



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E  
SUSTENTABILIDADE**

**POSSÍVEIS IMPACTOS DA INSERÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO VETOR  
ENERGÉTICO, COM ÊNFASE NAS MATRIZES ENERGÉTICAS  
DE BRASIL E PARAGUAI**

**MARCELO MIGUEL**

Foz do Iguaçu - PR  
2025

**POSSÍVEIS IMPACTOS DA INSERÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO VETOR  
ENERGÉTICO, COM ÊNFASE NAS MATRIZES ENERGÉTICAS  
DE BRASIL E PARAGUAI**

**MARCELO MIGUEL**

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade

Orientadora: Profa. Dra. Janine Padilha Botton  
Coorientadora: Profa. Dra. Kátya Regina de Freitas

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Arturo Riveros Godoy

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação  
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - CENTRAL

M636

Miguel, Marcelo.

Possíveis impactos da inserção do hidrogênio como vetor energético, com ênfase nas matrizes energéticas de Brasil e Paraguai / Marcelo Miguel. - Foz do Iguaçu, 2025.

107 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Fox do Iguaçu-PR, 2025.

Orientadora: Janine Padilha Botton.

Coorientadora: Katya Regina de Freitas.

1. Hidrogênio. 2. Energia - Sustentabilidade. 3. Energia - Matrizes energéticas. 4. Energia - Planejamento. 5. Energia - Regulação. 6. Energia - Legislação. I. Botton, Janine Padilha. II. Freitas, Katya Regina de. III. Título.  
CDU 502.174.3(81+892)

# POSSÍVEIS IMPACTOS DA INSERÇÃO DO HIDROGÊNIO COMO VETOR ENERGÉTICO, COM ÊNFASE NAS MATRIZES ENERGÉTICAS DE BRASIL E PARAGUAI

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

**BANCA EXAMINADORA**



Documento assinado digitalmente

**JANINE PADILHA BOTTON**

Data: 15/01/2026 15:58:01-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientadora: Profa. Dra. Janine Padilha Botton

UNILA



Documento assinado digitalmente

**KATYA REGINA DE FREITAS ZARA**

Data: 02/02/2026 11:33:09-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Coorientadora: Profa. Dra. Katya Regina de Freitas

UNILA

---

Prof. Dr. Gustavo Arturo Riveros

PTI - PY



Documento assinado digitalmente

**GILSON BATISTA DE OLIVEIRA**

Data: 02/02/2026 11:11:22-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Gilson Batista de Oliveira

UNILA



Documento assinado digitalmente

**EDUARDO CESAR DECHECHI**

Data: 16/01/2026 14:52:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Eduardo Dechechi

UNIOESTE

---

Prof. Dr. Michel Osvaldo Galeano

UNA - PY



Documento assinado digitalmente

**JOHAN ALEXANDER CORTES SUAREZ**

Data: 22/01/2026 16:52:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Prof. Dr. Johan Alexander Cortes Suarez

UNILA

Foz do Iguaçu, 2 de julho de 2025.

Este trabalho é dedicado a toda minha família pela compreensão, apoio e incentivo durante todo o seu desenvolvimento.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar força e inspiração para a realização deste trabalho.

Em especial, agradeço à Professora Dra. Janine Padilha Botton, pela honra de sua orientação e pela atenção dispensada durante todo o desenvolvimento deste trabalho e à professora Dra. Kátya Regina de Freitas pela coorientação fundamental para esta tese.

Aos professores ilustres componentes da banca: Prof. Prof. Dr. Gustavo Arturo Riveros, Prof. Dr. Gilson Batista de Oliveira, Dr. Eduardo Dechechi, Prof. Dr. Michel Osvaldo Galeano e Prof. Dr. Ricardo José Ferracin, pela honra de tê-los na banca.

Ao professor Dr. Ricardo Morel Hartmann e ao professor Dr. Jorge Ledesma pelos estágios supervisionados.

Aos professores Leonardo Da Silva Arrieche, Gustavo Adolfo Ronceros Rivas, Maria Das Gracias Cleophas Porto, Andreia Cristina Furtado, Caroline Da Costa Silva Goncalves, Marciana Pierina Uliana Machado, Michel Rodrigo Zambrano Passarini e Marcelo Nepomoceno Kapp pelas disciplinas ministradas.

Aos colegas José Navas, Andréia Cruz, Luiz Zubeldia, Juliana Gaio Somer, Carina Bonavigo Jakubiu, Glenda Rodrigues de Souza Gaio, Felipe Gustavo Dinca, Denis Porfirio Viveros Rodas, Jhon Steven Navarro Hoyos e Itamar Pena Nieradka pela colaboração nos trabalhos em grupo das disciplinas do programa.

Aos professores e à secretaria da Universidade Federal da Integração Latino- Americana (UNILA), pela dedicação e atenção que demonstraram durante todas as etapas deste curso.

Ao Programa de Pós-graduação em Energia e Sustentabilidade (PPGIES), por oferecer o curso de Doutorado em Energia e Sustentabilidade.

À entidade Itaipu Binacional e a seu corpo gerencial, por acreditarem e ajudarem a viabilizar este projeto até a minha aposentadoria.

À Ponte Nova Energia que me acolheu após me aposentar, pelo apoio à continuidade deste doutorado.

A todas as empresas, instituições de ensino e pessoas citadas neste trabalho, pela disponibilização dos dados de referência necessários.

*A água, decomposta em seus elementos primitivos – e decomposta, decerto, pela eletricidade, que então se tornará uma força poderosa e controlável. (...) Sim, meus amigos, creio que a água venha a ser um dia empregada como combustível, que o hidrogênio e o oxigênio que a constituem, usados em conjunto ou separadamente, proporcionam uma fonte inexaurível de calor e luz, cuja intensidade é superior à do carvão. (...) A água será o carvão do futuro.*

Júlio Verne

MIGUEL, Marcelo. Possíveis impactos da inserção do hidrogênio como vetor energético, com ênfase nas matrizes energéticas de Brasil e Paraguai. 2025. 104f. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) – UNILA, Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu.

## RESUMO

A necessidade de uma transição energética em busca da descarbonização das economias globais tem impulsionado a busca por fontes de energias mais limpas e sustentáveis. Nessa busca está incluído o uso eficiente das energias renováveis que apresentam limitações de continuidade de geração por serem intermitentes. Neste contexto entra o hidrogênio que é uma forma possível de armazenamento de energia atuando como vetor energético com elevado potencial de complementação das fontes intermitentes de energia. Portanto, esta tese tem como foco a avaliação das matrizes energéticas do Brasil e do Paraguai, analisando suas semelhanças e diversidades bem como os desafios e as oportunidades para a inserção do hidrogênio como uma estratégia de alternativa energética, considerando aspectos técnicos, regulatórios, econômicos e ambientais. A metodologia adotada é de caráter exploratório e interdisciplinar, englobando levantamento bibliográfico, análise dos balanços energéticos nacionais, identificação de leis, políticas e regulamentações específicas para o hidrogênio, além da aplicação das ferramentas analíticas SWOT e Pestel. Na busca de documentos oficiais com dados energéticos dos dois países, foi possível uma análise e constatação que as matrizes energéticas possuem uma dependência significativa dos combustíveis fósseis, principalmente pelo uso no setor de transportes, que representa a maior parcela das emissões de gases de efeito estufa nos países. Os resultados indicam que o Brasil e o Paraguai possuem condições técnicas e institucionais favoráveis para o desenvolvimento da economia do hidrogênio, embora enfrentem desafios regulatórios e de coordenação intersetorial. A produção de hidrogênio por meio de fontes renováveis, sobretudo a hidrelétrica, pode gerar ganhos significativos de eficiência, otimizar a operação dos sistemas elétricos e ampliar o tempo disponível para o planejamento de expansão da infraestrutura energética. Porém, o uso do excedente de energia de cada país precisa ser avaliado técnica e politicamente, tendo em vista que parte dela é exportada, principalmente pelo Paraguai. Assim, conclui-se que a inclusão estratégica do hidrogênio nas matrizes energéticas do Brasil e do Paraguai não apenas contribui para a transição energética com menor emissão de carbono, como também oferece benefícios econômicos, técnicos e ambientais de longo prazo, considerando-se como uma solução viável e necessária para as suas sustentabilidades energéticas.

**Palavras-chave:** hidrogênio; sustentabilidade; matrizes energéticas; planejamento energético; regulação; legislação.

MIGUEL, Marcelo. Posibles impactos de la inserción del hidrógeno como vector energético, con énfasis en las matrices energéticas de Brasil y Paraguay. 2025. 104f. Licenciatura (Doctorado en Energía y Sostenibilidad) – UNILA, Universidad Federal para la Integración Latinoamericana. Foz de Iguazú.

## RESUMEN

La necesidad de una transición energética para descarbonizar las economías globales ha impulsado la búsqueda de fuentes de energía más limpias y sostenibles. Esta búsqueda incluye el uso eficiente de las energías renovables, cuya continuidad de generación es limitada debido a su intermitencia. El hidrógeno es una forma potencial de almacenamiento de energía, actuando como un vector energético con un potencial significativo para complementar las fuentes de energía intermitentes. Por lo tanto, esta tesis se centra en la evaluación de las matrices energéticas de Brasil y Paraguay, analizando sus similitudes y diferencias, así como los desafíos y oportunidades para incorporar el hidrógeno como una estrategia energética alternativa, considerando aspectos técnicos, regulatorios, económicos y ambientales. La metodología adoptada es exploratoria e interdisciplinaria, abarcando una revisión bibliográfica, el análisis de los balances energéticos nacionales, la identificación de leyes, políticas y regulaciones específicas para el hidrógeno, y la aplicación de las herramientas analíticas SWOT y Pestel. Mediante la búsqueda de documentos oficiales con datos energéticos de ambos países, fue posible analizar y confirmar que sus matrices energéticas dependen significativamente de los combustibles fósiles, principalmente debido a su uso en el sector del transporte, que representa la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero en los países. Los resultados indican que Brasil y Paraguay cuentan con condiciones técnicas e institucionales favorables para el desarrollo de la economía del hidrógeno, si bien enfrentan desafíos regulatorios y de coordinación intersectorial. La producción de hidrógeno mediante fuentes renovables, especialmente la hidroeléctrica, puede generar importantes mejoras de eficiencia, optimizar la operación de los sistemas eléctricos y aumentar el tiempo disponible para planificar la expansión de la infraestructura energética. Sin embargo, el uso del excedente energético de cada país debe evaluarse técnica y políticamente, considerando que parte de este se exporta, principalmente por Paraguay. Por lo tanto, se concluye que la inclusión estratégica del hidrógeno en las matrices energéticas de Brasil y Paraguay no solo contribuye a la transición energética con menores emisiones de carbono, sino que también ofrece beneficios económicos, técnicos y ambientales a largo plazo, considerándola una solución viable y necesaria para su sostenibilidad energética.

**Palabras clave:** hidrógeno; matrices energéticas; sostenibilidad; planificación energética; regulación; legislación.

MIGUEL, Marcelo. Possible impacts of the insertion of hydrogen as an energy vector, with emphasis on the energy matrices of Brazil and Paraguay. 2025. 104f. Degree (PhD in Energy and Sustainability) – UNILA, Federal University of Latin American Integration. Foz do Iguaçu, 2025.

## ABSTRACT

The need for an energy transition to decarbonize global economies has driven the search for cleaner and more sustainable energy sources. This search includes the efficient use of renewable energy sources, which have limited generation continuity due to their intermittent nature. Hydrogen is a potential form of energy storage, acting as an energy carrier with significant potential to complement intermittent energy sources. Therefore, this thesis focuses on evaluating the energy matrices of Brazil and Paraguay, analyzing their similarities and differences, as well as the challenges and opportunities for incorporating hydrogen as an alternative energy strategy, considering technical, regulatory, economic, and environmental aspects. The methodology adopted is exploratory and interdisciplinary, encompassing a bibliographic survey, analysis of national energy balances, identification of specific laws, policies, and regulations for hydrogen, and the application of the SWOT and Pestel analytical tools. By searching for official documents with energy data from both countries, it was possible to analyze and confirm that their energy matrices are significantly dependent on fossil fuels, primarily due to their use in the transportation sector, which accounts for the largest share of greenhouse gas emissions in the countries. The results indicate that Brazil and Paraguay have favorable technical and institutional conditions for the development of the hydrogen economy, although they face regulatory and intersectoral coordination challenges. Hydrogen production through renewable sources, especially hydroelectric power, can generate significant efficiency gains, optimize the operation of electrical systems, and increase the time available for planning energy infrastructure expansion. However, the use of each country's surplus energy needs to be evaluated technically and politically, considering that part of it is exported, mainly by Paraguay. Thus, it is concluded that the strategic inclusion of hydrogen in the energy matrices of Brazil and Paraguay not only contributes to the energy transition with lower carbon emissions but also offers long-term economic, technical, and environmental benefits, considering it a viable and necessary solution for their energy sustainability.

**Keywords:** hydrogen; energy matrices; sustainability; energy planning; regulation; legislation.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Fontes de energia .....	25
<b>Figura 2</b> – Processos de produção de hidrogênio .....	27
<b>Figura 3</b> – Ondas da transição energética global .....	30
<b>Figura 4</b> – Os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável .....	37
<b>Figura 5</b> – Consumo de energia (kWh) per capita no Brasil e Paraguai entre os anos de 2012 até 2021 .....	58
<b>Figura 6</b> – Oferta interna de energia no Brasil no ano de 2024.....	60
<b>Figura 7</b> – Consumo de energia por setor no Brasil no ano de 2023, valores em 10 <sup>3</sup> tep. 61	
<b>Figura 8</b> – Gráfico de Pareto para o custo da energia no Brasil em R\$/MWh .....	63
<b>Figura 9</b> – Composição da energia primária do Paraguai com base no balanço energético de 2023.....	64
<b>Figura 10</b> – Matriz Energética do Paraguai.....	65
<b>Figura 11</b> – Linha do tempo com a regulação brasileira em 2024.....	72
<b>Figura 12</b> – Principais projetos anunciados para o Brasil .....	72
<b>Figura 13</b> – Curva de demandas diárias do sistema elétrico interligado .....	88
<b>Figura 14</b> – Curva de demandas diárias do sistema elétrico interligado .....	89
<b>Figura 15</b> – Crescimento da demanda nos cenários de crescimento econômico .....	91

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Objetivos específicos das estratégias de alguns países em relação à transição energética.....	43
<b>Quadro 2</b> – Órgão regulatório e sua atuação nos EUA, dentro da cadeia do hidrogênio ....	43
<b>Quadro 3</b> – Atividades regulatórias para o hidrogênio nos Estados Unidos para produção, armazenamento e transporte .....	45
<b>Quadro 4</b> – Atividades regulatórias nos Estados Unidos para uso final do hidrogênio .....	46
<b>Quadro 5</b> – Predefinição para a análise SWOT.....	49
<b>Quadro 6</b> – Modelo/predefinição para análise PESTEL .....	51
<b>Quadro 7</b> – Fatores da análise PESTEL em relação às tecnologias de hidrogênio.....	52
<b>Quadro 8</b> – Balanço energético brasileiro consolidado com a oferta total de fontes de energia primária para o ano de 2023 .....	59
<b>Quadro 9</b> – Potencial de hidrogênio na América Latina .....	69

<b>Quadro 10</b> – Órgãos regulatórios para a cadeia do hidrogênio nos EUA, Brasil e Paraguai .....	78
<b>Quadro 11</b> – Análise SWOT para o cenário Brasil .....	82
<b>Quadro 12</b> – Análise SWOT para o cenário Paraguai.....	83
<b>Quadro 13</b> – Análise PESTEL para o cenário do Brasil e do Paraguai.....	86
<b>Quadro 14</b> – Informações do boletim diário da operação de 17 de abril de 2025 .....	89
<b>Quadro 15</b> – Detalhe da exportação de eletricidade pelo Paraguai segundo a fonte e destino .....	90
<b>Quadro 16</b> – Projeção da demanda energética brasileira.....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABH <sub>2</sub>	Associação Brasileira do Hidrogênio
ABIHV	Associação Brasileira da Indústria do Hidrogênio Verde
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEN	Agenda Nacional de Energia
AMN	<i>Asociación Mercosur de Normalización</i>
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ANDE	<i>Administración Nacional de Electricidad</i>
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANNP	<i>Administración Nacional de Navegación y Puertos</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
APE	Potência Instalada dos Autoprodutores de Energia
BEN (BR)	Balanço Energético Brasileiro
BEN (PY)	<i>Balance Energético Paraguay</i>
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BSEE	<i>Bureau of Safety and Environmental Enforcement</i>
CADE	Conselho Administrativo de Defesa Econômica
CB	Comitês Brasileiros
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCS	Captura e armazenamento de carbono
CEE	Comissões de Estudo Especiais
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CONACYT	<i>Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología</i>
COPANT	<i>Comisión Panamericana de Normas Técnicas</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COP 21	21 <sup>a</sup> Conferência das Partes
COP 28	28 <sup>a</sup> Conferência das Partes
CTN	Comitê Técnico de Normalização
DINAC	Dirección Nacional de Aeronáutica Civil
DIPA	<i>Dirección Nacional de Protección Ambiental</i>
DNH	<i>Dirección Nacional de Hidrocarburos</i>

DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNSIT	<i>Dirección Nacional de la Seguridad de la Infraestructura del Transporte</i>
DOE	<i>United States Department of Energy</i>
DNV	<i>Dirección Nacional de Vialidad</i>
DSM	<i>Demand Side Management</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FAA	<i>Federal Aviation Administration</i>
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FMCSA	<i>Federal Motor Carrier Safety Administration</i>
FTC	<i>Federal Trade Commission</i>
GLD	Gerenciamento pelo Lado da Demanda
GLO	Gerenciamento pelo Lado da Oferta
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> V	Hidrogênio Verde
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Committee</i>
IEC/TC	<i>International Electrotechnical Commission/Technical Committee</i>
IEC/TS	<i>International Electrotechnical Commission/Technical Specification</i>
IEV	Vocabulário Eletrotécnico Internacional
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
INFONA	<i>Instituto Forestal Nacional</i>
INTN	<i>Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología</i>
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IRENA	Agência Internacional de Energia Renovável
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISO/TC	Organização Internacional de Normalização/Comitê Técnico
ISO/TR	Organização Internacional de Normalização/Relatório Técnico
kT	Quilotonelada
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt hora
LCFS	<i>California Low Carbon Fuel Standard</i>

MADES	<i>Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible</i>
MCTIC	Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comércio
ME	Ministério da Economia
MEC	Ministério da Educação
MERCOSUL	Mercado Comum do Sul
MJT	<i>Ministerio de Justicia y Trabajo</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
MME	Ministério de Minas e Energia
MOPC	<i>Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones</i>
MRE	Ministério das Relações Exteriores
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
tep	Toneladas equivalentes de petróleo
NBR	Norma Brasileira
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
NOS	Operador Nacional do Sistema
NUPHI	Núcleo de Pesquisas em Hidrogênio
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OIE	Oferta Interna de Energia
ONN	Organismo Nacional de Normalização
ONS	Organismos de Normalização Setorial
ONU	Organização das Nações Unidas
O <sub>2</sub>	Oxigênio
OSHA	<i>Occupational Safety and Health Administration</i>
PCH	Pequenas centrais hidrelétricas
PEFC	Células de combustível de eletrólito de polímero
PEN	Política Nacional de Energia
PHBC	Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono
PESTEL	Político, Econômico, Social, Tecnológico, Ambiental e Legal.
PHMSA	<i>Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PNA	<i>Proyecto de Norma en Aplicación</i>
PNH <sub>2</sub>	Programa Nacional do Hidrogênio

PTI	Parque Tecnológico de Itaipu
PTIEE	Produção e Transporte Independente de Energia Elétrica
RED	Diretiva de Energias Renováveis da União Europeia
RenovaBio	Programa Nacional de Biocombustíveis
SEDECO	<i>Secretaría Nacional de Defensa al Consumidor y al Usuario</i>
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
SOFC	Células a combustível de óxido sólido
SP	Potência Instalada no Serviço Público
SSM	<i>Supply Side Management</i>
SWOT	Strength, Weakness, Opportunity, Threat
TCU	Tribunal de Contas da União
TWh	Terawatt hora
UNE	União Nacional dos Estudantes
UNFCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
UNILA	Universidade Federal da Integração Latino-Americana
UPE	<i>Universidad Privada del Este</i>
USCG	<i>United States Coast Guard</i>
UTE	Usina termoeétrica
VMME	<i>Viceministerio de Minas y Energía</i>
WEC	<i>World Energy Council</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1 OBJETIVOS .....	21
1.1.1 Objetivo Geral.....	21
1.1.2 Objetivos Específicos.....	21
1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	22
1.2.1 Pergunta De Pesquisa.....	22
1.2.2 Hipótese .....	22
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>24</b>
2.1 FONTES DE ENERGIA.....	24
2.2 MATRIZES ENERGÉTICAS .....	28
2.3 AGÊNCIAS REGULADORAS .....	31
2.3.1 Agência Nacional De Energia Elétrica .....	31
2.3.2 mudanças cli De Electricidad .....	32
2.4 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESCARBONIZAÇÃO .....	33
2.4.1 Acordos Internacionais De Energia .....	34
2.4.2 Mercado Energético: Fontes Renováveis E Hidrogênio.....	41
2.4.3 Legislação .....	42
2.5 ANÁLISE SWOT .....	49
2.6 ANÁLISE PESTEL.....	50
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>54</b>
3.1 ABORDAGEM DO ESTUDO.....	54
3.2 ANÁLISE DAS MATRIZES ENERGÉTICAS.....	54
3.3 POLÍTICAS PÚBLICAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA .....	55
3.4 ANÁLISE DOS DADOS .....	56
3.4.1 Análise Das Políticas Públicas .....	56
3.4.2 Análise Técnica E Econômica.....	56
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
4.1 ANÁLISE DAS MATRIZES ENERGÉTICAS.....	57
4.1.1 Matriz Energética Brasileira.....	58
4.1.2 Matriz Energética Paraguaia .....	64
4.2 POLÍTICAS PÚBLICAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA .....	66

4.3.1 Cenário América Latina .....	68
4.3.2 Cenário Do Hidrogênio No Brasil.....	70
4.3.3 Cenário Do Hidrogênio No Paraguai .....	75
4.4 ANÁLISE DOS CENÁRIOS PARA O HIDROGÊNIO NO BRASIL E PARAGUAI.	78
4.3.1 Análise SWOT Dos Cenários De Brasil E Paraguai.....	79
4.3.2 Análise PESTEL Dos Cenários De Brasil E Paraguai.....	85
4.4 ANÁLISE DAS DEMANDAS ELÉTRICAS PARA O HIDROGÊNIO.....	87
4.4.1 Demanda Elétrica Brasileira.....	87
4.4.2 Demanda Elétrica Paraguaia .....	89
4.4.3 Análise da Projeção Das Demandas Elétricas Futuras De Paraguai E Brasil .....	90
4.4.3.1 Análise Da Demanda Elétrica Futura Do Paraguai .....	91
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>92</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em um mundo cada vez mais preocupado com a sustentabilidade, na área de energia existe a busca pela substituição das fontes não renováveis pelas renováveis. No entanto, além de atender as demandas energéticas existe um esforço em preservar o meio ambiente e a própria existência (Sendich, 2019).

Os primeiros esforços para alternativas energéticas mais eficientes iniciaram, em âmbito mundial, com a crise do petróleo de 1973/1974 (DOE, 2022). Superada a crise do petróleo, veio a crise atual ambiental, devido à emissão de gases de efeito estufa pela queima dos derivados do petróleo, ameaçando a sustentabilidade do planeta. Com isso, cresceu-se as pressões para a transição energética com energias renováveis (IPCC, 2023).

Com o aumento do uso de energias renováveis percebeu-se que muitas vezes existe a disponibilidade da energia, mas para que possa ser utilizada em todos os momentos, tecnologias ligadas à ela precisavam ser desenvolvidas. Isso entra no contexto apresentado por Rifkin (2003), em que enfatiza a necessidade de “repensar” a Terra e a energia precisa ser “descarbonizada”, o que levaria inevitavelmente ao futuro com hidrogênio, por ser isento de carbono, abundante na natureza e possuir alta densidade energética.

Porém, é necessário fazer uma diferenciação entre as fontes de energia e o hidrogênio. Apesar da existência do hidrogênio geológico, onde foi encontrado este gás misturado com metano em poços abaixo de 2.000 m da superfície, sua exploração ainda não ocorre, sendo necessários estudos e tecnologias próprias para isto, então ainda não se considera o hidrogênio como uma fonte de energia, mas sim um energético que viabiliza um maior consumo das fontes renováveis de energia (Lefevre *et al.*, 2024). Portanto, a identificação de nichos de mercado mais significativos, nos quais o hidrogênio pode substituir os combustíveis fósseis e otimizar processos produtivos, tem sido foco de intensos esforços científicos. A crescente preocupação com os impactos ambientais decorrentes da poluição e da exploração indiscriminada dos recursos naturais, evidencia a necessidade de transição para fontes energéticas mais sustentáveis. Diante da constatação de que os recursos disponíveis são finitos e que sua escassez pode gerar consequências ambientais e socioeconômicas significativas, torna-se imprescindível adotar estratégias que atendam à crescente demanda energética da sociedade sem comprometer a sustentabilidade do planeta (Wilkinson, 2020).

Para viabilizar uma transição energética que incorpore o hidrogênio na matriz energética do país, alguns aspectos são importantes: (i) econômico, que significa reduzir os custos de produção e/ou aumentar a receita com a venda adicional dos ganhos de produção; (ii) técnico, que consiste em superar os desafios tecnológicos, promovendo melhoria da eficiência dos sistemas; e o (iii) político, onde a busca pela independência energética é estratégica para os países, tendo em vista que o hidrogênio pode ser produzido de forma local em qualquer região do planeta.

Apesar das vantagens mencionadas, o hidrogênio ainda não possui participação significativa nas matrizes energéticas. Sendo assim, precisa de apoio político, técnico e econômico para ocupar o lugar cabível como energia renovável.

Neste contexto, este trabalho avalia quais são os possíveis impactos do hidrogênio nas matrizes energéticas do Brasil e Paraguai. Com esse objetivo, são necessários esforços para avaliar sua atual situação energética para que se possa otimizar a produção de energia e a operação dos sistemas, atendendo a demanda eletrointensiva necessária para a produção do hidrogênio.

Este estudo busca contribuir com os esforços de promoção da economia do hidrogênio nos países analisados, visando seu uso como um vetor estratégico para o fortalecimento da sustentabilidade e da segurança energética. Também, fomenta um debate mais amplo sobre o tema, contribui com soluções para que os sistemas elétricos possam atender a eletrointensiva produção de hidrogênio, ajuda a direcionar os esforços para a introdução do hidrogênio priorizando os usos com impactos mais significativos.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar os possíveis impactos decorrentes da inserção do hidrogênio como vetor energético nas matrizes energéticas do Brasil e do Paraguai, com vista a contribuir estrategicamente para uma transição energética viável e sustentável ao hidrogênio nesses países.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para atender o objetivo geral, tem-se como objetivos específicos:

- Analisar os balanços energéticos do Brasil e do Paraguai, identificando

sua composição, evolução histórica, fontes predominantes, potencialidades técnicas, econômicas e ambientais para a produção de hidrogênio visando uma transição energética sustentável;

- Avaliar a contribuição do hidrogênio na promoção da sustentabilidade ambiental, investigando sua contribuição para a descarbonização dos setores da economia que mais causam emissões;
- Aplicar a análise SWOT (Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças) para identificar fatores internos e externos que afetam a implementação do hidrogênio como vetor energético em ambos os países;
- Usar a análise PESTEL (Política, Econômica, Sociocultural, Tecnológica, Ecológica e Legal) para contextualizar os fatores macro ambientais que influenciam a viabilidade e a atratividade do hidrogênio no Brasil e no Paraguai;
- Propor soluções para que os sistemas elétricos nacionais possam atender a demanda de futuras plantas eletrointensivas de produção de hidrogênio de forma segura e confiável.
- Apresentar sugestões estruturais baseadas nos resultados.

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

### 1.2.1 Pergunta De Pesquisa

Em que níveis Brasil e Paraguai estão se organizando estrategicamente para se integrar à “economia do hidrogênio”, levando em conta os efeitos da inserção do hidrogênio nas suas matrizes energéticas nacionais e na cooperação binacional?

### 1.2.2 Hipótese

Embora Brasil e Paraguai possuam potencial energético significativo, com destaque para fontes renováveis como a hidrelétrica binacional de Itaipu, ambos os países ainda apresentam níveis incipientes e assimétricos de organização estratégica voltada à economia do hidrogênio. Refletindo em lacunas em políticas públicas, infraestrutura tecnológica e integração binacional coordenada, o que pode comprometer sua inserção competitiva e sustentável.

A formulação dessa hipótese admite a existência de potencial técnico e natural favorável, como o uso de energia hidrelétrica para a produção de hidrogênio de baixa emissão de carbono. Contudo, os indícios indicam desafios estruturais, tais como ausência de marcos regulatórios consolidados, baixa articulação entre atores públicos e privados e a ausência de cooperação efetiva entre os dois países nesse setor. Ademais, existe a possibilidade de explorar as assimetrias existentes entre os países, como a questão da política energética.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE

Este estudo está estruturado em cinco capítulos, organizados de forma a proporcionar uma abordagem sistemática e coerente do tema investigado.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, abordando a relevância e justificativa de estudo do tema de inclusão do hidrogênio para transição energética, nas matrizes energéticas do Brasil e Paraguai. Este capítulo inclui a pergunta de pesquisa e os objetivos geral e específico.

O Capítulo 2 corresponde à revisão bibliográfica, na qual são examinados os principais referenciais teóricos e estudos prévios relacionados ao tema. Essa seção busca fundamentar a pesquisa por meio da análise crítica de conceitos, abordagens e tendências que envolvem a inserção do hidrogênio nas matrizes energéticas.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia adotada para a condução do estudo, incluindo os procedimentos de coleta e análise de dados, a abordagem metodológica escolhida e as justificativas para sua aplicação. Essa seção destaca os critérios utilizados para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e suas respectivas discussões, estabelecendo relações com os referenciais teóricos e analisando as implicações no contexto energético. Nessa seção, são explorados os impactos da economia do hidrogênio e suas perspectivas futuras, considerando os desafios e oportunidades para sua implementação nas matrizes energéticas dos países estudados.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura relacionada ao tema deste trabalho, as fontes de energia, as matrizes energéticas, regulação energética no cenário global e na América Latina em relação à energia do hidrogênio, incluindo informações sobre os acordos internacionais de energia.

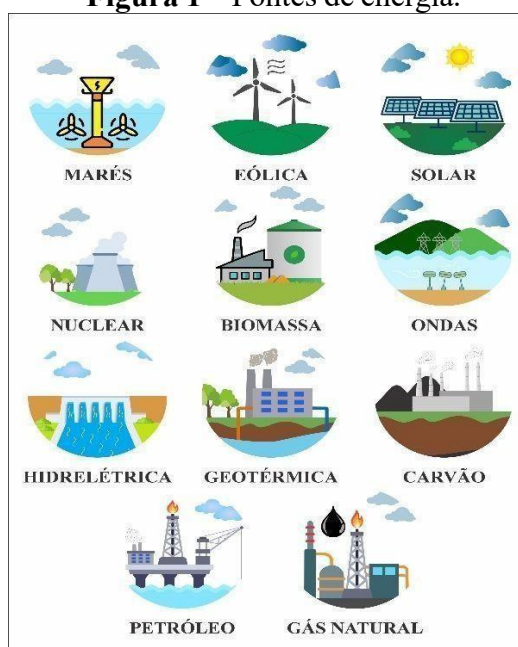
### 2.1 FONTES DE ENERGIA

A estabilidade econômica de um país está diretamente ligada com a capacidade de ter sua própria fonte energética possibilitando o atendimento às necessidades residenciais, comerciais e industriais. Outro ponto importante diz respeito à capacidade de gerar excedentes de energia, podendo exportar para outros países apresentando uma vantagem competitiva no cenário global. As relações comerciais que podem ocorrer, criam oportunidades para colaborações econômicas e geopolíticas.

As principais fontes energéticas em escala global estão sintetizadas na Figura 1, evidenciando a diversidade de recursos naturais passíveis de conversão em energia. A viabilidade de seu uso está intrinsecamente vinculada às características geográficas e ambientais de cada região, por exemplo, áreas com alta irradiação solar apresentam potencial ótimo para geração fotovoltaica, enquanto zonas costeiras podem explorar sistemas de conversão de energia maremotriz. Essa relação direta entre a disponibilidade local das fontes de energia e o seu real uso demanda estudos técnico-econômicos rigorosos, os quais devem integrar critérios de eficiência operacional, sustentabilidade ambiental e impactos socioeconômicos, garantindo assim a otimização dos recursos naturais sem comprometer a saúde pública ou os ecossistemas.

Das fontes de energia apresentadas na Figura 1, as renováveis representam um pilar fundamental para a transição energética global, pois são alternativas sustentáveis e de baixo impacto ambiental em relação aos combustíveis fósseis.

Energias renováveis são fontes de energia que se regeneram, com impacto ambiental reduzido, pois não geram emissão ao meio ambiente de gases de efeito estufa. Por isso são consideradas sustentáveis, atendendo às necessidades do presente sem comprometer o futuro do planeta. Exemplos principais de energia renovável: solar, eólica, hidrelétrica, geotérmica e biomassa (EPE, 2024).

**Figura 1 – Fontes de energia.**

Fonte: Adaptado de Freepik, 2025.

As fontes consideradas não renováveis são aquelas cujas fontes dependem de processos em escala de tempo geológica ou de formação do sistema solar para se tornarem disponíveis, por exemplo, o carvão mineral, o petróleo, o gás natural e a energia nuclear. No caso da energia nuclear, apesar de sua produção não emitir gases de efeito estufa, pode ser considerado risco o fato de que seus resíduos são radioativos, ocasionando acidentes nucleares. (Goldemberg, 2008). No entanto, a classificação diz respeito a ser renovável ou não, e não de emissão de gases poluentes ou sua periculosidade.

Entre as principais fontes renováveis destacam-se a energia solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e geotérmica, cada uma com características específicas, as quais influenciam sua viabilidade técnica, econômica e ambiental (Pereira e Neto, 2021). A energia solar tem experimentado crescimento exponencial devido à redução dos custos tecnológicos e à escalabilidade, enquanto a hidrelétrica, tradicionalmente dominante em países como Brasil e Paraguai, continua sendo uma fonte robusta, embora sujeita a limitações ambientais e sociais. A biomassa oferece potencial de integração com setores agrícolas e industriais, contribuindo para a diversificação da matriz energética, inclusive com o uso de resíduos orgânicos como energéticos. A incorporação dessas fontes renováveis é essencial para a construção de sistemas energéticos resilientes, capazes de atender à crescente demanda por energia limpa, reduzir emissões de gases de efeito estufa e promover o desenvolvimento sustentável, especialmente no contexto da economia do hidrogênio, na qual a geração renovável é crucial para a produção de hidrogênio de baixa

emissão de carbono.

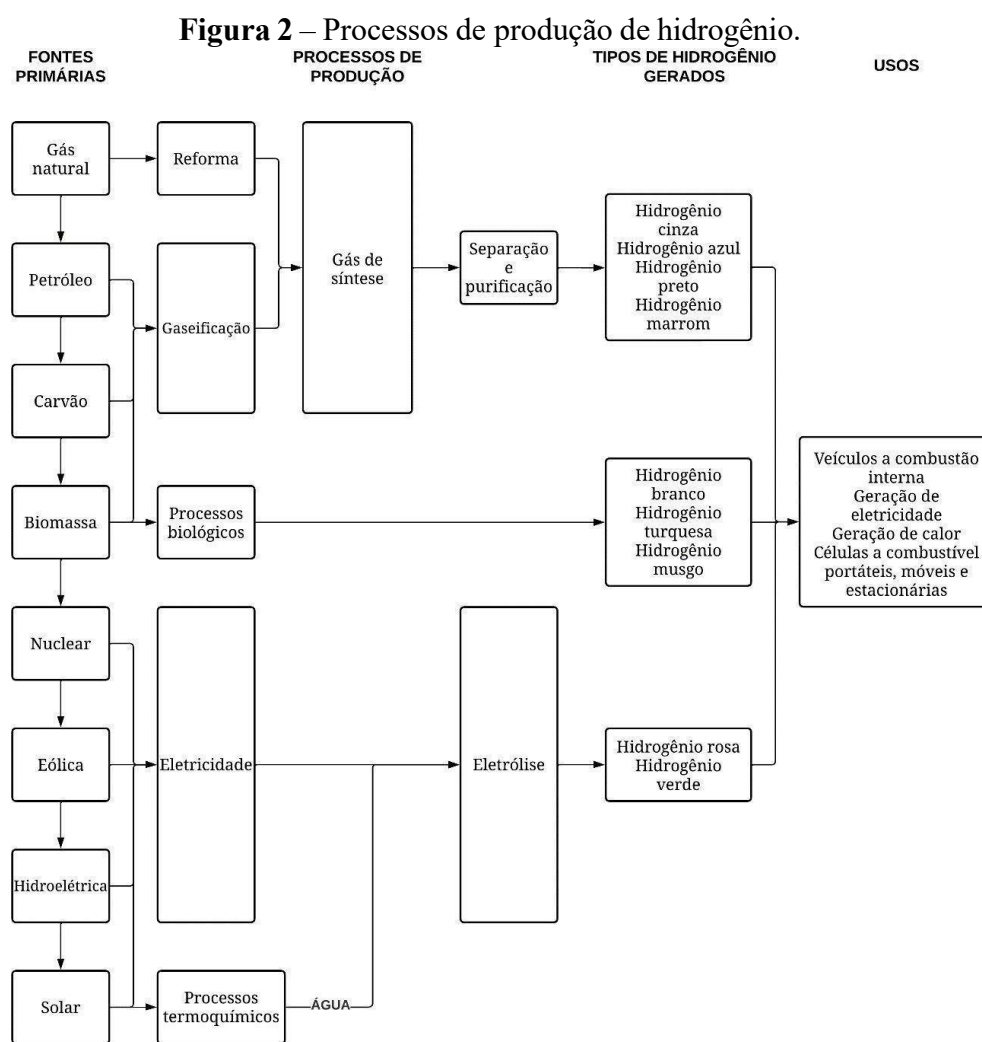
O hidrogênio, objeto central deste estudo, não está representado na Figura 1, uma vez que não se qualifica como fonte primária de energia. Apesar da descoberta do hidrogênio geológico, como uma alternativa promissora no quesito de disponibilidade energética com menor impacto ambiental, sua exploração ainda está na fase de pesquisa. O hidrogênio geológico pode ser encontrado de forma natural (hidrogênio dourado), o qual ocorre espontaneamente em reservatórios subterrâneos, ou pode ser produzido artificialmente por meio de reações químicas induzidas dentro da rocha (hidrogênio laranja). Existe a estimativa de haver no mínimo 200 mil toneladas por ano desse hidrogênio. No entanto, a sua exploração está na fase de estudos, pois é necessário a existência de condições geológicas específicas, bem como tecnologias que minimizem perdas de gás durante a sua extração.

Outro detalhe importante, consiste no fato de que estes reservatórios necessitem ser preenchidos com outros gases. Uma das vantagens desse hidrogênio se deve ao fato de que a sua produção produz emissão zero de CO<sub>2</sub>. Os desafios para a exploração do hidrogênio geológico são técnicos, como a dificuldade de detecção de reservatórios economicamente viáveis e os altos custos iniciais associados à aquisição de dados geofísicos em larga escala. Ainda assim, avanços em técnicas de aquisição sísmica, eletromagnética e de aprendizado de máquina podem viabilizar sua exploração comercial a médio prazo (Zhang e Li, 2024).

Enquanto o hidrogênio geológico não tem sua exploração concretizada, continua-se usando o hidrogênio que atua como vetor energético, demandando um aporte energético externo para sua produção. Essa característica, somada à sua elevada densidade energética por unidade de massa e à viabilidade de estocagem em estado gasoso, reforça seu potencial como vetor estratégico para o armazenamento e transporte de energia. Adicionalmente, o hidrogênio oferece a flexibilidade de ser produzido em instalações descentralizadas, sem a necessidade de grandes áreas ou infraestruturas complexas, e distribuído por meio de modais versáteis, como caminhões ou dutovias (Dawood, Anda e Shafiullah, 2020).

A produção de hidrogênio pode ser realizada por meio de diferentes rotas tecnológicas, sendo a eletrólise da água um dos processos mais promissores em termos de sustentabilidade. Essa técnica consiste na decomposição da molécula de água (H<sub>2</sub>O) em hidrogênio (H<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>) mediante a aplicação de energia elétrica. A fonte dessa

energia elétrica pode ser proveniente de diversas modalidades, incluindo hidrelétricas, sistemas fotovoltaicos, parques eólicos e outras fontes renováveis. O hidrogênio produzido por eletrólise se caracteriza pela sua elevada pureza, demandando apenas etapas de secagem para remoção da umidade residual, a depender da aplicação final. Outra rota de produção amplamente utilizada é a reforma de hidrocarbonetos, na qual esses compostos são submetidos a processos termoquímicos para obtenção do "syngas", uma mistura gasosa composta principalmente por hidrogênio e monóxido de carbono. A obtenção de hidrogênio com a pureza requerida para aplicações específicas exige, nesse caso, etapas adicionais de separação e purificação do gás (Zhou *et al.*, 2025). A Figura 2 mostra as principais rotas de produção do hidrogênio.



O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, no entanto ele é encontrado associado com outros elementos. Portanto, para a sua obtenção na

forma gasosa,  $H_2$ , são necessários alguns processos, como citado anteriormente. Vale ressaltar que o hidrogênio geológico natural como não está sendo explorado e comercializado, este não está sendo considerado no atual trabalho. A Figura 2 mostra de forma ampliada as formas de produção do hidrogênio, quais são as fontes primárias, colocando a classificação do hidrogênio na forma de coloração, identificado em muitos trabalhos e na comunidade geral. A figura representa que todo o hidrogênio pode ser utilizado em sistemas móveis ou estacionários, no entanto é importante salientar que dependendo do processo utilizado para produção do  $H_2$ , este precisa ser purificado e pode ser utilizado na indústria para o refino de petróleo, produção de amônia e metanol e para a produção de alimentos (Okolie *et al.*, 2021).

Como citado anteriormente, existem vários tipos de fontes de energia e cada região/país pode avaliar a sua disponibilidade e capacidade de produção de energia. Portanto, o levantamento dos dados é apresentado e assim é conhecida a matriz energética.

## 2.2 MATRIZES ENERGÉTICAS

Nas matrizes energéticas, são consideradas todas as fontes de energia que estejam em atividade no país, sejam elas primárias ou secundárias. A energia primária é aquela encontrada diretamente da natureza, como o petróleo, gás natural, carvão, hidráulica, solar, eólica, geotérmica, biomassa, maremotriz. A secundária resulta do processo de transformação da energia primária, ou seja, essa é derivada da primária, como exemplo o gásóleo e a gasolina, ambos derivados do petróleo (EPE, 2024).

No caso do gás hidrogênio achado de forma natural em prospecções diretamente do solo, este pode ser considerado como uma fonte primária, pelo fato de não necessitar de processo de transformação (Kannah *et al.*, 2021). Se o hidrogênio for produzido a partir de outras fontes, conforme explicado na Figura 2, ele é uma fonte secundária por ser resultado da transformação de outras fontes primárias.

Sobre as matrizes energéticas, cada país divulga anualmente seu balanço energético, consistindo num quantitativo das fontes que geram energia para uso residencial, comercial e industrial. Os resultados, chamados de matriz energética, variam de acordo com a disponibilidade de recursos naturais e/ou tecnologias para a exploração energética. Estes estão ligados diretamente a fatores econômicos para seu uso, portanto, a matriz energética pode ser diferente em cada país (Sendich, 2019). Os órgãos responsáveis por divulgar as matrizes energéticas variam de acordo com o país: no Brasil é a Empresa de

Pesquisa Energética (EPE, 2024) e no Paraguai o *Viceministerio de Minas y Energía* (VMME, 2024).

Outra distinção conceitual relevante no âmbito dos balanços energéticos refere-se às matrizes energética e elétrica. A matriz energética abrange o conjunto de todas as fontes de energia disponíveis em um país ou região, considerando seus diversos usos finais, tais como combustíveis para transporte, gás de cozinha, aquecimento e eletricidade. Por sua vez, a matriz elétrica corresponde especificamente às fontes utilizadas para a geração de energia elétrica. Dessa forma, a matriz elétrica constitui um subconjunto da matriz energética, representando apenas a parcela destinada à produção de eletricidade.

A análise das matrizes energéticas de um país permite compreender o comportamento de uso das diferentes fontes de energia, oferecendo subsídios importantes para avaliar o estágio e o direcionamento de sua transição energética. Essa avaliação revela não apenas a predominância de determinadas fontes, mas também as escolhas estratégicas adotadas em função de fatores técnicos, econômicos, ambientais e institucionais.

Historicamente, antes da ampla inserção das fontes renováveis - em especial a energia eólica e a solar - os planejamentos energéticos nacionais priorizavam, sobretudo, os potenciais regionais disponíveis e os custos associados a cada fonte, tendo como critérios principais a modalidade e a modicidade tarifária. No entanto, com o avanço das diretrizes globais voltadas à mitigação das mudanças climáticas, observa-se uma mudança de paradigma: a priorização crescente das fontes renováveis tornou-se um vetor central das políticas energéticas, alinhada aos compromissos internacionais de descarbonização e desenvolvimento sustentável.

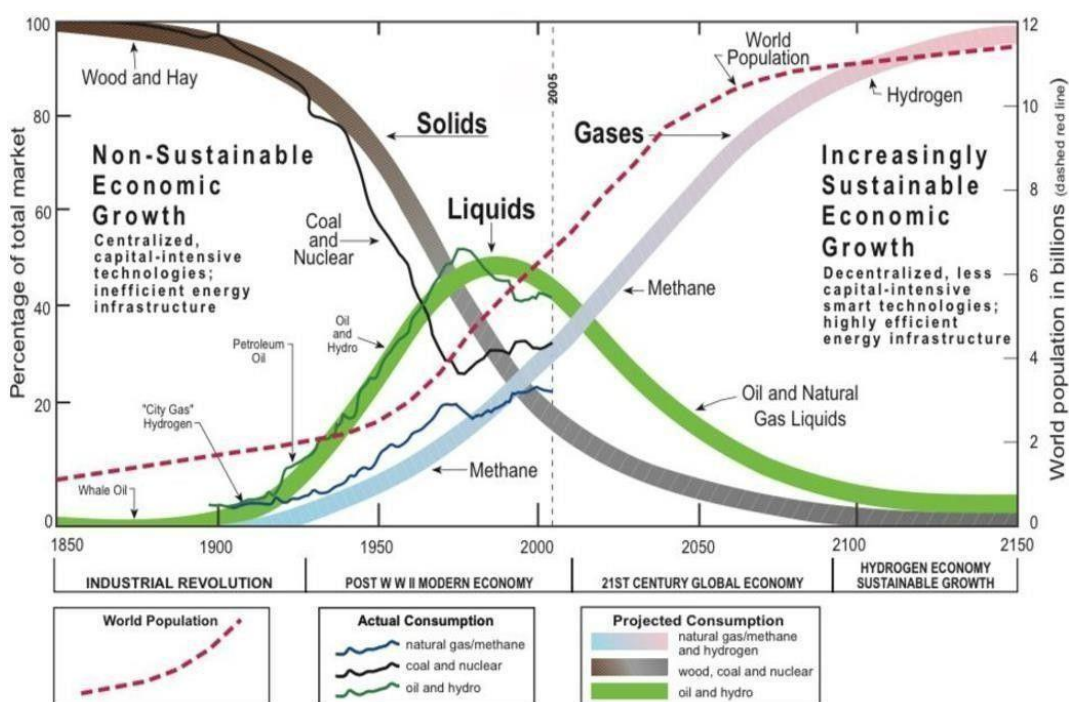
Apesar desse avanço, a incorporação massiva de fontes renováveis ainda enfrenta desafios significativos, que vão além dos aspectos econômicos. Conforme destacam Pagel, Campos e Carolino (2018), persistem obstáculos de natureza institucional, administrativa, ambiental, mercadológica e até mesmo relacionados à aceitação pública. Ademais, conforme aponta Trevisan *et al.* (2015), as fontes não renováveis permanecem em operação em determinados contextos, nos quais desempenham um papel estratégico na garantia da segurança energética dos sistemas, especialmente em momentos de instabilidade ou sazonalidade da geração renovável.

A Figura 3 mostra as ondas de transição energética global de uma economia não sustentável para uma economia sustentável mais eficiente. Apresenta uma representação gráfica da evolução histórica da matriz energética global desde meados do século XIX e com projeção para meados do século XXI, evidenciando as transições

sucessivas entre os principais tipos de combustíveis: sólidos, líquidos e gasosos. Esta trajetória energética acompanha, de maneira clara, os marcos históricos, tecnológicos e socioeconômicos da humanidade.

No período da Revolução Industrial, a base energética era formada predominantemente por combustíveis sólidos, como madeira e feno, com uso complementar de óleo de baleia e posteriormente do chamado “*syngas*” (gás manufacturado contendo hidrogênio). Com o avanço tecnológico e a crescente demanda por energia, houve a consolidação do carvão mineral e da energia nuclear como fontes principais durante a primeira metade do século XX, representando um modelo de crescimento econômico não sustentável, centralizado e intensivo em capital, como destacado na Figura 3.

**Figura 3** – Ondas da transição energética global.



Fonte: Adaptado de Hefner, 2007.

Com a modernização do sistema energético no pós-guerra, deu-se início à transição para os combustíveis líquidos, com destaque para o petróleo e a geração hidrelétrica, cujo uso atingiu seu auge por volta do ano 2000. A partir deste ponto, iniciou-se a chamada “Era dos Gases”, marcada pela crescente participação do gás natural (metano) e, futuramente, do hidrogênio, como alternativa estratégica no contexto de transição energética e sustentabilidade global.

Essa mudança está intrinsecamente relacionada ao crescimento

populacional mundial, representado na Figura 3 pela linha pontilhada vermelha, que demonstra um aumento contínuo da demanda energética ao longo do tempo. Segundo Hefner (2007), essa evolução energética - dos sólidos aos líquidos, e destes para os gases - evidencia uma tendência natural e progressiva rumo a fontes mais eficientes, limpas e compatíveis com os objetivos de desenvolvimento sustentável.

Conforme a projeção para até 2150, há um indício da predominância dos combustíveis gasosos, com destaque para o hidrogênio, que passa a ocupar papel central na matriz energética global, promovendo um modelo de crescimento econômico cada vez mais sustentável. Este novo modelo energético é caracterizado por tecnologias descentralizadas, inteligentes e altamente eficientes, com menor impacto ambiental e maior resiliência sistêmica.

No entanto, como apontado por Pagel, Campos e Carolino (2018), a transição para fontes renováveis e limpas, como o hidrogênio, ainda enfrenta barreiras significativas, não apenas de ordem econômica, mas também institucionais, administrativas, ambientais e socioculturais. Mesmo assim, o movimento em direção a uma matriz energética baseada em gases, especialmente o hidrogênio, é uma estratégia inevitável e desejável no enfrentamento das crises climáticas e na construção de um futuro energético sustentável.

### 2.3 AGÊNCIAS REGULADORAS

Existem várias fontes de energia que podem ser exploradas, porém além da disponibilidade de matéria-prima, tecnologias e recursos humanos, faz-se necessária uma estrutura política e regulatória para garantir a produção e aproveitamento das fontes energéticas (Mito, 2022).

A regulação é um conjunto de regras de controle da atividade energética, com a finalidade de estabelecer o funcionamento equilibrado do mercado. É exercida pelo órgão regulador diante do princípio da legalidade, constituído pelas leis, tornando a regulação compatível com as leis vigentes, enquanto as leis e decretos possuem diversas origens de acordo com o âmbito do poder emitente, seja federal, estadual ou municipal (Dalmarco, 2017).

As agências reguladoras possuem características específicas conforme o país. No caso do Brasil, a agência reguladora é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e no Paraguai como é um monopólio esta função é absorvida pela

*Administración Nacional de Electricidad (ANDE).*

### 2.3.1 Agência Nacional De Energia Elétrica

A ANEEL, autarquia em regime especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia, foi criada para regular o setor elétrico brasileiro, por meio da Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997, tem como atribuições desde os procedimentos para registro, a autorização e a concessão dos empreendimentos até a regulação técnica e a econômica. Na regulação técnica, as principais atividades são: regras e procedimentos para a prestação de serviços, indicadores de qualidade do serviço e do produto energia elétrica, acompanhamento da universalização do acesso à energia elétrica e aplicação da tarifa social de energia elétrica. Abrangendo o processo de regulamentação, normatização e padronização de serviços e instalações.

A regulação econômica é caracterizada pela regulação do preço, incluindo revisão tarifária e reajuste. No âmbito tarifário significa disciplinar custos operacionais além de regular investimentos. Todo esse arcabouço regulatório e legislativo pode ser distinto em cada país, porém normalmente possui um senso comum, tendo em vista que tudo precisa ser acompanhado por especialistas técnicos. Portanto, precisa haver uma concordância para ocorrer a comercialização de energia entre os países. Com isso, cria-se a necessidade da sua regulação, que versa de maneira indistinta ou conjunta a regras em geral, sejam elas legislativas, regulamentares ou técnicas (Silva, 2012).

Pela Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, que dispõe sobre a realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento (P&D) e eficiência energética pelas empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, o hidrogênio pode participar tanto de projetos de eficiência energética do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia), quanto de chamadas de Projetos de PDI (Programa de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação) da ANEEL.

### 2.3.2 Administración Nacional De Electricidad

A *Administración Nacional De Electricidad* (ANDE) é uma instituição autônoma e descentralizada da Administração Pública, de duração ilimitada, com personalidade jurídica e bens próprios. Seu objetivo principal é satisfazer adequadamente as necessidades de energia elétrica do Paraguai, a fim de promover o seu desenvolvimento

econômico e o bem-estar da população, através do uso preferencial dos recursos naturais (ANDE, 2025).

Além de sócia em 50% das usinas binacionais do país, Itaipu e Yaciretá, possui as seguintes funções:

- a) Elaborar planos e programas de desenvolvimento elétrico;
- b) Projetar, construir e adquirir obras de geração, transmissão e distribuição elétrica, e outras instalações e bens necessários ao normal funcionamento dos serviços elétricos;
- c) Administrar os sistemas de alimentação elétrica da sua propriedade ou de terceiros que se encarrega de fornecer energia aos consumidores e prestar serviço de eletricidade, iluminação pública, de acordo com tarifas aprovadas conforme o disposto na legislação vigente;
- d) Comprar e vender, dentro e fora do território nacional, energia elétrica, a terceiros empresas ou sistemas elétricos de serviço público ou privado, e trocar energia com eles;
- e) Regular tudo o que diz respeito à energia elétrica que gera, transforma, transmite, distribui e/ou fornece;
- f) Coordenar e orientar o desenvolvimento elétrico do país e promover o consumo de eletricidade;
- g) Praticar, em geral, todos os demais atos e funções relacionados com o cumprimento de seus propósitos.

Portanto, tudo o que envolve o setor elétrico do Paraguai segue as regulamentações da ANDE, inclusive os acordos bilaterais.

## 2.4 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESCARBONIZAÇÃO

Como tem se verificado nos últimos anos, o aumento da temperatura da Terra é uma consequência dos GEE (Gases de Efeito Estufa) emitidos pela queima de combustíveis fósseis. As matrizes energéticas mostram o elevado uso de fontes de energia primárias e secundárias emitem gases de efeito estufa, principalmente quando ocorre a queima de combustíveis fósseis, que aliadas ao desmatamento e práticas agropecuárias intensivas, dificultam o ciclo natural do carbono (Crespo, Souza e Silva, 2023).

Conforme já discutido na Figura 3, existe uma projeção de emissões até 2050, e estas podem provocar a elevação do nível dos oceanos, temperaturas extremas

como ondas de calor e frio, enchentes, secas, bem como o derretimento acelerado das geleiras. Esses fenômenos atingem a população como um todo de forma econômica, social e política. Neste contexto estão envolvidos a produção de alimentos, a vida das pessoas, tanto as que são perdidas quando eventos climáticos ocorrem, quanto à saúde da população, até a ação dos governantes para estarem prevenidos aos acontecimentos e buscarem soluções para um futuro próximo.

Uma possível solução é a descarbonização que consiste em um conjunto de medidas com o objetivo de reduzir as emissões líquidas de carbono. Porém, a descarbonização não ocorre instantaneamente, assim, muito se discute e se trabalha em cima de uma transição energética com a finalidade de estabilizar o clima global através do uso de combustíveis alternativos juntamente com a transformação dos padrões atuais de produção e consumo (MCTIC, 2017).

A substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia

(hídrica, eólica, solar e biomassa) junto com a eletrificação dos setores possíveis, contribuirão para uma melhor eficiência energética. O CO<sub>2</sub> emitido pela queima de combustíveis fósseis deve ser capturado e armazenado (CCS - Carbon Capture and Storage). O CO<sub>2</sub> biogênico e não biogênico inevitável poderia ser capturado e posteriormente utilizado na obtenção de produtos úteis como e-fuels, biofuels, produtos químicos, conforme os conceitos Biomass-to-X (BtX) e Power-to-X (PtX) (Dossow *et al.*, 2025).

Conforme apresentado anteriormente, outra possibilidade é o uso do hidrogênio como alternativa de baixo carbono. Das formas de se produzir este combustível, a eletrólise da água é um processo que não gera emissões diretas, além de poder atender a diferentes setores, tendo em vista que o gás hidrogênio produzido é de elevada pureza. No entanto, apesar de ser uma solução, a produção, comercialização e transporte do hidrogênio necessita ser regulamentada, o que envolve desde políticas públicas até regulações.

A transição energética demanda esforços de todos os setores. Países desenvolvidos estão à frente dos demais com relação às regulamentações e políticas adotadas, servindo como modelos para os demais, em todos os sentidos, seja para o que deve ser feito, e o que não se deve, pois não funciona.

Os desafios enfrentados vão além do desenvolvimento tecnológico que

tem avançado na área do hidrogênio, porém ainda faltam regras claras para o transporte, certificação e comércio do hidrogênio, dificultando o seu mercado. Portanto, neste trabalho serão apresentados alguns acordos internacionais e analisadas as políticas e regulamentações na área do hidrogênio criadas e utilizadas nos Estados Unidos da América, EUA, como uma base para a proposição do que pode ser utilizado no Brasil e Paraguai.

#### 2.4.1 Acordos Internacionais De Energia

Os acordos internacionais de energia desempenham um papel estratégico na promoção da complementaridade entre oferta e demanda energética entre as nações. Tais acordos são particularmente relevantes para países cuja demanda interna supera a capacidade de geração ou possuem disponibilidade excedente de recursos, tornando-se essencial a importação/exportação de energia como mecanismo para sustentar o crescimento econômico e garantir a segurança energética nacional. Isso ocorre porque o ritmo de crescimento da demanda energética nem sempre é acompanhado, de forma proporcional, pela expansão da oferta interna, o que impõe desafios estruturais ao sistema energético. Nesse contexto, os fluxos energéticos transfronteiriços possibilitam a otimização de recursos entre países com excedentes e aqueles com déficits, promovendo maior estabilidade e eficiência nos sistemas regionais e globais (Santos, 2018).

Nesse contexto, o hidrogênio desponta como uma solução energética estratégica, especialmente por sua versatilidade de produção e aplicação. Uma de suas principais vantagens competitivas reside na possibilidade de ser produzido localmente, o que favorece a autonomia energética de sistemas isolados ou com infraestrutura insuficiente (Rifkin, 2003). Além disso, a produção de hidrogênio a partir de excedentes de energia elétrica, especialmente oriundos de fontes renováveis, como solar, hidráulica e eólica, representa uma alternativa eficaz para o aproveitamento de recursos que, de outro modo, seriam desperdiçados. Esse hidrogênio pode ser armazenado, convertido e transportado para outras regiões ou países, funcionando como vetor energético e elemento-chave na integração energética internacional.

Diante deste cenário, a seguir são analisados diferentes níveis de governança e cooperação relacionados à transição energética e ao papel do hidrogênio: em escala global, com destaque para o Acordo de Paris, a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável e as Conferências das Nações Unidas sobre Mudanças

Climáticas (COPs); e no âmbito regional, será abordado o Mercosul como espaço estratégico de articulação energética entre os países- membros; e, em nível bilateral, será analisado o Tratado de Itaipú, como caso emblemático de cooperação energética entre Brasil e Paraguai.

#### *2.4.1.1 Acordo de Paris*

Trata-se de um tratado global, adotado em dezembro de 2015 pelos países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima durante a 21ª Conferência das Partes (COP 21). Esse acordo rege medidas de redução de emissão de dióxido de carbono a partir de 2020, e tem por objetivos fortalecer a resposta à ameaça da mudança do clima e reforçar a capacidade dos países para lidar com os impactos gerados por essa mudança. Por meio deste acordo, os governos se comprometeram em agir para manter o aumento da temperatura média mundial “bem abaixo” dos 2°C em relação aos níveis pré-industriais e em envidar esforços para limitar o aumento a 1,5 °C. Para tanto, os países apresentaram planos de ação nacionais abrangentes para reduzirem as suas emissões por meio da formulação de sua Contribuição Nacionalmente Determinada (MCTIC, 2017). A Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil para 2035, estabelece uma redução de emissões de gases de efeito estufa entre 59% e 67%, em relação a 2005, objetivando alcançar entre 850 milhões e 1,05 bilhão de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (NDC, 2024). O NDC do Paraguai, para 2030, estabelece uma redução de GEE de 20%.

O Acordo de Paris simboliza um avanço global na luta contra as mudanças

climáticas que tem afetado diferentes países, independente da sua localização ou o fato de ser desenvolvido ou subdesenvolvido. Esse acordo estimula o setor energético o uso de energias limpas alternativas. O trabalho conjunto para remodelar os sistemas de energia globais é uma busca para a diminuição das emissões dos gases que provocam o efeito estufa e assim minimizar os efeitos oriundos das crises ambientais.

Espera-se que os países que assinaram o Acordo de Paris realmente cumpram com os objetivos assumidos, concentrando o setor energético em fontes de energia renováveis em busca do progresso de uma economia de baixa emissão de carbono. Portanto esse acordo vai além de ações, pois estão associados dilemas sociais e ambientais atuais (MCTIC, 2017).

Como análise crítica, as ações até agora são muito insuficientes, conforme constatado no documento: Acordo de Paris: um documento para perplexos (LACLIMA, 2023).

#### 2.4.1.2 Agenda 2030

Trata-se de um plano global com metas a serem alcançadas até o ano de 2030 como resultado de discussões realizadas durante a Assembleia Geral das Nações Unidas, ocorrida em Nova Iorque, em setembro de 2015. A assembleia contou com a participação de 193 estados membros e estabeleceu 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ONU, 2015), os quais estão apresentados na Figura 4.

**Figura 4** – Os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável



Fonte: ONU, 2024.

A origem dessa agenda se deve ao consenso dos países membros da ONU, sob a necessidade de se construir um mundo com desenvolvimento sustentável na área ambiental e com o objetivo econômico da busca pela erradicação da pobreza, conforme descrito no próprio documento.

Dentre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, o ODS 7 está ligado à energia limpa e acessível, tratando de forma direta e explícita a questão energética. Esse objetivo busca "assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todos" (UNIC Rio, 2016), reconhecendo o papel central da energia como vetor transversal para o desenvolvimento humano, econômico e ambiental.

Contudo, os impactos da expansão de fontes de energia limpa e renovável

transcendem o escopo do ODS 7, exercendo influência direta e indireta sobre diversos outros objetivos. A incorporação de energias renováveis, como solar, eólica, hidráulica e, mais recentemente, o hidrogênio verde, contribui de maneira significativa para o ODS 3 - Saúde e bem-estar, ao reduzir as emissões de poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis, o que melhora a qualidade do ar e reduz doenças respiratórias e cardiovasculares associadas à poluição.

No âmbito econômico e tecnológico, a promoção de uma matriz energética limpa e moderna estimula o ODS 9 - Indústria, inovação e infraestrutura, na medida em que favorece a industrialização sustentável, impulsiona investimentos em pesquisa e desenvolvimento e promove a inovação tecnológica no setor energético. Esses avanços criam oportunidades para cadeias produtivas de maior valor agregado, além de ampliar o acesso à tecnologias descentralizadas, como micro redes e sistemas híbridos.

A nível urbano, os benefícios se estendem ao ODS 11 - Cidades e comunidades sustentáveis, pois o uso de fontes limpas reduz os impactos ambientais nas áreas urbanas, melhora a eficiência energética dos sistemas de transporte e edificação, e contribui para a resiliência das cidades diante de eventos climáticos extremos.

No que se refere ao enfrentamento da crise climática, o vínculo com o ODS 13 - Ação contra a mudança global do clima é evidente, já que a substituição progressiva de fontes fósseis por renováveis reduz significativamente as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), alinhando-se às metas estabelecidas no Acordo de Paris.

Portanto, a energia sustentável desempenha um papel relevante no ODS 15:

vida terrestre, ao minimizar os impactos ambientais das atividades extrativistas tradicionais, preservar ecossistemas naturais e promover práticas de uso racional dos recursos naturais. Isso inclui tanto a preservação da biodiversidade quanto a conservação do solo e dos corpos d'água, especialmente em regiões afetadas por grandes empreendimentos energéticos.

Dessa forma, observa-se que o desenvolvimento de sistemas energéticos sustentáveis não é apenas um objetivo isolado, mas um elemento estruturante para o cumprimento da Agenda 2030 como um todo. A transição energética, portanto, deve ser compreendida como um processo multidimensional, que exige articulação entre políticas públicas, investimentos tecnológicos e mecanismos de cooperação internacional.

### 2.4.1.3 Conferência das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas

A COP 28, 28ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), foi concluída em 13 de dezembro de 2023, em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, e representou um marco significativo nas negociações climáticas internacionais. Um dos principais resultados da conferência foi o estabelecimento de metas globais voltadas à transformação dos sistemas energéticos, com vistas à neutralidade climática até 2050. Nesse contexto, a COP 28 teve papel central ao promover a realização do primeiro Balanço Global (*Global Stocktake*) do Acordo de Paris, um mecanismo fundamental para avaliar o progresso coletivo das nações no enfrentamento das mudanças climáticas.

Como principal desdobramento desse balanço, 117 países firmaram um compromisso multilateral para triplicar a capacidade global instalada de geração de energia renovável até 2030, reforçando o objetivo de limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais (Burnett, 2023). Tal meta sinaliza um avanço concreto na direção de uma transição energética global, alicerçada na expansão de fontes limpas e sustentáveis, com impacto direto sobre os sistemas produtivos, a governança energética e os compromissos de descarbonização.

Por sua vez, a COP 29, realizada em Baku, no Azerbaijão, em 2024, apresentou avanços e retrocessos. Apesar dos fracassos no cumprimento das metas de financiamento climático, especialmente no que diz respeito ao apoio financeiro aos países em desenvolvimento para mitigação e adaptação, a conferência registrou progressos relevantes em outras áreas. Destacam-se, nesse sentido, os avanços nas metas comuns de descarbonização do setor energético, com discussões aprofundadas sobre a eliminação gradual de combustíveis fósseis, o fortalecimento de mecanismos de cooperação tecnológica e o papel do hidrogênio como vetor estratégico para a transição energética (Guitarrari e Cardoso, 2024).

Assim, o ciclo COP 28-29 reforça tanto os desafios estruturais quanto às oportunidades emergentes no processo de transição energética global, evidenciando a necessidade de ações coordenadas, investimentos consistentes e mecanismos de governança eficazes para o alcance dos compromissos climáticos assumidos internacionalmente.

#### *2.4.1.4 Mercosul*

A exemplo dos grandes acordos internacionais, como a União Europeia, percebeu-se a necessidade da América do Sul possuir um acordo que reforçasse e regulamentasse o mercado do Cone Sul.

Portanto, o Mercosul (Mercado Comum do Sul), estabelecido em 31 de dezembro de 1994, foi inicialmente concebido no Tratado de Assunção em 1991 para a constituição de um mercado comum entre a República Argentina, a República Federativa do Brasil, a República do Paraguai e a República do Uruguai. Posteriormente, se associaram ao grupo a Venezuela, Chile, Colômbia e Equador (Soares, 2009).

Assim, o Mercosul foi criado com o objetivo de ser uma União Aduaneira, eliminando barreiras tarifárias e de restrições não-tarifárias, adotando uma Tarifa Externa Comum, o que significa que todos os países membros teriam de cobrar a mesma tarifa para um mesmo produto. No entanto, ao contrário do que ocorre na União Europeia e o que caracteriza um Mercado Comum, no Mercosul ainda não existe a livre circulação de serviços, capitais e pessoas.

Entretanto, atualmente sua composição se difere, sendo composto por quatro países membros: Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai; e sete países associados: Bolívia, Chile, Colômbia, Equador, Guiana, Peru e Suriname (MERCOSUL, 2024), tendo em vista que a Venezuela foi suspensa em 2022, devido a seus graves problemas políticos.

Na área de energia, se destaca o acordo (Mensagem 518/06) que estabelece parâmetros gerais para a realização de projetos regionais no setor de energia. O objetivo principal é reduzir as assimetrias na área energética entre os países signatários, no entanto ainda não apresentou evolução.

#### *2.4.1.5 Tratado de Itaipu*

O Tratado de Itaipu, que regula a maior geradora de energia do planeta, trata-se de um acordo internacional bilateral entre Brasil e Paraguai para o aproveitamento hidrelétrico fronteiro do rio Paraná. Para que este empreendimento se tornasse realidade, foi necessário um tratado para evitar qualquer conflito ou divergência de natureza política ou econômica.

As negociações foram iniciadas em 1966 e tiveram como resultado o “Tratado entre a República do Paraguai e a República Federativa do Brasil, para o

aproveitamento hidrelétrico dos recursos hídricos do rio Paraná, pertencentes em condomínio aos dois países, desde e inclusive o Salto del Guairá ou Salto Grande das Sete Quedas até a desembocadura do rio Iguazu”, conhecido como Tratado de Itaipu, assinado em 26 de abril de 1973 (Itaipu Binacional, 1973).

Este tratado, assinado em 26 de abril de 1973, possui 3 anexos: o Anexo A que define os estatutos da entidade binacional Itaipu, o Anexo B que descreve as instalações para produção de energia e obras auxiliares, e o Anexo C que descreve as bases financeiras. O Anexo A e o Anexo B continuam vigentes enquanto o Anexo C passou por revisão, em 2024, após 50 anos de vigência e amortização da dívida da construção da usina, contudo não se chegou a um acordo final, tornando o assunto pendente de solução (Itaipu Binacional, 2025).

No caso do Anexo C, é importante destacar que o Brasil e o Paraguai estavam obrigados de forma compulsória a usar na totalidade a energia produzida pela Itaipu como garantia para pagamento da dívida. Naturalmente que não havendo mais dívida ocorre um hiato até que os países cheguem a um novo acordo financeiro (Itaipu Binacional, 2024).

Como os países ainda não foram capazes de convergir a um acordo que satisfaça as duas partes, a empresa está sofrendo entraves financeiros graves e, com isso, será necessário um grande esforço de ambas as partes para a volta à normalidade financeira desta que é a maior produtora mundial de energia. (Itaipu Binacional, 2025).

#### 2.4.2 Mercado Energético: Fontes Renováveis E Hidrogênio

A diversidade da matriz energética juntamente com a sazonalidade dos recursos energéticos desafia o setor responsável pela regulamentação dos preços. Portanto, fatores econômicos e ambientais devem ser aliados aos estratégicos, pois além da necessidade de se considerar os custos de energia, sua escassez, o valor de mercado deve incluir no cálculo a transição energética em busca da descarbonização. Como exemplo, o setor da geração de energia elétrica hidráulica possui períodos úmidos e secos dependendo das chuvas e rios e isso tornando o mercado muito dinâmico.

No Brasil, a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) é a entidade responsável por gerir o mercado de energia elétrica. Em relação ao Mercado Livre de Energia, cabe à CCEE registrar, controlar e organizar todas as operações que ocorrem nesse ambiente de negócios. No Paraguai, como ainda é um monopólio da ANDE, ela

regula o seu mercado exclusivo.

Como as energias renováveis para a geração distribuída têm crescido, em especial a solar, cada vez mais energia privada é injetada na rede, devido aos incentivos para o consumidor reduzir sua conta de energia usando geração própria, com o uso de quadros elétricos bidirecionais para contabilizar tanto a energia consumida que entra da rede quanto aquela que é gerada no local e é injetada na rede.

Apesar de reduzir a conta de energia trazendo um benefício econômico ao consumidor, um problema que pode acarretar é ter vizinhos que injetam uma quantidade elevada de energia na rede, podendo piorar a qualidade de energia pelo surgimento de componentes harmônicos tanto de corrente quanto de tensão. Com isso, ao invés de se ter uma fonte única de um distribuidor, a rede se torna cada vez mais distribuída, com diversas injeções de energia, fazendo com que os barramentos tenham injeções de ondas que o transformam de um barramento estável para uma rede com mais componentes harmônicos causados por essa diversidade, criando cada vez mais a necessidade de estudos para manter a qualidade da energia (Bogila *et al.*, 2018).

Em relação ao mercado de hidrogênio, na nossa região do Mercosul ainda está em construção a regulação do mercado, sendo que as referências para esta regulação estão vindo dos mercados com potencial de importação, como por exemplo o Mercado Comum Europeu, a fim de possibilitar segurança jurídica para as relações comerciais do comércio exterior. No caso brasileiro, o marco legal do hidrogênio é a Lei nº 14.948/2024, que regulamenta a produção, comercialização e uso de hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil (ANP, 2024) e Sistema Brasileiro de Certificação do Hidrogênio (SBCH<sub>2</sub>) é um sistema voluntário que certifica a intensidade de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do hidrogênio produzido no Brasil (Cardoso, 2024).

Essa regulação é importante para oferecer segurança jurídica para o mercado futuro do hidrogênio, tanto para exportação como para uso no mercado nacional, como por exemplo uso nos veículos de transporte, para geração de energia distribuída e uso industrial, como no caso da indústria de aço para substituir os combustíveis fósseis para produzir o aço verde para exportação aos países que exigem a sustentabilidade nos produtos que importam.

A nova onda do mercado de energias renováveis, impulsionado pelo desejo global de uma transição energética para a sustentabilidade, está exigindo um esforço global para um arcabouço regulatório que contemple as diversas necessidades regionais, além de um grande investimento em tecnologia e treinamentos de mão de obra (Hoppe *et*

*al.*, 2022).

### 2.4.3 Legislação

Tendo em vista que a discussão neste trabalho é sobre o uso de hidrogênio como energético na substituição de alguns combustíveis e no melhor aproveitamento das fontes de energia intermitentes, a seguir será discutido como está o cenário global para o hidrogênio. Serão apresentados dados referentes às regulamentações e políticas públicas de países em que o setor está mais consolidado.

#### 2.4.3.1 Cenário global

Para Mengdi e Jianlong (2021), o desenvolvimento da energia do hidrogênio é um objetivo perseguido por muitos países para combater a tendência de aquecimento global. O ODS 7 é o que assegura o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos (Collera e Agaton, 2021).

A União Europeia e diversos países possuem pontos em comum nos objetivos específicos das estratégias para suas matrizes energéticas, propondo mecanismos para integrar o potencial energético do hidrogênio nos distintos setores da economia, por meio de normativas, investimentos para criação de mercados, pesquisa e inovação, com ações coordenadas entre os setores público e privado. O Quadro 1 apresenta os objetivos específicos das estratégias de alguns países (IPEA, 2022).

**Quadro 1** – Objetivos específicos das estratégias de alguns países em relação à transição energética.

Objetivos Países	Redução das emissões	Diversificação da matriz energética	Crescimento econômico	Integração de fontes renováveis	Desenvolvimento	
					Tecnologia nacional	Mercado exportador
U. Europeia	x	x	X	x	x	
Alemanha	x	x	X	x	x	
Países Baixos	x		X	x	x	
França	x		X	x	x	
Espanha	x	x		x		x
Itália	x	x	X	x	x	x
Reino Unido	x			x	x	
Noruega	x				x	
Suíça	x		x			
Ucrânia		x		x		x
Rússia				x	x	x
Japão	x	x	x	x	x	
Coreia do Sul			x		x	

China	x	x	x	x	x	
Austrália			x		x	x
Marrocos	x		x	x	x	x
Chile	x		x	x	x	x

Fonte: Adaptado de IPEA, 2022.

#### 2.4.3.2 Legislação para o Hidrogênio

O poder legislativo de um país é responsável por elaborar, discutir, votar e aprovar as leis que regem um país. Porém, as regulações são atos normativos emitidos por órgãos da administração pública onde existem pessoas com conhecimento técnico e científico necessário para elaborar tal documento.

Quanto à cadeia do hidrogênio, são necessárias regulações em relação à sua produção, comercialização e manuseio. Portanto, nos EUA agências reguladoras são responsáveis por cada setor e, para ser mais bem compreendida a situação americana, o Quadro 2 distingue as agências e sua atuação.

**Quadro 2** – Órgão regulatório e sua atuação nos EUA, dentro da cadeia do hidrogênio.

(continua)

<b>Órgão</b>	<b>O que é</b>	<b>Atuação</b>
<i>Environmental Protection Agency</i> (EPA, Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)	Agência que regula diversos aspectos ambientais, incluindo a qualidade do ar, da água, a proteção contra a radiação, a gestão de resíduos e a prevenção da poluição.	Padrões e normas, aplica a legislação ambiental e fornece orientação técnica para estados e outros parceiros.
<i>United States Department of Energy</i> (DOE, Departamento de Energia dos Estados Unidos da América)	Departamento executivo do governo federal responsável pela política energética nacional e a produção de energia, incluindo energia nuclear, pesquisa científica e segurança nuclear.	Elabora e implementa políticas relacionadas à energia. Financia e conduz pesquisas em diversas áreas energéticas. Estabelece padrões e regulamentações, promove a eficiência energética e a conservação de energia. Supervisiona a produção de energia.
<i>Federal Aviation Administration</i> (FAA, Administração Federal da Aviação dos Estados Unidos da América)	Agência do governo americano	Regula e supervisiona a aviação civil, incluindo a segurança aérea, a certificação de pessoal e aeronaves, o controle de tráfego aéreo e as normas dos aeroportos

<i>Federal Energy Regulatory Commission</i> (FERC, Comissão Federal de Regulamentação de Energia dos Estados Unidos)	Agência independente do governo dos Estados Unidos	Regula a transmissão e a venda por atacado de eletricidade e gás natural; os preços do transporte de petróleo por oleoduto e analisa projetos de armazenamento e transporte de combustível gasoso, como o gás natural.
<i>Occupational Safety and Health Administration</i> (OSHA, Administração de Segurança e Saúde Ocupacional)	Agência do Departamento do Trabalho dos Estados Unidos	É responsável por estabelecer e fiscalizar as normas de segurança e saúde no local de trabalho.
<i>Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration</i> (PHMSA, Administração de Segurança de Oleodutos e Materiais Perigosos)	Agência do Departamento de Transporte do governo	É responsável pela regulamentação e fiscalização da segurança de materiais perigosos e na operação de dutos.
<i>Bureau of Safety and Environmental Enforcement</i> (BSEE, Departamento de Segurança e Fiscalização Ambiental)	Agência federal encarregada de aprimorar a segurança e garantir a proteção ambiental relacionada à indústria de energia offshore, principalmente petróleo e gás natural, na Plataforma Continental Exterior (PCE) dos EUA	Promover a segurança, proteger o meio ambiente e conservar recursos offshore por meio de supervisão e fiscalização regulatória rigorosas.
<i>United States Coast Guard</i> (USCG, Guarda Costeira dos Estados Unidos)	Força militar do governo	Regula e fiscaliza o transporte marítimo, além de realizar operações de terminais portuários
<i>Federal Highway Administration</i> (FHWA, Administração Federal de Rodovias)	É uma agência do Departamento de Transportes do governo	Estabelece requisitos para infraestrutura de transporte de materiais perigosos, como condições das estradas para veículos de carga pesada, pontes, túneis e rotas que transportam materiais sensíveis
<i>Federal Trade Commission</i> (FTC, Comissão Federal de Comércio)	Agência governamental independente	Protege os consumidores e promove a concorrência justa no mercado

Fonte: Autoria própria, 2025.

**Quadro 2** – Órgão regulatório e sua atuação nos EUA, dentro da cadeia do hidrogênio. *(continuação)*

<b>Órgão</b>	<b>O que é</b>	<b>Atuação</b>
<i>Federal Motor Carrier Safety Administration</i> (FMCSA, Administração Federal de Segurança dos Transportadores Rodoviários)	Agência do Departamento de Transporte	Fiscaliza a segurança das operações de transporte rodoviário, trabalhando em conjunto com a FHWA

Fonte: Autoria própria, 2025.

Analisando o Quadro 2, pode-se concluir que apesar de muitos países desejarem realizar a transição energética para uma matriz com menos carbono, existem limitações geopolíticas que ainda os tornam dependentes energeticamente, seja de uma fonte não renovável, seja de outro país exportador de energia. A maioria dos países estão comprometidos em reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas poucos têm diversificado a matriz energética e capacidade de exportação.

Conhecidos os órgãos responsáveis por auxiliar o governo americano na

regulamentação do hidrogênio, em seguida serão discutidas as atividades regulatórias já implementadas.

Conforme DOE (2022), o Congresso americano em novembro de 2021 assinou a lei de infraestrutura *Public Law 117-58* a qual incluiu US\$ 9,5 bilhões para impulsionar o hidrogênio de baixo carbono (*clean hydrogen*). Além disso, o Roteiro Estratégico Nacional para o Hidrogênio de Baixo Carbono (*U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap*) trouxe metas para 2030, 2040 e 2050. O Quadro 3 apresenta as atividades regulatórias para produção, armazenamento e transporte do hidrogênio nos Estados Unidos. Observa-se que a regulação está relacionada à segurança envolvida nas atividades.

**Quadro 3** – Atividades regulatórias para o hidrogênio nos Estados Unidos para produção, armazenamento e transporte.

(continua)

Sistema	Agência	Regulação	Ano de publicação	Sumário
Produção	EPA	40 CFR Parte 98	29/04/2024	Exige relatórios de gases de efeito estufa pelas instalações
	DOE	IIJA Sec 40315 (Sec 822 de EPCACT 2005)	08/09/2005	Direciona o DOE para elaborar normas de produção de hidrogênio de baixo carbono
Transporte por Trilho	PHMSA	49 USC 5117 e 49 CFR Parte 172, 173, 174, 179, 180	31/03/2007	Requisitos para operações de inspeção, teste e transporte de materiais perigosos dentro ou sobre vagões

Fonte: Adaptado de DOE, 2022.

**Quadro 3** – Atividades regulatórias para o hidrogênio nos Estados Unidos para produção, armazenamento e transporte.

(continuação)

Sistema	Agência	Regulação	Ano de Publicação	Sumário
Armazenamento	FAA	14 CFR Parte 420	19/10/2000	Distância de separação entre hidrogênio líquido e energéticos incompatíveis.
	FERC	18 CFR Parte 157	08/03/2024	Certificação de empresas para serviços de energia, gasodutos ou de armazenamento.
	EPA	40 CFR 144, 146	25/03/2024	Autorização para injetar hidrogênio para armazenamento no subsolo.
	OSHA	29 CFR Parte 1910	14/05/2019	Segurança para armazenamento e entrega de hidrogênio gasoso e líquido.
Transporte por Gasoduto	BSEE	43 USC Capítulo 29	30/10/2020	Conformidade para operações além da Plataforma Continental (OCS).
	FERC*	18 CFR Parte 153, 157 e 284	08/03/2024	Autorização para construir, operar, transportar ou prestar serviços de energia e gás.

	PHMSA	49 CFR Parte 192, 195	06/04/2017	Segurança para instalações dentro dos limites da plataforma continental.
	USCG	33 CFR Parte 154	17/08/2012	Regulamentos para operações com materiais perigosos em navios.
Transporte Rodoviário	FHWA	23 CFR Parte 658, 924	21/07/2021	Regula o tamanho e o peso dos caminhões para a segurança rodoviária.
	FMCSA	49 CFR Parte 356, 389, 397	01/10/2001	Requisitos de segurança para o transporte rodoviário de materiais perigosos.
	FTC	16 CFR Parte 306	01/01/2012	Descreve a certificação e classificações de combustível automotivo comercial.
	PHMSA	49 CFR Parte 172, 173, 177, 178, 180	18/07/2022	Fornecer requisitos e classifica materiais perigosos para transporte rodoviário.
Transporte por Hidrovias	PHMSA	49 CFR Parte 172, 173, 176, 178, 180	01/09/2023	Fornecer requisitos e classifica materiais perigosos para transporte por navio.
	USCG	33 CFR Parte 154, 156 e 46 CFR Parte 38, 150, 151, 153, 154	17/08/2012	Regulamentos para operação e transferência de materiais perigosos em navios e embarcações.

Fonte: Adaptado de DOE, 2022.

O setor de transporte do hidrogênio é o que possui mais regulamentações, pois dependendo da infraestrutura e do destino, pode ser transportado por caminhões, dutos, navios ou trens. A FAA que regula o setor da aviação está no contexto, pois o hidrogênio líquido é utilizado como combustível para foguetes.

Apesar do quantitativo de regulações, existe uma complexidade para o uso desse recurso energético. A variedade de agências e regulamentos envolvidos demonstra a necessidade de coordenação de interagências para garantir um sistema seguro e sustentável. Portanto, o avanço das regulamentações auxilia tanto o governo quanto as indústrias. No Quadro 4 são apresentadas as regulações dos Estados Unidos para as atividades que correspondem ao uso final do hidrogênio.

**Quadro 4** – Atividades regulatórias nos Estados Unidos para uso final do hidrogênio.

Sistema	Agência	Regulação	Ano de publicação	Sumário
Fonte de Alimentação Auxiliar ou Alternativa	FAA	14 CFR Parte 23, 25, 27, 29 Subparte E	09/12/2022	Requisitos para sistemas de geração auxiliares e energia de reserva.
	FMCSA	49 CFR Parte 390	12/12/2023	Regulamenta equipamentos gerais de segurança em veículos comerciais.
	FRA	49 CFR Parte 229	28/12/2023	Regulamentos para sistemas elétricos, proteção contra gases e colisões.
	USCG	46 CFR Parte 111	16/03/2023	Regulamentos para sistemas de fornecimento de energia em navios.
Uso Químico e Industrial	EPA	40 CFR Parte 98	01/01/2024	Exige relatórios de gases de efeito estufa pelas instalações aplicáveis.
	OSHA	29 CFR Parte 1910	14/05/2019	Dita segurança estrutural e operações de hidrogênio gasoso e líquido.

Produção de Eletricidade	DOE	10 CFR Parte 503, 504	03/01/2017	Relativa a plantas de produção com uso de combustíveis alternativos.
	EPA	40 CFR Parte 60	20/11/2023	Aborda as emissões de GEE da geração elétrica por combustíveis fósseis.
	FERC	18 CFR Parte 292	29/11/2023	Regulamentação para pequenas centrais de produção de energia e cogeração.
Terminais de importação/exportação	USCG	33 CFR Parte 154, 156	03/06/2022	Regulamentos para embarcações com gases liquefeitos, petróleo ou materiais perigosos.
Uso em Veículos	FHWA	23 CFR Parte 658, 924	23/09/2019	Regula a segurança dos caminhões, pontes, túneis e elementos associados.
	NHTSA	49 CFR 571	02/05/2024	Fornece padrões federais de segurança de veículos e seus equipamentos.
Uso na Aviação	FAA	14 CFR Parte 23, 25,26, 27, 29, 33	09/12/2022	Requisitos e padrões de aeronavegabilidade para aviões e helicóptero.
Uso Marítimo	FTA	49 USC Cap. 53	27/01/2021	Requisitos para o Plano Nacional de Segurança no Transporte Público.
	USCG	46 CFR Partes 24-196	14/11/2022	Regulamentação da construção de navios e requisitos gerais de combustível.
Uso Ferroviário	FRA	49 CFR Parte 229, 238	28/12/2023	Projeto de segurança de locomotivas e requisitos de resistência a colisões.
	FTA	49 CFR Parte 659, 674	09/03/2016	Fornece orientações de segurança e supervisão para sistemas ferroviários.

Fonte: Adaptado de DOE, 2022.

O Quadro 4 reflete o compromisso dos Estados Unidos em integrar o hidrogênio a diversas aplicações finais, alinhando a inovação tecnológica com a segurança e a sustentabilidade. Essas regulamentações são essenciais para impulsionar a adoção do hidrogênio como vetor energético, promovendo a descarbonização em setores cruciais da economia.

Com relação aos demais países, a Europa possui uma política bem definida no seu *Hydrogen Roadmap Europe* (FCH, 2019) e uma regulação comum na União Europeia *EU rules for renewable hydrogen* (Erbach, 2023). A China possui seu *roadmap* em progresso (WEF, 2023) e uma regulação estruturada (Zhang, 2024). A Austrália construiu sua estratégia nacional (DCCEEW, 2024) e segue para o hidrogênio a regulação da *Commonwealth*, ou Comunidade das Nações, é uma associação voluntária de 56 países independentes, com raízes históricas no Império Britânico (DCCEEW, 2024). O Japão construiu sua estratégia para o hidrogênio (McCrehri, 2023) e sua regulação (Bocobza, Tanabe e Takahashi, 2024). A Rússia tem sua estratégia para a economia do hidrogênio (Barlow, 2021) e sua regulação (Ramenskiy *et al.*, 2017).

#### 2.4.3.3 Incentivos fiscais

As políticas de regulamentação para a produção e uso do hidrogênio

estão sendo criadas pelos países. No entanto, para uma real implementação, existe uma demanda por incentivos fiscais, pois o custo do hidrogênio ainda está acima dos combustíveis convencionais, os grandes emissores de CO<sub>2</sub>.

Os incentivos fiscais vêm do governo, o qual precisa avaliar a melhor forma de incentivar empresas que realmente promovam o uso do hidrogênio sem que sejam as que poluem. O hidrogênio, como combustível, não emite gases de efeito estufa, porém, esses poluentes podem ser liberados dependendo da forma em que o hidrogênio é produzido. Assim, existem incentivos fiscais e regulatórios aplicados à produção de hidrogênio de baixo carbono.

Hernandez e Kirchofer (2025) publicaram um estudo comparando os projetos *California Low Carbon Fuel Standard (LCFS)*, o crédito tributário federal para produção de hidrogênio limpo dos EUA (45V) e a Diretiva de Energia Renovável da União Europeia (RED).

O programa de crédito tributário federal para a produção de hidrogênio limpo dos EUA (45V) concede até US\$ 3/kg de hidrogênio produzido por processos em que as emissões sejam iguais ou menores que 0,45 kg CO<sub>2</sub>e/kg H<sub>2</sub>. Ou seja, produzir hidrogênio sem poluir o meio ambiente com a atribuição de créditos baseada na intensidade de carbono a partir da avaliação do ciclo de vida do hidrogênio. Portanto, o Departamento de Energia dos EUA avalia os fatores de emissão padrão a partir de um modelo oficial denominado 45VH<sub>2</sub>-GREET. Dessa forma é possível avaliar a produção regional de hidrogênio e as emissões gasosas para então aumentar a precisão da política fiscal (Hernandez e Kirchofer, 2025).

O projeto LCFS (Padrão de Combustível de Baixo Carbono) oferece créditos por tonelada de CO<sub>2</sub> evitada. Esse crédito é comercializável e tem valor de mercado variável, o qual em 2024 ficou em cerca de US\$ 566/tCO<sub>2</sub> equivalente. Inclusive, caso sejam utilizados processos como a eletrólise da água, processo limpo, para a produção de hidrogênio e oxigênio, sendo este último também aproveitado comercialmente, a quantidade de tCO<sub>2</sub>e aumenta juntamente com o ganho comercial. Portanto, este pode ser um projeto referência para programas brasileiros (Hernandez e Kirchofer, 2025).

Além dos programas americanos, a União Europeia também possui a Diretiva de Energias Renováveis (RED) que busca incentivar os setores à transição energética, ao substituir fontes não renováveis por renováveis. As diretivas consistem em: (i) exige que até 2030, pelo menos 42% do hidrogênio utilizados nas indústrias seja produzido a partir de fontes renováveis; (ii) estabelece um rigoroso rastreio da origem da

eletricidade utilizada nos países integrantes da UE; e (iii) os incentivos financeiros, via Banco Europeu do Hidrogênio só irão para quem cumprir as metas obrigatórias. O RED é um modelo que integra a parte energética com a climática, pois a qualidade ambiental é importante, no entanto apresenta restrições de acesso a apoio para produtores menores de energia, pois exigem certificações as quais são inviáveis para eles (Hernandez e Kirchofer, 2025).

Os modelos de programas citados acima são alguns dos existentes que o Brasil pode avaliar e usar como base. Não existe um programa perfeito, no entanto adequações podem ser feitas com base na realidade de cada região brasileira. Para isto, existem várias ferramentas que podem ser utilizadas, no entanto, este trabalho foca sobre o uso das análises SWOT e PESTEL, as quais são explicadas abaixo.

## 2.5 ANÁLISE SWOT

As origens empíricas da análise SWOT datam de 1952 no Departamento de Planejamento de Desenvolvimento Corporativo da Lockheed, com Robert Franklin Stewart. Já em 1962 Stewart se tornou chefe do grupo de Teoria e Prática de Planejamento no Instituto de Pesquisa Stanford. Em 1965 quando Robert F. Stewart, Otis J. Benepe e Arnold Mitchell do Stanford Research Institute escreveram o artigo técnico *Formal Planning: The Staff Planner's Role at Start-Up*, utilizado por muitas grandes empresas em todo o mundo. Inicialmente tinha a sigla SOFT: o "satisfatório" nas operações atuais, "oportunidades" nas operações futuras, "falhas" nas operações atuais e "ameaças" às operações futuras. Em 1967 evoluiu para SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities, and threats*): Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças (Puyt, 2023).

Karadzhov (2025) discorre sobre as técnicas para a análise SWOT mostrando como essa ferramenta é versátil para tomadas de decisão estratégicas, abordando pontos fortes e fracos internos. Assim, como exalta as oportunidades e identifica as ameaças externas com objetivo de mitigá-las, se tornando um guia para dotar os leitores de conhecimento e ferramentas para montarem suas próprias análises SWOT. O Quadro 5 ilustra um modelo ou predefinição para a Análise SWOT.

**Quadro 5 – Predefinição para a análise SWOT.**

Objetivos		Favorece	Contraria
Fatore	Internos	Forças ( <i>Strengths</i> )	Fraquezas ( <i>Weaknesses</i> )

s	<b>Externos</b>	Oportunidades ( <i>Opportunities</i> )	Ameaças ( <i>Threats</i> )
---	-----------------	--	----------------------------

Fonte: Adaptado de Sarsby, 2012.

Gürel (2017) em seu artigo: *SWOT Analysis: a Theoretical Review*, faz uma revisão bibliográfica sobre a Análise SWOT, de natureza qualitativa e descritiva, importante para quaisquer áreas que requeiram planejamento estratégico. Explica a posição da Análise SWOT no processo de gestão estratégica, examinando e explicando como caracterizar os componentes da Análise SWOT para cada situação gerencial, enfatizando suas vantagens para as tomadas de decisão.

No intuito de elaborar um guia prático para elaboração da análise SWOT, Sarsby (2012) indica os seguintes atributos práticos: (i) os pontos fortes são características que lhe conferem vantagens competitivas; (ii) as fraquezas consistem em características que são desvantagens em relação aos demais; (iii) as oportunidades são os elementos que poderiam explorar em seu benefício e; (iv) as ameaças são elementos que poderiam causar problemas para o negócio ou projeto.

Em geral, os fatores internos são aqueles que estão no ambiente de controle da entidade ou grupo que realiza o trabalho, como os recursos humanos, financeiros, físicos, instalações, equipamentos, atividades, experiências, interesses. Portanto, é importante analisar todo o contexto interno que possa impactar os resultados.

No entanto, nem tudo é possível ter sob controle, e é aí que entram os fatores externos, sobre os quais temos pouco ou quase nenhum controle ou influência. Esses estão as legislações, política, economia internacional e nacional, fontes de financiamentos, demografias, ambiente físico, mudanças tecnológicas, eventos extraordinários, mudanças culturais, enfatizando que deve ser analisado todo o contexto externo para que o método seja eficaz.

A ferramenta SWOT é importante para o planejamento estratégico porque usa todos os fatores que podem ser a favor ou contra do que se deseja aplicar, ou seja, nos dá uma visão geral (Kumar, 2023). Portanto, para a avaliação da inserção do hidrogênio na matriz energética dos países deste estudo, é uma ferramenta essencial.

## 2.6 ANÁLISE PESTEL

Uma análise PESTEL é uma estrutura ou ferramenta utilizada por profissionais de marketing para analisar e monitorar os fatores macroambientais (ambiente

de marketing externo) que impactam uma organização, empresa ou setor. Ela examina os fatores políticos, econômicos, sociais, tecnológicos, ambientais e legais do ambiente externo, de onde vem a sua nomenclatura (Fosher, 2018). Apesar de ser amplamente utilizada no marketing, essa ferramenta dá condições para ser empregada em diversas áreas.

A análise PESTEL foi descrita de forma pioneira no livro de Francis Aguilar, em 1967 intitulado: "*Scanning the Business Environment*", sendo seguido neste tema em várias outras obras por vários autores (Kourteli, 2000). Em trabalho posterior, Correira (2017) faz uma revisão sistemática do tema enfatizando a importância de se escanear o ambiente de negócios, justificando o uso dessa ferramenta de gestão. Para uma melhor compreensão sobre a ferramenta PESTEL, Rashid (2023), define melhor os fatores que a constituem, os quais estão mostrados no Quadro 6.

Conforme mostrado no Quadro 6, são seis os fatores analisados separadamente, no entanto, eles são interligados, por exemplo, quando se analisa o fator econômico, este está diretamente relacionado à política e reflete na questão social, tecnológica e ambiental. Portanto, apesar de estarem relacionados, a análise separada possibilita um melhor detalhamento e identificação do que pode ser um ponto forte ou fraco.

**Quadro 6** – Modelo/predefinição para análise PESTEL.

	<b>Fator</b>	<b>Definição do fator</b>
<b>P</b>	Político: <i>Political</i>	Políticas públicas que influenciam o mercado como políticas tributárias e restrições comerciais, estabilidade política, legislação, impostos e regulamentação do negócio.
<b>E</b>	Econômico: <i>Economic</i>	Inflação, taxas de câmbio, taxas de juros, desemprego, poder de compra da população, crescimento econômico e demais indicadores macroeconômicos.
<b>S</b>	Social: <i>Social</i>	Hábitos de consumo, estilos de vida, valores, cultura, tendências de mercado, mudanças demográficas, Conscientização ambiental, mudanças comportamentais dos consumidores.

<b>T</b>	Tecnológico: <i>Technological</i>	Avanços tecnológicos, mudanças nas ferramentas e processos, inovação e outros fatores que podem impactar a produção e como seu público usa a tecnologia e a que tem acesso.
<b>E</b>	Ambiental: <i>Environmental</i>	Ecologia, mudança climática, poluição, sustentabilidade, uso de recursos naturais, energias renováveis, regulamentação ambiental.
<b>L</b>	Legal: <i>Legal</i>	Ambiente regulatório, leis, regulamentações, padrões de segurança, direitos autorais, normas, aspectos legais internacionais.

Fonte: Adaptado de Rashid, 2023.

A análise PESTEL já foi utilizada em vários trabalhos, inclusive em estudos na área de transição energética. Marahatta (2013) elaborou análise PESTEL em relação às tecnologias de hidrogênio. Seu objetivo neste artigo foi explorar tecnologias sustentáveis impulsionadas pelo hidrogênio, visando soluções de energia mais limpa em meio às crescentes preocupações ambientais e ao declínio dos recursos de combustíveis fósseis, analisando seus impactos macroambientais e examinar as interações dentro do setor de hidrogênio. O objetivo foi compreender a viabilidade econômica e a integração estratégica das tecnologias de hidrogênio nas estruturas globais de energia, a fim de aproveitar ao máximo as capacidades do hidrogênio e aumentar a segurança energética e a sustentabilidade ambiental. Como resultado, Marahatta (2013) criou o quadro que está mostrado na Quadro 7.

Spilleir *et al.* (2024) também usou PESTEL para fazer uma análise do caso brasileiro nos segmentos políticos, econômicos, sociais, tecnológicos, ambientais e legais, chegando a conclusões que o segmento político impacta significativamente o potencial de desenvolvimento do setor de hidrogênio, enquanto o segmento econômico representa diversas ameaças, e os segmentos tecnológico, legal e ambiental representam oportunidades significativas.

**Quadro 7** – Fatores da análise PESTEL em relação às tecnologias de hidrogênio.

<b>Fatores Políticos</b>	<b>Fatores Econômicos</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Apoio global à inovação em hidrogênio.</li> <li>– Criação de Centros de Hidrogênio e entidades aceleradoras.</li> <li>– Políticas estratégicas nacionais e <i>roadmaps</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Investimentos significativos em hidrogênio verde.</li> <li>– Redução de custos por meio de avanços tecnológicos.</li> <li>– Oportunidades de diversificação econômica.</li> </ul>
<b>Fatores Sociais</b>	<b>Fatores Tecnológicos</b>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tecnologia atendendo às preferências dos consumidores.</li> <li>- Mudança social em direção ao transporte sustentável.</li> <li>- Campanhas de conscientização moldando a percepção pública.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Avanços na eletrólise e em células a combustível.</li> <li>- Parcerias contínuas de pesquisa.</li> <li>- Progresso acelerado na tecnologia.</li> </ul>				
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;"><b>Fatores Ambientais</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Hidrogênio verde alinhado com a sustentabilidade.</li> <li>- Tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS) para mitigação de emissões.</li> <li>- Soluções de armazenamento eficientes e seguras.</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>	<b>Fatores Ambientais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hidrogênio verde alinhado com a sustentabilidade.</li> <li>- Tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS) para mitigação de emissões.</li> <li>- Soluções de armazenamento eficientes e seguras.</li> </ul>	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th style="padding: 5px;"><b>Fatores Legais</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Políticas e incentivos de apoio.</li> <li>- Normas de segurança para implementação responsável.</li> <li>- Estímulo à inovação por meio de estruturas legais.</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>	<b>Fatores Legais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Políticas e incentivos de apoio.</li> <li>- Normas de segurança para implementação responsável.</li> <li>- Estímulo à inovação por meio de estruturas legais.</li> </ul>
<b>Fatores Ambientais</b>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hidrogênio verde alinhado com a sustentabilidade.</li> <li>- Tecnologias de captura e armazenamento de carbono (CCUS) para mitigação de emissões.</li> <li>- Soluções de armazenamento eficientes e seguras.</li> </ul>					
<b>Fatores Legais</b>					
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Políticas e incentivos de apoio.</li> <li>- Normas de segurança para implementação responsável.</li> <li>- Estímulo à inovação por meio de estruturas legais.</li> </ul>					

Fonte: Adaptado de Marahatta, 2013.

Baumgarten *et al.* (2025) escreveu sobre a transição para uma economia baseada em hidrogênio e sobre a necessidade de uma abordagem diferenciada para o desenvolvimento de métricas para avaliar se um país está se preparando ou está preparado para a economia do hidrogênio. Concluiu que critérios econômicos, como incentivos ao investimento, fatores como lei e ordem, desempenho da governança, geografia, infraestrutura e potencial de produção de energia renovável impactam significativamente a atratividade de uma localização usando a estrutura PESTEL em 18 estados partes do Oriente Médio e do Norte da África. Os resultados mostraram que os países com melhor classificação pertencem ao Conselho de Cooperação do Golfo, seguidos pelos países do Norte da África.

Iacob, Morgan e Curtis (2025) analisaram as barreiras para a criação de um mercado de hidrogênio usando a estrutura PESTEL com a finalidade de compreender os potenciais desafios e oportunidades na criação desse mercado, tanto usando como base um hidrogênio nacional (dos EUA), quanto oriundo do mercado externo. Na análise internacional (com 43 países), o desenvolvimento de infraestrutura foi o item mais presente identificado como barreira. O quesito desenvolvimento de infraestrutura incluiu infraestrutura para armazenamento, transporte e distribuição de hidrogênio. A segunda barreira mais identificada estava relacionada à necessidade de desenvolvimento de mercado para o hidrogênio. Na análise nacional, os resultados da análise qualitativa confirmaram uma variabilidade considerável entre regiões e origens das partes interessadas. As barreiras vistas como tendo o maior impacto na implantação de projetos de hidrogênio foram a falta de clareza regulatória e a falta de conhecimento e conscientização dos tomadores de decisão. No cenário nacional, as barreiras mais

frequentemente apresentadas foram a necessidade de suporte à demanda do mercado e a necessidade de desenvolver uma força de trabalho voltada para o setor de hidrogênio.

Kansongue, Juguna e Vertigans (2023) usaram tanto a análise PESTEL quanto a SWOT para analisar a situação do Togo, país que continua a depender do uso de formas tradicionais de energia de biomassa, o que causa enormes riscos socioeconômicos, ambientais e à saúde. Além disso, a distribuição e o uso desequilibrados de eletricidade, petróleo e gás liquefeito refletem a desproporção na renda e na qualidade de vida no país. Com isto, as análises PESTEL e SWOT, são utilizadas para avaliar os fatores internos e externos em relação ao desenvolvimento da energia renovável e seu impacto no Togo. O resultado mostra que o desenvolvimento da energia renovável no Togo melhorou na última década e teve algum impacto no desenvolvimento socioeconômico. Essa experiência de aplicar os 2 métodos de forma complementar incentiva como referência que outros autores também assim o façam.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a descrição da metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho.

#### 3.1 ABORDAGEM DO ESTUDO

Esta pesquisa pode ser classificada como exploratória e bibliográfica, pois busca compreender, comparar, analisar e propor estratégias para uma possível inserção do hidrogênio como vetor energético nas matrizes energéticas do Brasil e do Paraguai.

A pesquisa exploratória se caracteriza pela existência de poucos dados disponíveis. E a pesquisa bibliográfica é feita com base em documentos já elaborados (Santos, 2012).

#### 3.2 ANÁLISE DAS MATRIZES ENERGÉTICAS

Para identificar as matrizes energéticas, do Brasil e do Paraguai, foi realizada uma pesquisa documental, nos documentos oficiais divulgados publicamente, por entidades e órgãos públicos de cada país. No Brasil a busca foi realizada em três órgãos: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME) e Ministério de Ciência, Tecnologia, Inovação e Comércio (MCTIC). No Paraguai, foi consultado somente o *Viceministerio de Minas y Energia* (VMME). As informações globais foram pesquisadas no *International Energy Agency* (IEA) e no *World Energy Council* (WEC).

Na busca foram utilizadas as palavras-chave “matriz energética”, “balanço energético”, “Brasil”, “Paraguai”, nos arquivos de Balanço Energético Brasileiro (BEN) da EPE e do VMME, entre o período de 2020 a 2024, identificando sua composição, balanço energético, fontes predominantes, potencialidades regionais e desafios para a transição energética sustentável.

Após a seleção dos documentos, foi realizada a análise quanto a presença das seguintes informações: principais fontes de energia, percentual de energias renováveis e não renováveis, balanço energético, dentre outras informações, assim como artigos internacionais publicados sobre a transição energética de outros países, para fins de comparação e embasamento para a análise realizada neste trabalho.

Na análise das soluções em termos de matrizes energéticas foi utilizada a metodologia *Demand Side Management* (DSM, que significa Gerenciamento pelo Lado da Demanda, GLD) (Camargo e Teive, 2006). Esta análise estuda o lado da demanda de energia a fim de atuar na gestão desta demanda para ela poder se adequar de forma otimizada à capacidade da oferta de forma a melhorar a eficiência energética (Miguel, 2003).

Esse recurso é interessante ser utilizado quando se deseja postergar investimentos em novas fontes geradoras ou quando não há tempo hábil para entrada no sistema dessas novas fontes. Com isso este trabalho propõe que o ONS passe não só a despachar a geração das usinas geradoras do Sistema Integrado Nacional, mas também fizesse a gestão da operação dos consumidores eletrointensivos em casos em que haja risco à operação do sistema ou ao fornecimento de energia.

### 3.3 POLÍTICAS PÚBLICAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

O levantamento das políticas públicas de transição energética relacionadas ao hidrogênio e das metas governamentais foi realizado por meio de consultas nos órgãos governamentais em ambos os países. Para o Brasil as buscas foram realizadas na Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH<sub>2</sub>), o Ministério de Minas e Energia (MME), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a regulamentação e legislação, e na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a normatização. E para o Paraguai, foi realizado no *Viceministerio de Minas y Energia* (VMME) e no *Instituto Nacional de Tecnología, Normalización y Metrología* (INTN) as normas técnicas.

Como no Paraguai, existe o uso intensivo da biomassa florestal como energia, foi necessário recorrer ao *Instituto Forestal Nacional* (INFONA, 2016) para pesquisar as políticas públicas relacionadas a área de reflorestamento, visando mitigar a degradação das suas áreas nativas verdes. Este instituto é responsável pela gestão e bases de dados dos recursos florestais do país, pela Política Florestal Nacional e pelo Plano Nacional de Restauração Florestal. Este levantamento buscou identificar no processo de inserção do hidrogênio na transição energética, as estratégias que cada país está adotando, desde o planejamento até a legislação existente. Para isso, foram analisados os planos estratégicos, programas de incentivo, diretrizes regulatórias e compromissos nacionais e internacionais assumidos pelo Brasil e pelo Paraguai, bem como acordos de cooperação.

A identificação das barreiras e estratégias que podem ser utilizadas, por

serem eficazes, para a inserção do hidrogênio nas matrizes energéticas e sua integração aos mercados interno e externo foi baseada nas seguintes experiências, além das pesquisas em bases bibliográficas:

- Planejamento Estratégico da Itaipu (2004 a 2011): elaboração do Objetivo Estratégico 9 (OE9): “Constituir-se como referência no desenvolvimento de investigação tecnológica de hidrogênio, como fonte alternativa de energia”.
- Convênio com a Unicamp (2005 a 2010): Assessoria Técnica e Científica para o Programa do Hidrogênio na Itaipu Binacional e formação acadêmica de pós-graduação de recursos humanos.
- Convênio com a Eletrobras (2011 a 2014): Construção da Planta de Produção e do Laboratório de Hidrogênio do Parque Tecnológico Itaipu.
- Convênio com o PTI, atual Itaipu Parquetec, (2014 a 2022): Criação do NUPHI – Núcleo de Pesquisas em Hidrogênio.
- Participações em fóruns nacionais e internacionais.

### 3.4 ANÁLISE DOS DADOS

#### 3.4.1 Análise Das Políticas Públicas

Na análise das políticas públicas foram utilizadas as análises SWOT (Macedo, Peyerl e Silva Filho, 2025) por ser uma ferramenta clássica para indicar riscos, oportunidades, problemas e vantagens, pontos fortes, fracos e ameaças. E para avaliar os segmentos político (por exemplo, gestão governamental), econômico (por exemplo, indicadores macro e microeconômicos), social (por exemplo, padrões e tendências no comportamento social), tecnológico (por exemplo, pesquisa e inovação), ambiental (por exemplo, características e problemas no ambiente natural) e legal (por exemplo, regras, regulamentação e leis) foi utilizada a estrutura PESTEL (Spilleir *et al.*, 2024) para direcionar as decisões gerenciais objetivando a melhoria do desempenho dos planos de ação (Marahatta e Safari, 2024).

#### 3.4.2 Análise Técnica E Econômica

Para análise técnica, foram comparados os dados de forma a evidenciar os mais significativos. No caso da análise econômica, foram comparados os custos das diversas fontes disponíveis para o fornecimento da energia necessária para suprir a demanda para a produção de hidrogênio.

A fim de compreender o impacto do hidrogênio em termos de sustentabilidade, foram comparadas as emissões de gases de efeito estufa dos diversos possíveis usos do hidrogênio a fim de que se possa priorizar os usos mais significativos para a mitigação dos impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis. A abordagem comparativa permitiu evidenciar os benefícios potenciais da incorporação do hidrogênio em diferentes setores da economia e realizar a proposição da inclusão do hidrogênio na matriz energética dos países estudados.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os resultados são apresentados neste capítulo, primeiramente com o levantamento sobre as matrizes energéticas do Brasil e Paraguai, países deste estudo e, posteriormente, discutindo sobre as possibilidades da integração do hidrogênio nesses locais.

### **4.1 ANÁLISE DAS MATRIZES ENERGÉTICAS**

A interdependência energética entre Brasil e Paraguai, evidenciada de forma emblemática pela operação conjunta da Usina Hidrelétrica de Itaipu, constitui um caso singular de cooperação binacional no setor elétrico. Essa interligação transcende os aspectos operacionais e envolve uma complexa rede de fatores geográficos, técnicos, econômicos e políticos, que variam conforme as especificidades de cada território.

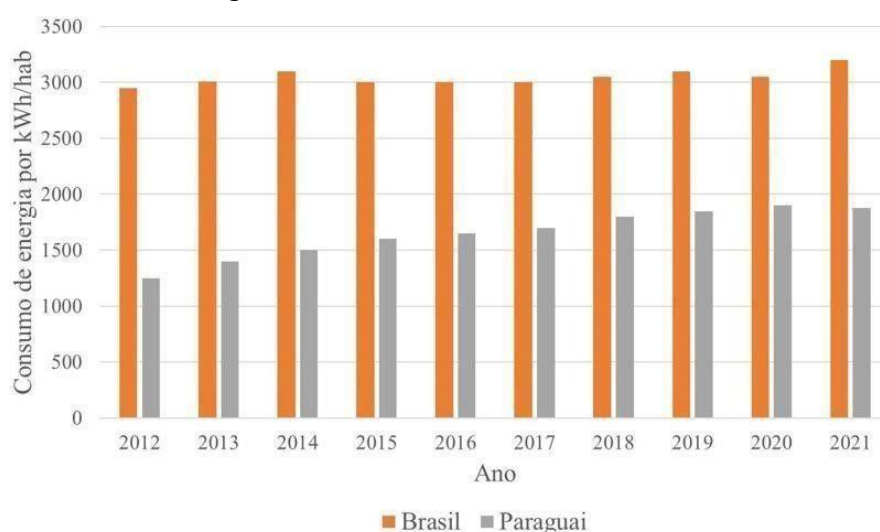
As disparidades e complementaridades entre as matrizes energéticas dos dois países exigem uma análise técnica sistemática de seus balanços energéticos, incluindo atualizações periódicas e avaliações de potencialidades locais e regionais. Além disso, a compreensão dessas dinâmicas deve considerar os condicionantes científicos e sociais que influenciam diretamente as decisões de planejamento e integração energética. Assim, a investigação comparativa entre Brasil e Paraguai fornece uma base relevante não apenas para o entendimento de seus contextos internos, mas também para situá-los frente às tendências globais e regionais em transição energética. Isto abre espaço para discussões

sobre sustentabilidade, segurança energética e desenvolvimento conjunto.

Inicialmente é avaliada a evolução dos balanços energéticos dos dois países deste estudo, apresentando o progresso de cada um. Concomitantemente, são discutidas tendências futuras a partir de sugestões alternativas dentro do conceito de sustentabilidade, com foco na viabilidade do hidrogênio nas matrizes energéticas.

A Figura 5 mostra o consumo de energia per capita no Brasil e Paraguai entre os anos de 2012 até 2021.

**Figura 5** – Consumo de energia (kWh) per capita no Brasil e Paraguai entre os anos de 2012 até 2021.



Fonte: Adaptado de IEA, 2021.

Conforme se vê na Figura 5, o consumo de energia per capita do Paraguai cresceu mais do que o do Brasil de 2012 a 2021. O aumento no consumo de energia elétrica per capita no Paraguai pode ser atribuído a fatores estruturais, econômicos e sociais.

No Brasil, conforme a Figura 5, o consumo de energia per capita é maior que o do Paraguai, apresentando uma oscilação dentro do período estudado, com um maior consumo no ano de 2021.

A evolução do consumo influencia diretamente no planejamento da expansão dos sistemas a fim de que se possa assegurar a oferta de energia necessária à previsão de consumo futuro. Esse planejamento no Brasil é feito pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética, enquanto no Paraguai é feito pelo VMEE – *Viceministerio de Minas y Energía*.

#### 4.1.1 Matriz Energética Brasileira

Os dados energéticos do Brasil são divulgados no documento EPE (2025), apresentado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE, a qual apresenta no ano atual, os valores do ano anterior, portanto os dados de 2025 são equivalentes a 2024 em que a Oferta Interna de Energia (OIE) no país alcançou 322 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), um incremento de 2,4% em comparação ao ano anterior. Das fontes, as renováveis (hidráulica, eólica, fotovoltaica, licor preto e biodiesel) foram equivalentes a 50% da matriz, nível consideravelmente maior do que países que pertencem ao OCDE. As fontes não renováveis se mantiveram quase constantes, somente com um discreto aumento de 0,5%. Como até o momento não foi divulgado um relatório detalhado das fontes de energia e houve pouca variação com relação aos dados de 2023, abaixo está o Quadro 8 com as informações sobre as fontes, sua produção, o volume que foi importado e consequentemente, o valor total ofertado.

**Quadro 8** – Balanço energético brasileiro consolidado com a oferta total de fontes de energia primária para o ano de 2023.

Fontes de Energia Primária	Produção	Importação	Varição de Estoques	Oferta Total
Petróleo	176.038	11.721	356	188.116
Gás natural	54.281	5.692	0	59.974
Carvão/vapor	2.356	2.876	392	5.624
Carvão/metalúrgico	0	7.044	53	7.097
Urânio U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	1.084	4.670	-1.383	4.371
Energia hidráulica	36.636	0	0	36.636
Lenha	27.105	0	0	27.105
Produtos da cana	55.398	0	0	55.398
Outras fontes primárias	38.098	0	0	38.098
<b>Total</b>	<b>390.996</b>	<b>32.004</b>	<b>-582</b>	<b>422.417</b>

\*Valores em 10<sup>3</sup> tep

Fonte: Adaptado de EPE, 2025.

Conforme o Quadro 8, a OIE no Brasil em 2023 foi de 422 Mtep, demonstrando a diversidade da matriz energética, no entanto, ainda dependente de fontes fósseis. A elevada produção nacional, 92,5%, evidencia a autossuficiência energética do Brasil, apesar de ainda importar 32 Mtep. Porém, como o pilar da matriz energética brasileira é o petróleo, tanto na produção, quanto no consumo, existe a necessidade de explorar mais as fontes de energia renováveis, principalmente encontrando uma forma mais eficiente de armazená-las para uso em momentos de maior necessidade.

Comparando os dados de 2023 com os de 2024, segundo informações do EPE (2025), houve um crescimento de 39,7 TWh, ou seja, alta de 5,5 %. Segundo a Figura 6 a oferta interna de energia no Brasil, oriunda da síntese do balanço energético nacional de 2024, com a sua produção interna e importação, o país está explorando cada vez mais as fontes renováveis.

**Figura 6 – Oferta interna de energia no Brasil no ano de 2024**

Renováveis		Não Renováveis	
Biomassa de cana	16,7%	Petróleo e derivados	34,0%
Hidráulica <sup>1</sup>	11,6%	Gás natural	9,6%
Eólica	2,9%	Carvão mineral	4,5%
Lenha <sup>2</sup> e carvão vegetal	8,5%	Urânio	1,3%
LICOR <sup>3</sup> preto e outra renováveis <sup>3</sup>	8,1%	Outras não renováveis <sup>5</sup>	0,6%
Solar <sup>4</sup>	2,2%		
<b>Total</b>	<b>50%</b>	<b>Total</b>	<b>50%</b>

Fonte: Adaptado EPE, 2025.

O grande potencial hidráulico brasileiro e as usinas hidrelétricas instaladas abastecem grande número de cidades com energia elétrica renovável. O potencial eólico está sendo mais explorado com a instalação de novos aerogeradores. O mesmo acontece com a energia solar fotovoltaica, a qual é cada vez mais comum ver painéis solares sobre tetos de residências, bem como usinas fotovoltaicas.

A cana-de-açúcar utilizada na produção de etanol pode ter seu bagaço aproveitado para a geração de bioeletricidade, tendo seu potencial energético destacado (Silva *et al.*, 2021). As outras fontes de energia renováveis consistem em biogás, gás industrial e carvão vegetal.

Das fontes não renováveis, a mais utilizada é o petróleo e seus derivados, sendo parte deste explorado em território brasileiro, mas ainda grande parte é importado. Isto deixa o Brasil dependente de políticas internacionais e mercado externo. Das demais fontes de energia estão o gás natural, gás de alto-forno, gás de aciaria, gás de enxofre e outras (EPE, 2025).

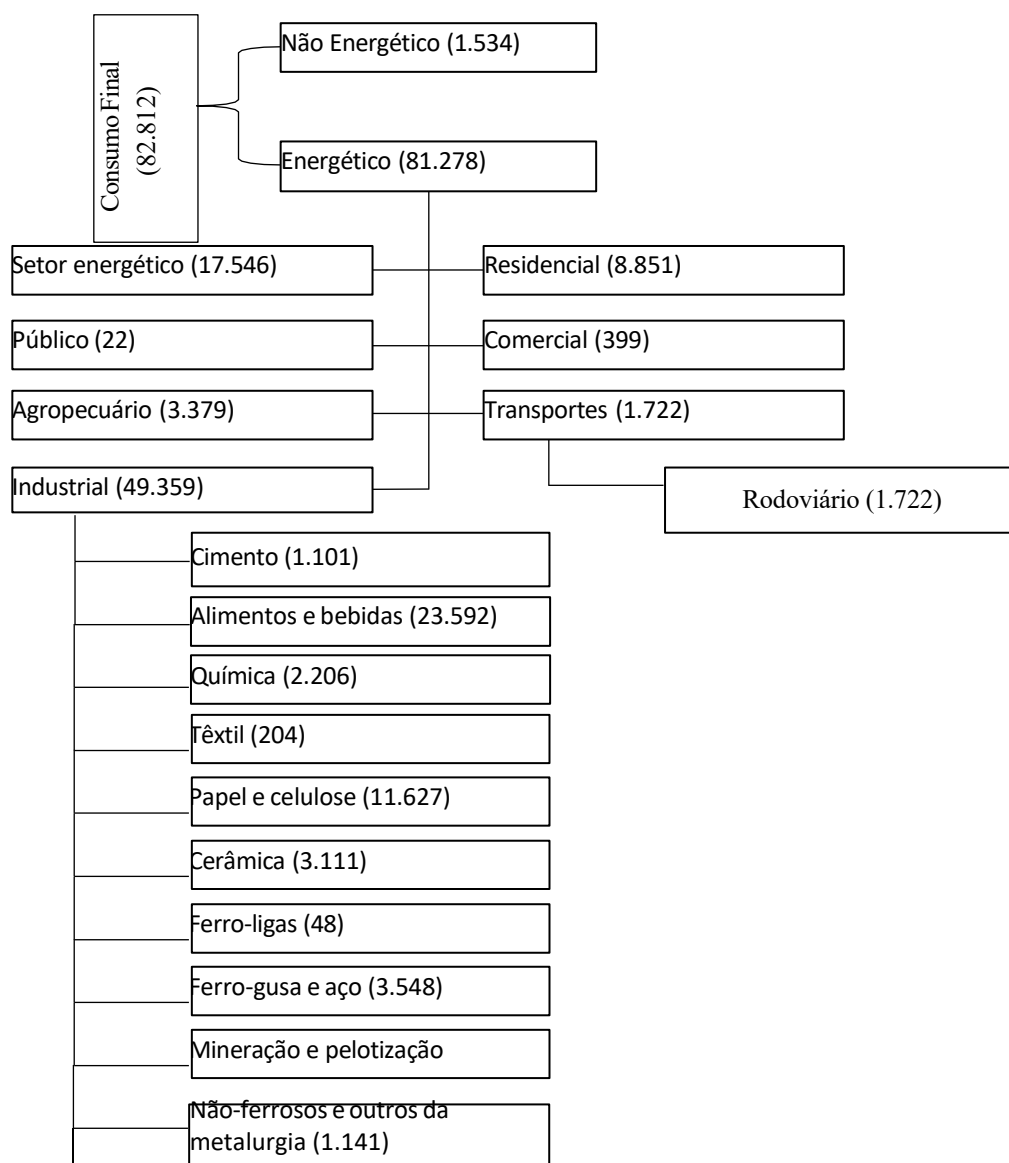
Com relação à oferta de energia, o Brasil ainda tem a predominância de energias fósseis não renováveis. No entanto, em termos de energia elétrica essa ordem se inverte, com energias renováveis predominantes.

Neste caso, fica claro que as energias não renováveis não são em sua maioria utilizadas para a produção de energia elétrica, e sim para os demais usos como transportes e indústria. Tal perfil pode ser considerado insustentável, pois traz para a superfície todo aquele carbono armazenado por milhões de anos debaixo da terra, poluindo

as grandes concentrações urbanas e centros industriais. Sendo assim, a substituição das energias não renováveis pelas renováveis nestes segmentos é relevante no objetivo de descarbonização da transição energética.

Os valores apresentados na Figura 7 são em  $10^3$  tep equivalentes ao ano de 2023, pois até o momento, as informações consolidadas de 2024 ainda não foram divulgadas. Portanto, o consumo total foi de 82,8 Mtep, sendo 1,8% deste montante, destinado para fins não energéticos, ou seja, usado como matéria-prima na indústria, e não como fonte de energia para a geração de calor, eletricidade ou movimento. O gás natural e nafta são utilizados como insumos para a produção de amônia, ureia, metanol, plásticos e outros produtos petroquímicos. O gás natural também é usado como matéria-prima de fertilizantes e o carvão como redutor químico na indústria de metais e ligas metálicas (Villela e Zamuner, 2023). Essas informações alertam sobre a necessidade de implementar a transição energética na cadeia produtiva, pois o uso dessas fontes não renováveis também contribui para a emissão de gases de efeito estufa e isso está na contabilidade do carbono.

**Figura 7** – Consumo de energia por setor no Brasil no ano de 2023, valores em  $10^3$  tep.



Fonte: adaptado de EPE, 2024.

A predominância do consumo energético está no setor industrial, o equivalente a 60,7% do total nacional. Esse número demonstra a alta dependência da indústria brasileira de fontes energéticas, assim, para que a descarbonização seja alcançada precisam ocorrer mudanças no setor industrial. Desses, os subsetores que mais consomem energia, em ordem decrescente, são alimentos e bebidas (48%), papel e celulose (23%), ferro-gusa e aço (7%) e química (0,5%). Assim, tanto no setor onde as fontes de energia são matérias-primas, quanto no industrial, o hidrogênio pode ser empregado como uma estratégia para substituir os combustíveis fósseis e assim diminuir as emissões de CO<sub>2</sub>.

O consumo dos energéticos em transportes aparentemente é baixo e está concentrado no modal rodoviário, confirmando o domínio dos combustíveis fósseis líquidos nesse setor. Porém, apesar da sua modesta participação, o setor de transportes é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa, assim uma transição energética demanda mudanças drásticas neste setor. Como alternativas existe a eletrificação de frotas leves e urbanas e o uso de hidrogênio para transporte pesado e de longa distância, devido a maior densidade energética (Nogueira e Varella, 2024).

As residências consomem cerca de 10,9% do total energético, valor devido principalmente ao uso de eletricidade, gás de cozinha e biomassa. Apesar do aumento do consumo de energia solar fotovoltaica nos últimos anos, o hidrogênio também pode ser uma forma de armazenamento de energia.

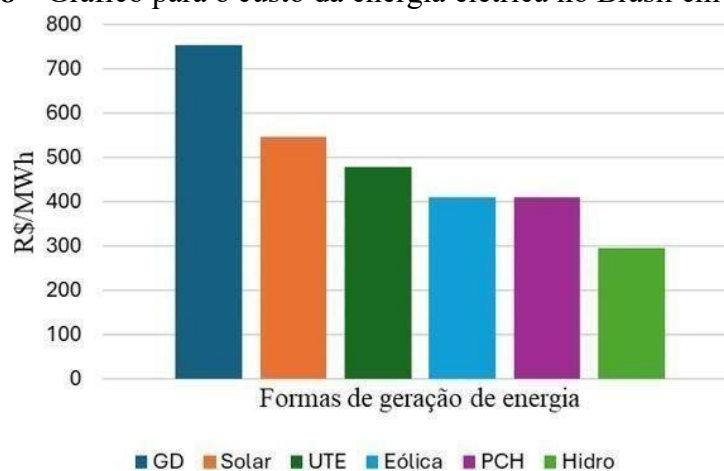
O setor agropecuário também tem um consumo relevante, portanto, se utilizados excedentes de biomassa e outras formas de produção de energia descentralizada, poderia ser produzido hidrogênio. Caso haja um excedente de eletricidade, o hidrogênio também pode ser uma forma de armazenar essa energia.

A análise qualitativa do consumo de energia por setores no Brasil fornece uma base empírica para aplicação dos métodos de SWOT e PESTEL para a avaliação da viabilidade da cadeia do hidrogênio no Brasil.

A partir dos dados apresentados até o momento pode-se ver que o Brasil possui uma elevada disponibilidade energética que atende a todos os setores, sendo

somente uma pequena quantidade de energia importada de outros países. E, segundo o mercado, quanto mais disponível um produto ou serviço, a tendência é que seu custo seja menor. Por isso, a Figura 8 apresenta uma análise comparativa dos custos médios de diferentes formas de geração de energia elétrica no Brasil expressos em reais por MWh. Através da análise de Pareto é possível identificar quais fontes possuem maior peso no custo total da energia, sendo uma ferramenta na tomada de decisões no quesito de transição energética e para a inserção do hidrogênio na matriz.

**Figura 8** – Gráfico para o custo da energia elétrica no Brasil em R\$/MWh.



Fonte: CCEE, 2025.

A geração distribuída (GD) que consiste em produzir energia elétrica próximo de onde será consumida, muitas vezes gerada pelo próprio consumidor, é a que possui um maior custo, pois cada vez mais estão sendo instalados sistemas fotovoltaicos em residências e comércios. Seu maior custo unitário pode ser atribuído à escala reduzida, sem ganhos próprios, com estrutura tarifária específica que não estimula essa produção, além de encargos e custos de conexão. Por este motivo este tipo de geração de energia elétrica não é distribuído uniformemente no país (Galvão, 2021).

Em maior escala dos sistemas fotovoltaicos, a energia solar centralizada apresenta um custo menor, pois as instalações de usinas solares produzem mais energia e conseguem melhor valor. Porém, o custo dos módulos ainda é elevado e fatores como intermitência, custo de capital e necessidade de backup limitam este tipo de produção (Galvão, 2021).

A geração termelétrica (UTE) tem um custo intermediário, porém usa combustíveis fósseis como gás natural ou óleo diesel. Dependendo da sua localização pode ter um custo variado porque o combustível precisa ser transportado até a usina. Apesar de

ser menos intermitente, a queima desses combustíveis provoca impactos ambientais e de emissões indo contra o caminho da descarbonização, além do fato de prejudicarem a saúde da população em geral.

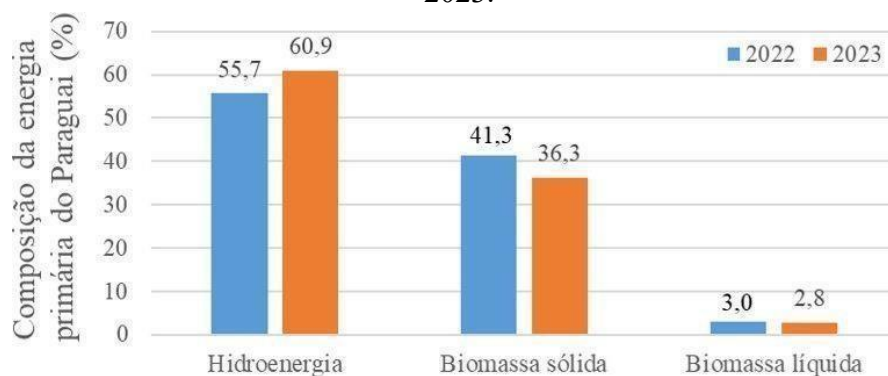
As outras fontes de geração de energia em ordem decrescente de custo são as eólicas, as pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e as hidrelétricas de grande porte. Estas últimas são predominantes na matriz energética brasileira, apresentam competitividade econômica, além da vantagem de que seu excedente de energia pode ser utilizado para a produção de hidrogênio verde. Porém, salienta-se que qualquer tipo de energia elétrica, independente da sua fonte de geração, pode ser utilizada para produzir hidrogênio.

Cabe salientar que os custos da energia elétrica são variáveis de acordo com o mercado, apesar de existir um custo de produção. Tal variação de preço deve ser sempre atualizado pelo site da Câmara de Comercialização de Energia, que opera o mercado comercial de energia no Brasil, atualmente acessado no endereço <https://www.ccee.org.br/>.

#### 4.1.2 Matriz Energética Paraguaia

O Paraguai, diferente do Brasil, revela uma estrutura energética que merece atenção para que se possa alcançar além da segurança, uma sustentabilidade energética. Conforme dados do balanço energético de 2023, a oferta total de energia atingiu 7,0 Mtep, sendo 1,9% maior que em 2022, com o histórico apresentado na Figura 9.

**Figura 9** – Composição da energia primária do Paraguai com base no balanço energético de 2023.



Fonte: Adaptado de BEN PY, 2023.

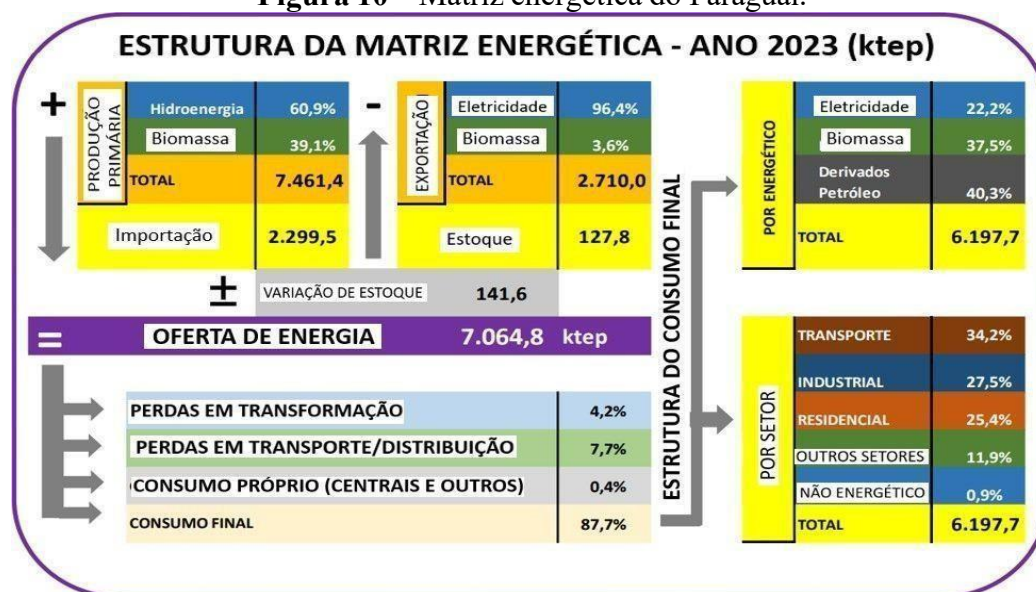
Conforme mostrado na Figura 9, o acréscimo na produção primária de

energia se deu pela elevação na geração hidrelétrica, cuja participação na matriz passou de 55,7% em 2022 para 60,9% em 2023. Em contrapartida observou-se a redução na participação da biomassa sólida que é destinada majoritariamente para uso final energético, 79%, ficando o restante, 21%, direcionados aos centros de transformação como insumo de carbonera para a produção de carvão vegetal. A biomassa líquida tem uma participação muito pequena nessa produção primária de energia (BEN PY, 2023).

O balanço energético histórico do Paraguai demonstra que ele produz muito mais energia do que consome, portanto, parte dessa energia é exportada. Como o aumento da produção de energia de hidrelétrica, devido aos excedentes de energia, o volume de energia disponível para exportação também aumentou. Os países que compram energia elétrica do Paraguai são Brasil e Argentina, com 73,1 e 26,9%, respectivamente. Portanto, pode-se afirmar que o Paraguai é um fornecedor estratégico de energia elétrica no Mercosul, especialmente por meio da Usina Hidrelétrica de Itaipu (BEN PY, 2023).

O que parece vantajoso ter grande volume de energia, inclusive para a exportação, merece atenção, pois a elevada dependência da energia hidráulica é muito boa em termos de sustentabilidade ambiental. Porém existe um risco potencial frente à variabilidade hidrológica, podendo comprometer a segurança energética em períodos de escassez hídrica. Portanto, uma diversificação na matriz energética (Figura 10) pode trazer segurança para o Paraguai a longo prazo, principalmente por possuir um perfil de produção de energia renovável, e seu maior consumo ainda ser não renovável.

**Figura 10 – Matriz energética do Paraguai.**



Fonte: VMME, 2024.

O Paraguai, apesar de suas duas grandes usinas hidrelétricas binacionais, Itaipu em parceria com o Brasil, e Yacyretá em parceria com a Argentina, possui como principais fontes de seu balanço energético o petróleo e a biomassa, ambos representando 41% do consumo final de energia, contra apenas 18% de eletricidade, conforme o Balanço Energético Nacional, em 2022. Enquanto todo o consumo de energia elétrica adveio das suas grandes usinas hidrelétricas, conforme (VMME, 2023).

O consumo de energia tem crescido de forma estável, que reflete o comportamento do crescimento estável da economia. Em relação à biomassa, o alto percentual se deve ao uso intensivo de fornos à lenha (Aguero, 2019).

No tocante aos derivados de petróleo, o país importa o petróleo em sua totalidade por não possuir produção própria (Zuccarino, 2017).

Levando em consideração que todos seus derivados de petróleo são importados, a substituição por hidrogênio traz o benefício agregado de se tornar independente energeticamente.

O Paraguai tem todas as condições de se tornar um grande *player* na produção de hidrogênio tanto para o comércio exterior quanto para seu mercado interno.

Com relação ao comércio exterior, seu grande potencial para produção de hidrogênio para exportação está no seu excedente de energia que atualmente é exportado, podendo ser usado para a produção de hidrogênio.

Enquanto o mercado interno, o destaque é para o potencial de usar o hidrogênio para os transportes, pelo fato de o Paraguai importar a totalidade de seus combustíveis por não ser produtor de petróleo nem gás natural, podendo o hidrogênio substituir os combustíveis fósseis para a mobilidade.

No Paraguai, o preço da eletricidade é igual para todos os segmentos e regulados pela ANDE (*Administración Nacional de Electricidad*), o que se dificulta a competitividade econômica entre os segmentos. Conforme IEA (2021), foi elaborado um mapa de custos regionais projetados, que pode servir de referência para a localização dos empreendimentos de produção de hidrogênio verde na América Latina. Assim, o Paraguai pode se balizar para o planejamento logístico da produção futura. Para o Paraguai esse custo para 2050 fica no intervalo de 1,4 a 1,6 USD/kg H<sub>2</sub> para energia elétrica (IEA, 2021).

Como a produção de energia elétrica no Paraguai se dá por suas usinas hidrelétricas e o seu mercado de energia é feito por sua empresa estatal ANDE, para todo o país com custo uniforme e, por dispor de energia excedente de sua produção para exportação, a energia hidrelétrica se torna a de maior oportunidade para produção de

hidrogênio por já possuir toda infraestrutura montada, reduzindo-se o custo de implementação de novas usinas. Atualmente o preço da energia elétrica no Paraguai, conforme o *pliego de tarifas* N° 21 da ANDE (atualizada em 27 de novembro de 2024), o preço da eletricidade em alta tensão (66 kV) no horário de ponta de carga é de USD 30,88/MWh. Como são necessários 58 kW para produzir 1 kg de hidrogênio e o custo da energia é aproximadamente 70% do custo de produção de hidrogênio por eletrólise, o custo previsto para produção por energia hidrelétrica no Paraguai é de 3,31 USD/kg H<sub>2</sub>.

#### 4.2 POLÍTICAS PÚBLICAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA

Conforme Hoppe (2022), a transição energética está se desenvolvendo com forte multidisciplinaridade, abrangendo ao mesmo tempo o crescimento das energias renováveis e a descentralização dos sistemas de geração, além das ferramentas disponibilizadas pela digitalização dos sistemas, impactando em aspectos regulatórios e na democratização de acesso à energia. Sendo assim, os profissionais deverão estar capacitados com os seguintes conhecimentos: a estrutura geral de funcionamento do setor; conhecimento de mercado; arcabouço regulatório; ferramentas computacionais e de análise de dados; e conhecimento do sistema de energia. Para isso, os países precisam se planejar para que as ações a serem realizadas sejam efetivamente positivas.

O Brasil, apesar de ter sua matriz predominantemente renovável, no ano de 2021 o governo lançou o Sistema de leilões de energia A-3 e A-4 com a finalidade de promover o financiamento de parques eólicos, solares, biomassa e pequenas centrais hidroelétricas. Esses leilões são promovidos pela ANEEL, os quais têm viabilizado a contratação dessas fontes a preços competitivos. No entanto, o crescimento exponencial dessas fontes está intimamente associado ao mecanismo de subsídio governamental, como os descontos nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição. Esses incentivos, embora promovam o aumento da participação renovável, suscitam preocupações quanto à sustentabilidade financeira e à equidade regulatória, uma vez que estão ocorrendo práticas como o fracionamento de usinas para obtenção de subsídios, segundo dados de fiscalização do Tribunal de Contas da União (TCU). Portanto, existe a necessidade de um aprimoramento regulatório que assegure efetivamente a política pública de transição energética sem comprometer a racionalidade econômica e o equilíbrio do setor elétrico nacional (Orlandi *et al.*, 2024).

Além dos leilões, o governo brasileiro tem promovido a transição

energética através de incentivos e financiamentos através do BNDES e do Programa Nacional de Biocombustíveis (RENOVABIO), estimulando o etanol e biodiesel como formas de descarbonização. A Lei nº 15.097/2025 chamada de Lei das Eólicas *Offshore* estabelece o marco legal para a geração de energia elétrica em áreas marinhas no Brasil, como uma forma de produzir energia com incentivos do governo e ao mesmo tempo ter um controle ambiental (Brasil, 2025). Outras formas de incentivo do governo brasileiro é o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>) com o financiamento de projetos na área, além de programas de energia para todos e investindo bilhões em combustíveis de baixa emissão.

No entanto, apesar das políticas de promoção do uso de combustíveis renováveis, o governo brasileiro também tem promovido leilões para exploração do petróleo, inclusive na Amazônia, para a promoção da transição energética (Agência Brasil, 2025).

O Paraguai no seu Plano Nacional de Desenvolvimento 2014-30, se propôs a reduzir em 20% o consumo de combustíveis fósseis e no ano de 2024 lançou a Nova Política Energética com o N° decreto 2.553/2024. Atualmente o VMME está trabalhando na regulamentação da lei N° 3006/2025 do produtor e transportador de energia elétrica. Neste contexto, existem metas para melhorar a estrutura institucional, aumentar a eficiência energética, ampliar projetos de eletrificação rural, aumentar a frota elétrica e expandir a produção de energia renovável e utilizar formas de armazenar o excedente de energia (Brasil, 1998).

Paralelamente, o governo paraguaio tem trabalhado na regulação do uso das fontes renováveis e com projetos estratégicos com o objetivo de promover a energia verde, inclusive promovendo iniciativas em biogás, biomassa e modernização energética.

Sendo a procura por energias renováveis para a substituição aos combustíveis fósseis é fundamental para a sustentabilidade do planeta. Com isso, o hidrogênio especificamente tomou um novo impulso devido ao interesse mundial neste vetor energético por não ser carbonizado. Assim, tanto o Brasil quanto o Paraguai estão trabalhando com ações e políticas em incentivo ao hidrogênio.

#### 4.3 CENÁRIOS DA ENERGIA DO HIDROGÊNIO

Neste item são apresentados o cenário global e da América Latina, analisando a evolução da energia do hidrogênio tanto pelo mundo quanto na região foco

deste estudo.

#### 4.3.1 Cenário América Latina

Na América Latina, 11 países publicaram ou estão preparando estratégias de rotas para o hidrogênio, conforme a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021). Nas fases iniciais de pesquisa e inovação, projetos pilotos e implantação, um planejamento integrado colaborativo poderia tornar mais eficiente os esforços financeiros e científicos, acelerando a aprendizagem e reduzindo o tempo de implantação, desenvolvimento e comercialização, para garantir a adaptação das tecnologias às diversidades de requisitos regionais.

O Quadro 9 apresenta o potencial de hidrogênio de alguns países da América Latina. O quadro revela que a América Latina tem um grande potencial para se tornar um hub de hidrogênio, especialmente hidrogênio de baixo carbono. No entanto, desafios significativos como a falta de marcos regulatórios claros, infraestrutura para transporte e qualificação da força de trabalho precisam ser superados. Países como o Brasil, Chile, Uruguai, Colômbia e Argentina estão em melhores posições para aproveitar o potencial do hidrogênio, mas ainda há um longo caminho pela frente para que o setor se desenvolva de maneira integrada e sustentável na região.

**Quadro 9 – Potencial de hidrogênio na América Latina.**

<b>Critérios analisados em relação ao H<sub>2</sub></b>	<b>Argentina</b>	<b>Brasil</b>	<b>Chile</b>	<b>Colômbia</b>	<b>Uruguai</b>	<b>Equador</b>	<b>Peru</b>	<b>Trinidade e Tobago</b>	<b>Costa Rica</b>	<b>Paraguai</b>	<b>Venezuela</b>
Marco regulatório	X	☺	☺	☺	☺	☺	☑	☺	☺	☺	X
Mercado interno e demanda (América Latina)	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Grandes centros industriais para uso de H <sub>2</sub>	☑	☑	☺	☑	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
Infraestrutura para transporte	X	☺	☺	X	☺	X	X	X	X	X	X
Excesso de energia verde para usar na eletrólise	X	☺	☑	X	☑	☺	X	X	☑	☑	X
Grande indústria de petróleo e gás para apoiar o hidrogênio azul	☑	☑	X	☑	X	☺	☺	☑	X	X	☑
Habilidade da força de trabalho	☺	☺	X	X	X	X	X	☺	☺	X	X
H <sub>2</sub> azul ou cinza em produção	☑	☑	☑	☺	☑	X	☑	X	X	X	X
H <sub>2</sub> verde em produção	☑	☑	☑	X	☺	X	X	X	☺	X	X

Apoio do governo	🟡	🟢	🟢	🟡	🟢	🟡	🟡	🟢	🟢	🟢	🟡
------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Nota: X não existe. 🟡 em processo 🟢 existe

Fonte: Adaptado de IPEA, 2022.

Segundo os dados apresentados, o Brasil e o Chile são os que apresentam maior número de critérios consolidados, ou em processo avançado de estruturação para viabilizar o uso e a exportação de hidrogênio de baixa emissão (verde e azul). Ambos os países apresentam demanda interna relevante, grandes centros industriais, excesso de energia renovável para eletrólise, além de apoio governamental estruturado.

O Brasil destaca-se por já possuir produção de hidrogênio cinza ou azul, além de outros projetos de hidrogênio em andamento, infraestrutura industrial consolidada e política energética em desenvolvimento, apesar de ainda não possua marcos regulatórios definitivos e plena estrutura de transporte. O Paraguai, embora tenha alta disponibilidade de energia hidroelétrica excedente, carece de infraestrutura, centros industriais e políticas públicas definidas, apesar de algumas em construção, possui um elevado potencial para a produção de hidrogênio verde.

Uruguai, Colômbia e Costa Rica encontram-se em processo intermediário de desenvolvimento, com importantes avanços regulatórios e industriais, mas ainda enfrentam desafios estruturais, principalmente em transporte e recursos humanos. Venezuela apresenta cenário mais limitado, com ausência de marcos regulatórios, infraestrutura e demanda interna, o que retarda sua inserção nas cadeias globais de hidrogênio. Peru tem uma proposta de regulamentação da lei de fomento do hidrogênio de baixa emissão de carbono e Equador tem uma "*Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde*" e uma "*Estrategia para la Producción de Hidrógeno Verde*".

#### 4.3.2 Cenário Do Hidrogênio No Brasil

Conforme EPE (2024), a participação das energias renováveis na Oferta Interna de Energia (OIE) tem se mantido em um patamar altamente elevado ao longo do tempo, atingindo 49,1% em 2023. Isso mostra que o Brasil vem praticando ações que visam à transição energética por meio da inserção de novas fontes renováveis em sua matriz energética.

Analisando a Figura 4, houve um aumento nos últimos anos da diversificação das energias renováveis na matriz energética a partir do desenvolvimento

das fontes eólica e solar, permitindo melhorar os níveis de confiabilidade no fornecimento, mesmo com oscilações da oferta das demais fontes de energia da matriz energética. A participação de fontes renováveis na matriz energética foi marcada pelo aumento da oferta interna de biomassa, eólica e solar. Portanto, um melhor aproveitamento das energias renováveis consiste em encontrar uma forma de armazenamento para utilizá-la em momentos de maior demanda, sendo aí que está inserido o papel do hidrogênio.

Conforme Kannah *et al.* (2021), o hidrogênio é um combustível limpo que pode fornecer incentivos energéticos e reduzir os impactos ambientais, se a plataforma de produção for cuidadosamente selecionada e otimizada. Porém, não basta ter disponibilidade de matéria-prima, tecnologias, e recursos humanos, mas é necessária uma estrutura política e regulatória para garantir a produção e aproveitamento das fontes energéticas na produção e uso do hidrogênio (Mito, 2022).

Dessa forma, cria-se a necessidade da sua regulação, que versa de maneira indistinta ou conjunta a regras em geral, sejam elas legislativas, regulamentares ou técnicas.

A estruturação do hidrogênio ainda é incipiente no Brasil e Paraguai, seguindo o exemplo do restante da América Latina em geral, mostrando a necessidade de esforços para os avanços necessários. Em termos mundiais, exemplos encontrados nos países da Europa e nos Estados Unidos podem ser estudados e seguidos, mas sempre com o cuidado de serem adequados às realidades e necessidades típicas de cada país.

No Brasil, alguns projetos estão em andamento e outros sendo anunciados, conforme mostrado na Figura 11. Conforme pode ser visto na figura, destacam-se projetos no nordeste, sudeste e sul, deixando as regiões norte e centro-oeste em segundo plano.

Outra questão importante na regulação seria contemplar remuneração para que os sistemas autônomos de armazenamento de energia recebam receita do despacho de sua energia e potência no mercado do Sistema Elétrico Nacional dos países, para que isso ajude a promover o crescimento de uma variedade de tecnologias de armazenamento, incluindo o hidrogênio.

Políticas de longo prazo para segurança jurídica com incentivo ao uso das tecnologias sustentáveis e restrições às tecnologias poluentes, em especial em áreas de grandes concentrações de emissões como centros urbanos, são estratégicos para o favorecimento do uso mais intensivo das opções não poluentes como a economia do hidrogênio, favorecendo também a saúde pública, o que pode levar ao apoio fundamental

da Organização Mundial da Saúde.

Um caminho que pode facilitar seria um planejamento integrado, reativando e fortalecendo as relações através do Mercosul e seus organismos, em especial para as normas técnicas como Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) e Asociación Mercosur de Normalización (AMN).

#### 4.3.2.1 Regulações energéticas brasileiras e o hidrogênio

Com relação à regulação, dos modelos estudados o norte americano por ser federativo se torna mais simples para ser seguido para os países onde a regulação ainda está sendo elaborada, pois na Europa os países membros possuem regulação própria.

A Figura 11 destaca uma linha do tempo com alguns destaques na regulação brasileira do hidrogênio. O Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>) e das suas Câmaras Temáticas, foi criado de acordo com a Resolução nº 6 de 22 de abril de 2021: realização de estudo para proposição de diretrizes para o PNH<sub>2</sub> (MME, 2021b). Enquanto a Figura 12 apresenta os principais projetos de produção de hidrogênio anunciados em todo território nacional.

**Figura 11** – Linha do tempo com a regulação brasileira em 2024.



Fonte: Autoria própria, 2025.

**Figura 12 – Principais projetos anunciados para o Brasil.**



Fonte: Adaptado de Neves, 2023.

Enquanto a Resolução nº 63 de 23 de junho de 2022 do CNPE (Conselho Nacional de Política Energética) instituiu o PNH<sub>2</sub>, criou o Comitê Gestor do PNH<sub>2</sub> – COGES e criou 5 primeiras Câmaras Temáticas (Brasil, 2022):

1. Fortalecimento das Bases Científico - Tecnológicas sob a Coordenação do MCTI;
2. Capacitação de Recursos Humanos sob a Coordenação do MEC;
3. Planejamento Energético sob a Coordenação do MME;
4. Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo (“Câmara de Regulação”) sob a Coordenação do MME;
5. Abertura e Crescimento do Mercado e Competitividade sob a Coordenação do ME.

Em 2024 foi aprovado o Projeto de Lei (PL) 3.027/2024, que institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC), foi

publicado no DSF nº 131, páginas 533-542, em 14 de agosto de 2024 (Guimarães, 2024).

No Plano Nacional de Energia 2050 (EPE e MME, 2020) de dezembro de 2020, o hidrogênio é descrito como uma tecnologia disruptiva e aparece como elemento estratégico no contexto da descarbonização da matriz energética e armazenamento de energia (MME, 2021b).

Conforme Castro *et al.* (2022), no final de fevereiro de 2021, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou um documento de trabalho sobre os “Fundamentos de uma consolidação para uma estratégia brasileira de hidrogênio”, que analisa aspectos fundamentais para uma estratégia brasileira de hidrogênio. A cooperação com a Alemanha e com a Associação Germano-Brasileira de Energia é abordada explicitamente no documento.

O Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), decidiu em meados de março de 2021, priorizar o hidrogênio em uma diretriz de pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia. O objetivo da diretriz é alinhar as obrigações de investimento em pesquisa e desenvolvimento de empresas de energia legalmente estabelecidas com uma estratégia de longo prazo do setor de energia.

Em meados de abril de 2021, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) decidiu estabelecer as diretrizes para um Programa Nacional de Hidrogênio, coordenado pelo MME com a participação da EPE, do Ministério de Assuntos Regionais (MDR) e do Ministério da Ciência (MCTI).

Em 4 de agosto de 2021, o Ministério de Minas e Energia (MME) apresentou aos membros do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) uma proposta de diretrizes para um Programa Nacional de Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>).

Outra iniciativa legislativa foi o Projeto de Lei N° 725 - Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável (Prates, 2022).

O Estado do Ceará estabeleceu a 1ª normativa para hidrogênio verde para o licenciamento ambiental, a Resolução COEMA nº 03, de 10 de fevereiro de 2022, dispõe sobre os procedimentos, critérios e parâmetros aplicáveis ao Licenciamento Ambiental no âmbito da Superintendência Estadual do Meio Ambiente (SEMACE) para empreendimentos de produção de hidrogênio verde no Estado do Ceará (COEMA, 2022).

Alguns estados brasileiros estão se destacando: o Paraná, com o Projeto de Lei 53/2023 para estabelecer a política do hidrogênio renovável no estado, e o Ceará, o Projeto de Lei 80/23 institui a Política Estadual do Hidrogênio Verde no Ceará e cria o

Conselho Estadual de Governança e Desenvolvimento da Produção de Hidrogênio Verde.

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), criada pela Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, é regulamentada pelo decreto Nº 5.177 de 12 de agosto de 2004 e tem como atribuição viabilizar a comercialização de energia do hidrogênio no mercado de energia brasileiro, assim como a certificação dos vencedores dos leilões de hidrogênio. A expectativa é que os leilões do hidrogênio movimentem interessados em todo o mundo.

Como operadora do mercado brasileiro de energia, a CCEE tem acesso a todos os registros de contrato de energia elétrica no Brasil, com gestão da medição de geração e consumo da energia em todo o território nacional. Dessa forma, a organização consegue ter em sua base de informações detalhes acerca do processo de geração de todos os agentes e, neste caso, também dos possíveis operadores do hidrogênio no país.

Dessa forma, a organização se tornou apoiadora estratégica das empresas interessadas em participar de leilões e certificadora no caso dos possíveis vencedores.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a entidade responsável pela elaboração das Normas Brasileiras (NBR), elaboradas por seus Comitês Brasileiros (ABNT/CB), Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE).

Para o hidrogênio foi formado o Comitê de Estudos Especiais ABNT/CEE- 067 - Tecnologias de Hidrogênio, cujo escopo é a normalização no campo de tecnologia de hidrogênio, compreendendo sistemas e dispositivos para produção, armazenamento, transporte, medição e uso do hidrogênio, bem como pilhas ou células a combustível de hidrogênio, no que concerne à terminologia, requisitos e métodos de ensaio (Oliveira, 2022).

Esta comissão é espelho do ISO/TC 197 – *Hydrogen Technologies* e trata de Pilhas ou Células a Combustível de Hidrogênio do IEC/TC 105 (conforme acordado com o ABNT/CB-003). Estas normas estão no escopo dos ODS como: ODS 7: Energia Limpa e Acessível e ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura.

O desenvolvimento de normas é algo contínuo e permanente, visando a padronização do assunto. Até este momento, ao pesquisar no Comitê ABNT/CEE-067, os trabalhos que estão sendo realizados e desenvolvidos, foram encontrados os projetos:

- 067:000.000-003-7-1 Tecnologia de células a combustível - Parte 7-1: Métodos de ensaio - Ensaio de desempenho de célula única para células a combustível de eletrólito de polímero (PEFC).

- 067:000.000-005 Geradores de hidrogênio usando eletrólise da água

—  
Aplicações industriais, comerciais e residenciais.

- 067:000.000-006-485 Vocabulário Eletrotécnico Internacional (IEV) - Parte 485: Tecnologias de células a combustível.
- ABNT IEC/TS 62282-7-2 Tecnologias de células a combustível - Parte 7- 2: Métodos de ensaio - Ensaio de desempenho de célula única e pilha para células a combustível de óxido sólido (SOFC).
- ABNT ISO/TR 15916 Considerações básicas para a segurança dos sistemas de hidrogênio.

#### 4.3.3 Cenário Do Hidrogênio No Paraguai

Conforme já discutido, o Paraguai possui um elevado volume de energia hidroelétrica, mas ainda faz a queima de um grande volume de biomassa devido ao intensivo uso de fornos à lenha (Aguero, 2019). Portanto, o maior quantitativo de energia elétrica

Tomando como referência o baixo percentual de eletricidade, apesar de o país ser um grande produtor de energia, esta energia ainda é em sua maioria para exportação ao Brasil e Argentina através de suas grandes hidrelétricas binacionais.

No tocante aos derivados de petróleo, o país importa o petróleo em sua totalidade por não possuir produção própria (Zuccarino, 2017). Portanto, o Paraguai se caracteriza por ser grande produtor e exportador de eletricidade. Em termos de consumo, o maior é dos derivados do petróleo, seguido de biomassa e por último eletricidade.

Levando em consideração que o Paraguai importa todos os seus derivados de petróleo, a substituição por hidrogênio traz o benefício agregado do país se tornar independente energeticamente.

O Paraguai tem todas as condições de se tornar um grande produtor de hidrogênio tanto para o comércio exterior quanto para seu mercado interno.

Com relação ao comércio exterior, seu grande potencial para produção de hidrogênio para exportação está no seu excedente de energia que atualmente é exportado, podendo ser usado para a produção de hidrogênio.

Enquanto o mercado interno, o destaque é para o potencial de usar o

hidrogênio para os transportes, pelo fato de o Paraguai importar a totalidade de seus combustíveis por não ser produtor de petróleo nem gás natural, podendo o hidrogênio participar da descarbonização dos combustíveis para a área da mobilidade.

#### *4.3.3.1 Regulações energéticas paraguaias e o hidrogênio*

Segundo IEA (2021), vários governos da América Latina estão elaborando rotas e documentos estratégicos sobre o hidrogênio, incluindo o Paraguai.

A Política Energética Nacional 2050 do Paraguai foi aprovada pelo Decreto N° 2553/2024 em 19/09/2024 e fica revogado o Decreto N° 6092 de 10/10/2016.

No que se refere à produção e transporte de energia elétrica, existe a Lei n° 3.009/06 de Produção e Transporte Independente de Energia Elétrica (PTIEE), regulamentada pelo Decreto n° 9.829/2012, que visa agilizar a promoção de processos e dar a oportunidade de o setor privado a participar.

Em 2017, o Paraguai ratificou o Estatuto da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA), que promove a implementação ampla e reforçada, além do uso sustentável de todas as formas de energia renovável (Lei n° 5.984/17).

Além disso, o Paraguai possui a Lei n° 3.239/07 de Recursos Hídricos do Paraguai, que visa regular a gestão sustentável e integral de toda a água e dos territórios que a produzem dentro do território nacional, a fim de torná-la social, econômica e ambientalmente sustentável.

Em janeiro de 2023, o Congresso Paraguaio aprovou a Lei 6977 que regula o fomento, geração, produção, desenvolvimento e o uso da energia elétrica a partir de fontes de energias renováveis não convencionais e não hidráulicas, definindo o hidrogênio verde no seu Artigo 4º, parágrafo 9 como o produzido por eletrólise da água com eletricidade proveniente de fontes renováveis de energia (Paraguay, 2023).

A proposta de estudo “Rumo à rota do hidrogênio verde no Paraguai” responde à Agenda Nacional de Energia (AEN 2019-2023) e propõe o hidrogênio verde como um vetor energético que pode contribuir para o desenvolvimento do setor energético do país, principalmente para o setor de transportes.

Essa visão estratégica e inovadora do uso energético do hidrogênio verde é citada em um número significativo de objetivos e metas da mencionada Agenda, destacando as vantagens do uso energético, aproveitando o grande excedente de hidroeletricidade.

Por meio do Vice Ministério de Minas e Energia (VMME), o roadmap tem como foco principal o transporte, segmento que será estudado e desenvolvido com essa tecnologia com base nas seguintes linhas de ação:

- Linha de Ação 1: Gerar diretrizes estratégicas, marcos políticos, regulamentações e capacidades institucionais e técnicas para o desenvolvimento da economia do hidrogênio verde, como instrumento de transição energética e mitigação das mudanças climáticas.
- Linha de Ação 2: Instalar plantas piloto para a produção de hidrogênio verde a partir da eletrólise da água com energia renovável para seu uso como vetor energético e demonstrar sua viabilidade.

Com isso, se espera em 10 anos produzir H<sub>2</sub>V a um preço inferior a 3 USD/kg H<sub>2</sub>, evitar a emissão de CO<sub>2</sub> em aproximadamente 21.170 toneladas, assumindo um consumo equivalente a 7.358.400 litros de gasolina que serão substituídos pelos 1.168.000 kg de H<sub>2</sub>V produzidos ao longo do período (VMME, 2021).

O Projeto TRES de Cooperação Triangular "Energia Acessível e Sustentável para o Paraguai: Implementando a Política Nacional de Energia" foi um projeto que envolveu Paraguai, Uruguai e Alemanha, tendo como objetivo, entre outros temas, aprofundar o conhecimento e o desenvolvimento de capacidades associadas à geração inovadora e uso de energia como o hidrogênio verde.

O país avança com a regulamentação da Lei 6.977/23 sobre o uso de energia elétrica proveniente de fontes renováveis não convencionais, onde o hidrogênio pode se enquadrar.

Além dessa, o país possui sua primeira norma do hidrogênio, Projeto de Lei 150094/2023 de 15 de outubro de 2023, que implementa o regime jurídico da produção, uso, armazenamento, comercialização, distribuição, transporte e exportação de hidrogênio, além da Estratégia Nacional do Hidrogênio Verde publicada em 2024. O país conta com um Comitê Técnico de Normalização CTN70; Tecnologias do Hidrogênio, até início de 2025 aprovou duas normas paraguaias (Itaipu Binacional, 2025). Pois, a Estratégia Nacional do Hidrogênio Verde, foi apresentada no final de 2024.

Em 12 de outubro de 2023, foi promulgada a Lei 7190/2023 para dotar o país de um marco regulatório sobre Créditos de Carbono para comercialização em mercados internacionais, designando o *Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES)* como autoridade de aplicação, criando o Registro de Créditos de Carbono Nacional, retendo de 3% a 10% dos créditos para transferência de conhecimento a

profissionais e técnicos paraguaios.

O Organismo Nacional de Normalização (ONN) do Paraguai faz parte do Instituto Nacional de Tecnologia, Normalização e Metrologia. Representa o Paraguai nos organismos de normalização internacionais e regionais, como *International Organization for Standardization (ISO)*, *International Electrotechnical Committee (IEC)*, *Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT)* e *Asociación Mercosur de Normalización (AMN)*.

O INTN – Instituto Nacional de Tecnologia, Normalização e Metrologia criou o Comitê Técnico 70 – Tecnologias do Hidrogênio, para coordenar os seguintes participantes designados: O Parque Tecnológico Itaipu Paraguay, a Itaipu Binacional, a *Administración Nacional de Electricidad (ANDE)*, *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)*, universidades, UNA, UNE, UPE e UCA, Petropar, Ministérios ME, MRE e MOPC, empresas ATOME, CIE e *Linde*, *Conacyt* e Congresso Nacional. A 1ª norma a ser elaborada foi priorizar a de terminologia, PNA 70 001 23, de 24 de dezembro de 2023, tomando como referência a normalização espanhola para facilitar a linguagem. A 2ª norma foi a PNA 70 002 24 - Calidad del combustible de hidrógeno.

#### 4.4 ANÁLISE DOS CENÁRIOS PARA O HIDROGÊNIO NO BRASIL E PARAGUAI

Na revisão bibliográfica foi apresentado o Quadro 2 com informações dos órgãos dos EUA responsáveis por regulações na área do hidrogênio. No entanto, precisam ser identificados quais órgãos brasileiros e paraguaios podem ser responsáveis para a regulação nos países, e o Quadro 10 apresenta as respectivas informações.

**Quadro 10** – Órgãos regulatórios para a cadeia do hidrogênio nos EUA, Brasil e Paraguai.

Órgão Americano	Órgão Brasileiro	Órgão Paraguai
<i>Environmental Protection Agency</i> (EPA, Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA)	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADES)
<i>United States Department of Energy</i> (DOE, Departamento de Energia dos Estados Unidos da América)	Ministério de Minas e Energia (MME)	Viceministerio de Minas y Energía (VMME)
<i>Federal Aviation Administration</i> (FAA, Administração Federal da Aviação dos Estados Unidos da América)	Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC)	Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC)
<i>Federal Energy Regulatory Commission</i> (FERC, Comissão Federal de Regulamentação de Energia dos Estados Unidos)	Eletricidade: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) Gás: Agência Nacional do	Eletricidade: Administración Nacional de Electricidad (ANDE) Gás: Dirección Nacional de

	Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)	Hidrocarburos (DNH).
<i>Occupational Safety and Health Administration</i> (OSHA, Administração de Segurança e Saúde Ocupacional)	Ministério do Trabalho e Emprego (MTE)	Ministerio de Justicia y Trabajo (MJT)
<i>Bureau of Safety and Environmental Enforcement</i> (BSEE, Departamento de Segurança e Fiscalização Ambiental)	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA)	Dirección Nacional de Protección Ambiental (DIPA)
<i>Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration</i> (PHMSA, Administração de Segurança de Oleodutos e Materiais Perigosos)	Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)	Dirección Nacional de la Seguridad de la Infraestructura del Transporte (DNSIT)
<i>United States Coast Guard</i> (USCG, Guarda Costeira dos Estados Unidos)	Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ)	Administración Nacional de Navegación y Puertos (ANNP)
<i>Federal Highway Administration</i> (FHWA, Administração Federal de Rodovias)	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT)	Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones (MOPC)
<i>Federal Motor Carrier Safety Administration</i> (FMCSA, Administração Federal de Segurança dos Transportadores Rodoviários)	Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT)	Dirección Nacional de Vialidad (DNV)
<i>Federal Trade Commission</i> (FTC, Comissão Federal de Comércio)	Conselho Administrativo de Defesa Econômica (CADE)	Secretaría Nacional de Defensa al Consumidor y al Usuario (SEDECO)

Fonte: Autoria própria, 2025.

Tendo como base a experiência americana, os órgãos regulatórios brasileiros e paraguaios podem usar os documentos base e adequar a sua necessidade e particularidade. Porém, para um melhor entendimento das necessidades com relação ao hidrogênio, são necessárias análises específicas, as quais podem ser utilizadas as ferramentas com base SWOT e Pestel para avaliação de cenários para o hidrogênio no Brasil e no Paraguai.

#### 4.4.1 Análise SWOT Dos Cenários De Brasil E Paraguai

Segundo Kansongue, Njuguna e Vertigans (2023), a análise SWOT (Strength, Weakness, Opportunity, Threat) é uma ferramenta de gestão que avalia as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças de um negócio ou projeto. É uma matriz que ajuda a identificar os fatores internos e externos que podem impactar no sucesso ou insucesso de um empreendimento.

Os Quadro 11 e Quadro 12, mostram a análise SWOT dos cenários para o hidrogênio no Brasil e no Paraguai, respectivamente.

No cenário brasileiro como pontos fortes se destacam as políticas públicas favoráveis, regulamentação, legislação e potencial de recursos energéticos com matrizes de fontes de energia de maioria renovável.

No entanto, os mercados internos ainda estão pouco desenvolvidos para as possibilidades de uso do hidrogênio, a falta de mão de obra qualificada em todos os segmentos (o que atrapalha o desenvolvimento de projetos) e infraestrutura necessária de produção e distribuição de hidrogênio. Com relação às normas técnicas, o fato de ainda não terem avançado de forma significativa pode ser superado adotando-se normas técnicas internacionais.

Como oportunidades que se apresentam, a produção de fertilizantes é bem promissora pelo fato de o país ser um destaque no agronegócio e depender de importação de fertilizantes. As possibilidades também são grandes para combustíveis sustentáveis para todos os segmentos dos transportes devida à matriz energética com predominância de energias renováveis para a produção de hidrogênio verde (ou de baixo carbono) e geração distribuída, pelo fato de o Brasil possuir ainda vários sistemas isolados do Sistema Interligado Nacional.

Pela análise SWOT, é possível identificar as oportunidades que existem, apesar das ameaças, como a grande distância dos maiores mercados consumidores, como é o caso do europeu, assim como a ameaça da concorrência internacional. Ademais, é

possível identificar os fatores relevantes para a economia do hidrogênio se desenvolver no Brasil. Sendo assim, apesar dos avanços em políticas como pontos fortes e muitas oportunidades, ainda existem fraquezas de infraestrutura, logística e preços, o que ameaça de forma competitiva o mercado.

Uma grande ameaça para o Paraguai é o fato de que, apesar de ser grande exportador de energia no momento por ter usinas hidroelétricas que produzem mais energia do que seu consumo, ainda não tem perspectiva de entrada em operação de novos grandes empreendimentos de geração de energia. Com isso, o excedente de energia que poderia ser usado para produção de energia a curto prazo pode ser exaurido a médio/longo prazo, de acordo com o crescimento do consumo.

Como grande oportunidade existe a possibilidade de uso do hidrogênio para produção de fertilizantes e tirar o país da dependência da sua importação, devido ao desenvolvido agronegócio paraguaio. Outra grande oportunidade a ser considerada é para combustível no transporte fluvial, devida à sua importância para o comércio internacional do país.

Como pontos fortes comuns aparecem as políticas públicas favoráveis, regulamentação, legislação e potencial de recursos energéticos com matrizes de fontes de energia de maioria renovável.

Como oportunidades comuns os mercados internos ainda pouco desenvolvidos para as possibilidades de uso do hidrogênio, a falta de mão de obra qualificada em todos os segmentos (o que atrapalha o desenvolvimento de projetos) e infraestrutura necessária de produção e distribuição de hidrogênio. Com relação às normas técnicas, o fato de ainda não terem avançado de forma significativa pode ser superado adotando-se normas técnicas internacionais.

Como oportunidades comuns se apresentam a produção de fertilizantes e combustíveis sustentáveis para todos os segmentos dos transportes, energias renováveis para a produção de hidrogênio verde (ou de baixo carbono) e geração distribuída, pelo fato de Brasil e Paraguai possuírem ainda vários sistemas isolados das suas redes nacionais.

Pela análise SWOT, Brasil e Paraguai possuem mais oportunidades do que ameaças. Ameaças comuns são a distância dos maiores mercados consumidores a exemplo do europeu e a concorrência internacional.

**Quadro 11 – Análise SWOT para o cenário Brasil.**

<b>PONTOS FORTES</b>	<b>FRAQUEZAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Presença de marco regulatório através de várias Leis, Decretos e Resoluções de incentivo à indústria do hidrogênio.</li> <li>– Possui planejamento contando com um Programa e Plano de Trabalho Trienal para orientar as ações do governo federal no desenvolvimento do setor de hidrogênio.</li> <li>– O Foro Nacional de Normalização está ativo na elaboração das normas brasileiras para as tecnologias do hidrogênio.</li> <li>– Já existe produção de H<sub>2</sub> em diversas rotas tecnológicas renováveis (etanol, hidrelétrica, eólica, solar e biometano) e gás natural, além de iniciativas para exploração do hidrogênio natural.</li> <li>– Desenvolveu projetos demonstrativos como ônibus e embarcações a hidrogênio, produção de hidrogênio por eletrólise da água nas usinas hidrelétricas de Itaipu, Itumbiara e Porto Primavera, além de reformadores a vapor a partir de gás natural e etanol, incluindo atividades empresariais.</li> <li>– Instituições de associações que reúnem empresas do setor (ABH<sub>2</sub> e ABIHV).</li> <li>– Matriz energética com recursos naturais de energias renováveis para produção de hidrogênio de baixo carbono.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– O refino de petróleo é um importante produtor de hidrogênio no país, mas essa produção é utilizada para consumo interno nas refinarias, não havendo mercado para esse produto.</li> <li>– A elaboração das Normas Técnicas precisa ainda evoluir.</li> <li>– Desafios tecnológicos e de custo na infraestrutura de hidrogênio, que exigem soluções metalúrgicas especiais para dutos e tanques, mais caras do que as infraestruturas convencionais.</li> <li>– Formação profissional técnica ainda limitada a P&amp;D. Falta recursos humanos qualificados, tanto no nível operacional quanto no de engenharia e tecnologia, o que significa que o país depende de fornecedores internacionais. A incerteza e o atraso tecnológico da indústria brasileira neste setor agravam o cenário, dificultando a entrada de novos capitais, que geralmente ingressam onde há maior valor agregado.</li> <li>– O uso energético do hidrogênio apresenta desafios tecnológicos e de mercado em toda a sua cadeia de suprimentos, que envolve produção, transporte, armazenamento e consumo.</li> <li>– Carência de ações efetivas para atrair investimentos e gerar um mercado adicional que demande H<sub>2</sub>.</li> <li>– A falta de definição e compreensão do modelo de difusão do hidrogênio na matriz energética dificulta o desenvolvimento da sequência de mercado que catalisará sua indústria.</li> </ul>
<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>AMEAÇAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Cenário Internacional com mercado mundial favorável ao hidrogênio verde como tecnologia viável para a descarbonização das economias.</li> <li>– Demanda interna crescente da Petrobras para seus processos de produção,</li> <li>– Produção de fertilizantes para substituir as importações pelo setor agroindustrial.</li> <li>– Produção do Aço Verde para exportação.</li> <li>– Substituição dos combustíveis fósseis nos setores de transporte rodoviário, fluvial e aéreo.</li> <li>– Armazenamento de energia para eficiência e estabilidade do sistema das fontes intermitentes de energia.</li> <li>– Uso de energia nos períodos fora da ponta e de baixa de demanda, assim como de energia turbinável de escoamento superficial de usinas hidrelétricas para produção de hidrogênio.</li> <li>– Produção de eletrolisadores no Brasil, visto que o país possui a matéria-prima necessária (reservas de níquel).</li> <li>– Os recursos de gás natural disponíveis no país e a tecnologia de captura e armazenamento de CO<sub>2</sub>, permitem a produção de hidrogênio azul.</li> <li>– A mistura de hidrogênio em redes de gás natural pode contribuir para a expansão da demanda e aumentar a eficiência do uso de gasodutos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– O hidrogênio compete com outras soluções de descarbonização, como biocombustíveis e o uso de fontes fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS).</li> <li>– As grandes distâncias: dos consumidores principais internacionais como os países europeus, tornando a distância um desafio.</li> <li>– A concorrência e competição internacional na implementação de ações estruturantes na cadeia de valor para produzir H<sub>2</sub> verde para exportação e consumo local.</li> <li>– Na questão da segurança, o hidrogênio por ser um gás explosivo aumenta a percepção de risco social.</li> <li>– O baixo crescimento da economia e alto endividamento da máquina pública impacta o volume de investimentos públicos e privados, além de reduzir a demanda do consumidor do produto.</li> <li>– As dificuldades para o Operador Nacional do Sistema suprir e operar as altas demandas eletrointensivas dos projetos de produção de hidrogênio.</li> </ul>

Fonte: Autoria própria, 2025.

**Quadro 12 – Análise SWOT para o cenário Paraguai.**

<b>PONTOS FORTES</b>	<b>FRAQUEZAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Presença de marco regulatório através de várias Leis, Decretos e Resoluções no regime jurídico da produção, uso, armazenamento, comercialização, distribuição, transporte e exportação de hidrogênio, e a Estratégia Nacional do Hidrogênio Verde.</li> <li>– Possui a Política Nacional de Energia 2050 (PEN 2050) que visa consolidar uma matriz energética adequada às necessidades do país, garantir a segurança energética, promover a produção de energias alternativas renováveis, reduzir o consumo de hidrocarbonetos e aumentar a inserção de energia elétrica. Além disso, procura introduzir o uso de combustíveis derivados do hidrogênio, implementar medidas de eficiência energética, avançar a integração energética regional, introduzir o gás natural como um novo recurso energético e fortalecer o quadro institucional e as empresas estatais do setor.</li> <li>– Matriz energética com recursos naturais de energias renováveis para produção a curto prazo de hidrogênio de baixo carbono.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Vários setores que poderiam gerar um mercado interno de hidrogênio ainda não estão presentes no Paraguai como produção de petróleo, aço ou fertilizantes.</li> <li>– A elaboração das normas técnicas precisa ainda evoluir.</li> <li>– Não há incentivos fiscais governamentais que apoiem o surgimento do mercado.</li> <li>– A exemplo do Brasil, existem desafios tecnológicos e de custo na infraestrutura de hidrogênio, que exigem soluções metalúrgicas especiais para dutos e tanques, mais caras do que as infraestruturas convencionais.</li> <li>– Formação profissional técnica ainda limitada de recursos humanos: Será necessária a formação de professores para ministrarem os cursos de formação de mão de obra especializada no país.</li> <li>– Dependência externa da importação na cadeia de suprimentos.</li> <li>– Falta de infraestrutura para armazenamento, distribuição, transporte e postos de abastecimento.</li> <li>– Transporte: Grandes distâncias para o transporte de hidrogênio são custosas.</li> <li>– Investimentos: dependência de capital externo para altos investimentos.</li> </ul>
<b>OPORTUNIDADES</b>	<b>AMEAÇAS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Transporte Fluvial: o Paraguai possui a maior frota fluvial da América Latina e a 3ª maior do mundo. Como importa 100% dos combustíveis, seria uma grande oportunidade para o desenvolvimento de embarcações a hidrogênio e/ou derivados como metanol.</li> <li>– Transporte Terrestre: como nesse caso também é dependente das importações de combustíveis seria estratégico reduzir essa dependência, incluindo com veículos a hidrogênio em especial em transporte pesado e de longa distância.</li> <li>– Transporte Aéreo: uma produção própria de combustível sustentável de aviação pode ser estratégica para reabastecer aviões que voam para países que tenham incentivos para esses combustíveis.</li> <li>– Hidrogênio Verde: o Paraguai produz praticamente toda sua eletricidade com energia renovável, gerando oportunidades para a produção de hidrogênio verde.</li> <li>– Exportação: a geração hidrelétrica excede a demanda local e o excedente é exportado para o Brasil e Argentina. Este excedente poderia ser usado para produção de hidrogênio e/ou seus derivados para exportação.</li> <li>– Fertilizantes: o Paraguai é um grande produtor agrícola, sendo em 2024 o 4º maior produtor de soja do mundo com 10,7 milhões de toneladas. A produção de fertilizantes pode reduzir a dependência das importações e impulsionar a produção de hidrogênio.</li> <li>– Geração Distribuída: No curto prazo, pode haver oportunidades concretas para o hidrogênio em ilhas e sistemas isolados, especialmente aqueles que dependem de combustíveis líquidos para geração de energia, com preços marginais muito altos. Esses sistemas podem ter um custo nivelado de eletricidade superior a 200 USD/MWh e sofrem problemas de confiabilidade.</li> <li>– Hidrogênio para armazenar grandes quantidades de energias renováveis intermitentes e sazonais. O Plano Mestre de Geração atualizado da ANDE considera PCHs, usinas PV com baterias de íon-lítio, gás natural e pequenos reatores nucleares (small modular reactors). O hidrogênio é uma alternativa interessante para armazenar grandes blocos de energia durante longos períodos de tempo (semanas ou meses).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Distância: os principais consumidores tendem a ser, a princípio, os países europeus, tornando a distância um desafio, a exemplo do Brasil.</li> <li>– Logística: como o Paraguai não possui porto marítimo, a logística do transporte é afetada, o que pode encarecer os custos.</li> <li>– Concorrência: competição internacional na implementação de ações estruturantes na cadeia de valor para produzir hidrogênio verde para exportação e consumo local, a exemplo do Brasil.</li> <li>– Energia: o aumento do consumo a cada ano no Paraguai faz com que o país use cada vez mais a energia que seria exportada de suas hidrelétricas binacionais, fazendo com que a longo prazo as reservas energéticas para produção do hidrogênio sejam reduzidas,</li> <li>– Carência de ações efetivas para atrair investimentos e gerar um mercado adicional que demande hidrogênio.</li> <li>– O hidrogênio compete com outras soluções de descarbonização, como biocombustíveis e o uso de fontes fósseis com captura e armazenamento de carbono (CCS).</li> <li>– As grandes distâncias: dos consumidores principais internacionais como os países europeus, tornando a distância um desafio.</li> <li>– A concorrência e competição internacional na implementação de ações estruturantes na cadeia de valor para produzir H2 verde para exportação e consumo local.</li> <li>– Na questão da segurança, o hidrogênio por ser um gás explosivo aumenta a percepção de risco social.</li> <li>– Falta de perspectiva de entrada em operação no médio/longo prazo de novas grandes fontes de energia para suprir as demandas eletrointensivas que a produção de hidrogênio necessita.</li> <li>– O gasoduto Argentina - Paraguai, Brasil projetado para entrar em operação em 2030.</li> </ul>

Fonte: Autoria própria, 2025.

#### 4.4.2 Análise PESTEL Dos Cenários De Brasil E Paraguai

Para Jacob, Morgan e Curtis (2025), a análise PESTEL é uma abordagem comum em gestão estratégica para a análise do ambiente de negócios. O método foi introduzido inicialmente em 1967 por Francis Aguilar como forma de auxiliar as empresas a identificar fatores macro ambientais, políticos, econômicos, sociais e tecnológicos que devem ser considerados durante a fase estratégica de desenvolvimento de produtos ou avaliação de mercado.

Segundo Spilleir *et al.* (2024), a análise PESTEL é uma ferramenta de gestão que ajuda a identificar e avaliar fatores externos. Ela se baseia na análise de seis fatores macro ambientais: Político, Económico, Social, Tecnológico, Ambiental e Legal.

Baumgarten *et al.* (2025) considera a análise PESTEL adequada para análise do papel do hidrogênio na transição energética.

Conforme Marahatta (2025) e referenciado no capítulo 2, os fatores para a análise PESTEL dos cenários para o hidrogênio foram os seguintes utilizados:

- P: Fatores Políticos: Apoio global à inovação do hidrogênio, iniciativas como centros de hidrogênio e aceleradores de hidrogênio, e políticas estratégicas e roteiros nacionais.
- E: Fatores Econômicos: Investimentos significativos em hidrogênio verde, redução de custos através de avanços tecnológicos, e oportunidades econômicas diversificadas.
- S: Fatores Sociais: Tecnologia que aborda as preferências dos consumidores, mudança social em direção ao transporte sustentável, e campanhas de conscientização moldando as percepções públicas.
- T: Fatores Tecnológicos: Avanços em eletrólises e células a combustível, parcerias de pesquisa em andamento, e progresso acelerado em tecnologia.
- E: Fatores Ambientais: Hidrogênio verde alinhado com sustentabilidade, tecnologias CCUS para mitigação de emissões, e soluções eficientes e seguras de estocagem.
- L: Fatores Legais: Políticas e incentivos de apoio, normas de segurança para implantação responsável, e fomento da inovação por meio de estruturas legais.

O Quadro 13 mostra a análise PESTEL dos cenários para o hidrogênio no Brasil e no Paraguai. No caso brasileiro a análise PESTEL classifica o cenário em 66%. Indicando que os fatores a serem melhorados, nessa ordem, seriam: econômicos e sociais, tecnológicos e ambientais. Sendo os fatores políticos e legais todos os pontos foram favoráveis.

**Quadro 13 – Análise PESTEL para o cenário do Brasil e do Paraguai.**

	<b>BRASIL</b>	<b>PARAGUAI</b>
<b>FATORES POLÍTICOS</b>		
Apoio global à inovação do hidrogênio	S	S
Iniciativas como centros de hidrogênio e aceleradores de hidrogênio	S	N
Políticas estratégicas e roteiros nacionais	S	S
ST	3	2
<b>FATORES ECONÔMICOS</b>		
Investimentos significativos em hidrogênio verde	N	N
Redução de custos através de avanços tecnológicos	N	N
Oportunidades econômicas diversificadas	S	N
ST	1	0
<b>FATORES SOCIAIS</b>		
Tecnologia que aborda as preferências dos consumidores	N	N
Mudança social em direção ao transporte sustentável	S	N
Campanhas de conscientização moldando as percepções públicas	N	N
ST	1	0
<b>FATORES TECNOLÓGICOS</b>		
Avanços em eletrólises e células a combustível	S	N
Parcerias de pesquisa em andamento	S	S
Progresso acelerado em tecnologia	N	N
ST	2	1
<b>FATORES AMBIENTAIS</b>		
Hidrogênio verde alinhado com sustentabilidade	S	S
Tecnologias CCUS para mitigação de emissões	N	N
Soluções eficientes e seguras de estocagem	S	S
ST	2	2
<b>FATORES LEGAIS</b>		
Políticas e incentivos de apoio	S	S
Normas de segurança para implantação responsável	S	S
Fomentando inovação por meio de estruturas legais	S	S
ST	3	3
<b>ÍNDICES</b>		
<b>Pontuação Total</b>	12/18	8/18
<b>Percentual</b>	66%	44%

Nota: S=Sim (existente), N=Não (não existente) e ST= Subtotal

Fonte: Autoria própria, 2025.

No caso paraguaio a análise PESTEL classifica o cenário em 44%. Precisaríamos ser melhorados nessa ordem: fatores econômicos e sociais, seguidos de fatores tecnológicos, e por último fatores políticos e ambientais. Com relação aos Fatores Legais todos os pontos foram favoráveis.

A análise PESTEL ajuda a responder à pergunta de pesquisa sobre se os

países estão se preparando adequadamente, classificando o cenário brasileiro em 66% e o cenário paraguaio em 44%. Estes valores demonstram que ainda há percentuais significativos de necessidade de melhoria nos cenários de ambos os países.

#### 4.5 ANÁLISE DAS DEMANDAS ELÉTRICAS PARA O HIDROGÊNIO

Conforme Zucarato, Machado e Freiria (2025), existe uma grande preocupação com a possível entrada no Sistema Elétrico Nacional de futuras cargas eletrointensivas, como grandes projetos de produção de hidrogênio e grandes Data Centers.

Conforme Camargo e Teive (2006), uma das formas de se fazer eficiência energética é o Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD), onde as cargas entrando nos horários de menor demanda faz com que a curva de carga diária de energia não seja sobrecarregada nos horários de pico.

Com isso, se o ONS pudesse gerenciar o despacho dessas cargas, assim como já faz o gerenciamento despacho das geradoras de energia pelo lado da oferta, haveria espaço para a produção de hidrogênio nesses horários, nos quais a demanda não está nos seus valores máximos.

No entanto, para que isso aconteça, seria necessária uma mudança na regulação existente, permitindo ao Operador Nacional do Sistema atuar no despacho dessas demandas, ou promovendo incentivos nesses horários para que os usuários migrem de forma voluntária.

##### 4.5.1 Demanda Elétrica Brasileira

A Figura 13 mostra uma semana típica da Curva de Demanda do Sistema Elétrico Interligado. Tomando-se como base a maior demanda ocorrida, tem-se a certeza de que é uma demanda perfeitamente suportável pelo sistema para ser utilizada durante os demais horários de baixa carga do dia.

**Figura 13** – Curva de demandas diárias do sistema elétrico interligado.



Fonte: ONS, 2025.

Com a demanda de pico de 92.784 MW por hora, para saber a demanda de um dia, ou seja, 24 h, multiplicou-se o valor acima pelo número de horas no dia e o valor do consumo diário é de 2.226.816 MWh.

O Quadro 14 mostra as informações retiradas do Boletim Diário da Operação do ONS do dia 17/04/2025, onde ocorreu a demanda média diária de 81.850 MW médios. Multiplicando-se esse valor 81.850 MW pelas 24 horas do dia, chegou-se a um consumo diário de energia 1.964.400 MWh. A diferença entre o consumo que poderia se ter de 2.226.816 MWh e o que realmente ocorreu, 1.964.400 MWh, consiste em uma energia de 262.416 MWh que poderia ser usada na produção de hidrogênio. Tomando-se como base o valor de que são necessários 56,87 kWh para ser produzido 1,0 kg de H<sub>2</sub> (Nasser, 2025), a energia excedente poderia produzir 4.614.313,35 kg H<sub>2</sub> por dia (262.416.000 kWh/56.87 kWh/kg H<sub>2</sub>).

Assim, o valor para o ano seria 4.614.313,35 kg H<sub>2</sub> /dia multiplicado por 365 dias, o que resultaria numa produção de 1,7x10<sup>9</sup> kg H<sub>2</sub> /ano.

Como a EPE (2024) traz como referência que o consumo brasileiro de hidrogênio é de 400 kT de H<sub>2</sub> /ano, seria o suficiente para produzirmos 4,21 vezes o consumo brasileiro anual. Portanto, o Brasil seria um exportador desse gás.

**Quadro 14** – Informações do boletim diário da operação de 17 de abril de 2025.



Fonte:ONS, 2025.

#### 4.5.2 Demanda Elétrica Paraguaia

A Figura 14 mostra uma semana típica da Curva de Demanda do Sistema Elétrico Paraguaio. Tomando-se como base a maior demanda ocorrida, tem-se a certeza de que é uma demanda perfeitamente suportável pelo sistema para ser utilizada durante os demais horários de baixa carga do dia (ANDE, 2021).

**Figura 14** – Curva de demandas diárias do sistema elétrico interligado.



Fonte: ANDE, 2024.

A partir do valor da demanda de pico de 4.925 MW, multiplicando-se pelas 24 horas do dia, poderia ter um consumo de 118.200 MWh. Somando-se toda a energia consumida pelas demandas horárias do dia, houve um consumo de 106.451 MWh no dia. Assim, a diferença entre o consumo que poderia ser de 118.200 MWh e o que realmente ocorreu, de 106.451 MWh, o excedente de energia que corresponde a 11.749 MWh, poderia ser usada na produção de hidrogênio.

Tomando como base 56,87 kWh/kg H<sub>2</sub> (Nasser, 2025), poderiam ser produzidos 206.593,98 kg por dia (11.749.000 kWh/56.87 kWh/kg H<sub>2</sub>). No ano, esse valor seria 206.593,98 kg /dia multiplicado por 365 dias, o que resultaria numa produção de 75.406.804,99 kg H<sub>2</sub> /ano.

O Quadro 15 mostra a exportação de energia do Paraguai. A energia exportada pelo Paraguai foi de 30.389,8 GWh em 2023, a qual poderia ser usada na produção de hidrogênio. Tomando-se como base 56,87 kWh/kg H<sub>2</sub> (Nasser, 2025), seria possível produzir diariamente 0,5x10<sup>9</sup> kg de H<sub>2</sub> (30.389.800.000 kWh/56,87 kWh/kg H<sub>2</sub>).

**Quadro 15** – Detalhe da exportação de eletricidade pelo Paraguai segundo a fonte e destino.

ELETRICIDADE (GWh)	2022	2023	VARIAÇÃO (%)
Argentina (UHE Acaray)	106,6	112,9	5,9
Argentina Excedente (EBY)	6.067,2	8.074,0	33,1
Brasil Excedente (ITAIPU)	17.781,2	22.202,9	24,9
Exportação Total	23.995,1	30.389,8	26,9

Fonte: Adaptado de BEN, 2023.

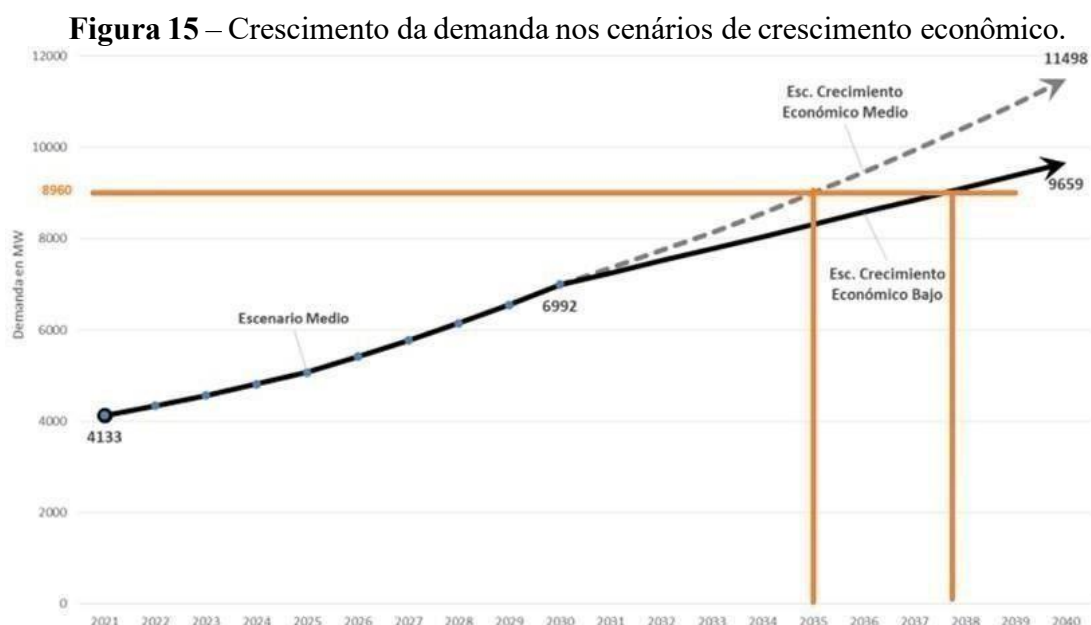
Como a EPE (2024) traz como referência que o consumo brasileiro de hidrogênio de 400 kT de H<sub>2</sub> /ano, seria o suficiente para ser produzido 1,3 vezes o consumo brasileiro anual no caso de ser exportado para o Brasil.

#### 4.5.3 Análise Da Projeção Das Demandas Elétricas Futuras De Paraguai E Brasil

Não menos importante do que as análises das demandas atuais de energia, são as demandas futuras, tendo em vista que ela é necessária para a produção de hidrogênio. E, tendo em vista que existem particularidades na produção e disponibilidade de energia no Brasil e no Paraguai, a análise das previsões será apresentada separadamente.

#### 4.5.3.1 Análise Da Demanda Elétrica Futura Do Paraguai

Em relação ao Paraguai, caso não entre nenhuma energia nova no sistema, essa energia excedente precisaria ser comparada no limite do momento em que a projeção da demanda alcançaria a soma das potências disponíveis ao Paraguai instaladas de Itaipu (7.000 MW, Yaciretá (1.750 MW) e Acaraí (210 MW), dando um total de 8.960 MW, conforme a Figura 15.



Fonte: Adaptado de ANDE, 2024.

Pode-se observar na Figura 15 que o excedente de energia atingiria seu limite entre os anos de 2035 e 2038, dependendo do crescimento econômico, sendo o limite inferior de 2035 caso ocorra crescimento econômico considerado baixo, ou no limite superior o ano de 2038 no caso de ocorrer um crescimento econômico médio.

#### 4.5.3.2 Análise da demanda elétrica futura do Brasil

No caso do Brasil, como não possui excedente de energia para exportação e nossa expansão é planejada apenas para suprir a demanda com leilões periódicos de energia, a disposição de energia excedente acontece somente a curto prazo e de forma sazonal dependendo predominantemente dos índices pluviométricos no caso das hidrelétricas por ser a energia hidráulica a preponderante no Sistema Interligado Nacional.

No entanto, nem toda geração futura está projetada em energia renovável, o que afeta a produção de hidrogênio de baixo carbono, como demonstrado no Quadro 16.

**Quadro 16** – Projeção da demanda energética brasileira.

Cenários	Todas as formas de energia		Energia elétrica	
	10 <sup>6</sup> de tep	% Renovável	10 <sup>3</sup> MW médio	% Renovável
2025	276	60,3	82	93,7
2050 (em estagnação)	290	54,3	102	92,0
2050 (em expansão)	562	54,3	241	92,0

Fonte: Adaptado de PNE, 2050.

O aumento da demanda de energia como um todo em caso de estagnação seria de apenas 5%, mas no caso de expansão será necessário dobrar a capacidade de geração em 25 anos, o que será um grande desafio inclusive em relação às emissões, já que o percentual de energia renovável seria diminuído em 6%. Com isso, aumenta a oportunidade de introdução do hidrogênio em substituição dos combustíveis fósseis.

Já em termos de energia elétrica, o aumento da demanda em caso de estagnação seria de 24%, mas no caso de expansão existe um grande desafio em triplicar a capacidade de geração. Neste caso, se faz necessário uma diminuição do percentual de energias renováveis, de aproximadamente 1,7%, o que não é tão significativo quanto no caso energético como um todo, o que não impactaria tanto na produção de hidrogênio de baixo carbono de forma percentual.

## 5 CONCLUSÕES

Com relação à pergunta de pesquisa: Será que o Brasil e o Paraguai estão se preparando de forma adequada para participarem da “Economia do Hidrogênio”, devido aos possíveis impactos da inserção do hidrogênio como vetor energético com ênfase nas matrizes suas energéticas? E a hipótese: Sim, o Brasil e o Paraguai estão se preparando adequadamente, a análise PESTEL trouxe os índices de 66% para o Brasil e 44% para o Paraguai, sendo que a análise SWOT detalhou forças (Strengths), fraquezas (Weaknesses), oportunidades (Opportunities) e ameaças (Threats), muitas delas comuns ao Brasil e Paraguai. Analisando pelo custo, no Paraguai, o preço da eletricidade é igual para todos os segmentos e regulados pela ANDE. No futuro haverá a necessidade de se adotar uma nova política de preços de acordo com os custos da energia nova que for entrar no sistema, incluindo custos ambientais para a energia nova para favorecer a entrada de energias

renováveis na matriz energética e sempre visando a modicidade tarifária.

Como conclusão das análises SWOT e PESTEL, o Brasil e o Paraguai precisarão criar incentivos para o surgimento de uma demanda do mercado interno para o consumo de hidrogênio e seus derivados, assim como investir na infraestrutura que os seus mercados internos e externos vão requerer.

No Brasil, a análise dos custos por fonte de energia em R\$/MWh mostra que a energia de menor custo para ser priorizada na produção de hidrogênio é a hidráulica, seguida por PCH, eólica, UTE, solar e por último e mais cara a geração distribuída. No caso do Paraguai a tarifa é unificada, portanto sem competição de preços.

Em termos de disponibilidade de energia elétrica, tanto no Brasil quanto no Paraguai a maior disponibilidade de energia é da geração hidráulica para produção de hidrogênio.

Avaliando a contribuição do hidrogênio na promoção da sustentabilidade ambiental e a descarbonização dos sistemas energéticos termos de energia no sentido amplo e não só apenas a elétrica, o gráfico comparativo mostra que tanto no Brasil quanto no Paraguai o petróleo e seus derivados emissores de gases de efeito estufa são amplamente os mais consumidos, comprovando a necessidade de substituição dessas fontes.

No caso do Paraguai, todos os seus derivados de petróleo são importados, fazendo com que sua substituição por hidrogênio traga o benefício agregado de se tornar independente energeticamente.

No caso das demandas futuras, a sobra de energia que o Paraguai exporta que poderia ser revertida para a produção de hidrogênio se esgotaria entre os anos de 2035, no caso de um crescimento baixo da demanda ao longo do tempo, e 2038 no caso de ocorrer um crescimento elevado.

No caso do Brasil, como os leilões de energia são voltados apenas para o mercado interno, não tem sobra de energia para produção de hidrogênio, apenas é possível usar a margem da demanda fora do horário de ponta a curto prazo.

Em ambos os casos de Brasil e Paraguai, como as matrizes de energia elétrica são predominantemente constituídas de energias renováveis, favorecem a produção de hidrogênio de baixo carbono, ressaltando-se a necessidade de que a energia nova seja renovável.

Como sugestão de mudança estrutural interna nos países, haveria a

necessidade de mudança da regulação, permitindo que o Operador Nacional do Sistema (ONS) no Brasil e a Administración Nacional de Electricidad (ANDE) no Paraguai possam gerenciar a entrada em operação fora da hora de pico dessas cargas eletrointensivas como é o caso da produção de hidrogênio, até que haja produção específica para cada uma delas.

E, finalmente, em termos regionais, se criar um planejamento energético e uma regulação integrada para o Mercosul, aproveitando as especificidades e complementaridades dos países membros e respeitando suas regulações próprias, assim como é feito na União Europeia.

Como sugestões para trabalhos futuros, atualizar e aprofundar todas as análises feitas, pois refletem o retrato atual de uma realidade muito dinâmica da economia do hidrogênio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA BRASIL. Petrobras arremata 19 blocos na Foz do Amazonas em leilão da ANP. *Em Tempo*, 17 jun. 2025. Disponível em: <https://emtempo.com.br/409449/amazonas/leilao-anp-petroleo-margem-equatorial-protestos/>. Acesso em: 18 jun. 2025.

ANDE - Administración Nacional de Electricidad. PLAN MAESTRO DE GENERACIÓN PERIODO: 2021 – 2040. Dirección de Planificación y Estudios (DP) División de Estudios Energéticos (DP/EE) Departamento de Estudios de Generación (DP/EDG). Asunción, febrero 2021.

ANDE - Administración Nacional de Electricidad. Resumen de la Institución. Disponível em: [https://www.jica.go.jp/Resource/paraguay/espanol/activities/c8h0vm0000ccs175-atf/activity21\\_14.pdf](https://www.jica.go.jp/Resource/paraguay/espanol/activities/c8h0vm0000ccs175-atf/activity21_14.pdf) e <https://x.com/ANDEOficial/status/1768447839032472002>. Acesso em: 13 abr. 2025.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: Implementação do Marco Regulatório do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono no Brasil. Rio de Janeiro, 2024.

AGUERO, C. R. Projeção de Cenários: República do Paraguai. Foz do Iguaçu: Parque Tecnológico Itaipu, 2019.

AUGUSTO, C.C. Ferramenta da Qualidade. Dissertação. Instituto Politécnico de Tomar, Escola Superior de Tecnologia de Abrantes. Abrantes, jan. 2021.

BAC CN - Biblioteca y Archivo Central del Congreso Nacional Paraguay: Ley N° 6977 de 22 de marzo de 2023 / Regula el Fomento, Generación, Producción, Desarrollo y la Utilización de Energía Eléctrica a Partir de Fuentes de Energías Renovables No Convencionales No Hidráulicas. Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/11281/ley-n-6977-regula-el-fomento-generacion-produccion-desarrollo-y-la-utilizacion-de-energia-electrica-a-partir-de-fuentes-de-energias-renovables-no-convencionales-no-hidraulicas>. Acesso em: 01 mar. 2024.

BAUMGARTEN, J.A.B., CHRISTIAN P. SCHNEIDER, C.P.B.C , MOST, D. *Hydrogen Economy Index – A comparative assessment of the political and economic perspective in the MENA region for a clean hydrogen economy. International Journal of Hydrogen Energy* 101 (2025) 1503–1517. Acesso em: 9 jan. 2025.

BARLOW, I. *Russia's Hydrogen Energy Strategy*. CCSI - Center for Strategic and International Studies Published October 14, 2021. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/russias-hydrogen-energy-strategy>. Acesso em: 17 abr. 2025.

BOCOBZA, J. TANABE, M. TAKAHASHI, S. *On the path to decarbonisation: Japan enacts its first legislation on hydrogen and CCS. White&Case*, 25 June 2024. Disponível em: <https://www.whitecase.com/insight-alert/path-decarbonisation-japan-enacts-its-first-legislation-hydrogen-and-ccs>. Acesso em: 15 abr. 2025.

BOGILA, A. *et al.* Análise Harmônica Nos Inversores Fotovoltaicos de uma Microgeração Fotovoltaica. VII Congresso Brasileiro de Energia Solar – Gramado, 17 a 20 de abril de 2018.

BRASIL. Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997. Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 out. 1997.

BRASIL. Decreto nº 2.553, de 16 de abril de 1998. Regulamenta os arts. 75 e 88 a 93 da Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996, que regula direitos e obrigações relativos à propriedade industrial. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 abr. 1998.

BRASIL. Decreto nº 5.177, de 12 de agosto de 2004. Regulamenta os arts. 4º e 5º da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, e dispõe sobre a organização, as atribuições e o funcionamento da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 ago. 2004.

BRASIL. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 mar. 2004.

BRASIL. Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 ago. 2024.

BRASIL. Lei nº 15.097, de 10 de janeiro de 2025. Disciplina o aproveitamento de potencial energético offshore; e altera a Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, a Lei nº 14.182, de 12 de julho de 2021, e a Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 jan. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 dez.

1996.

BRASIL. Resolução nº 63, 01 de julho de 2022. Institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio, e dá outras providências. Diário Oficial da União, 04 de agosto de 2022.

BURNETT, N. *COP28 The United Nations Climate Change Conference. CLRB - Commons Library Research Briefing*, 10 novembro de 2023.

CAMARGO, C.C.de B., TEIVE, R.C.G. Gerenciamento Pelo Lado da Demanda. ISBN: 8576960125, ISBN13: 9788576960126. Editora Univali, 2006.

CARDOSO, R.G. Regulação Do Hidrogênio No Brasil: Marco Legal e Contribuições para a regulação da Lei nº 14.948/2024. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/apresentacoes/17a-reuniao-coges-pnh2/20240830-apresentacao-rolim-goulart-cardoso-advogados-2.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CASTRO, N. et al. Observatório do Hidrogênio nº 5 - ISBN: 978-65-86614-50-3. Janeiro, 2022.

COEMA - Conselho Estadual de Meio Ambiente do Estado do Ceará. Resolução COEMA Nº 3 DE 10/02/2022. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=427495#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20os%20procedimentos%2C%20crit%C3%A9rios,verde%20no%20Estado%20do%20Cear%C3%A1>. Acesso em: 29 fev. 2024.

COLLERA, A.A., AGATON, C.B., *Opportunities for Production and Utilization of Green Hydrogen in the Philippines. International Journal of Energy Economics and Policy*, 11(5), 37-41. 2021.

CRESPO, A. M.; SOUZA, M. N.; SILVA, M. A. B. DA. Ciclo do carbono (C) e sistemas agroflorestais na sustentabilidade da produção agrícola: revisão de literatura. Incaper em Revista, Vitória, v. 13 e 14, p. 6-19, dez. 2023. Disponível em: <https://revista.incaper.es.gov.br/index.php/ojs/article/view/12>. Acesso em: 16 mai. 2025.

DALMARCO, A.R. **Regulação Energética: Sustentabilidade e Inovação nos Ambientes Regulatórios Brasileiro e Estadunidense**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Direito da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2017.

DAWOOD, F.; ANDA, M.; SHAFIULLAH, G. M. Hydrogen production for energy: An overview. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, p. 3847-3869, 7 fev. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319919345926?via%3Dihub>. Acesso em: 14 mai. 2025.

DCCEEW, 2024. *National Hydrogen Strategy 2024, Department of Climate Change*,

*Energy, the Environment and Water, Canberra*. CC BY 4.0. Disponível em: [dceew.gov.au/publications](https://dceew.gov.au/publications). Acesso em: 13 abr. 2025.

DOE. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap Draft. U.S. Department of Energy, setembro 2022.

DOSSOW, Marcel, et al. Advancing GIS-based suitability analysis of BtX, PtX, PBtX, and eBtX facilities using the fuzzy analytic hierarchy process. *MethodsX* 14 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103194>

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio. No EPE-DEA-NT-003/2021. Rio de Janeiro: EPE, 23 de fevereiro de 2021.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2024: Ano base 2023. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Relatório síntese do Balanço Energético Nacional (BEN) 2025: ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025.

ERBACH, G., SVENSSON S. EU rules for renewable hydrogen: Delegated regulations on a methodology for renewable fuels of non-biological origin . Briefing: Towards climate neutrality. EPRS | European Parliamentary Research Service. PE 747.085 – April 2023.

FCH – Fuel Cell and Hydrogen – Join Undertaken. Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway to European energy transition. February 6, 2019. Disponível em: [https://uploads-ssl.webflow.com/62ed42f4bdcfca24e2bd5f61/633a9522debcfdff3aac52a8\\_Hydrogen%20Roadmap%20Europe.pdf](https://uploads-ssl.webflow.com/62ed42f4bdcfca24e2bd5f61/633a9522debcfdff3aac52a8_Hydrogen%20Roadmap%20Europe.pdf). Acesso em: 15 abr. 2025.

GALVÃO, R. R. de A. O crescimento não uniforme da geração distribuída no Brasil sob a óptica da nova economia institucional: uma análise comparativa entre o Paraná e Minas Gerais. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2021.

GOLDEMBERG, J. Os riscos da energia nuclear. Artigo. ISSN 1519-7654. SBPC – Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. Universidade Estadual de Campinas – Unicamp. Campinas, 2008.

GUIMARÃES, J. PROJETO DE LEI Nº 3.027. Institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono – PHBC. Câmara dos Deputados, 2024.

GUITARRARI, L., CARDOSO, J.V.M. Resultados E Desafios Da Cop29 Para A Agenda Climática Global. FGV – Fundação Getúlio Vargas, dezembro de 2024. Disponível em: [https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao\\_cop29\\_fgvenergia.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/opiniao_cop29_fgvenergia.pdf). Acesso em: 15 mar. 2025.

GÜREL, Emet; TAT, Merba. SWOT analysis: a theoretical review. *The Journal of International Social Research*, v. 10, n. 51, p. 994-1006, Aug. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.17719/jisr.2017.1832>.

HEFNER, R.A. *The Age of Energy Gases*. The GHK Company: Oklahoma City, 2007

HERNANDEZ, S. G.; KIRCHOFER, A. Incentivizing hydrogen: A perspective review of lifecycle analysis methodology disparities affecting hydrogen incentives in policy frameworks. *Energy and Climate Change*, v. 6, p. 1-7, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2666278724000485?via%3Dihub>. Acesso em: 21 mai. 2025.

HOPPE, L. *et al.* Mercado de hidrogênio Verde e power to x: demanda por capacitações profissionais. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Brasília, fevereiro 2022.

IACOB, I., MORGAN, M.G., CURTIS, S. Barriers to Creating a Market for Hydrogen: Insights from Global Roadmaps and Stakeholders in the United States. Department of Engineering and Public Policy, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania 5000 Forbes Ave #5215, Pittsburgh, PA 15213, USA. *Energy Research & Social Science* 121 (2025) 103947. Available online 12 February 2025.

IEA - International Energy Agency. Hidrógeno en América Latina. De las oportunidades a corto plazo, al despliegue a gran escala. 2021.

INFONA. Escenarios de deforestación futura em Paraguay. Instituto Forestal Nacional. Paraguay: Asunción, 2016.

IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

IPEA - Instituto de Pesquisa Economica Aplicada. Panorama do Hidrogênio no Brasil. Rio de Janeiro. 2022.

ITAIPU BINACIONAL. Anexo "C" do Tratado de ITAIPU Bases Financeiras e de Prestação dos Serviços de Eletricidade da ITAIPU. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/u123/AnexoC.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2024.

ITAIPU BINACIONAL. *Paraguay avanza en la regulación del hidrógeno para impulsar la transición energética, con apoyo de ITAIPU*. 24 mai. 2025. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.py/noticias/tecnologia/paraguay-avanza-en-la-regulacion-del-hidrogeno-para-impulsar-la-transicion-energetica-con-apoyo-de-itaipu>. Acesso em: 30

mai. 2025.

ITAIPU BINACIONAL. Perguntas frequentes sobre o anexo C do tratado de Itaipu. Foz do Iguaçu, 11 de agosto de 2023. Disponível em: [https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/positionpapers/faq-perguntas-frequentes-sobre-o-anexo-c-do-tratado-de-itaipu#:~:text=O%20pr%C3%B3prio%20texto%20do%20Anexo,os%20anexos%20A%20e%20B](https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/positionpapers/faq-perguntas-frequentes-sobre-o-anexo-c-do-tratado-de-itaipu#:~:text=O%20pr%C3%B3prio%20texto%20do%20Anexo,os%20anexos%20A%20e%20B.). Acesso em: 23 jan. 2025.

ITAIPU BINACIONAL. Tratado de ITAIPU. Brasília, 26.4.1973. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/sites/default/files/u13/tratadoitaipu.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

KANNAH, R. YUKESH *et al.* Techno-economic assessment of various hydrogen production methods – A review. Elsevier, Bioresource Technology 319. 2021.

KANSONGUE, N., NJUGUNA, J., VERTIGANS S. A PESTEL and SWOT impact analysis on renewable energy development in Togo. DOI 10.3389/frsus.2022.990173. Frontiers in Sustainability. Central South University, China, 07 February 2023.

KARADZHOV, V. How to Create the Best SWOT Analysis. DOI 10.52403/ijrr.20250110. Int. J. Res. Rev. V.12, n. 1: p. 66-75, jan. 2025.

KUMAR, C.R.S., PRAVEENA, K.B. SWOT Analysis. DOI 10.21474/IJAR01/17584. Int. J. Adv. Res., v. 11, n. 9: p. 744-748, set. 2023.

LACLIMA: Acordo de Paris: um guia para perplexos. Documento conjunto com o Observatório do Acordo de Paris e Observatório do Clima. Versão atualizada de setembro de 2023. Disponível em: <https://oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/11/Acordo-de-Paris-Um-guia-para-os-perplexos-1.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.

LEFEUVRE, Nicolas *et al.* *Characterizing Natural Hydrogen Occurrences in the Paris Basin From Historical Drilling Records*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, v. 25, p. 1-14, 2024. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2024GC011501>. Acesso em: 28 mai. 2025.

MACEDO, S.F., PEYERL, D., SILVA FILHO, D. Brazilian hydrogen economy development. Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 2, p. 181-200, 2023. Tradução.

MARAHATTA, S. SAFARI, A. A Hydrogen-Driven Technology Mapping For Future Energy Systems. 13th IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications. November 9-13, Nagasaki, JAPAN, 2024.

MCREHRI - The Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues. Basic Hydrogen Strategy. June 6, 2023. Disponível em: [https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene\\_shinene/suiso\\_seisaku/pdf/20230606\\_5.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_5.pdf).

Acesso em: 16 mar. 2025.

MCTIC. O Acordo de Paris - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. MCTIC Secretaria de Políticas e Programas de Pesquisa e Desenvolvimento. SEPED Coordenação-Geral do Clima. CGCL. Brasília, 2017.

MENGDI, J., JIANLONG, W. - Review and comparison of various hydrogen production methods based on costs and life cycle impact assessment indicators. Elsevier, International Journal of Hydrogen Energy 46, 38612 e 3863, 2021.

MERCOSUL. Países do MERCOSUL. [S.l.: s.n.], atual. há cerca de 2 semanas. Disponível em: <https://www.mercosur.int/pt-br/quem-somos/paises-do-mercosul/>. Acesso em: 13 out. 2024.

MIGUEL, M. Modelos de Gestão de Auditorias Energéticas para Usinas Hidrelétricas: estudo de caso na Itaipu. 2003. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MITO, J. Y. DE L. Análise de aspectos políticos e regulatórios do biogás no Brasil e seu crescimento com o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. 2022.

MME - Ministério de Minas e Energia. MME apresenta ao CNPE proposta de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>). *Governo Federal*. 04 de agosto de 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-apresenta-ao-cnpe-proposta-de-diretrizes-para-o-programa-nacional-do-hidrogenio-pnh2>. Acesso em: 27 fev. 2024.

NDC - Determinação nacional em contribuir e transformar. A NDC do Brasil: determinação nacional em contribuir e transformar. 29<sup>a</sup> Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (COP29). Baku, Azerbaijão, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/ndc-versao-em-portugues.pdf/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

NEVES, L. Com portos no Nordeste à frente, já há 42 projetos de hidrogênio verde no Brasil. PV Magazine. abril 27, 2023. Disponível em: <https://www.pv-magazine-brasil.com/2023/04/27/com-portos-no-nordeste-a-frente-estudo-identifica-42-projetos-de-hidrogenio-verde-no-brasil/>. Acesso em: 21 mar. 2025.

NOGUEIRA, R. R. da S; VARELLA, F. K. O. M. Transição energética do setor de transportes: políticas públicas e cenários. Projeto de Engenharia Elétrica (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2024.

OKOLIE, J. A. *et al.* Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 46, p. 8885-8905, 19 fev. 2021. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319921000276?via%3Dihub>.

Acesso em: 14 mai. 2025.

OLIVEIRA, S.P. - Um Recorte das Abordagens de Regulação do Hidrogênio no Brasil e no Exterior. Evento: Semana Smart Cities Brasil 2022. Local: Parque Tecnológico de Sorocaba, 04 de outubro de 2022.

ONS – Operador Nacional do Sistema. Boletim Diário de Operação. Resultados da Operação/Histórico da Operação de 17 a 25 de março 2025. Disponível em:

[https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/carga\\_energia.aspx](https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/carga_energia.aspx).

Acesso em: 27 mar. 2025.

ONU – Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York, 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/>. Acesso em: 26 fev. 2024.

ORLANDI, A. G. *et al.* Evolução das fontes eólicas e solar e o uso de inovações tecnológicas pela ANEEL para monitoramento. *Revista do TCU*, Brasília, v. 154, n. 1, p. 146-171, jul./dez. 2024. Disponível em:

<https://revista.tcu.gov.br/ojs/index.php/RTCU/article/view/1959/1991>. Acesso em: 18 jun. 2025.

PAGEL U.R., CAMPOS F.A., CAROLINO J. Análise dos principais desafios ao desenvolvimento das energias renováveis no Brasil. XICBPE – Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Cuiabá, MT, 11 a 14 de setembro de 2018.

PARAGUAI. Anexo do Decreto nº 6.092, de 16 de maio de 2016. Política Energética da República do Paraguai: 2016–2040. Assunção: Governo da República do Paraguai, 2016. Disponível em: [https://www.ssme.gov.py/vmme/index.php/download\\_file/view/2876/3942/](https://www.ssme.gov.py/vmme/index.php/download_file/view/2876/3942/). Acesso em: 17 abr. 2025.

PARAGUAI. Ley Nº 3009. “De la producción y transporte independiente de energía eléctrica (PTIEE)”. *Asunción*, Congreso de la Nación Paraguaya. Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2092/ley-n-3009-de-la-produccion-y-transporte-independiente-de-energia-electrica-ptiee>. Acesso em: 17 abr. 2025.

PARAGUAI. Decreto nº 9.829, de 3 de outubro de 2012. *Por el cual se reglamenta la Ley Nº 3009/2006 – De la Producción y Transporte Independiente de Energía Eléctrica (PTIEE)*. Asunción: Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones, 3 out. 2012. Disponível em: <https://minasyenergia.mopc.gov.py/pdf/decretos/Decreto9829-2012.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2025.

PARAGUAI. Ley Nº 2.724 – De los recursos hídricos del Paraguay. *BACN – Banco de Archivos de la Cámara de Diputados*, Asunción: Congreso de la Nación Paraguaya.

Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/2724/de-los-recursos-hidricos-del-paraguay>. Acesso em: 18 abr. 2025.

PARAGUAI. Ley N° 6977, de 2023. Que regula el fomento, generación, producción, desarrollo y la utilización de energía eléctrica a partir de fuentes de energías renovables no convencionales no hidráulicas. *BACN – Banco de Archivos de la Cámara de Diputados*, Asunción. Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/11281/ley-n-6977-regula-el-fomento-generacion-produccion-desarrollo-y-la-utilizacion-de-energia-electrica-a-partir-de-fuentes-de-energias-renovables-no-convencionales-no-hidraulicas>. Acesso em: 03 maio. 2025.

PARAGUAI. Ley N° 7190, de 12 de outubro de 2023. De los créditos de carbono. *BACN – Banco de Archivos de la Cámara de Diputados*, Asunción: Congreso de la Nación Paraguaya, 12 out. 2023. Disponível em: <https://www.bacn.gov.py/leyes-paraguayas/11986/ley-n-7190-de-los-creditos-de-carbono>. Acesso em: 08 maio. 2025.

PEREIRA, Donisete da Silva; NETO, Romeu e Silva. Diversificação de fontes geradoras da matriz elétrica brasileira: uma revisão sistemática. *Open Journal Systems. Meio Ambiente (Braisl)*, v. 3, n. 1, 002-021, 2021.

PRATES, J.P. PROJETO DE LEI N° 725 - Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável. Senado Federal, 2022.

PUYT, Richard W.; LIE, Finn Birger; WILDEROM, Celeste P. M. The origins of SWOT analysis. *Long Range Planning*, v. 56, 102304, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2023.102304>.

RAMENSKIY, A.Y. *et al.* Technical regulation issues concerning fuel cell technologies in the Russian Federation, countries of the Eurasian Economic Union and CIS countries. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 42, Issue 33, 17 August 2017, Pages 21250-21262.

RIFKIN, J. *A Economia do Hidrogênio: a criação de uma nova fonte de energia e a redistribuição do poder na Terra*. 300p. São Paulo, SP: M.Books do Brasil LTDA, 2003. ISBN:85-89-384-03-09.

SANTOS, B.P., SILVA, H.I.P. Política externa brasileira e acordos Internacionais na área de energia (1990-2016): mapeando parceiros e setores envolvidos. *REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIA*, Vol. 24 | N° 2 | 2° Trim. 2018.

SENDICH, E. *et al.* International Energy Outlook 2019 – with projections to 2050. U.S. Energy Information Administration. September 24, 2019.

SILVA, M.B. Mecanismos de participação e atuação de grupos de interesse no processo regulatório brasileiro: o caso da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brazil. Rev. Adm. Pública 46 (4), Ago 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-76122012000400004>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SILVA, S. P. da, *et al.* A importância da biomassa na matriz energética brasileira. Pensar Acadêmico, Manhauçu, v. 19, n.2, p. 557-583, maio-setembro, 2021. Disponível em: <https://www.pensaracademico.unifacig.edu.br/index.php/pensaracademico/article/view/2306/1996>. Acesso em: 09 jun. 2025.

SOARES, J.F. MERCOSUL: surgimento, estrutura, direitos sociais, relação com a Unasul, perspectivas de sua evolução. Direito Internacional. Revista CEJ, Brasília, Ano XIII, n. 46, p. 21-38, jul./set. 2009

SPILEIR D., *et al.*: Characteristics and influence of macroenvironment in the Brazilian hydrogen energy sector. Journal Elsevier.com/Cleaner Production Letters 6 (2024) 100059. Acesso em: 03 mar. 2025.

TREVISAN, G.V. *et al.* Fontes Renováveis e Não Renováveis Geradoras de Energia Elétrica no Brasil. Researchgate, Conference Paper. November 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/342716427>. Acesso em 16 abr. 2025.

UNIC Rio - Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil. Revisado pela Coordenadoria-Geral de Desenvolvimento Sustentável (CGDES) do Ministério das Relações Exteriores do Brasil. 2016. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org>. Acesso em: 24 jan. 2024.

VILLELA, B. B.; ZAMUNER, L. F. I. Novo mercado de gás-natural: um estudo de caso sobre o uso não energético na cadeia de fertilizantes nitrogenados no Brasil. 2023. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2023.

VMME - El Viceministerio de Minas y Energías. Balance Energético Nacional 2023. Asunción, Paraguay: 2024.

VMME - El Viceministerio de Minas y Energías. Hacia la Ruta del Hidrógeno Verde en Paraguay: Marco conceptual. Junho, 2021.

WEF - World Economic Forum. Green Hydrogen in China: A Roadmap for Progress. In collaboration with Accenture and China Hydrogen Alliance. White Paper, 2023. Disponível em: [https://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Green\\_Hydrogen\\_in\\_China\\_A\\_Roadmap\\_for\\_Progress\\_2023.pdf](https://www3.weforum.org/docs/WEF_Green_Hydrogen_in_China_A_Roadmap_for_Progress_2023.pdf). Acesso em: 13 abr. 2025.

WILKINSON, A. *et al.* World Energy Issues Monitor 2020 – Decoding New Signals of

Change. World Energy Council. London, 2020.

ZHANG, V. Explore reliable legal information about hydrogen energy in China. 21 novembro 2024. Disponível em: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/china>. Acesso em: 16 abr. 2025.

ZHANG, M.; LI, Y. *The role of geophysics in geologic hydrogen resources*. Journal of Geophysics and Engineering, v. 21, ed. 4, p. 1242-1253, agosto 2024. Disponível em: <https://academic.oup.com/jge/article/21/4/1242/7676857>. Acesso em: 28 mai. 2025.

ZHOU, Wu *et al.* Hydrogen production technologies from water decomposition: A review. Next Energy, v. 8, p. 1-13, jul. 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949821X2500033X?via%3Dihub>. Acesso em: 14 mai. 2025.

ZUCARATO, A., MACHADO, F., FREIRIA, I.L. Desafios da Operação do Sistema Interligado Nacional. ONS – Operador Nacional do Sistema. 1ª edição do Fórum do Setor de Empresas de Energia Elétrica. FEESC - Fundação de Ensino e Engenharia de Santa Catarina. Florianópolis, 26 mar. 2025.

ZUCCARINO, M. El reciente descubrimiento de petróleo en Paraguay: un recorrido histórico y sus proyecciones en el escenario sudamericano. Universidad Nacional de La Plata (UNLP). 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/318402590>.