bombeamento pode ter origem em fontes não renováveis — como eletricidade importada de usinas térmicas ou nucleares — o que levanta questionamentos sobre a sustentabilidade real dessa prática.

Figura 14 – Comparação da geração de eletricidade interna entre países (2022).



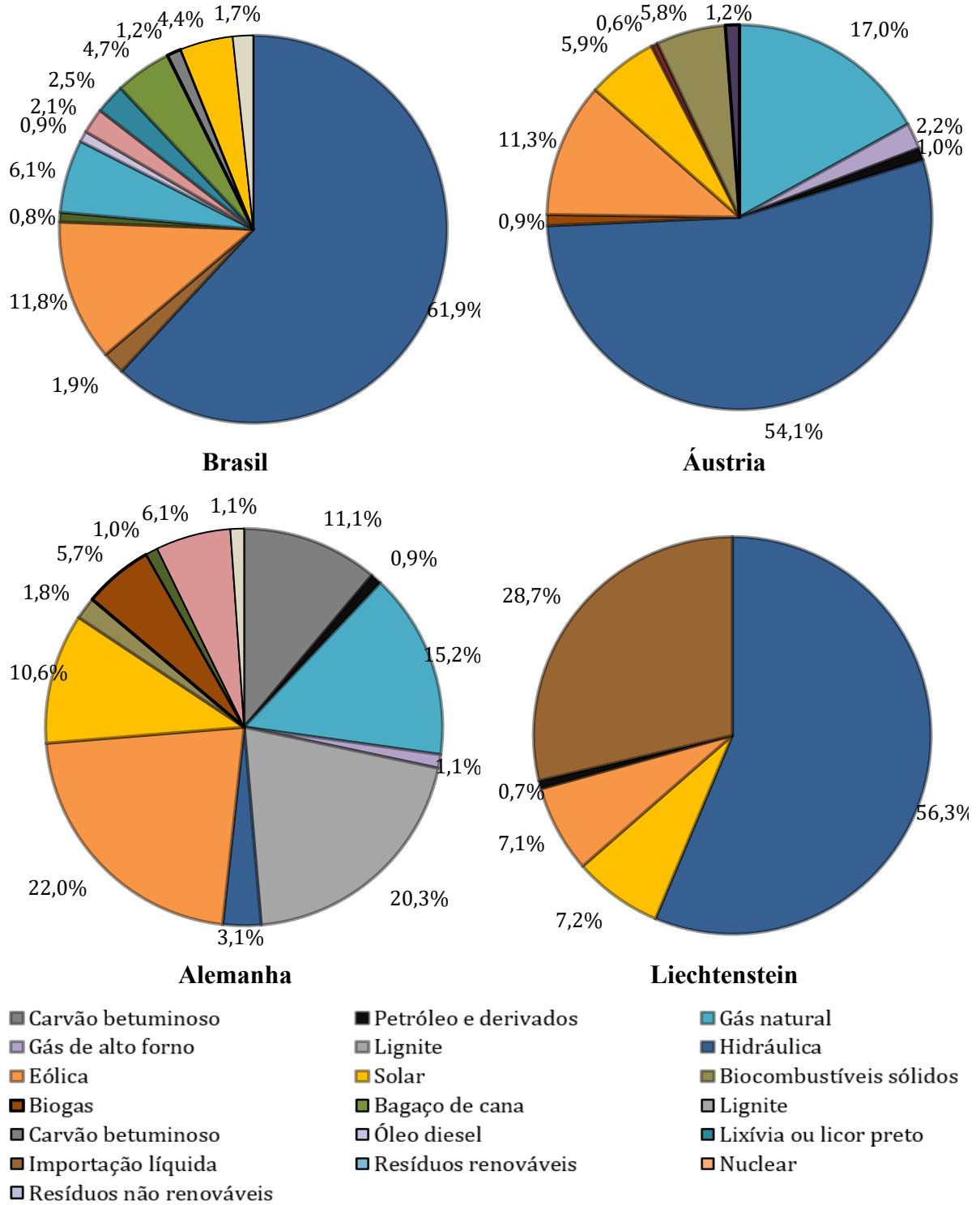
Fonte: Adaptado de EPE (2023); STATISTIK AUSTRIA (2023); LKW (2023).

A Áustria, Brasil e Liechtenstein destacam-se pelo uso significativo de recursos hídricos em suas matrizes energéticas, enquanto a Alemanha, embora tenha avançado na adoção de energias renováveis, ainda enfrenta desafios na substituição de fontes não-renováveis. Essas diferenças refletem as políticas e trajetórias específicas de cada país na busca por um sistema energético mais sustentável e adaptável.

Em 2022, a oferta interna de energia elétrica variou significativamente entre os países analisados: Brasil com 690,1 TWh, Alemanha com 580,3 TWh, Áustria com 69,2 TWh e Liechtenstein com 126,2 GWh (gigawatt-hora), refletindo diferentes demandas e níveis de autossuficiência. A Figura 15 mostra as proporções de uso de diferentes fontes de

energia na geração de eletricidade, destacando as variações nas matrizes energéticas, especialmente no uso de fontes renováveis e não renováveis.

Figura 15 – Consumo final bruto de eletricidade por fonte (2022).



Fonte: Adaptado de EPE (2023); STATISTIK AUSTRIA (2023); LKW (2023).

Como descrito na Figura 15, observa-se uma grande relevância sobre o uso da energia hidráulica para conversão em eletricidade para Brasil, Áustria e Liechtenstein. O Brasil é um país vasto territorialmente e com diversas regiões que propiciam a instalação de usinas hidrelétricas, o que potencializa ainda mais sua capacidade no setor. Considerando que quase a totalidade das importações são oriundas da usina de Itaipu, a fonte hídrica atinge em torno de 62% para o ano de 2022.

Já na Áustria, a energia hidráulica também desempenha um papel significativo na matriz elétrica, representando cerca de 54,1% do total de geração. Isso se deve à geografia montanhosa do país, com abundância de rios e vales que favorecem a construção de usinas hidrelétricas, principalmente do tipo de reservatório e fio d'água. Esse cenário é ainda mais intensificado que o do Brasil em termos de proporção na matriz energética, destacando o compromisso austríaco com fontes renováveis e com a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Já em Liechtenstein, embora o território seja pequeno e as possibilidades de geração sejam limitadas, a energia hidráulica ainda possui uma importância estratégica para o país, que representa 56,3% do total gerado, aproveitando o potencial dos rios alpinos e parcerias regionais. Essa predominância evidencia a importância dessa fonte renovável no país, posicionando-a como a principal responsável pelo abastecimento elétrico. Além disso, a energia solar (7,2%) e a eólica (7,1%) reforçam a diversificação das fontes renováveis, somando esforços para uma matriz energética mais sustentável. Esse panorama reflete um esforço conjunto entre sustentabilidade e eficiência energética, alinhado às diretrizes ambientais europeias.

No total, as energias renováveis (hidráulica, solar e eólica) correspondem a 70,7% da eletricidade produzida. Apesar disso, 28,7% da energia se enquadra na categoria de "Fontes de energia não verificáveis", de acordo com a legislação, que classifica como tal a energia adquirida em mercados sem certificados de origem. Fontes de energia não renováveis, como combustíveis fósseis, representam uma parcela muito pequena (0,7%). Esse cenário demonstra o compromisso de Liechtenstein com as energias limpas, enquanto aponta para a necessidade de reduzir a dependência de fontes não verificáveis, promovendo uma maior transparência e sustentabilidade em seu mix energético.

Em 2022, cerca de 77% da energia elétrica consumida em Liechtenstein foi importada, enquanto a geração doméstica correspondeu a aproximadamente 23%. Dentro dessa produção interna, as fontes renováveis desempenham um papel predominante, com

destaque para a energia hidrelétrica (63,4 GWh) e solar fotovoltaica (26,8 GWh, considerando tanto a produção própria quanto a de terceiros).

Em cenário nacional, somando-se a oferta de hidráulica, solar, eólica, bagaço de cana e outras energias renováveis, as fontes renováveis representam 83,6% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (EPE, 2023).

O Brasil, como um grande produtor de cana-de-açúcar, também se faz o uso de tecnologias verdes para obtenção de não somente energia, mas também eletricidade. A utilização da biomassa, principalmente aquela oriunda do bagaço, representam uma proporção relativamente significativa em sua matriz elétrica, representando cerca de 8,2% de sua integralidade. O potencial de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis no Brasil pode ser cada vez mais intensificado, principalmente neste setor.

Além do elevado potencial em geração de eletricidade a partir das hidrelétricas, o Brasil também é vasto na geração de eletricidade a partir de outras energias renováveis, como eólica, representando 10,6% de sua totalidade. Além disso, o país também possui muito potencial na geração de energia solar, principalmente na região norte do país.

Em cenário austríaco, além da hidroeletricidade, a Áustria também tem investido consideravelmente em outras fontes renováveis, como a energia eólica e solar, diversificando sua matriz energética. Na totalidade, somando energias de fontes hidráulica, biogás, eólica, solar, biocombustíveis sólidos e resíduos renováveis municipais, as energias de fonte renováveis somam 78,6%. A eficiente infraestrutura de distribuição e as políticas governamentais de apoio às energias limpas têm desempenhado um papel crucial na integração dessas fontes no mix energético do país.

O uso do gás natural, uma fonte não renovável que também vem sendo bastante explorada no Brasil nos últimos anos, representa uma parcela significativa na matriz elétrica austríaca, na ordem de 17,0%. Isso implica que, apesar do forte investimento em fontes de energia renováveis, a Áustria ainda depende consideravelmente de fontes fósseis para a geração de eletricidade. Além disso, a presença de biocombustíveis sólidos também contribui de forma relevante, representando 5,8% da geração de eletricidade. Esse mix energético reflete uma abordagem equilibrada da Áustria, combinando fontes renováveis e não renováveis para assegurar a estabilidade e a segurança do abastecimento energético.

Por fim, em cenário alemão, embora o uso de fontes não renováveis seja mais intenso na matriz energética do que o uso de energias renováveis em comparação com os

demais países, a Alemanha mantém um equilíbrio e diversidade em sua composição energética. A energia eólica é a fonte de energia renovável mais representativa, correspondendo a 22,0% da matriz. Além disso, a Alemanha investe em outras fontes renováveis, como a solar (10,6%) e biogás (5,7%), o que contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para o aumento da sustentabilidade do sistema energético. Na totalidade, somando energias de fontes hidráulica, eólica, solar, biocombustíveis sólidos, biogás e resíduos renováveis municipais, a quantidade de energias de fontes renováveis na matriz elétrica alemã equivale a 44,1%. Esse mix diversificado reflete o compromisso da Alemanha com a transição energética e com a segurança do abastecimento, garantindo uma matriz energética consistente e equilibrada.

O uso de gás natural na matriz elétrica alemã também é representativo, da ordem de 16,2%. Além disso, a utilização de lignite e energia nuclear desempenham um papel importante, representando 18,5% e 11,8% da matriz energética, respectivamente. Isso demonstra que, embora a Alemanha esteja avançando na incorporação de energias renováveis, como a eólica e a solar, ainda há uma dependência considerável de fontes de energia não renováveis, como a lignite e o gás natural, bem como de fontes de baixa emissão de carbono, como a nuclear.

A combinação dessas fontes na matriz energética alemã reflete um esforço contínuo para equilibrar a segurança energética e a sustentabilidade. A energia nuclear, apesar de controversa, contribui significativamente para a redução das emissões de carbono e para a estabilidade do fornecimento energético. Dessa forma, a Alemanha promove uma transição gradual e estável para uma economia de baixo carbono, buscando diversificar suas fontes de energia e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

4.3.3 Potencial de geração de energias renováveis

O Brasil, quando comparado ao ambiente internacional, possui uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo, com destaque para a liderança na produção de biocombustíveis, especialmente etanol a partir de cana-de-açúcar. Por esta razão, o país tem condições muito favoráveis para o desenvolvimento da tecnologia do hidrogênio verde a partir da eletrólise, uma vez que é rico em reservas naturais e biodiversidade, como energias hídrica, eólica, solar e biomassa.

No cenário austríaco, com o fortalecimento de políticas adequadas e investimentos contínuos, o país está bem-posicionado para atingir suas metas ambiciosas de energia renovável e contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas.

O comprometimento da Áustria com as energias renováveis é reforçado por políticas consistentes e apoio governamental, como o PNEC, que delinea estratégias para atingir as metas de 2030 e 2050. Essas políticas incluem incentivos financeiros, subsídios e programas de pesquisa e desenvolvimento focados em tecnologias de energia renovável.

Já no caso da Alemanha, existe um enorme potencial de geração de energia renovável, especialmente em energia solar e eólica que deve ser cada vez mais bem explorado. Devido à sua localização geográfica, a Alemanha recebe uma quantidade razoável de luz solar durante todo o ano, o que a torna adequada para a energia solar fotovoltaica. Além disso, suas vastas áreas de costa e condições climáticas favoráveis contribuem para um grande potencial de geração de energia eólica *offshore* e *onshore*.

Atualmente, a Alemanha é líder mundial em energia solar instalada per capita e está entre os principais países em capacidade de energia eólica. O governo alemão tem investido significativamente em tecnologias de energia renovável e estabeleceu metas ambiciosas para a transição energética do país, conhecida como "*Energiewende*". Esta política visa aumentar a participação de energias de fontes de energia renováveis na matriz energética do país, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade ambiental.

No caso de Liechtenstein, apesar de seu território pequeno e das limitações geográficas, o país demonstra um forte compromisso com o desenvolvimento sustentável e a geração de energia renovável. A localização alpina oferece oportunidades para o aproveitamento de recursos hídricos, que são fundamentais para sua matriz energética. Além disso, Liechtenstein colabora estreitamente com outros países europeus, aproveitando parcerias regionais para importar energia limpa e fortalecer sua integração ao sistema energético sustentável da Europa. A combinação de políticas governamentais focadas em eficiência energética, incentivos para fontes renováveis e a adesão a acordos climáticos internacionais reflete a ambição de Liechtenstein em contribuir para a mitigação das mudanças climáticas e a transição global para uma economia de baixo carbono.

4.3.3.1 Fonte hídrica

desenvolvimento sustentável é direcionado para alcançar todo o potencial hidráulico brasileiro.

Em cenário europeu, a energia hidrelétrica desempenha um papel central na matriz energética da Áustria, com o país aproveitando extensivamente seus recursos hídricos, possuindo várias usinas hidrelétricas localizadas em rios como o Danúbio, o Inn e o Mur. Este recurso não apenas proporciona uma fonte de energia limpa e confiável, mas também contribui significativamente para a estabilidade do sistema elétrico nacional.

Para cada região onde estão localizadas as principais hidrelétricas da Áustria, existem planos de gestão que objetivam proteger e potencializar a geração de eletricidade nesses lugares. Por exemplo, no caso do rio Inn, o Plano de Gestão de Recursos Hídricos (do inglês, *Water Management Framework Plan – WMFP*) para o Tirol Ocidental foi elaborado e, em novembro de 2014, o Ministério Federal da Agricultura, Florestas, Meio Ambiente e Gestão de Recursos Hídricos (do alemão, *Bundesministerium für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft – BML*) decretou uma diretiva correspondente (RIS, 2014). O potencial hidrelétrico remanescente, que pode ser utilizado técnica e economicamente nesta área, é de 4.650 GWh/ano (REINDL, EGGER & FITZKA, 2017).

A Áustria possui um histórico de aproveitamento de energia hidrelétrica, com políticas eficazes e investimentos contínuos que fomentam o desenvolvimento desse setor. O país tem se destacado por sua capacidade de integrar a energia hidrelétrica em uma matriz energética diversificada e sustentável, promovendo o desenvolvimento de tecnologias avançadas e infraestruturas eficientes para maximizar o uso desse recurso natural.

Liechtenstein, apesar de seu pequeno território, tem investido na geração de energia renovável, com a hidreletricidade desempenhando um papel importante na matriz energética do país. A principal empresa responsável pela geração e distribuição de energia elétrica em Liechtenstein são as Usinas de Energia de Liechtenstein (do alemão, *Liechtensteinische Kraftwerke – LKW*), que operam diversas pequenas centrais hidrelétricas no país.

Em 2022, os dados da LKW indicam que a produção interna de energia elétrica proveniente da hidreletricidade atingiu 63,4 GWh. Essa geração interna, no entanto, não é suficiente para suprir toda a demanda do país, tornando necessário importar aproximadamente 77% da energia consumida (LKW, 2023).

As principais usinas hidrelétricas em Liechtenstein incluem:

- *KW Samina* – responsável pela maior parte da geração hidrelétrica do país (77,3% da produção interna);
- *KW Lawena* – contribui com aproximadamente 14,2%;
- *KW Schlosswald, KW Letzana, KW Steia e KW Mühleholz* – juntas, essas pequenas centrais complementam a geração interna.

Além das instalações no próprio território, a LKW possui participação em usinas hidrelétricas no exterior, como o *Kraftwerk Taschinas* na Suíça, contribuindo com cerca de 2,6 GWh, e o *Kleinwasserkraftwerk Seebach*, com 1,3 GWh (LKW, 2023).

A estratégia energética do país busca aumentar a independência energética, reduzindo a dependência das importações. Para isso, a LKW continua investindo na modernização de suas hidrelétricas e na diversificação da matriz com outras fontes renováveis, como a energia solar e eólica.

4.3.3.2 Fonte eólica

A matriz elétrica brasileira é descentralizada e baseada em energias de fontes renováveis; nesse contexto, a energia eólica tem sido a mais competitiva nos leilões de energia recentes. A utilização da energia eólica é benéfica nos âmbitos social, ambiental e econômico, contribuindo para um futuro mais sustentável e o cumprimento do Acordo Climático no país. A usina eólica é considerada uma fonte de produção de energia limpa, ocupando pouco espaço físico, podendo gerar energia em locais remotos e sendo abundante, pois o vento está disponível em todo o mundo (ALMEIDA & LUCENA, 2019).

Tabela 5 – Resumo dos resultados para os potenciais bruto, técnico, ambiental e social.

Potencial	Área (km ²)	Capacidade potencial (GW)	Participação na área bruta de recursos eólicos (%)
Bruto	562,522	1688	100
Tecnológico	354,735	1064	63
Ambiental e Social	110,159	330	20

Fonte: VINHOZA & SCHAEFFER (2021).

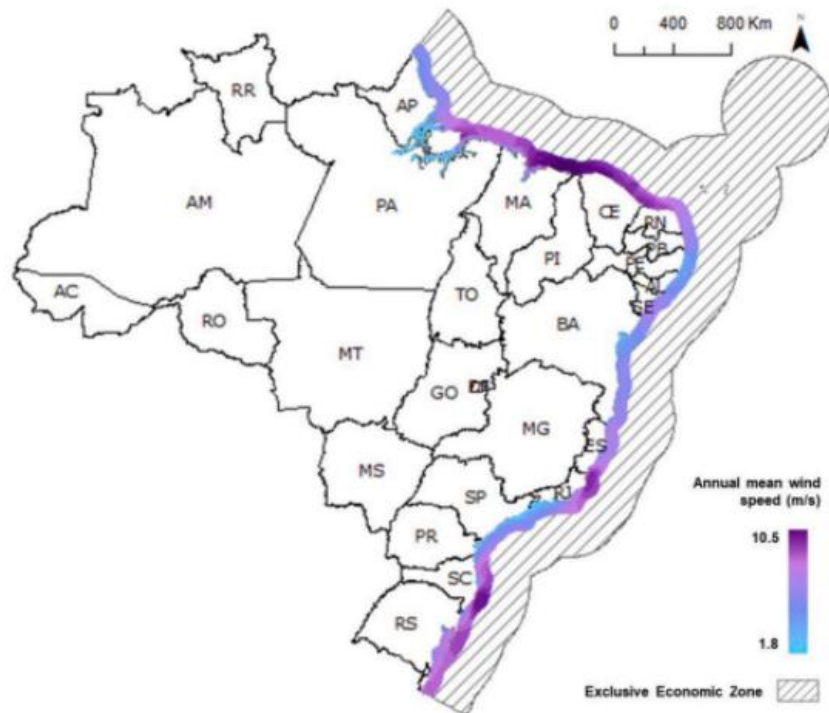
Os anos de 2021 e 2022 foram os mais desafiadores para o setor de energia eólica no Brasil, em parte devido à pandemia de COVID-19, mas mostraram sinais de recuperação

econômica. De acordo com o Banco Central e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro cresceu cerca de 7,6% nos últimos dois anos, com um aumento de 5,66% no consumo de eletricidade. Esse crescimento ressalta a importância da diversificação da matriz energética e do investimento contínuo em fontes renováveis para garantir a segurança e sustentabilidade do setor elétrico no país.

A energia eólica no Brasil experimentou um crescimento notável na última década, aumentando de 1 GW em 2011 para 21 GW em janeiro de 2022. No momento, a energia eólica representa a segunda maior fonte de energia do país, contribuindo com 11% da matriz elétrica. Três principais fatores foram determinantes para esse crescimento: em primeiro lugar, a implementação do marco regulatório dos leilões facilitou a aquisição de energia eólica a preços competitivos; em segundo lugar, políticas financeiras voltadas para o desenvolvimento nacional impulsionaram a formação de uma sólida base industrial eólica no Brasil, capacitando-o a produzir turbinas em quantidade suficiente para uma instalação anual de aproximadamente 5 GW; em terceiro lugar, a crescente incerteza em relação ao papel da energia hidrelétrica na matriz elétrica, devido às mudanças climáticas e à redução dos níveis dos reservatórios necessários para a produção hidrelétrica, tem levado a uma maior busca por fontes alternativas, como a energia eólica (LEE & ZHAO, 2022).

Conforme previsto no Plano de Expansão Decenal de Energia (2022b) da EPE, a energia eólica deverá crescer significativamente no Brasil nesta década. Está se tornando a principal fonte de expansão da matriz elétrica brasileira, juntamente com a energia solar. A Figura 17 apresenta os dados obtidos a partir dos recursos eólicos offshore mapeados ao longo da costa brasileira sem restrições. Esses dados foram modelados como parte do Atlas Eólico Brasileiro oficial, produzido pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Portanto, o uso da energia eólica para a eletrólise pode ser ainda mais intensificado do ponto de vista econômico e ambiental em relação à estabilidade do sistema.

Figura 17 – Mapa do potencial bruto de recursos eólicos *offshore* do Brasil.



Fonte: SEMA (2019).

Em território europeu, a energia eólica também tem um papel importante e em expansão na Áustria. O país tem estabelecido metas ambiciosas para aumentar sua capacidade eólica, com o objetivo de adicionar 10 TWh até 2030. Isso requer uma expansão significativa de mais de 500 MW por ano. Segundo a Agência Internacional de Energia (do inglês, *International Energy Agency* – IEA), a energia eólica representa uma das soluções mais viáveis para a diversificação da matriz energética austríaca e para a redução da dependência de combustíveis fósseis. Esta expansão não apenas apoia a segurança energética nacional, mas também contribui significativamente para a mitigação das mudanças climáticas, alinhando-se com os compromissos internacionais da Áustria em termos de sustentabilidade ambiental.

A Associação Austríaca de Energia Eólica (*IG Windkraft*) ressalta que, com o apoio contínuo do governo e investimentos estratégicos, a Áustria pode aumentar significativamente sua produção de energia eólica, contribuindo de maneira crucial para a segurança energética e a redução das emissões de gases de efeito estufa no país.

Já na Alemanha, a capacidade de energia eólica instalada é uma das maiores do mundo. Até o final de 2020, a capacidade instalada de energia eólica *onshore* na Alemanha era de aproximadamente 54 GW, e a capacidade de energia eólica *offshore* era de cerca de 8 GW. Para o ano de 2021, a geração de eletricidade bruta a partir de fonte eólica foi

equivalente a 115 GWh, o que correspondeu a 19,5% da matriz elétrica do país. No entanto, esses números podem ter aumentado desde então devido aos contínuos investimentos em energia renovável na Alemanha.

A Alemanha é um líder mundial em energia eólica e tem sido um dos países pioneiros na expansão dessa forma de geração de energia. A energia eólica também desempenha um papel significativo na matriz energética alemã. Para o ano de 2021, a relação de energias renováveis gerada a partir da eólica correspondeu a 9,7%, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a transição energética do país para fontes mais limpas e sustentáveis.

Ainda que pequeno em extensão, Liechtenstein tem explorado fontes renováveis de energia para reduzir sua dependência de importações e fortalecer sua segurança energética. Embora a energia hidrelétrica seja a principal fonte de geração no país, a energia eólica também faz parte da estratégia de diversificação energética.

A empresa LKW possui participações em parques eólicos no exterior, já que as limitações territoriais do país dificultam a instalação de turbinas eólicas em grande escala. Entre os investimentos em energia eólica, destacam-se os seguintes parques na Alemanha:

- *Windpark Prettin* – capacidade instalada de 10 MW, com produção anual estimada de 19 GWh;
- *Windpark Lübbenau* – capacidade de 19,5 MW, gerando aproximadamente 48,3 GWh anualmente;
- *Windpark Berlar* – capacidade de 7,5 MW, produzindo cerca de 14,4 GWh por ano.

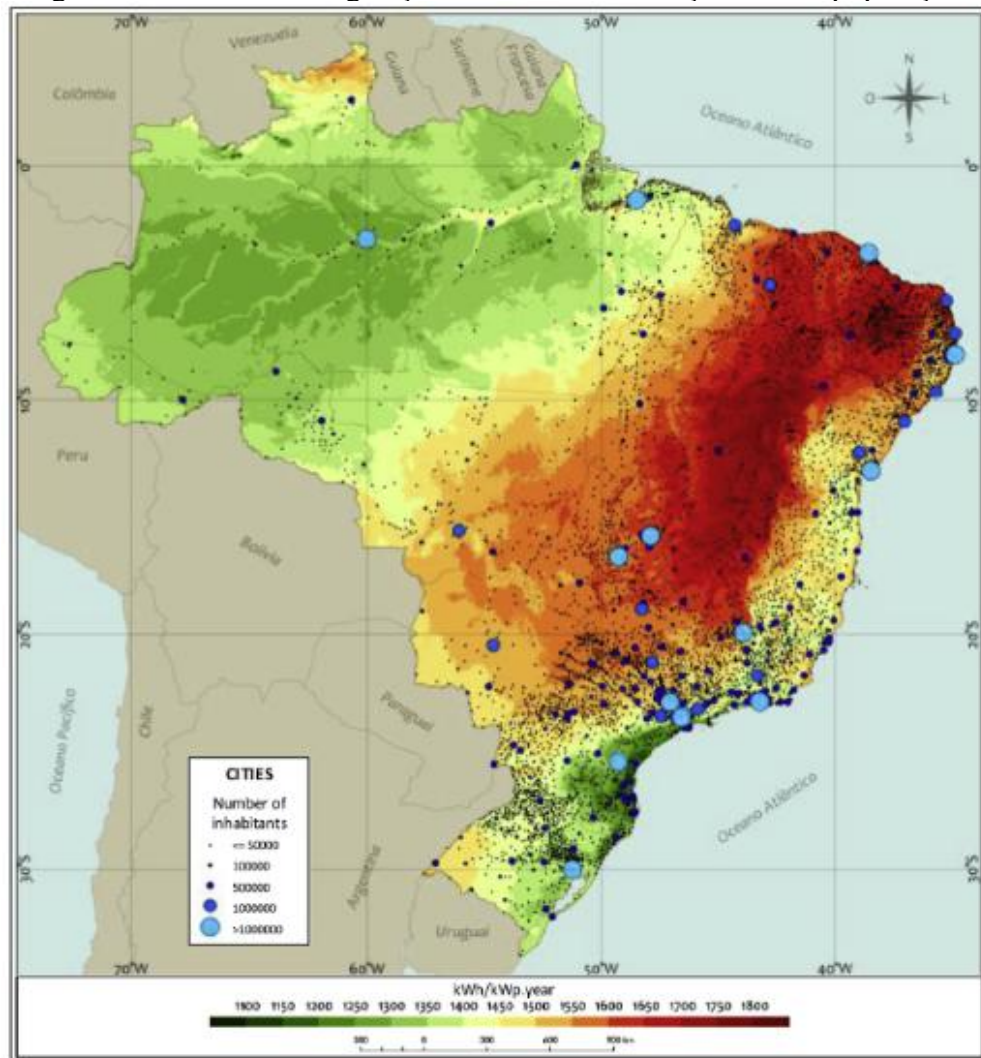
A participação da LKW nesses empreendimentos reforça o compromisso do país com a transição energética e a ampliação do uso de fontes renováveis. Além disso, a LKW continua a avaliar novas oportunidades de investimento para aumentar sua produção própria e reduzir a necessidade de importação de eletricidade.

4.3.3.3 Fonte solar

A energia solar também é de suma importância quando se trata da produção de hidrogênio verde por meio da eletrólise. Os recursos naturais deste setor energético no Brasil estão distribuídos de forma equitativa, embora ligeiramente mais elevados no Nordeste e nas partes centrais do país. Embora várias usinas já tenham sido instaladas nessas áreas, elas ainda apresentam um enorme potencial (EPE, 2023).

A eletricidade solar atende aos princípios básicos dos planos decenais de energia publicados pelo MME, os quais dizem respeito à sustentabilidade, redução dos custos energéticos e diversificação do sistema energético (DENES & KINDL, 2019). Conforme observado na Figura 18, as regiões com o maior número de habitantes também são aquelas com os melhores índices de radiação solar. Essa configuração geográfica dos habitantes brasileiros é muito favorável à energia fotovoltaica de microgeração distribuída e minigeração, pois está associada à proximidade com a rede de distribuição, disponibilidade de espaços e alta demanda por eletricidade (RIGO *et al.*, 2019).

Figura 18 – Potencial de geração fotovoltaica: radiação solar e população.



Fonte: PEREIRA *et al.* (2017)

O Brasil possui grandes depósitos de silício, um material necessário para a produção de energia solar, além de uma extensa área territorial e a contribuição da luz solar,

reforçando a perspectiva positiva. Além disso, o país possui uma grande área superficial e alta radiação solar devido à sua capacidade de aumentar significativamente a produção de energia com eletricidade solar, podendo gerar dezenas de milhares de GWh apenas com essa fonte de energia (DENES & KINDL, 2019).

De outro lado, segundo a IEA, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica na Áustria era de aproximadamente 2,5 GW em 2020. Esse número representa uma pequena fração da matriz energética do país, mas o crescimento anual tem sido robusto, com aumentos de cerca de 20% ao ano nos últimos cinco anos. Segundo a Statistik Austria (2023), para o ano de 2021, 2% na matriz energética e 4% da matriz elétrica foram a partir da utilização de fonte fotovoltaica.

A meta nacional da Áustria é alcançar 15 TWh de produção anual de energia solar até 2030, o que requer um aumento significativo na capacidade instalada. Este crescimento é facilitado pela adoção de tecnologias mais avançadas, como painéis solares de alta eficiência e sistemas de armazenamento de energia, além da implementação de políticas de incentivo à energia solar. Programas de subsídios e incentivos fiscais têm sido fundamentais para estimular tanto a geração distribuída em telhados residenciais quanto a construção de grandes usinas solares.

A Agência de Energia Renovável da Áustria (do alemão, *Österreichische Energieagentur – ÖGEE*) destaca que, com a continuidade dos investimentos e o apoio governamental, a energia solar tem o potencial de se tornar uma parte significativa da matriz energética do país, contribuindo para a diversificação das fontes de energia e para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Já no cenário alemão, apesar de ser um país que não recebe tanto sol quanto regiões mais próximas do equador, o potencial de energia solar é significativo. A Alemanha tem investido fortemente em energia solar nos últimos anos, e a energia solar desempenha um papel cada vez mais importante na sua matriz energética. No ano de 2021, a geração de energia e eletricidade a partir do uso de fonte fotovoltaica correspondeu a 4,2% e 8,4%, respectivamente. Percebe-se o dobro do uso na matriz elétrica, o que indica uma crescente dependência da energia solar como fonte de eletricidade limpa e sustentável.

A capacidade instalada de energia solar na Alemanha tem crescido significativamente ao longo dos anos. No final de 2020, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica na Alemanha ultrapassou os 52 GW, tornando-a uma das líderes mundiais em capacidade instalada per capita.

O sucesso da energia solar na Alemanha é em parte atribuído aos incentivos governamentais, como tarifas de alimentação (*feed-in tariffs*) e subsídios para instalações solares. Esses incentivos foram fundamentais para estimular investimentos em energia solar em residências, empresas e instalações industriais.

Além das instalações solares em telhados de residências e edifícios comerciais, a Alemanha também está promovendo a energia solar comunitária, onde várias pessoas ou comunidades investem em sistemas solares compartilhados, aumentando a acessibilidade da energia solar.

Liechtenstein, apesar de seu pequeno território, tem demonstrado um compromisso crescente com o uso de fontes de energia renovável, em particular a energia solar. De acordo com os dados apresentados pela LKW, o país obteve uma produção total de energia fotovoltaica de 26,8 GWh em 2022, o que inclui 1,3 GWh gerados pelas próprias instalações da LKW e 25,5 GWh provenientes de outros produtores locais (LKW, 2023). Esses números representam um progresso significativo no esforço de aumentar a independência energética e reduzir a pegada de carbono.

O governo de Liechtenstein tem promovido iniciativas importantes, como o modelo de participação solar. Este programa permite que residentes invistam em energia solar sem a necessidade de instalar painéis em suas propriedades. Em 2022, a primeira instalação desse tipo, localizada no terminal de ônibus de Schaan, foi completamente vendida em poucas semanas. Outros projetos semelhantes estão em desenvolvimento, visando expandir a acessibilidade à energia solar sustentável para toda a população.

Além disso, o Liechtenstein investe continuamente no aumento da capacidade instalada de energia fotovoltaica. Em 2022, cerca de 170 novas instalações solares foram adicionadas, e a LKW continua incentivando a adoção de sistemas combinados de painéis solares e baterias. Apesar dos desafios logísticos, como atrasos no fornecimento de componentes eletrônicos, a demanda por soluções de energia solar tem crescido de forma consistente.

Outrossim, Liechtenstein também utiliza energia solar para complementar sua estratégia de sustentabilidade, alinhando-se com as metas de energia limpa da Estratégia Energética 2030. Esta abordagem reflete o compromisso do país em aumentar significativamente sua produção local de energia renovável, reduzindo sua dependência de importações e contribuindo para a segurança energética regional. Com essa abordagem

inovadora e sustentável, o Liechtenstein destaca-se como um exemplo de como países menores podem liderar na implementação de soluções de energia limpa e renovável.

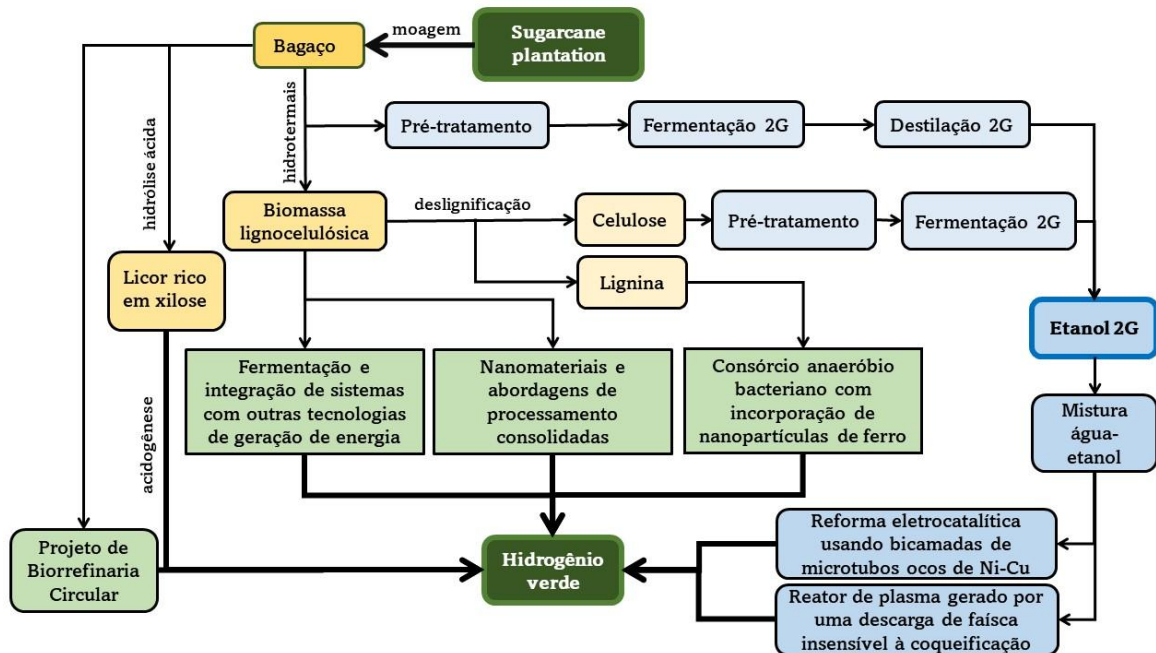
4.3.3.4 Biomassa

A biomassa representa uma fonte crucial de energia renovável, com grande potencial para contribuir significativamente na matriz energética global. O Brasil, com sua vasta produção de cana-de-açúcar, lidera mundialmente na produção de açúcar e etanol, consolidando-se como uma potência nesse setor.

No que concerne a produção de cana-de-açúcar, o Brasil ocupa a primeira posição no ranking mundial, sendo considerado a maior potência na fabricação desse composto. Suas usinas podem produzir açúcar e etanol, ou apenas etanol em destilarias autônomas. De acordo com a 3ª pesquisa sobre a produção de cana-de-açúcar no Brasil pela Companhia Nacional de Abastecimento (Conab, 2022), na safra 2022/2023, mais de 400 usinas brasileiras processaram cerca de 598,4 milhões de toneladas métricas de cana-de-açúcar. O caldo extraído foi utilizado para produzir aproximadamente 36,4 milhões de toneladas métricas de açúcar e 31,1 bilhões de litros de etanol de primeira geração.

A cana-de-açúcar é uma fonte de biomassa altamente eficiente, permitindo a produção de bioenergia de forma sustentável. Além de ser utilizada para a produção de etanol, que serve como biocombustível, os resíduos da cana, como o bagaço e a palha, podem ser utilizados na geração de energia elétrica e térmica. Este aproveitamento integral da cana-de-açúcar não só maximiza o uso dos recursos disponíveis, mas também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Observa-se na Figura 19 as diferentes rotas de obtenção de hidrogênio renovável a partir da utilização de biomassa de cana-de-açúcar.

Figura 19 – Cadeia produtiva de hidrogênio verde a partir do uso de etanol 2G e processos produtivos simultâneos.



Fonte: Adaptado de SILVA (2023); ROMEU DA SILVA (2025).

A biomassa proveniente da cana-de-açúcar, portanto, desempenha um papel essencial na diversificação da matriz energética do Brasil, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e promovendo uma economia mais sustentável. O potencial da biomassa para a produção de energia renovável é vasto e, quando bem aproveitado, pode fornecer uma fonte de energia limpa, eficiente e economicamente viável. Este modelo pode ser replicado em outras regiões do mundo, adaptando-se às características e recursos locais, contribuindo assim para a transição global para fontes de energia mais sustentáveis.

Na Áustria, a biomassa, especialmente biocombustíveis sólidos primários, representa uma contribuição significativa no cenário energético. A biomassa lenhosa é a principal fonte de bioenergia na Áustria, representando 80% do total, incluindo biomassa lenhosa sólida e licor negro (ANCA-COUCÉ; HOCHENAUER & SCHARLER, 2021).

A Áustria possui um considerável potencial para aumentar a geração de energia a partir de biomassa, dado seus vastos recursos florestais e agrícolas e tem investido significativamente em tecnologias de bioenergia e no desenvolvimento de sistemas de aquecimento a biomassa, que são amplamente utilizados tanto em áreas rurais quanto urbanas. A promoção de biomassa como fonte de energia é parte integral dos esforços do país para alcançar suas metas de energia renovável e de redução de emissões conforme estabelecido pela UE.

O território austríaco é um dos mais países mais florestados da Europa, com cerca de 47% de sua superfície coberta por florestas (IEA & ÖSTERREICHISCHER BIOMASSEVERBAND). Esse recurso natural oferece uma vasta quantidade de resíduos de madeira que podem ser utilizados para a produção de biocombustíveis sólidos, como pellets e briquetes de madeira.

Estudos indicam que a Áustria pode aumentar significativamente sua capacidade instalada de energia a partir de biomassa, explorando de maneira mais intensiva seus recursos florestais e agrícolas. Além disso, o potencial de produção de biogás a partir de resíduos agrícolas e resíduos orgânicos urbanos é substancial. A digestão anaeróbia de resíduos agrícolas pode contribuir significativamente para a matriz energética (IEA & ÖSTERREICHISCHER BIOMASSEVERBAND).

A Alemanha também possui uma posição de destaque no uso de biomassa como parte de sua matriz energética, tendo se destacado na utilização de diversas formas de biomassa, incluindo biocombustíveis sólidos primários, biogás e biocombustíveis líquidos.

A biomassa lenhosa é a principal fonte de bioenergia na Alemanha, representando aproximadamente 70% do total. Isso inclui o uso de resíduos de madeira, pellets e briquetes de madeira para produção de calor e eletricidade. Além disso, a Alemanha tem investido em tecnologias avançadas de bioenergia, como a digestão anaeróbia, para produzir biogás a partir de resíduos agrícolas e orgânicos urbanos.

Com cerca de um terço de seu território coberto por florestas, a Alemanha possui vastos recursos florestais que podem ser explorados de forma sustentável para aumentar ainda mais a geração de energia a partir de biomassa. Além disso, o país tem incentivado a produção de biomassa por meio de políticas de apoio e investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

Estudos indicam que a Alemanha possui um considerável potencial para expandir ainda mais sua capacidade de geração de energia a partir de biomassa. O desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e a intensificação do uso de resíduos agrícolas e orgânicos urbanos podem contribuir significativamente para aumentar a participação da biomassa na matriz energética do país, alinhando-se com suas metas de energia renovável e de redução de emissões de carbono.

4.4 POLÍTICAS ENERGÉTICAS DE DESCARBONIZAÇÃO E CUMPRIMENTO DE METAS

4.4.1 Brasil

O Brasil é um exemplo notável no cenário global das matrizes energéticas, apresentando um perfil distinto em comparação com o restante do mundo. Apesar da predominância de fontes de energia não renováveis no consumo nacional, o Brasil depende mais de energias renováveis (por exemplo, hidroeletricidade e derivados da cana-de-açúcar). Aproximadamente 44,8% da matriz energética do Brasil é constituída por energias de fontes renováveis, ilustrando um compromisso significativo com práticas energéticas sustentáveis (REN *et al.*, 2020).

O país emergiu como um modelo, particularmente para as nações em desenvolvimento, no estabelecimento e expansão de parques eólicos terrestres em larga escala (DIÓGENES; CLARO & RODRIGUES, 2019). O empreendimento brasileiro em energia fotovoltaica começou em 2011, marcado pela chamada de pesquisa e desenvolvimento da ANEEL. Esta iniciativa visava propor disposições técnicas e comerciais para a produção de eletricidade através da energia fotovoltaica, fomentando o desenvolvimento de infraestruturas e tecnologias (CARSTENS & CUNHA, 2019). Na expectativa de uma demanda energética triplicada até 2030, o Brasil alinha estrategicamente seus planos decenais de energia, enfatizando a sustentabilidade, a redução dos custos de energia e a diversificação do sistema energético, todos atendidos pela energia fotovoltaica (CARSTENS & CUNHA, 2019).

O Brasil implementou diversos instrumentos de política de promoção de energias renováveis, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA). O programa, iniciado em 2002, utilizou Tarifas de Alimentação (do inglês, *Feed-in Tariffs* – FITs) para gerar 3300 MW a partir de fontes de energia renováveis, como usinas eólicas, biomassa e hidrelétricas (AQUILA *et al.*, 2017). A adoção pelo governo de regimes de leilões, sistemas de empréstimos e contratos de compra garantida contribuiu significativamente para o crescimento das instalações de energia eólica para 5300 MW em 2013 (ABDMOULEH; ALAMMARI & GASTLI, 2015). O quadro jurídico para os sistemas de energia solar fotovoltaica foi estabelecido em 2012, incorporando medição líquida, FIT e incentivos monetários (MUHAMMED & TEKBIYIK-ERSOY, 2020).

Planos estrategicamente delineados, como o Plano de Expansão Energética 2010-2019, demonstram o compromisso do Brasil com a redução da construção de usinas de combustíveis fósseis e a expansão dos setores de energia hidrelétrica e eólica (MUHAMMED & TEKBIYIK-ERSOY, 2020). Além disso, a Contribuição Nacional Mitigada do Brasil visa reduzir as emissões de GEE em 37% e 47% abaixo dos níveis de 2005 até 2025 e 2030, respectivamente. Este objetivo ambicioso exige investimentos em energias renováveis no cabaz energético do país (UNFCCC, 2015).

A liderança do Brasil se estende aos biocombustíveis, onde resoluções recentes destacam o papel fundamental dos biocombustíveis na matriz energética do país e enfatizam a necessidade de mais investimentos no setor (DRANKA & FERREIRA, 2020). O marco regulatório do setor elétrico brasileiro passou por mudanças estruturais significativas, criando um modelo que promove a eficiência econômica por meio da competitividade (TOLMASQUIM *et al.*, 2021). O programa de leilões, iniciado em 2007 e prosseguido com leilões especiais de energias renováveis, tem sido fundamental para a aquisição de capacidade de energia renovável (TOLMASQUIM *et al.*, 2021).

Órgãos governamentais como o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e o MME desempenham papéis cruciais na formulação e no fortalecimento de políticas (SIQUEIRA & BERMAN, 2020). A Resolução Normativa nº 482/2012 permitiu que os consumidores gerassem sua energia elétrica a partir de energias de fontes renováveis, contribuindo para o desenvolvimento de arranjos de mercado (TOLMASQUIM, 2012). A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), lançada em 2017, estimulou ainda mais a produção de biocombustíveis e introduziu um programa de limitação e comércio de créditos de descarbonização (CBIOS) (LAZARO *et al.*, 2022).

A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil visa reduzir substancialmente as emissões de gases de efeito estufa, impulsionada por investimentos intensivos em energia renovável (UNFCCC, 2015). Planos de expansão setoriais de longo e médio prazo por meio do Plano Nacional de Energia (PEV) e do PDE delineiam o compromisso do país com caminhos sustentáveis (SILVA *et al.*, 2019). O governo ambiental, executado por instituições como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) e Sistema Estadual de Proteção Ambiental (SEPA), enfatiza o licenciamento de empreendimentos em conformidade com as regulamentações ambientais federais, estaduais e municipais (SILVA *et al.*, 2019).

O Brasil depende significativamente de energias de fontes renováveis de energia, incluindo hidrelétricas e derivados da cana-de-açúcar, que compõem quase metade de sua matriz energética. O país tornou-se um modelo para as nações em desenvolvimento, particularmente na expansão da energia eólica e na aventura na energia solar. Instrumentos políticos como o PROINFA têm facilitado o crescimento das energias renováveis, alinhando-se às ambiciosas metas do Brasil de redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, persistem desafios na implementação e aplicação de políticas e na abordagem das preocupações ambientais.

Para mitigar esses desafios, o Brasil poderia focar em aprimorar os mecanismos de implementação e fiscalização de políticas para garantir que os projetos de energia renovável sejam desenvolvidos e gerenciados de forma eficaz. O fortalecimento dos marcos regulatórios e das instituições responsáveis pela supervisão de projetos energéticos pode ajudar a melhorar a conformidade com os padrões ambientais e abordar preocupações relacionadas ao uso da terra, conservação da biodiversidade e engajamento comunitário. Além disso, investir em iniciativas de pesquisa e desenvolvimento para avançar as tecnologias e infraestruturas de energia renovável pode aprimorar a eficiência e a confiabilidade dos sistemas de energia renovável, tornando-os mais competitivos em relação às fontes de energia convencionais.

4.4.2 Áustria

Em uma decisão histórica em 1978, os austríacos, por meio de um referendo democrático, proibiram o uso da energia nuclear, posicionando a energia eólica e solar como opções exclusivas para a expansão significativa da geração de energia de baixo carbono (PELINKA, 1983; WEHRLE; GRUBER & SCHMIDT, 2021). Além disso, medidas introduzidas em 1998, como a exigência de que os operadores de rede aceitassem eletricidade de energias de fontes renováveis, lançaram as bases para a dedicação duradoura do país à eletricidade renovável. Este compromisso ganhou novo impulso em 2002 ao adotar a estratégia climática da Áustria como um plano nacional, alinhando-se com acordos internacionais como o Protocolo de Quioto. Ao abrigo deste protocolo, a Áustria comprometeu-se a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 13% em relação aos níveis de 1990 até 2008-2012 (CRICHTON *et al.*, 2023). Este momento crucial colocou a Áustria no caminho para um futuro energético livre de energia nuclear e

ambientalmente sustentável. A pedra angular desta transição é a Lei da Eletricidade Verde de 2002, que, quando alterada em 2012, definiu metas de instalação ambiciosas para a energia solar fotovoltaica e eólica, refletindo o compromisso da Áustria em aproveitar as energias renováveis (ÖSG, 2012).

O início da Lei da Eletricidade Verde em 2002 marcou o passo inaugural da Áustria para aumentar a participação de FERs não hídricas. Esta política, associada a uma tarifa de alimentação lucrativa, atraiu com êxito investimentos, fomentando o crescimento da implantação de energias renováveis (KUMAR *et al.*, 2019). No domínio da produção e fornecimento de eletricidade, a Lei da Eletricidade Verde desempenhou um papel fundamental na formação do panorama das energias renováveis da Áustria. A lei não só introduziu regimes tarifários de alimentação, mas também incentivou os investimentos através de subvenções e bónus de eletricidade verde, impulsionando a integração de instalações de cogeração de elevada eficiência no sector das energias renováveis (CRICHTON *et al.*, 2023). O firme compromisso da Áustria com a Lei da Eletricidade Verde demonstra sua dedicação a soluções de energia sustentáveis e de baixo carbono, direcionando a nação para um futuro energético mais verde e sustentável.

De acordo com o Plano Nacional Integrado de Energia e Clima para a Áustria 2021-2030, a importância das fontes de energia renováveis na consecução dos objetivos climáticos é sublinhada pela referência espacial à disponibilidade de energias renováveis na Áustria. Em uma tentativa de incentivar o uso de biocombustíveis, a Lei do Óleo Mineral da Áustria de 2007 concedeu benefícios fiscais para combustíveis com uma participação de biocombustível de pelo menos 6,6% e 4,6% para diesel e gasolina, respectivamente. No entanto, a alteração subsequente da portaria dos combustíveis, em 2008, impôs limitações, limitando a quota de biodiesel no abastecimento de combustível a um máximo de 7% (CRICHTON *et al.*, 2023).

A fim de proporcionar um quadro claro e estável para a implantação de energias renováveis, a Áustria promulgou a legislação das fontes de energia renováveis em julho de 2011, conhecida como *Ökostromgesetz* 2012. Esta legislação constituiu um marco significativo ao introduzir perspectivas de implantação a longo prazo com valores-alvo concretos, assegurando um quadro jurídico estável para as iniciativas em matéria de energias renováveis até 2020 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY WIND, 2015). Ao sintetizar essas medidas, a Áustria demonstra uma abordagem abrangente e voltada para o

futuro para integrar as energias renováveis em sua estratégia energética nacional, refletindo seu compromisso com a sustentabilidade e as metas climáticas.

A Áustria está firme no seu compromisso de alcançar 100% de energia renovável no seu cabaz de eletricidade até 2030 através da visionária "Missão 2030" (BMNT; BMVIT, 2018). Em paralelo, o governo planeja gerar 27 TWh adicionais de eletricidade a cada ano a partir de energias de fontes renováveis, culminando em um total de 78,3 TWh de geração de eletricidade renovável em 2030 (WEHRLE; GRUBER & SCHMIDT, 2021). A política climática da Áustria, um dos pilares da Missão 2030, visa uma redução substancial de 36% nas emissões de gases de efeito estufa até 2030 em comparação com os níveis de 2005. Esta iniciativa estratégica não apenas orienta os investimentos no setor de energia, mas também se alinha com os objetivos mais amplos da Áustria de descarbonização, mostrando sua dedicação à sustentabilidade ambiental global (KOMENDANTOVA; NEUMUELLER & NKOANA, 2021).

No contexto mais amplo, o compromisso da Áustria faz eco das ações políticas concretas do Conselho Europeu, que, em 2014, adotou o quadro relativo ao clima e à energia para 2030, um passo significativo no sentido do cumprimento do Acordo de Paris (EUROPEAN COMMISSION; D'ADAMO *et al.*, 2020). Indo além das políticas energéticas tradicionais, a Missão 2030 coloca uma forte ênfase na acessibilidade social e na governação participativa. Até 2030, a Áustria prevê satisfazer todas as suas necessidades de eletricidade a partir de energias de fontes renováveis domésticas, com um foco específico na energia eólica (WEHRLE; GRUBER & SCHMIDT, 2021). São delineados fatores-chave para a aceitação social e pública, incluindo a avaliação da racionalidade econômica, como os custos nivelados da geração de energia. A estratégia incentiva os esforços de colaboração para obter soluções sociais eficazes e defende os princípios da boa governação, assegurando um acesso transparente à informação e medidas de sensibilização (KOMENDANTOVA; NEUMUELLER & NKOANA, 2021).

Além disso, a Áustria se destaca como pioneira na promoção da flexibilidade energética por meio de iniciativas como o Fundo para o Clima e Energia (do alemão, *Klima-und Energiefonds* – KLIEN), que prioriza abordagens de baixo para cima, governança local e engajamento das partes interessadas, capacitando leigos na tomada de decisões para a descarbonização do setor energético. De acordo com o KLIEN, esse compromisso é exemplificado pelo apoio de longa data do fundo a atividades de energia sustentável nos níveis locais em municípios e regiões. A sinergia entre a Missão 2030 e o

KLIEN destaca a abordagem holística e inovadora da Áustria, reafirmando sua dedicação a um futuro energético sustentável, inclusivo e flexível.

Em uma escala mais ampla, a principal política energética suíça, Estratégia Energética 2050 (*Energiestrategie 2050*), delineado na Lei da Energia (*Energiegesetz, EnG*), define metas ambiciosas para a expansão do setor das energias renováveis (SWISS FEDERAL OFFICE OF ENERGY, 2016; SWISS FEDERAL OFFICE OF ENERGY, 2018). Com a Suíça adotando a *Energiestrategie 2050* em 2016 (SWISS FEDERAL OFFICE OF ENERGY, 2018) e a Áustria alterando sua Sociedade Austríaca de Engenharia de Controle (do alemão, *Österreichische Studiengesellschaft für Regelungstechnik – ÖSG*) em 2012, ambos os países estão navegando em cenários políticos em evolução. Recomenda-se cautela na mudança do atual sistema de políticas para evitar desfavorecer as iniciativas energéticas comunitárias, considerando a natureza nascente dos investimentos em Energia Renovável Comunitária (CRE). Um caso da Alemanha ilustra como os decisores políticos podem criar um quadro vantajoso para os projetos CRE, mesmo no meio de mudanças políticas (BROUGHEL & HAMPL, 2018).

As políticas implementadas pela Áustria para promover a adoção de energias renováveis demonstraram progressos significativos no sentido de alcançar uma transição para um sistema energético hipocarbônico. A decisão de proibir a energia nuclear em 1978, seguida de medidas legislativas subsequentes, como a Lei da Electricidade Verde de 2002, sublinham o compromisso da Áustria com o desenvolvimento das energias renováveis. Essas políticas têm incentivado com sucesso investimentos na implantação de energia renovável, resultando em resultados tangíveis, como o aumento da instalação de sistemas de energia solar fotovoltaica e eólica.

Além disso, as implicações das políticas de energia renovável da Áustria vão além de suas fronteiras, alinhando-se com estruturas europeias e internacionais mais amplas de clima e energia. A sinergia entre a Missão 2030 da Áustria e iniciativas como *Klima-und Energiefonds* destaca a sua abordagem holística para o desenvolvimento energético sustentável. No entanto, será necessária uma avaliação e adaptação contínuas das políticas para fazer face aos desafios em evolução e garantir o êxito a longo prazo da transição da Áustria para uma economia baseada nas energias renováveis.

Para mitigar esses desafios, esforços colaborativos entre agências governamentais, partes interessadas do setor privado e organizações da sociedade civil podem promover transparência, responsabilidade e participação das partes interessadas nos processos de

tomada de decisão relacionados a projetos de desenvolvimento energético. Além disso, a promoção de campanhas de conscientização pública e educação sobre os benefícios da energia renovável e práticas energéticas sustentáveis pode ajudar a obter apoio para iniciativas de energia limpa e incentivar mudanças comportamentais em direção a padrões de consumo de energia mais ambientalmente amigáveis.

4.4.3 Alemanha

O compromisso da Alemanha em remodelar seu cenário energético é evidente em suas políticas ambiciosas delineadas na Lei Alemã de Encerramento da Geração de Energia a Carvão (do alemão, *Kohleausstiegsgesetz* – KVBG) e na Lei Alemã de Fontes de Energia Renovável revisada (do alemão, *Erneuerbare-Energien-Gesetz* – EEG 2021) (DEUTSCHER BUNDESTAG, 2020a; DEUTSCHER BUNDESTAG, 2020b). Essas políticas significam uma mudança transformadora, incluindo a cessação antecipada da geração de energia nuclear e uma saída parcial do carvão até 2030 (WEHRLE; GRUBER & SCHMIDT, 2021).

A introdução da Lei das Energias Renováveis (EEG) em 2000 visava diversificar os investidores e profissionalizar o sector (HALL *et al.*, 2018). No entanto, respondendo às diretrizes da UE, o governo alemão fez a transição para um sistema baseado em leilões em 2014, levantando preocupações sobre possíveis compromissos com os diversos atores do sistema alemão de energias renováveis. Apesar das medidas de execução destinadas a apoiar projetos energéticos comunitários, subsistem dúvidas quanto à sua eficácia na resposta aos desafios associados às abordagens normalizadas de financiamento de projetos (HALL *et al.*, 2018).

O compromisso da Alemanha com a expansão acelerada das fontes de energia renovável ultrapassa as metas da União Europeia. Com a revisão da Lei de Energias Renováveis (EEG 2023), inserida na estratégia *Energiewende*, o país estabeleceu como meta que 80% do consumo bruto de eletricidade seja proveniente de fontes renováveis até 2030, antecipando significativamente os objetivos anteriormente projetados para 2050. Essa política energética visa também a neutralidade climática até 2045, contribuindo para a redução substancial das emissões de gases de efeito estufa no cenário europeu e global (BMWK, 2022).

O Plano de Ação Climática Alemão 2050 (do alemão, *Deutscher Klimaschutzplan 2050* – KSP 2050) descreve uma iniciativa ousada para fornecer eletricidade inteiramente a partir de energias de fontes renováveis até 2050 (NAGL *et al.*, 2011). O Governo Federal alemão estabeleceu metas de expansão para as quotas de energias renováveis na produção total de eletricidade, visando 40-45% até 2025 e 55-60% até 2035 (GERMAN FEDERAL GOVERNMENT, 2014).

A legislação, incluindo a Lei de Alimentação da Rede em 2000, desempenhou um papel fundamental na definição da transição energética da Alemanha (AGORA ENERGIEWENDE, 2016). Estão em curso esforços para aumentar a quota de energias renováveis na produção total de energia, alinhando-se com os objetivos climáticos da Alemanha para 2050, por exemplo, (BMUB, 2016).

A *Energiewende* representa uma mudança estratégica em direção a um portfólio dominado por energia renovável. A Alemanha aspira a alcançar uma substituição o mais próxima possível de 100% das fontes de energia não renováveis, com metas específicas para redução de gases de efeito estufa, participação de energia renovável, aumento da eficiência elétrica e esforços associados de pesquisa e desenvolvimento. A transição em curso já resultou em um aumento substancial na produção de energia renovável, especialmente na energia eólica (FRANK *et al.*, 2018).

O caminho da transição energética da Alemanha remonta à introdução da Lei de Alimentação da Rede em 1990, que propôs uma tarifa de alimentação (LEIREN & REIMER, 2018; BERCHEM, 2006). A subsequente Lei das Fontes de Energia Renováveis (EEG 2000) marcou uma mudança significativa, diferenciando entre várias fontes de energia renováveis e estabelecendo um objetivo de aumentar a quota de eletricidade produzida a partir de energias de fontes renováveis de 5% para 10% até 2010 (LEIREN & REIMER, 2018).

As modificações no EEG nos anos subsequentes refletiram a evolução dos cenários políticos e as respostas aos desafios, incluindo o desastre de Fukushima em 2011 (LEIREN & REIMER, 2018; SCHREURS, 2012; HUENTELER; SCHMIDT & KANIE, 2012; ALTMAIER, 2013). A Lei de Segurança Energética do Aprovisionamento (do alemão, *Energiesicherheitsgesetz* – EnSiG) confere poderes aos atos regulamentares para assegurar a responsabilidade individual pelas soluções de reserva, alinhando-se com o foco da Alemanha no aumento da eficiência energética e na consecução dos objetivos energéticos e climáticos para 2030 (PROSKURYAKOVA, 2018).

Estas políticas promovem estrategicamente práticas energéticas sustentáveis e contribuem para os esforços globais para atingir os objetivos de redução das emissões (BONATZ *et al.*, 2019). À medida que as energias eólicas e solar ganham destaque no setor elétrico da Alemanha, a política energética do país muda para a integração da geração de eletricidade a partir dessas energias de fontes renováveis (RUHNAU *et al.*, 2019). O reconhecido sucesso da Alemanha na promoção de energias renováveis é evidente em seu consistente ranking global e iniciativas estratégicas, como a *Energiewende* (ETHICS COMMISSION FOR A SAFE ENERGY SUPPLY, 2011; BRODNY; TUTAK & BINDZÁR, 2021).

Além disso, as políticas energéticas abrangentes e em evolução da Alemanha refletem seu compromisso com a descarbonização, sustentabilidade e energia renovável. O cenário legislativo, que engloba atos como o EEG e o KVBG, molda a transição energética do país, estabelecendo metas ambiciosas e fomentando a inovação no setor de energias renováveis. A *Energiewende* é um testemunho da liderança da Alemanha na transição para um sistema de energia sustentável, fornecendo informações valiosas para os esforços globais de combate às mudanças climáticas (BMUB, 2016; ETHICS COMMISSION FOR A SAFE ENERGY SUPPLY, 2011). O compromisso contínuo de aumentar a quota de eletricidade produzida a partir de energias de fontes renováveis e de enfrentar os desafios da transição energética reforça o papel da Alemanha como pioneira em práticas energéticas sustentáveis (FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY, 2016).

Em conclusão, apesar dos esforços para promover projetos energéticos comunitários, persistem questões sobre sua eficácia na abordagem dos desafios associados às abordagens padrão de financiamento de projetos, indicando a necessidade de medidas políticas mais adaptadas e inclusivas. O compromisso da Alemanha com a implantação agressiva de tecnologias de energia renovável visa superar as metas da UE e reduzir significativamente as emissões de gases com efeito de estufa até 2050. No entanto, alcançar esses objetivos requer superar desafios como a integração da rede, o armazenamento de energia e garantir acessibilidade e aceitação social. A transição em curso para energias de fontes renováveis, particularmente eólica e solar, ressalta a liderança da Alemanha em práticas de energia sustentável. No entanto, a inovação e a adaptação contínuas de políticas são essenciais para enfrentar os desafios em evolução e garantir a eficácia dos esforços de

transição energética da Alemanha, reforçando sua posição como pioneira global em práticas de energia sustentável.

4.4.4 Liechtenstein

Liechtenstein, apesar de ser um dos menores países do mundo, destaca-se pela sua abordagem ambiciosa e inovadora em relação à descarbonização e à transição energética. O país, com uma população pequena e alta densidade per capita de capacidade instalada de energia renovável, busca alcançar a neutralidade climática até 2050, alinhando-se aos objetivos climáticos europeus e globais.

A matriz energética de Liechtenstein é intrinsecamente conectada à da Suíça, de onde o país importa a maior parte de sua eletricidade. Essa interdependência implica uma diversificação na origem da energia consumida, que combina fontes de energia renováveis, nucleares e fósseis. Para minimizar a dependência de combustíveis fósseis e avançar na descarbonização, Liechtenstein investe intensamente em energia solar e hidrelétrica. Esses recursos renováveis são fundamentais para atender às demandas internas e reduzir a pegada de carbono associada ao consumo energético.

O papel da energia hidrelétrica é notável no país, que se beneficia de sua proximidade com regiões de grande potencial hidroelétrico. Além disso, o governo tem promovido a instalação de sistemas de energia solar em edifícios residenciais e comerciais, incentivando a geração descentralizada e o autoconsumo. Esses esforços contribuem para posicionar Liechtenstein entre os países líderes em capacidade instalada de energia renovável per capita.

Liechtenstein implementa políticas que priorizam a eficiência energética e a redução de emissões de GEE. Entre as principais iniciativas estão:

- **Plano Nacional de Energia e Clima (NEKP):** este plano estabelece diretrizes para a transição energética do país, com foco na ampliação do uso de fontes de energia renováveis e na melhoria da eficiência energética. O PNEC está alinhado às metas estabelecidas pela União Europeia, das quais Liechtenstein é um participante indireto por meio de acordos bilaterais com a Suíça;
- **Incentivos para renovação de edificações:** o governo oferece subsídios e benefícios fiscais para renovação energética de edificações antigas, reduzindo a demanda por aquecimento e melhorando a eficiência no uso de energia;

- **Transporte sustentável:** Liechtenstein também promove iniciativas voltadas para a eletrificação do setor de transportes, com incentivos à adoção de veículos elétricos e o desenvolvimento de infraestrutura de recarga. Essa medida visa não apenas reduzir as emissões do setor de transporte, mas também incentivar o uso de energias renováveis no carregamento de veículos.

Apesar do progresso, Liechtenstein enfrenta desafios relacionados à sua dependência de importação de eletricidade e à limitada capacidade de expansão de infraestrutura renovável devido ao seu pequeno território. Para superar essas limitações, o país aposta na cooperação internacional, principalmente com a Suíça, e na adoção de tecnologias inovadoras como o armazenamento de energia em baterias e o uso de hidrogênio verde.

O compromisso de Liechtenstein com a neutralidade climática até 2050 reflete sua visão estratégica de longo prazo e sua contribuição para o ODS 7. Por meio de políticas integradas e ações coordenadas, o país demonstra como mesmo nações de pequeno porte podem desempenhar um papel significativo na luta global contra as mudanças climáticas.

4.4.5 Análise comparativa das políticas energéticas de descarbonização: desafios, implicações e direções futuras entre Brasil e Europa

No panorama das políticas energéticas mundiais, a produção de hidrogênio tem merecido uma atenção significativa devido ao seu potencial para reduzir as emissões, apesar de enfrentar desafios associados a custos elevados (PFOSER; SCHAUER & COSTA, 2018). A transição para fontes de energia mais limpas é evidente nos objetivos ambiciosos estabelecidos pelos países europeus, como a Alemanha, no âmbito dos seus planos de transição energética (STRUNZ, 2014). Na Europa, o biometano tem sido reconhecido como uma alternativa promissora ao gás natural, com benefícios ambientais substanciais (D'ADAMO *et al.*, 2020). O apoio financeiro ao consumo de bioenergia na União Europeia depende de critérios de sustentabilidade (BANJA *et al.*, 2019).

A Áustria, um país europeu comprometido com a descarbonização, está explorando o uso de biometano para reduzir as emissões de carbono no aquecimento e resfriamento residencial (HERBES.; RILLING & RINGEL, 2021). A integração do gás verde nas tecnologias de aquecimento existentes apresenta uma opção viável para o consumo sustentável de energia. A disponibilidade de gás renovável contribui para os esforços da

Áustria para descarbonizar o aquecimento de edifícios residenciais (HERBES.; RILLING; RINGEL & 2021). A Agência Internacional de Energia projeta um aumento significativo no consumo global de biometano, enfatizando a influência das políticas energéticas na evolução do mercado.

Na Alemanha, um interveniente-chave na adoção de energias renováveis, a transição para fontes mais limpas é sublinhada pela Lei das Energias Renováveis, que molda um quadro regulamentar para promover a inovação e a expansão tecnológica (LANGER *et al.*, 2021). A indústria alemã de biogás está em transição, com ênfase na produção de electricidade e na diminuição da venda de biometano como combustível (DANIEL-GROMKE *et al.*, 2017). Nos últimos anos, assistiu-se a uma redução substancial dos custos da energia eólica e solar, em consonância com o compromisso da Alemanha para com as energias renováveis (COESTER; HOFKES & PAPYRAKIS, 2018). A mudança do país para um sistema de licitação e a competitividade econômica em energias renováveis contribuem para sua adoção geral (LI *et al.*, 2022; KEMFERT, 2017).

O Brasil, com seu vasto território e alta irradiação solar, possui um potencial substancial para aumentar a geração de energia usando energia fotovoltaica (CARSTENS & CUNHA, 2019). Estudos indicam que a capacidade de utilização da energia solar fotovoltaica no Brasil supera a de alguns países europeus (PEREIRA *et al.*, 2017). Além disso, o crescimento da energia eólica no Brasil tem sido notável, tornando-se a segunda maior fonte de energia do país (LEE & ZHAO, 2022).

5 CONCLUSÕES

A análise das políticas energéticas dos países investigados permitiu identificar convergências e divergências relevantes em suas estratégias de transição para fontes renováveis. Alemanha e Áustria destacam-se pela adoção de políticas amplamente estruturadas, com forte presença de incentivos estatais, investimentos em inovação tecnológica e metas ambiciosas de descarbonização. O Brasil, apesar de desafios institucionais e estruturais, apresenta um significativo potencial renovável, com destaque para as fontes hidrelétrica, eólica e solar, além de programas como o PROINFA e o RenovaBio. Liechtenstein, por sua vez, enfrenta restrições naturais e geográficas, mas avança em sua transição energética por meio de parcerias internacionais e soluções tecnológicas adaptadas à sua escala.

Em termos quantitativos, a Alemanha, por meio da política *Energiewende*, estabeleceu a meta de ampliar a participação de fontes renováveis no consumo bruto de eletricidade para 80% até 2030. A Áustria, por meio da Missão 2030, planeja gerar 27 TWh adicionais de eletricidade a cada ano a partir de fontes renováveis, culminando em um total de 78,3 TWh de geração de eletricidade renovável em 2030. O Brasil, com 44,8% de sua matriz energética composta por fontes renováveis, busca aliar crescimento econômico à sustentabilidade, utilizando recursos abundantes de forma estratégica. Liechtenstein, com 54,2% de sua matriz energética composta por fontes renováveis, adota mecanismos tarifários, acordos regionais e iniciativas de inovação para avançar em sua agenda energética.

As contribuições identificadas ao longo do estudo reforçam o papel de cada país no fortalecimento das políticas energéticas sustentáveis. Alemanha e Áustria oferecem modelos consolidados de eficiência, integração do hidrogênio verde e estratégias de longo prazo, podendo servir de referência para outras nações. O Brasil se posiciona como líder regional em renováveis, com capacidade de adaptação e expansão tecnológica. Liechtenstein, embora limitado em escala, evidencia a importância da cooperação internacional, do aproveitamento eficiente de recursos e da inserção de soluções energéticas inovadoras em contextos específicos. Tais conclusões contribuem para o debate global sobre sustentabilidade energética e o papel da diversidade de estratégias nacionais na construção de um futuro de baixo carbono.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de continuidade ao estudo realizado, tem-se:

- Análise comparativa de políticas de incentivo ao hidrogênio verde;
- Impacto econômico de longo prazo do hidrogênio verde;
- Avaliação da infraestrutura de transporte e armazenamento de hidrogênio;
- Desenvolvimento de tecnologias de eletrólise avançadas;
- Análise de ciclo de vida do hidrogênio verde;
- Integração de energias renováveis e hidrogênio verde;
- Modelos de negócios para a economia do hidrogênio;
- Aspectos sociais e políticas públicas para a transição energética;
- Comparação de emissões de gases de efeito estufa;
- Desafios e oportunidades da exportação de hidrogênio verde;
- Avaliação do ciclo de vida do hidrogênio verde produzido no Brasil;
- Desenvolvimento de modelos de negócios para energia renovável e hidrogênio

verde na Alemanha;

- Análise comparativa da eficiência de tecnologias de eletrólise em Áustria e Alemanha.

REFERÊNCIAS

- ABDMOULEH, Z.; ALAMMARI, R.A.; GASTLI, A. Review of policies encouraging renewable energy integration and best practices. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 45, p. 249–262, maio 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.035>. Acesso em: 10 maio 2024.
- AG ENERGIEBILANZEN E.V. **Share of energy sources in gross German power production in 2022**. AGEb - AG Energiebilanzen e.V., Berlin, [2022]. Disponível em: <https://ag-energiebilanzen.de/datenundfakten/zusatzinformationen/>. Acesso em: 10 maio 2024.
- AGORA ENERGIEWENDE. **Energiewende**: What do the new laws mean? ten questions and answers about eeg 2017, the electricity market act, and the digitisation act. Agora Energiewende: Berlin, Germany, 2016. Disponível em: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/EEG-FAQ/Agora_FAQ-EEG_EN_WEB.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.
- ALFREDSEN, K. *et al.* A synoptic history of the development, production and environmental oversight of hydropower in Brazil, Canada, and Norway. **Hydrobiologia**, Dordrecht, v. 849, n. 2, p. 269–280, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10750-021-04709-4>. Acesso em: 09 fev. 2024.
- ALMEIDA, J.; LUCENA, Y. Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line. **Clean Energy**, Oxford, v. 3, n. 2, p. 69–84, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/ce/zkz001>. Acesso em: 10 maio 2024.
- ANCA-COUCÉ; A. HOCHENAUER; C. SCHARLER, R. Bioenergy technologies, uses, market and future trends with Austria as a case study, **Renewable and Sustainable Energy**, Oxford, v. 135, p. 110237, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110237>. Acesso em: 30 maio 2024.
- AQUILA, G. *et al.* An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 70, p. 1090–1098, abr. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.013>. Acesso em: 10 maio 2024.
- BANJA, M. *et al.* Biomass for energy in the EU— The support framework. **Energy Policy**, Oxford, v. 131, p. 215–228, ago. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.038>. Acesso em: 10 maio 2024.
- BAUMANN, M. *et al.* Erneuerbares Gas in Österreich 2040. **Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie**, Vienna, Austria, v. 94, 2021.
- BERCHEM, A. **Das Unterschätzte Gesetz**. **Zeit Online**. 2006. Disponível em: <http://www.zeit.de/online/2006/39/EEG/komplettansicht>. Acesso em: 10 maio 2024.

BMNT; BMVIT. **#Mission2030**: Die Österreichische Klima- und Energiestrategie. 2018. Disponível em: <https://www.global2000.at/sites/global/files/Analyse-KlimaEnergiestrategie2018.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

BMUB. **Climate Protection Plan 2050**. Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, Berlin, 2016. Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/sites/lts/lts_de_en.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

BONATZ, N. *et al.* A comparative study of the interlinkages between energy poverty and low carbon development in China and Germany by developing an energy poverty index. **Energy and Buildings**, Oxford, v. 183, p. 817–831, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.042>. Acesso em: 10 maio 2024.

BREUER, J.L. *et al.* An overview of promising alternative fuels for road, rail, air, and inland waterway transport in Germany. **Energies**, Basel, v. 15, n. 4, p. 1443, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15041443>. Acesso em: 10 maio 2024.

BRODNY, J.; TUTAK, M.; BINDZÁR, P. Assessing the level of renewable energy development in the european union member states: a 10-year perspective. **Energies**, Basel, v. 14, n. 13, p. 3765, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14133765>. Acesso em: 10 maio 2024.

BROUGHEL, A.E.; HAMPL, N. Community financing of renewable energy projects in Austria and Switzerland: profiles of potential investors. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 123, p. 722–736, dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.054>. Acesso em: 10 maio 2024.

CARSTENS, D.D.S.; CUNHA, S.K. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 125, p. 396–404, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.063>. Acesso em: 10 maio 2024.

COESTER, A.; HOFKES, M.W.; PAPYRAKIS, E. Economics of renewable energy expansion and security of supply: a dynamic simulation of the German electricity market. **Applied Energy**, Amsterdã, v. 231, p. 1268–1284, dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.143>. Acesso em: 10 maio 2024.

COLEMAN, D.; KOPP, M.; WAGNER, T.; SCHEPPAT, B. The value chain of green hydrogen for fuel cell buses—A case study for the Rhine-Main area in Germany. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, v. 45, p. 5122–5133, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.06.163>. Acesso em: 30 maio 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. CONAB, Brasília, v. 9, p. 1–59, 2022. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 30 maio 2024.

CRICHTON, R. *et al.* The impact of Austria’s climate strategy on renewable energy consumption and economic output. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 178, p. 113610, jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113610>. Acesso em: 10 maio 2024.

D'ADAMO, I. *et al.* RES-T trajectories and an integrated SWOT-AHP analysis for biomethane: policy implications to support a green revolution in European transport. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 138, p. 111220, mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111220>. Acesso em: 10 maio 2024.

DANIEL-GROMKE, J. *et al.* Current developments in production and utilization of biogas and biomethane in Germany. **Chemie Ingenieur Technik**, Weinheim, v. 90, n. 1, p. 17–35, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/cite.201700077>. Acesso em: 10 maio 2024.

DENES, D.; KINDL, S. Challenges and opportunities for the growth of solar photovoltaic energy in Brazil. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 125, p. 396–404, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.063>. Acesso em: 10 maio 2024.

DEUTSCHER BUNDESTAG. **Coal-Fired Power Generation Termination Act (KVBG)**. Bundesgesetzblatt, Berlin, ago. 2020a. Disponível em: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//%2A%5B%40attr_id%3D%E2%80%99%99bgbl120s1818.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

DEUTSCHER BUNDESTAG. **Renewable Energy Sources Act**. Bundesgesetzblatt, Berlin, dez. 2020b. Disponível em: <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Downloads/renewable-energy-sources-act2017.pdf?blob=publicationFile&v=3>. Acesso em: 10 maio 2024.

DIAS, V. D. S. *et al.* An overview of hydropower reservoirs in Brazil: current situation, future perspectives and impacts of climate change. **Water**, Basel, v. 10, n. 5, p. 592, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w10050592>. Acesso em: 09 fev. 2024.

DIÓGENES, J.R.F.; CLARO, J.; RODRIGUES, J.C. Barriers to onshore wind farm implementation in Brazil. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 128, p. 253–266, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.062>. Acesso em: 10 maio 2024.

DRANKA, G.G.; FERREIRA, P. Electric vehicles and biofuels synergies in the Brazilian energy system. **Energies**, Basel, v. 13, n. 17, p. 4423, ago. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13174423>. Acesso em: 10 maio 2024.

ECKERT, E. **Grüner Wasserstoff: ein Überblick und mehr** (Green hydrogen: an overview and more). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. ISBN 978-3-7557-7774-8.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 10 maio 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>. Acesso em: 10 maio 2024.

ENERDATA. **Austria country profile**. Enerdata, Grenoble, 2025. Disponível em: <https://www.enerdata.net/estore/country-profiles/austria.html>. Acesso em: 23 jun. 2025.

ENERDATA. **Germany country profile**. Enerdata, Grenoble, 2025. Disponível em: <https://www.enerdata.net/estore/country-profiles/germany.html>. Acesso em: 23 jun. 2025.

ENERGIE IN ÖSTERREICH. **Zahlen, Daten, Fakten**. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Viena, 2023. Disponível em: <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>. Acesso em: 10 maio 2024.

ENERGY OUTLOOK. **Surviving the Energy Crisis**. Energy Information Administration, Washington, 2023. Disponível em: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>. Acesso em: 10 maio 2024.

ETHICS COMMISSION FOR A SAFE ENERGY SUPPLY. **Germany's Energy Transition – A Collective Project for the Future**. Federal Government of Germany, Berlin, 2011. Disponível em: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/2065474/457334/bae4db36ddee0379dac83f1a14cab337/2011-05-30-abschlussbericht-ethikkommission-en-data.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

EUROPEAN COMMISSION. 2030 Climate and Energy Framework. **Energy, Climate change, Environment**, [S.l.], 2014. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-targets_en. Acesso em: 10 maio 2024.

FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND CLIMATE ACTION. **In The National Hydrogen Strategy**. BMWi, Berlin, 2020.

FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY. Entwicklung der Erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2015. **Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)**, Berlin, 2016. Disponível em: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/connaissancedesenergies.org/files/pdf-actualites/erneuerbare-energien-in-zahlen-2015.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

FEDERAL MINISTRY FOR ECONOMIC AFFAIRS AND ENERGY. **Renewable Energy**. Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, [S.l.], 2022. Disponível em: <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Dossier/renewable-energy.html>. Acesso em: 25 jun. 2025.

FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION, BUILDING AND NUCLEAR SAFETY. **The German Government's Climate Action Programme 2020**. [S.n.], [S.l.], 2014. Disponível em: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/aktionsprogramm_klimaschutz_2020_broschuere_en_bf.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

FENG *et al.* Modulation the electronic structure of hollow structured CuO-NiCo₂O₄ nanosphere for enhanced catalytic activity towards methanolysis of ammonia borane. **Fuel**, Amsterdã, v. 332, p. 126045, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126045>. Acesso em: 10 maio 2024.

FRAGKOS, P. *et al.* Energy system impacts and policy implications of the European Intended Nationally Determined Contribution and low-carbon pathway to 2050. **Energy**

Policy, Amsterdã, v. 100, p. 216–226, jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.10.023>. Acesso em: 10 maio 2024.

FRANK, A.G. *et al.* The contribution of innovation policy criteria to the development of local renewable energy systems. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 115, p. 353–365, abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.036>. Acesso em: 10 maio 2024.

HALL, S. *et al.* Finance and justice in low-carbon energy transitions. **Applied Energy**, Amsterdã, v. 222, p. 772–780, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.007>. Acesso em: 10 maio 2024.

HERBES, C.; RILLING, B.; RINGEL, M. Policy frameworks and voluntary markets for biomethane – how do different policies influence providers’ product strategies? **Energy Policy**, Amsterdã, v. 153, p. 112292, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112292>. Acesso em: 10 maio 2024.

HUNT, J.D. *et al.* Hydrogen deep ocean link: a global sustainable interconnected energy grid. **Energy**, Amsterdã, v. 249, p. 123660, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123660>. Acesso em: 10 maio 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY WIND. **2014 Annual Report**. IEA, Paris, 2015. Disponível em: <https://usercontent.one/wp/iea-wind.org/wp-content/uploads/2022/12/2014-IEA-Annual-Report.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Renewable energy in Austria**. IEA, Paris, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/austria>. Acesso em: 10 maio 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The future of hydrogen**. IEA, Paris, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>. Acesso em: 10 maio 2023.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Capacity Statistics. **The International Renewable Energy Agency Publications**, Abu Dhabi, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2022/Apr/Renewable-Capacity-Statistics-2022>. Acesso em: 28 set. 2023.

KEMFERT, C. Germany must go back to its low-carbon future. **Nature**, Londres, v. 549, p. 26–27, set. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/549026a>. Acesso em: 10 maio 2024.

KÖCHE, J. C. **Fundamentos de Metodologia Científica**: teoria da ciência e iniciação à pesquisa. Petrópolis: Editora Vozes, 2011.

KOMENDANTOVA, N.; NEUMUELLER, S.; NKOANA, E. Public attitudes, co production and polycentric governance in energy policy. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 153, p. 112241, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112241>. Acesso em: 10 maio 2024.

KUMAR, A. *et al.* Drivers of renewable energy deployment in the EU: An analysis of past trends and projections. **Energy Strategy Reviews**, Amsterdã, v. 26, p. 100402, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100402>. Acesso em: 10 maio 2024.

LANGER, K. *et al.* Factors influencing citizens' acceptance and nonacceptance of wind energy in Germany. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 175, p. 133–144, fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.221>. Acesso em: 10 maio 2024.

LAZARO, L.L.B. *et al.* Energy transition in Brazil: Is there a role for multilevel governance in a centralized energy regime? **Energy Research and Social Science**, Amsterdã, v. 85, p. 102404, mar. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102404>. Acesso em: 10 maio 2024.

LEE, J.; ZHAO, F. Global Wind Report 2022. **Global Wind Energy Council**, Brussels, abr. 2022. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>. Acesso em: 28 set. 2023.

LEIREN, M.D.; REIMER, I. Historical institutionalist perspective on the shift from feed-in tariffs towards auctioning in German renewable energy policy. **Energy Research and Social Science**, Amsterdã, v. 43, p. 33–40, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.05.022>. Acesso em: 10 maio 2024.

LI, L. *et al.* Review and outlook on the international renewable energy development. **Energy and Built Environment**, Amsterdã, v. 3, n. 2, p. 139–157, abri. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2020.12.002>. Acesso em: 10 maio 2024.

LIAO, J. *et al.* Interfacial charge transfer induced dual-active-sites of heterostructured Cu_{0.8}Ni_{0.2}WO₄ nanoparticles in ammonia borane methanolysis for fast hydrogen production. **Applied Catalysis B: Environmental**, Amsterdã, v. 320, p. 121973, jan. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2022.121973>. Acesso em: 10 maio 2024.

LIEBICH, A. *et al.* Detailed analyses of the system comparison of storable energy carriers from renewable energies—Final report. **Federal Environment Agency**, Dessau-Roßlau, 2021a. Disponível em: https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=reportnumber%3A%22UBA-FB-000263/ANH%22. Acesso em: 10 maio 2024.

LIEBICH, A. *et al.* Detailed analyses of the system comparison of storable energy carriers from renewable energies—Annex. **Federal Environment Agency**, Dessau Roßlau, 2021b. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35248.69126>. Acesso em: 10 maio 2024.

LIECHTENSTEINISCHE KRAFTWERKE. Jahresbericht 2022. **LKW**, Schaan, 2023. Disponível em: <https://www.lkw.li>. Acesso em: 23 jun. 2025.

MACEDO, M.S.; SORIA, M.A.; MADEIRA, L. M. Process intensification for hydrogen production through glycerol steam reforming. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 146, p. 111151, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111151>. Acesso em: 10 maio 2024.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Mudança do clima 2023: Relatório síntese**. Brasília, 2023. Painel Intergovernamental Sobre Mudança do Clima. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o->

mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 23 jan. 2025.

MORADI, R.; GROTH, K.M. Hydrogen storage and delivery: Review of the state of the art technologies and risk and reliability analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, v. 44, p. 12254–12269, maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.041>. Acesso em: 10 maio 2024.

MUHAMMED, G.; TEKBIYIK-ERSOY, N. Development of renewable energy in China, USA, and Brazil: a comparative study on renewable energy policies. **Sustainability**, Basel, v. 12, n. 21, p. 9136, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su12219136>. Acesso em: 10 maio 2024.

NAGL, S. *et al.* Energy policy scenarios to reach challenging climate protection targets in the German electricity sector until 2050. **Utilities Policy**, Amsterdã, v. 19, n. 3, p. 185–192, set. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2011.05.001>. Acesso em: 10 maio 2024.

OLIVEIRA, R.C. Panorama do hidrogênio no Brasil. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, Brasília, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Capacidade Instalada: Histórico da Operação**. Rio de Janeiro:, 2025. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/capacidade_instalada.aspx. Acesso em: 22 jun. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Acordo de Paris sobre Mudança do Clima**. Nações Unidas Brasil: Brasília, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/88191-acordo-de-paris-sobre-o-clima>. Acesso em: 10 maio 2024.

ÖSTERREICHISCHE STUDIENGESELLSCHAFT FÜR REGELUNGSTECHNIK. **Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Ökostromgesetz 2012**. RIS, Berlin, 2025. Disponível em: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007386>. Acesso em: 10 maio 2024.

ÖSTERREICHISCHER BIOMASSEVERBAND. **Bioenergy policies and potentials: Austrian Biomass Association**. ÖBMV, Vienna, 2023. Disponível em: <https://www.biomasseverband.at/>. Acesso em: 10 maio 2024.

PATA, U. K.; ERTUGRUL, H. M. Do the Kyoto Protocol, geopolitical risks, human capital and natural resources affect the sustainability limit? A new environmental approach based on the LCC hypothesis. **Resources Policy**, Amsterdã, v. 81, p. 103352, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103352>. Acesso em: 10 maio 2024.

PELINKA, A. The nuclear power referendum in Austria. **Electoral Studies**, Amsterdã, v. 2, n. 3, p. 253–261, dec. 1983. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0261-3794\(83\)80032-8](https://doi.org/10.1016/S0261-3794(83)80032-8). Acesso em: 10 maio 2024.

PENNA, C. G. **O estado do planeta: sociedade de consumo e degradação ambiental**. Rio de Janeiro: Record, 1999. 287 p.

PEREIRA, E.B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar 2017**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017, p. 80. Disponível em: <https://doi.org/10.34024/978851700089>. Acesso em: 10 maio 2024.

PFOSE, S.; SCHAUER, O.; COSTA, Y. Acceptance of LNG as an alternative fuel: determinants and policy implications. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 120, p. 259–267, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.046>. Acesso em: 10 maio 2024.

POVACZ, L.; BHANDARI, R. Analysis of the levelized cost of renewable hydrogen in Austria. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 5, p. 4575, mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15054575>. Acesso em: 10 maio 2024.

PROSKURYAKOVA, L. Updating energy security and environmental policy: energy security theories revisited. **Journal of Environmental Management**, Amsterdã, v. 223, p. 203–214, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.016>. Acesso em: 10 maio 2024.

REINDL, R.; EGGER, K.; FITZKA. Der wasserwirtschaftliche rah-menplan tiroler oberland. **WasserWirtschaft**, n. 7–8, p. 69–74, 2017. Disponível em: https://neu.freiland.at/wp-content/uploads/2021/02/2017_0908_WaWi_2017_07-08_FA_10_Reindl.pdf. Acesso em: 30 maio 2024.

REN, X. *et al.* Challenges towards hydrogen economy in China. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, v. 45, n. 59, p. 34326–34345, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.163>. Acesso em: 10 maio 2024.

RIGO, P. D. *et al.* Is the success of small-scale photovoltaic solar energy generation achievable in Brazil? **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 240, p. 118243, dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118243>. Acesso em: 10 maio 2024.

RUHNAU, O. *et al.* Direct or indirect electrification? A review of heat generation and road transport decarbonisation scenarios for Germany 2050. **Energy**, Amsterdã, v. 166, p. 989–999, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.114>. Acesso em: 10 maio 2024.

SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Amazonas PERH/AM. Manaus: SEMA, 2019. Disponível em: <https://www.sema.am.gov.br/plano-estadual-de-recurso-hidricos-perh/>. Acesso em: 7 out. 2023.

SILVA, G. H. R. *et al.* Renewable energy potentials and roadmap in Brazil, Austria, and Germany. **Energies**, Basel, v. 17, n. 6, p. 1482, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17061482>. Acesso em: 10 maio 2024.

SILVA, G.D.P. *et al.* Environmental licensing and energy policy regulating utility-scale solar photovoltaic installations in Brazil: Status and future perspectives. **Impact Assessment and Project Appraisal**, Abingdon, v. 37, n. 6, p. 503–515, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14615517.2019.1595933>. Acesso em: 10 maio 2024.

SILVA, G.H.R. **Análise da cadeia produtiva do hidrogênio verde**: potencial de produção sustentável utilizando biorefinarias. 2024. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2023. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/253324>. Acesso em: 30 maio 2024.

SILVA, G.H.R. *et al.* Analysis of the sugarcane biomass use to produce green hydrogen: Brazilian case study. **Applied Sciences**, Basel, v. 15, p. 1675, fev. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app15031675>. Acesso em: 6 fev. 2025.

SILVA, G.H.R. *et al.* Renewable energy perspectives: Brazilian case study on green hydrogen production[J]. **AIMS Energy**, Research Triangle Park, v. 13, n. 2, p. 449–470, abr. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3934/energy.2025017>. Acesso em: 18 abr. 2025.

SIQUEIRA, A.M.Q.; BERMANN, C. Fundamentos do planejamento energético centralizado e do descentralizado. **Revista Brasileira de Energia**, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 33–44, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.47168/rbe.v26i1.561>. Acesso em: 10 maio 2024.

STATISTIK AUSTRIA. **Energy balances**. Statistik Austria, Vienna, 2023. Disponível em: <https://www.statistik.at/en/statistics/energy-and-environment/energy/energy-balances>. Acesso em: 10 maio 2024.

STRUNZ, S. The German energy transition as a regime shift. **Ecological Economics**, Amsterdã, v. 100, p. 150–158, abri. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.01.019>. Acesso em: 10 maio 2024.

SWISS FEDERAL OFFICE OF ENERGY. **Energiestrategie 2050**. Bundesamt für Energie, ttigen, 2018. Disponível em: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html/>. Acesso em: 10 maio 2024.

SWISS FEDERAL OFFICE OF ENERGY. **Herkunftsnachweis für Elektrizität und Stromkennzeichnung**. [S.n.], [S.l.], 2016. Disponível em: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/stromversorgung/herkunftsnachweisfue-relektrizitaet-und-stromkennzeichnung.html>. Acesso em: 10 maio 2024.

THE GLOBAL ECONOMY. **Liechtenstein**: share of clean energy. [S.n.], [S.l.], 2022. Disponível em:

https://www.theglobaleconomy.com/Liechtenstein/Share_of_clean_energy/. Acesso em: 22 jan. 2025.

TOLMASQUIM, M. The energy sector in Brazil: policy and perspectives. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, n. 76, p. 249–260, abr. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100017>. Acesso em: 10 maio 2024.

TOLMASQUIM, M.T. *et al.* Electricity market design and renewable energy auctions: the case of Brazil. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 158, p. 112558, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112558>. Acesso em: 10 maio 2024.

TRATTNER, A.; KLELL, M.; RADNER, F. Sustainable hydrogen society e Vision, findings and development of a hydrogen economy using the example of Austria. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, v. 47, n. 4, p. 2059–2079, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.166>. Acesso em: 10 maio 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Intended Nationally Determined Contribution**. UNFCCC, Brasília, 2015. Disponível em: <http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/PublishedDocuments/Brazil/1/BRAZILINDCenglishFINAL.pdf>. Acesso em: 10 maio 2024.

VILBERGSSON, K.V. *et al.* Can remote green hydrogen production play a key role in decarbonizing Europe in the future? A cradle-to-gate LCA of hydrogen production in. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, v. 48, n. 46, p. 177711–177728, maio 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.081>. Acesso em: 10 maio 2024.

VINHOZA, A.; SCHAEFFER, R. Brazil' s offshore wind energy potential assessment based on a Spatial Multi-Criteria Decision Analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 146, p. 111185, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111185>. Acesso em: 10 maio 2024.

WANG, Y. *et al.* Electrocatalytic water splitting over perovskite oxide catalysts. **Chinese Journal of Catalysis**, Hong Kong, v. 50, p. 109–125, jul. 2023. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(23\)64452-3](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(23)64452-3). Acesso em: 10 maio 2024.

WEHRLE, S.; GRUBER, K.; SCHMIDT, J. The cost of undisturbed landscapes. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 159, p. 112617, dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112617>. Acesso em: 10 maio 2024.

XAVIER, M.E.R.; KERR, A.S. A análise do efeito estufa em textos para-didáticos e periódicos jornalísticos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 3, p. 325–349, jan. 2004. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6423>. Acesso em: 10 maio 2024.

YAN, L. *et al.* Modulation of Charge Redistribution in heterogeneous NiO-Ni₃Se₄ nanosheet arrays for advanced water electrolysis. **Advanced Functional Materials**,

Weinheim, v. 34, p. 2308345, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/adfm.202308345>. Acesso em: 10 maio 2024.

ZAFAR, M.W. *et al.* Foreign direct investment and education as determinants of environmental quality: the importance of post Paris Agreement (COP21). **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 270, p. 110827, set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110827>. Acesso em: 10 maio 2024.

ZHONG, M.; BAZILIAN, M. D. Contours of the energy transition: investment by international oil and gas companies in renewable energy. **The Electricity Journal**, Amsterdã, v. 31, n. 1, p. 82–91, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2018.01.001>. Acesso em: 10 maio 2024.

ZIVAR, D.; KUMAR, S.; FOROOZESH, J. Underground hydrogen storage: A comprehensive review. **International Journal of Hydrogen Energy**, Amsterdã, v. 46, p. 23436–23462, jul. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.138>. Acesso em: 10 maio 2024.

PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS E PUBLICAÇÕES DERIVADAS DA PESQUISA

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

1. **SILVA, G.H.R.**; NASCIMENTO, A. Desafios e projeções de energias renováveis: análise de crescimento no Brasil, Áustria e Alemanha, apresentado em Poços de Caldas – Minas Gerais, em out. de 2024, durante o **21º Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas**. Anais do evento: <https://meioambientepocos.com.br/anais/Anais2024/Desafios%20E%20Proje%C3%A7%C3%B5es%20De%20Energias%20Renov%C3%A1veis%20An%C3%A1lise%20De%20Crescimento%20No%20Brasil,%20%C3%A1ustria%20E%20Alemanha.pdf>
2. BAUM, C.D.; NASCIMENTO, A.; **SILVA, G.H.R.** *Energy Policies in Brazil and Europe (Germany/Austria): A Comparative Study on Energy Shortage, Renewable Energies, and Hydrogen*, apresentado virtualmente em jul. de 2024, durante o **1º Congresso Brasileiro de Pesquisa, Inovação Tecnológica e Práticas Pedagógicas**. Anais do evento: [https://www.even3.com.br/anais/i-cobpi-congresso-brasileiro-de-pesquisa-inovacao-tecnologica-e-praticas-e-pedagogicas-414734/865470-energy-policies-in-brazil-and-europe-\(germany-austria\)--a-comparative-study-on-energy-shortage-renewable-energie](https://www.even3.com.br/anais/i-cobpi-congresso-brasileiro-de-pesquisa-inovacao-tecnologica-e-praticas-e-pedagogicas-414734/865470-energy-policies-in-brazil-and-europe-(germany-austria)--a-comparative-study-on-energy-shortage-renewable-energie)
3. **SILVA, G.H.R.**; NASCIMENTO, A.; NASCIMENTO, N. Análise comparativa do cenário de produção de energia renovável entre Brasil, Áustria e Alemanha, apresentado em Aracajú – Sergipe, em abr. de 2024, durante o **V Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (V Conepetro)**. Anais do evento: <https://www.even3.com.br/anais/vconepectro/795331-analise-comparativa-do-cenario-de-producao-de-energia-renovavel-entre-brasil-austria-e-alemanha>
4. **SILVA, G.H.R.**; NASCIMENTO, A. A worldline perspective on hydrogen production research, apresentado em Campos do Jordão – São Paulo, em nov. 2023, durante o **XLIV Congresso brasileiro de aplicações de vácuo na indústria e ciência (CBrAVIC)**.
5. **SILVA, G.H.R.**; NASCIMENTO, A. Bibliometria de Políticas Energéticas: escassez de energia, renováveis e hidrogênio (Brasil, Áustria e Alemanha), apresentado em Guaratinguetá – São Paulo, em out. de 2023, durante o **VII**

Workshop da Pós-Graduação em Engenharia. Anais do evento:
<https://www.feg.unesp.br/#!/eventos/vii-workshop-de-engenharia/anais-do-evento/>

Resumos em anais de Congresso

1. **SILVA, G.H.R.**; NASCIMENTO, A.; MATHIAS, M.H. Análise das políticas e perspectivas no contexto atual da transição energética: uma abordagem técnico-científica e comparativa abrangendo Brasil, Alemanha, Áustria e Liechtenstein, apresentado em Guaratinguetá – São Paulo, em out. de 2024, durante o **VIII Workshop da Pós-Graduação em Engenharia**. Anais do evento: <https://www.feg.unesp.br/Home/Eventos/viiiworkshopdeengenharia/anais-do-viii-workshop-da-pos-graduacao-em-engenharia---isbn.pdf>
2. **SILVA, G.H.R.**; NASCIMENTO, A.; NASCIMENTO, N. *Analysis of the sugarcane biomass use to produce green hydrogen: Brazilian case study*, apresentado em Marseille – França, em jun. de 2024, durante o **32nd European Biomass Conference & Exhibition**. Anais do evento: <https://programme.eubce.com/abstract.php?idabs=20875&idses=1632&idtopic=10>
3. BAUM, C.D.; **SILVA, G.H.R.**; NASCIMENTO, A. Brazil and Europe (Germany/Austria) Comparative Policies in Dealing with Energy Shortage, Renewable Energies, and Hydrogen, apresentado em formato virtual em jun. de 2024, durante o **6th International Conference on Academic Research in Science, Technology and Engineering (VI ICASTE)**. Anais do evento: <https://www.dpublication.com/proceeding/6th-icarste/#Table-of-Contents>

Artigos completos publicados em periódicos

1. **DA SILVA, G.H.R.**; Nascimento A.; Baum C.D.; Mathias M.H. Renewable Energy Potentials and Roadmap in Brazil, Austria, and Germany. **Energies**, v. 17, n. 6, p. 1482, mar. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17061482> (Qualis Eng. III: A2; Scopus: 82%)
2. **ROMEU DA SILVA, G.H.**; Nascimento, A.; Nascimento, D.; Hunt, J.D.; Mathias, M.H. Analysis of the Sugarcane Biomass Use to Produce Green Hydrogen: Brazilian Case Study. **Applied Sciences-Basel**, v. 15, p. 1675, fev. 2025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app15031675> (Qualis Eng. III: A3; Scopus: 79%)