

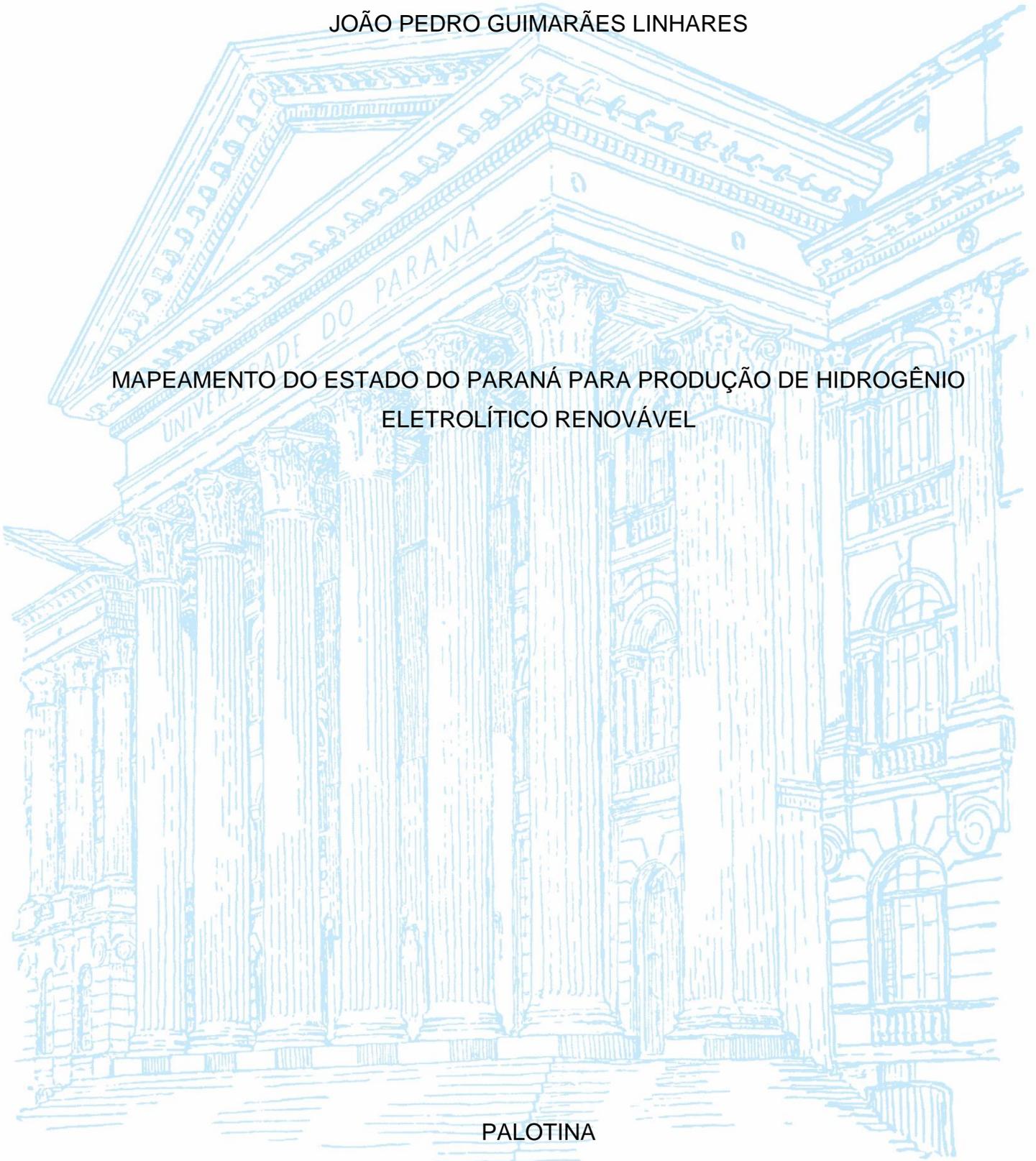
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO PEDRO GUIMARÃES LINHARES

MAPEAMENTO DO ESTADO DO PARANÁ PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO  
ELETROLÍTICO RENOVÁVEL

PALOTINA

2024



João Pedro Guimarães Linhares

MAPEAMENTO DO ESTADO DO PARANÁ PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO  
ELETROLÍTICO RENOVÁVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Energia, Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Romani

Coorientador: Prof. Dr. Maurício Guy de Andrade

PALOTINA

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

## ATA DE REUNIÃO

Aos cinco dias do mês de dezembro do ano de 2024, das 07h30min às 09h10min, na plataforma virtual *Microsoft Teams* ([link](#)), compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia o aluno **João Pedro Guimarães Linhares**, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "*Mapeamento do Estado do Paraná para produção de hidrogênio eletrolítico renovável*". Constituíram a Banca Examinadora os professores: **Prof. Dr. Maurício Romani (Orientador e Presidente da Banca)**, **Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken** e o **Engenheiro Frederico Freitas**. O orientador e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken, nota: 95 (noventa e cinco)**, **Engenheiro Frederico Freitas, nota: 97 (noventa e sete)**, e **Prof. Dr. Maurício Romani, nota: 100 (cem)**. A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **97 (noventa e sete)** considerando o discente **APROVADO**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** FREDERICO FREITAS DE CARVALHO  
Data: 05/12/2024 09:35:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



Documento assinado eletronicamente por **MAURICIO ROMANI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/12/2024, às 09:20, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOEL GUSTAVO TELEKEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/12/2024, às 09:21, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **7026150** e o código CRC **C6CA68FC**.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço à minha família, em especial aos meus pais e ao meu irmão, que sempre estiveram ao meu lado. Mesmo com a distância, vocês sempre se fizeram presentes, e cada conversa, conselho e gesto de carinho foram fundamentais para que eu alcançasse este objetivo. Vocês são a base de tudo o que realizei até hoje e a razão para continuar buscando novos desafios amanhã.

À minha namorada, Maria Eduarda, agradeço pelo carinho, companheirismo e compreensão ao longo desta jornada. Obrigado por tornar os desafios mais leves. Não poderia haver pessoa melhor para compartilhar cada momento.

Às amigas que fiz, meu muito obrigado por compartilharem essa caminhada comigo. Espero que cada um saiba a importância que teve em minha vida e que eu tenha proporcionado o mesmo em retorno. Alguns amigos se tornaram verdadeiros irmãos ao longo dessa etapa, e sou imensamente grato por isso.

Aos colegas do LABMATER, especialmente ao Lázaro Gasparrini, agradeço pelos momentos de aprendizado no laboratório, que contribuíram tanto para minha formação profissional quanto para meu crescimento pessoal. Obrigado pelos projetos e atividades que me permitiram aprender e evoluir.

E, por fim, a todos os meus professores, em especial ao meu orientador durante toda a graduação, Mauricio Romani, pela transmissão do conhecimento e pela dedicação em ensinar, que foram indispensáveis para minha trajetória acadêmica.

Muito obrigado a todos que fizeram parte dessa conquista!

## RESUMO

Acordos internacionais voltados à construção de uma economia mais sustentável, com foco na descarbonização e na redução de impactos ambientais, têm impulsionado pesquisas e investimentos em diversas áreas. Nesse cenário, o hidrogênio renovável de baixo carbono está emergindo como um vetor energético estratégico, favorecendo a redução de emissões de gases de efeito estufa em diferentes setores devido à sua ampla aplicabilidade. Diante do crescente interesse econômico e do aumento da demanda por esse recurso, tanto no Brasil quanto no mercado internacional, este trabalho tem como objetivo aplicar uma avaliação multicritério, utilizando o método de Análise Hierárquica integrado a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para identificar áreas no Estado do Paraná para a instalação de plantas de eletrólise. Essas plantas seriam estrategicamente localizadas próximas a usinas de energia renovável solar e eólica, alinhando-se às diretrizes da União Europeia RED III, que estabelece padrões para comercialização de combustíveis renováveis de origem não biológica (RFNBO), visto que no Brasil não há nenhuma regulamentação definida. Para isso, foram definidos parâmetros que orientam a seleção de locais apropriados e viáveis para a produção de hidrogênio eletrolítico renovável. Entre os fatores analisados estão: a irradiação solar disponível, a velocidade do vento para geração eólica, a disponibilidade hídrica da região e a infraestrutura local. Este último critério considera a proximidade com subestações conectadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e a presença de malhas de transporte adequadas para o escoamento de RFNBO até os portos, visando à comercialização internacional. Com esses dados, foi realizado o geoprocessamento e o cruzamento dessas informações, ponderando os fatores mais significativos para a viabilidade do empreendimento com base na hierarquia estabelecida. O resultado do trabalho é um mapa que identifica as regiões do estado com maior disponibilidade de recursos e infraestrutura para a implantação das plantas de produção de hidrogênio eletrolítico renovável para exportação de RFNBO.

**Palavras-chave:** Hidrogênio Renovável; Eletrólise; Análise Multicritério; Geoprocessamento; RFNBO.

## ABSTRACT

Global agreements focused to develop a sustainable economy through decarbonization and reducing environmental impacts have stimulated research and investments in multiple sectors. In this context, low-emissions hydrogen is emerging as an energy carrier, helping to reduce greenhouse gas emissions in different sectors due to its multiple applications. In light of the rising global interest and demand for this resource, this study employs a multi-criteria evaluation using the Analytical Hierarchy Process (AHP) methodology integrated with Geographic Information Systems (GIS) to identify optimal locations in the State of Paraná for the installation of electrolysis plants. These enterprises would be strategically located near solar photovoltaic and wind energy generations plants, aligning with the European Union's RED III directives, which establish standards for the commercialization of renewable fuels of non-biological origin (RFNBO). To this end, georeferenced parameters were defined to guide the selection of appropriate locations for the production of renewable electrolytic hydrogen. Those factors analyzed includes the available solar irradiation, wind speed, regional water availability, and local infrastructure. The last criteria considers the proximity to substations connected to *Brazil's* National Interconnected System (SIN) and the presence of transportation structure to distribute RFNBO to ports for exportation. Using those datas, with geoprocessing and cross-referencing, the most significant parameters were avaluated to the feasibility of the electrolyses enterprise based on an established hierarchy. The result is a final map identifying the regions of the State with most structure, energy end water availability for the installation of renewable electrolytic hydrogen production plants, highlighting the most promising areas focused on RFNBO exportation.

**Keywords:** Renewable Hydrogen; Electrolysis; Multi-Criteria Analysis; Geoprocessing; RFNBO.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ORGANIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO .....	20
FIGURA 2 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA .....	21
FIGURA 3 - PANORAMA DE 2028 DO SIN .....	23
FIGURA 4 - ROTAS DE PRODUÇÃO DO H <sub>2</sub> .....	26
FIGURA 5 – FUNCIONAMENTO DE CADA TIPO DE ELETROLISADOR .....	27
FIGURA 6 - PANORAMA DOS ELETROLISADORES.....	28
FIGURA 7 - CADEIA DE SUPRIMENTO DE H <sub>2</sub> ER.....	30
FIGURA 8 - ESTRATÉGIAS DE HIDROGÊNIO PUBLICADAS.....	33
FIGURA 9 - DIRETRIZES DO PNH <sub>2</sub> .....	34
FIGURA 10 - MARCOS TEMPORAIS PARA A ECONOMIA DO H <sub>2</sub> .....	35
FIGURA 11 - PRINCIPAIS POLÍTICAS BRASILEIRAS VOLTADAS AO H <sub>2</sub> .....	36
FIGURA 12 - IRRADIAÇÃO SOLAR POR MESORREGIÃO NO PARANÁ .....	42
FIGURA 13 - POTENCIAL EÓLICO DO PARANÁ.....	44
FIGURA 14 - COMPLEMENTARIEDADE SOLAR X EÓLICA.....	45
FIGURA 15 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DO PARANÁ.....	46
FIGURA 16 - MODELO VETORIAL E MATRICIAL .....	48
FIGURA 17 - SOBREPOSIÇÕES DE CAMADAS SIG.....	49
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA METODOLOGIA.....	52
FIGURA 19 - ÁREA DE ESTUDO .....	53
FIGURA 20 – MANIPULAÇÕES E OPERAÇÕES COM AS CAMADAS.....	56
FIGURA 21 - IRRADIAÇÃO GLOBAL MÉDIA NO PARANÁ.....	58
FIGURA 22 - VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A 100 METROS DE ALTURA NO PARANÁ .....	59
FIGURA 23 - BH NO ESTADO DO PARANÁ.....	61
FIGURA 24 - MALHA DE TRANSPORTE NO PARANÁ .....	63
FIGURA 25 - SISTEMA ELÉTRICO INTEGRADO AO SIN NO PARANÁ.....	66
FIGURA 26 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO PARANÁ.....	68
FIGURA 27 - ÁREAS DE RESTRIÇÃO NO PARANÁ.....	69
FIGURA 28 - MATRIZ RECÍPROCA .....	71
FIGURA 29 - MATRIZ DE DECISÃO .....	72
FIGURA 30 - MAPA DA IRRADIAÇÃO GLOBAL NORMALIZADA .....	76
FIGURA 31 - MAPA DA VELOCIDADE DO VENTO NORMALIZADA .....	78

FIGURA 32 - MAPA DAS BH NORMALIZADO .....	81
FIGURA 33 - REGIÕES POSSÍVEIS PARA UTILIZAÇÃO .....	84
FIGURA 34 - RELAÇÃO HIERÁRQUICA DOS PARÂMETROS .....	86
FIGURA 35 - MAPA FINAL DAS ÁREAS FAVORÁVEIS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA DE ELETRÓLISE PARA EXPORTAÇÃO DE RFNBO .....	87

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - ÁREA POR PARÂMETRO EM CADA MESORREGIÃO .....	83
--	----

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PARÂMETROS ADOTADOS.....	55
QUADRO 2 - CLASSES DA COBERTURA DO SOLO NO PARANÁ .....	68
QUADRO 3 – DESCRIÇÃO DAS ÁREAS RESTRITAS .....	70

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DESCRIÇÃO DOS ÓRGÃOS RESPONSÁVEIS PELO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....	19
TABELA 2 - CERTIFICAÇÕES RELEVANTES DE H <sub>2</sub> .....	37
TABELA 3 - ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY.....	50
TABELA 4 - PROCESSO DE NORMALIZAÇÃO DAS CAMADAS.....	57
TABELA 5 – DISPONIBILIDADE HÍDRICA POR BH.....	61
TABELA 6 - CLASSIFICAÇÃO POR INTERVALO.....	62
TABELA 7 - VALOR ATRIBUÍDO DE ACORDO COM A DISTÂNCIA PORTUÁRIA.....	64
TABELA 8 - VALOR ATRIBUÍDO DE ACORDO COM A DISTÂNCIA DAS RODOVIAS.....	65
TABELA 9 - ÍNDICE RANDÔMICO ( <i>IR</i> ).....	74
TABELA 10 - OCORRÊNCIA DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO SOLAR.....	76
TABELA 11 - MÉDIA DE IRRADIAÇÃO POR MESORREGIÃO.....	77
TABELA 12 - OCORRÊNCIA EÓLICA POR MESORREGIÃO DO ESTADO.....	79
TABELA 13 - VALOR ATRIBUÍDO PARA CADA BH.....	80
TABELA 14 - ÁREA REPRESENTADA POR VALOR NORMALIZADO.....	81
TABELA 15 - VALOR DA CLASSIFICAÇÃO DE CADA PARÂMETRO.....	86
TABELA 16 - ÁREA PARA CADA INTERVALO DE NORMALIZAÇÃO.....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

AHP	- Método de Análise Hierárquica
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	- Balanço Energético Nacional
BH	- Bacia Hidrográfica
CCEE	- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CCUS	- Captura, Utilização e Sequestro de Carbono
CH <sub>4</sub>	- Metano
CNPE	- Conselho Nacional de Política Energética
CMSE	- Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de Carbono
COP	- Conferência das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
EUA	- Estados Unidos da América
FV	- Fotovoltaico
GEE	- Gases de Efeito Estufa
Gt	- Gigatonelada
GW	- Gigawatt
GWh	- Gigawatt-hora
H <sub>2</sub>	- Hidrogênio
H <sub>2</sub> O	- Água
H <sub>2</sub> V	- Hidrogênio Verde
H <sub>2</sub> ER	- Hidrogênio Eletrolítico Renovável
IC	- Índice de Consistência
IGH	- Irradiação Global Horizontal
kg	- Quilôgrama
km	- Quilômetro
LOHs	- Líquidos Orgânicos Portadores de Hidrogênio
m	- Metro
MME	- Ministério de Minas e Energia
Mt	- Megatonelada
Mtep	- Megatonelada Equivalente de Petróleo
MW	- Megawatt

MWh	- Megawatt-hora
O <sub>2</sub>	- Oxigênio
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
PHBC	- Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono
RC	- Razão de Consistência
RE	- Rodovia Estadual
RED	- <i>Renewable Energy Directive</i>
RF	- Rodovia Federal
RFNBO	- Combustíveis Renováveis de Origem Não Biológica
SCR	- Sistema de Coordenada de Referência
SE	- Subestação
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SIN	- Sistema Interligado Nacional
TWh	- Terawatt-hora

## LISTA DE SÍMBOLOS

- ® - Marca registrada
- $\Sigma$  - Somatório de números
- $\Pi$  - Produtório de números
- $\lambda$  - Autovalor
- $\lambda_{m\acute{a}x}$  - Autovalor máximo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	17
1.1.1 Objetivo geral .....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
1.2 JUSTIFICATIVA .....	17
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO.....	19
2.1.1 Matriz elétrica brasileira.....	20
2.1.2 Sistema Interligado Nacional.....	22
2.1.3 Matriz elétrica do Paraná.....	24
2.2 HIDROGÊNIO .....	24
2.2.1 Eletrólise.....	26
2.2.2 Hidrogênio eletrolítico renovável .....	28
2.2.3 Armazenamento e transporte .....	30
2.3 REGULAMENTAÇÃO .....	32
2.3.1 Cenário brasileiro .....	33
2.3.2 Regulamentação para o H <sub>2</sub> eletrolítico renovável.....	36
2.4 ENERGIA RENOVÁVEL .....	40
2.4.1 Energia solar fotovoltaica .....	40
2.4.2 Energia eólica.....	42
2.4.3 Complementariedade solar x eólica .....	44
2.5 RECURSOS HÍDRICOS.....	45
2.6 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA.....	47
2.7 ANÁLISE MULTICRÉRIO.....	49
2.7.1 Método de Análise Hierárquica (AHP).....	50
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>52</b>
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	53
3.2 IDENTIFICAÇÃO E OBTENÇÃO DOS DADOS GEORREFERENCIADOS.....	54
3.3 PROCESSAMENTO E NORMALIZAÇÃO DAS CAMADAS.....	55
3.3.1 Irradiação solar global .....	57
3.3.2 Velocidade do vento .....	59
3.3.3 Recursos hídricos.....	60

3.3.4 Infraestrutura de transporte .....	62
3.3.4.1 Portos, portos secos e malha ferroviária .....	63
3.3.4.2 Malha rodoviária .....	64
3.3.5 Sistema elétrico .....	65
3.3.6 Uso e ocupação do solo e áreas de restrição .....	67
3.4 ANÁLISE MULTICRITÉRIO PELO MÉTODO AHP .....	70
3.5 CONSTRUÇÃO DO MAPA DAS ÁREAS FAVORÁVEIS .....	74
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
4.1 NORMALIZAÇÕES .....	75
4.1.1 Irradiação solar global .....	75
4.1.2 Velocidade do vento .....	77
4.1.3 Recursos hídricos.....	79
4.1.4 Infraestrutura do Estado .....	81
4.1.5 Áreas de restrição .....	84
4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS .....	85
4.3 MAPA FINAL DAS ÁREAS FAVORÁVEIS.....	87
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>90</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	91
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>
<b>APÊNDICE A – MAPAS DAS NORMALIZAÇÕES DE INFRAESTRUTURA .....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE B - OCORRÊNCIA DOS PARÂMETROS AS MESORREGIÕES .....</b>	<b>103</b>
<b>APÊNDICE C - RESULTADOS DO MÉTODO AHP .....</b>	<b>104</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A descarbonização e a desfossilização da matriz energética são ações realizadas para o combate a impactos ambientais e buscam promover um desenvolvimento sustentável. Essa transição para uma economia que visa reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, ocorre por meio da substituição de fontes de energia e produtos fósseis por alternativas renováveis e menos impactantes ao meio ambiente. O Acordo de Paris, assinado em 2015, representa esse compromisso global para enfrentar os impactos causados por recursos poluentes e acelerar uma transição energética limpa, estabelecendo metas entre os países que se comprometeram a implementar estratégias que incluam a descarbonização como uma linha central em suas políticas energéticas para a criação de economias de baixo carbono e limitar o aumento da temperatura mundial em até 1,5°C até 2030. (OLIVEIRA, 2022a)

A Conferência das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (COP) 28, promovida anualmente pela ONU e realizada em dezembro de 2023, destacou a necessidade urgente de acelerar a transição energética para combater as mudanças climáticas e reduzir o impacto causado por combustíveis fósseis. Além da principal meta de triplicar a capacidade de energia renovável até 2030, ocorreu uma discussão referente a alternativas aos recursos provenientes do petróleo e como reduzir a dependência desse insumo que ainda é muito utilizado e até mesmo recebe um elevado investimento. Por conta disso, a utilização de fontes de energia renovável e a produção de hidrogênio de baixo carbono são alternativas para alcançar os objetivos apresentados no debate. Além disso, na COP 28, reforçaram que a transição energética não é apenas uma questão tecnológica, mas também política e econômica, exigindo compromissos sólidos e ações imediatas de todas as partes interessadas para garantir um futuro sustentável. (IRENA, 2024a)

Devido a esse cenário, fontes de energia renovável, como a solar fotovoltaica e a eólica, estão sendo empregadas para descarbonizar principalmente o setor elétrico e reduzir a dependência de combustíveis fósseis utilizados em termelétricas. Para outros setores, especialmente a indústria e o transporte, o hidrogênio renovável surge como uma alternativa promissora para diminuir a pegada de carbono por conta de sua ampla aplicabilidade. Isso tem incentivado a criação de um mercado atrativo, com elevados investimentos de diversos players em pesquisa e desenvolvimento,

visando promover economias sustentáveis e atingir metas internacionais de redução de emissões de gases de efeito estufa. (IEA, 2024)

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Mapear as regiões no Estado do Paraná com possibilidade de produção em grande escala de hidrogênio renovável via eletrólise utilizando recursos e infraestrutura disponíveis.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Examinar o potencial energético solar e eólico do Paraná;
- Avaliar a infraestrutura existente do Estado para implementação de um empreendimento de eletrólise de grande porte ;
- Aferir a disponibilidade de recursos hídricos na área de estudo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O hidrogênio e sua cadeia produtiva são frequentemente mencionados em temas referentes à descarbonização da matriz energética e é considerado como um combustível do futuro. Por ser um ativo muito utilizado principalmente em refinarias de petróleo e na produção de amônia, a principal fonte de obtenção desse elemento é por meio da reforma a vapor do gás natural. Segundo o IEA (2024), estima-se que da demanda global de 97 milhões de toneladas de hidrogênio (H<sub>2</sub>) em 2023, aproximadamente 99% têm origem fóssil e menos de 1 Mt foi produzida por fontes com baixa emissão de carbono. Entretanto, com as iniciativas e metas internacionais, a previsão de produção de hidrogênio para 2030 é de 50 milhões de toneladas, além disso espera-se que 80% desse valor seja por eletrólise. O mercado mundial de hidrogênio no ano de 2019, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2021), movimentou cerca de 140 bilhões de dólares e em 2050, conforme Dias (2024), pode chegar próximo a US\$1,4 trilhão anual. Com isso, a utilização do hidrogênio de baixa emissão de carbono na indústria e no setor energético é uma possibilidade para a

transição energética e uma economia sustentável. De acordo com o SENAI CIMATEC (2023) em 2018, 95% de todo o hidrogênio produzido no Brasil foi pela Petrobras para utilização nas refinarias de petróleo. Além disso, o H<sub>2</sub> pode ter outras aplicações como uma alternativa para armazenar e transportar energia excedente gerada por fontes renováveis, produção de combustíveis líquidos com o processo de Fischer-Tropsch e em células a combustível para geração de energia elétrica e propulsão de veículos de transporte.

Levando em consideração o Programa Nacional de Hidrogênio (PNH<sub>2</sub>), apresentado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) em 2021, o Brasil possui potencial para conseguir suprir a demanda doméstica e ainda, se tornar um dos principais exportadores de H<sub>2</sub> até 2030. A versatilidade de rotas e cadeias de produção possíveis no país como a partir da biomassa ou via eletrólise, uma matriz elétrica limpa consolidada e a disponibilidade da infraestrutura de uma rede elétrica interligada por praticamente todo território brasileiro são fatores que destacam o país dos demais. Com a expectativa de produção de 1,8 gigatonelada por ano, o Brasil desperta interesse de investimentos que já atingiram 30 bilhões de dólares somando projetos anunciados e em desenvolvimento. O Plano de Trabalho Trienal 2023-2025 do PNH<sub>2</sub>, apresentado pelo MME em 2023, espera que em 2025 o Brasil dissemine por todas as regiões do país plantas piloto de hidrogênio de baixo carbono e em 2030 se consolide como um dos principais produtores do insumo no mundo.

Por conta do cenário apresentado, o hidrogênio eletrolítico renovável apresenta um potencial favorável no mercado. Esse recurso é produzido por meio da eletrólise da água, produzindo hidrogênio e oxigênio utilizando energia como solar ou eólica. Sendo assim, o mapeamento de regiões para produção de grande porte de H<sub>2</sub> renovável no Paraná pode auxiliar na inserção do Estado nessa economia com interesse internacional, possibilitando investimentos elevados e retornos favoráveis para desenvolvimento social e econômico do Estado. Com isso, o H<sub>2</sub> eletrolítico produzido deve possuir certificação e ser adequado às regulamentações internacionais para ser atrativo e possibilitar o comércio com *players* de grande escala. Nesse estudo, será utilizado como base as diretrizes do documento *Renewable Energy Directive* (RED III) aprovado em 2023 pelo Parlamento Europeu, o qual estabelece políticas que incentivam o uso de combustíveis renováveis de origem não biológica (RFNBOs). (Kelman *et al.*, 2024)

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este segmento tem como objetivo apresentar e aprofundar conceitos fundamentais necessários para a compreensão da produção de hidrogênio eletrolítico renovável, associada ao uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como ferramenta de análise.

### 2.1 SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

O setor elétrico brasileiro apresenta uma estrutura complexa e diversificada, organizada em três principais etapas sendo elas a geração, transmissão e distribuição de energia. Nele, atuam tanto empresas públicas quanto privadas que desempenham papéis fundamentais no fornecimento de energia com qualidade ao consumidor final. O planejamento e a operação do sistema são centralizados, possibilitando uma coordenação eficaz e respostas rápidas às demandas e emergências. Além disso, o mercado é composto por consumidores cativos (possuem tarifas reguladas) e por consumidores livres (negociam diretamente com geradores e comercializadores) que promovem um ambiente de negociação e flexibilidade no fornecimento de energia, dessa forma, essa estrutura permite um equilíbrio entre regulação e competição, garantindo assim, a segurança energética e a sustentabilidade do sistema (ANEEL, 2021).

A organização do setor elétrico brasileiro é composta por vários órgãos conectados, em que a TABELA 1 apresenta as respectivas responsabilidades destes no setor elétrico brasileiro.

TABELA 1 - DESCRIÇÃO DOS ÓRGÃOS RESPONSÁVEIS PELO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

<b>Órgão</b>	<b>Responsabilidade</b>
Conselho Nacional de Política Energética (CNPE)	Propor ao Presidente da República políticas nacionais e medidas para o setor elétrico brasileiro.
Ministério de Minas e Energia (MME)	Promover diretrizes que regem concessões e a emissão de instruções para o processo de licitação de serviços e ativos públicos.
Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE)	Acompanha e avalia o suprimento de energia por todo território brasileiro.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE)	Elaborar estudos e pesquisas, a fim de dar meios para a implantação do planejamento estratégico do setor energético.
Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)	Regula e fiscaliza o setor elétrico.
Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)	Coordena todo o Sistema Interligado Nacional, supervisionando e operando toda geração e transmissão de energia.
Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)	Viabiliza e monitora as atividades econômicas do setor elétrico.

FONTE: Adaptado de Sobreira (2023) e Averlan (2019).

As relações entre as organizações são demonstradas no esquema simplificado da FIGURA 1.

FIGURA 1 - ORGANIZAÇÃO DO SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO



FONTE: Sobreira (2023).

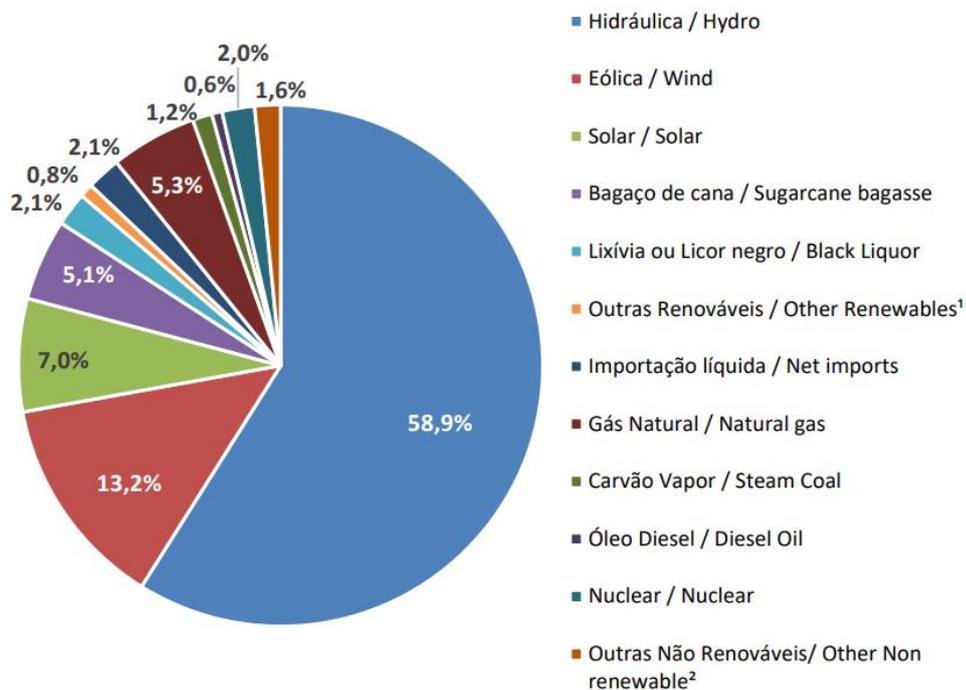
### 2.1.1 Matriz elétrica brasileira

A matriz energética brasileira é composta pelo conjunto de fontes de energia utilizadas para atender a demanda de energia do país. No ano de 2023, o Brasil teve uma oferta de energia interna total igual a 313,9 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), sendo destaque por ter uma matriz energética diversificada e relativamente limpa, devido a significativa participação de fontes renováveis com aproximadamente 49% da energia como a biomassa, hidrelétrica, eólica e a solar. No entanto, as fontes não renováveis, como o petróleo, gás natural e o carvão mineral,

ainda desempenham um papel economicamente importante e na manutenção da segurança energética, representando cerca de 51% da matriz, sendo os maiores consumidores dessa energia ocorrendo na indústria e transporte. (EPE, 2024a)

Ao avaliar apenas o consumo de energia elétrica, a matriz brasileira se torna ainda mais limpa, uma vez que, dos 708,1 TWh gerados em 2023, cerca de 89% são de origem renováveis, com destaque para a geração hidráulica responsável por quase 59% desse total. A oferta interna de energia elétrica no Brasil é apresentada na FIGURA 2. (EPE, 2024a)

FIGURA 2 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA



Notas / Notes:

1. Inclui Lenha, Biodiesel e Outras renováveis / Includes Firewood, Biodiesel and Other Renewables

2. Inclui Óleo Combustível, Gás de Coqueria, Outras Secundárias e Outras Não-Renováveis/ Includes Fuel Oil, Coke Oven Gas, Other Secondaries and Other Non-Renewables

FONTE: EPE (2024a).

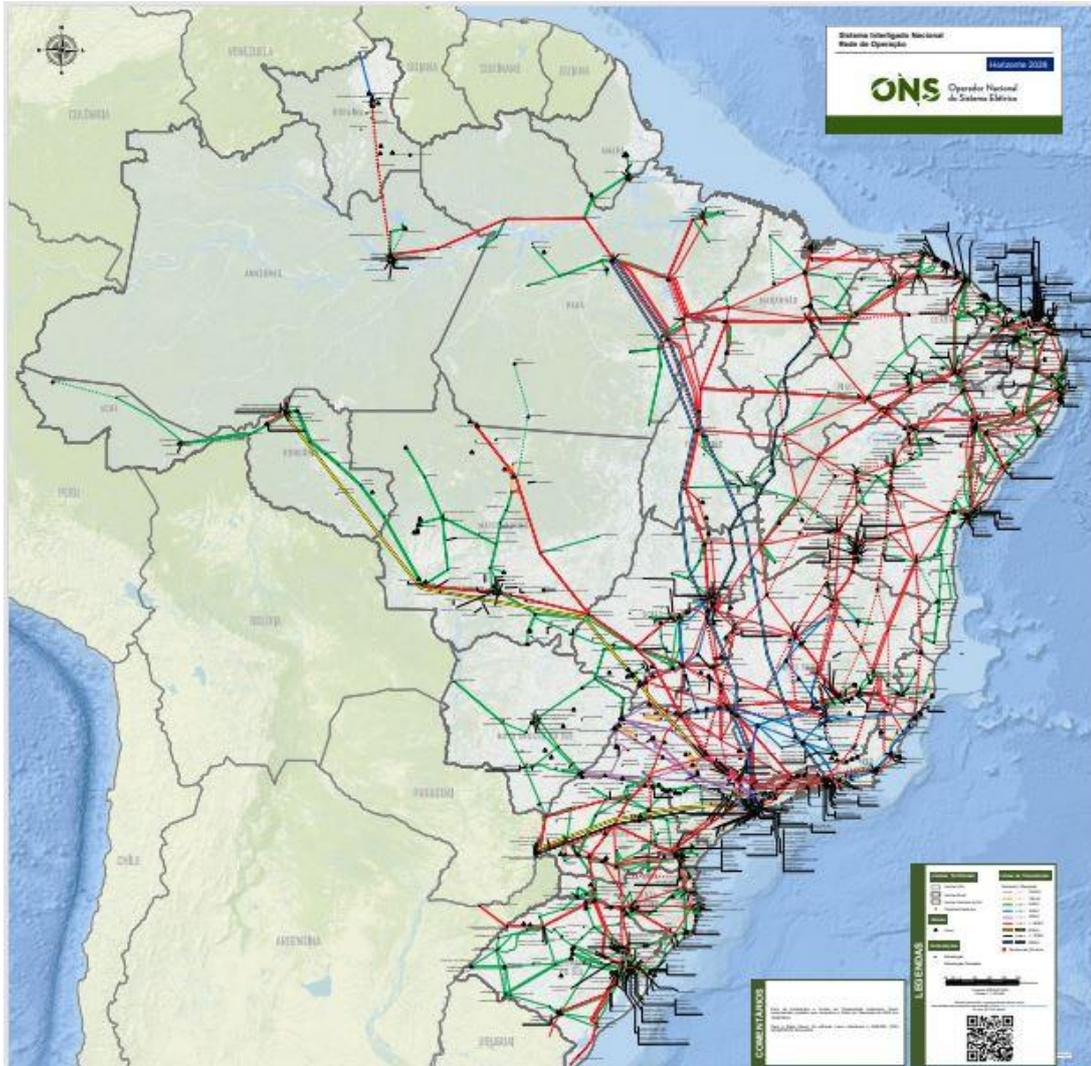
Diferente da matriz elétrica nacional, dos 28.642 TWh de energia elétrica gerados no mundo em 2022, aproximadamente 65,5% são de origem não renováveis, sendo o carvão o maior representante desse total com 36% e logo atrás o gás natural com 22,7%. No entanto, apesar de um recente crescimento, as fontes renováveis representam apenas 29,1% de toda matriz elétrica, em que a tendência nos próximos anos é essa parcela aumentar. (IEA, 2023a)

Por conta da disponibilidade de uma matriz renovável, o Brasil se destaca entre os demais países para a produção em larga escala de hidrogênio de baixa emissão de carbono, com um potencial estimado de gerar 1,8 Gt de hidrogênio eletrolítico por ano utilizando energia renovável. A presença já instalada da geração hidrelétrica, juntamente com o significativo potencial de expansão da eólica e solar, torna o país com uma das maiores capacidades de produção de H<sub>2</sub> renovável, atraindo investimentos internacionais no setor. (Vasconcelos, 2023)

### 2.1.2 Sistema Interligado Nacional

O Sistema Interligado Nacional (SIN) apresentado na FIGURA 2 é uma malha elétrica conectada por diversas subestações (pontos) e linhas de transmissão. O SIN possibilita a interconexão dos sistemas elétricos de distintas regiões através de uma rede de com 171.640 km de linha instalada pela extensão territorial brasileira. Essa relação facilita a transferência de energia entre os subsistemas, permitindo um controle mais refinado sobre a diversidade dos regimes hidrológicos das bacias, intermitência eólica e solar. Os quatro subsistemas que compõem a malha são: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte da região Norte. A integração dos recursos de geração e transmissão assegura o atendimento ao mercado com segurança e eficiência econômica. (ONS, 2024)

FIGURA 3 - PANORAMA DE 2028 DO SIN



FONTE: ONS (2024).

A capacidade instalada de geração do SIN é de 225.388 MW, sendo em maior parte composta por usinas hidrelétricas. Nos últimos anos, a instalação de usinas eólicas, especialmente nas regiões Nordeste e Sul, cresceu significativamente, aumentando a importância dessa fonte de energia reduzindo a dependência hídrica e problemas em épocas de estiagem. Já as usinas térmicas que causam maior emissão de gases de efeito estufa no processo de geração de energia, geralmente são localizadas próximas aos principais centros de carga. Estas desempenham um papel de segurança elétrica do sistema e são acionadas para realizar a gestão dos estoques de água nos reservatórios das hidrelétricas e suprir as lacunas causadas por intermitências na geração eólica ou solar. Os sistemas de transmissão integram as

diversas fontes de geração de energia, possibilitando o fornecimento eficiente ao mercado consumidor. (ONS, 2024)

### 2.1.3 Matriz elétrica do Paraná

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2024 publicado pela EPE (2024a), o Paraná foi responsável por 13,6% de toda a geração elétrica do Brasil em 2023 com 96.448 GWh. Dos 18.549 MW de capacidade instalada do Estado para geração de eletricidade sem incluir micro e minigeração distribuída, 90% são de fonte hidráulica, 9,77% de termelétricas e menos de 1% são de origem solar ou eólica. Estas fontes podem complementar a expansão do consumo futuro de eletricidade, cuja origem hídrica vem sendo severamente impactada por frequentes episódios de estiagem nos últimos anos por conta de aspectos climáticos e total dependência desse recurso para geração de eletricidade, uso para irrigação e na indústria. (Nojima, 2022)

## 2.2 HIDROGÊNIO

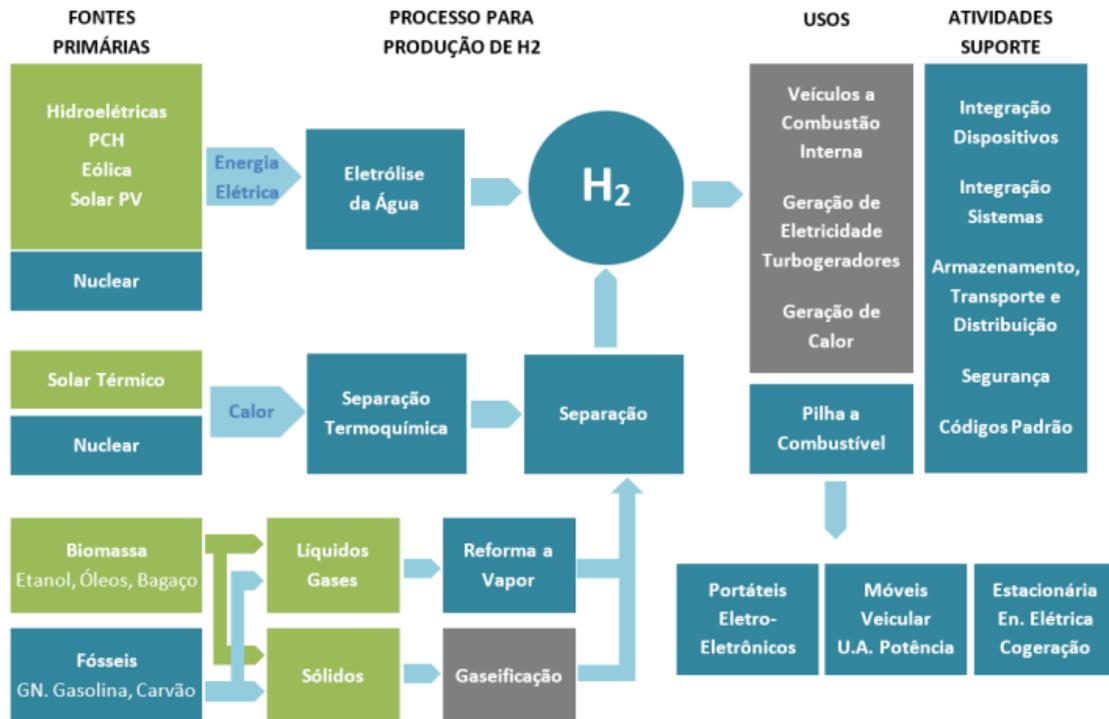
Segundo a Câmara de Comércio e Indústria Brasil-Alemanha (2021), o hidrogênio se tornou um vetor estratégico de diversos países para a descarbonização e construção de economias sustentáveis. Conforme SENAI CIMATEC (2023), o H<sub>2</sub> é considerado uma das principais fontes de energia do futuro, devido a possibilidade de sua utilização como combustível em veículos elétricos movidos por células a combustível ou em usinas de energia elétrica sendo queimado para gerar calor e produzir vapor. Além de ser uma alternativa para geração de energia elétrica, o hidrogênio é aplicado em importantes processos industriais como o refino de petróleo, produção de fertilizante, combustíveis e na indústria metalúrgica. O potencial como vetor energético ocorre por conta da possibilidade de ser produzido a partir de fontes renováveis tornando-se uma opção mais sustentável em comparação a origem fóssil.

Tanto o hidrogênio quanto a eletricidade podem ser gerados a partir de diversas fontes e tecnologias. A principal diferença entre os vetores energéticos é que o hidrogênio pode ser utilizado como portador de energia química, composto por moléculas e não apenas elétrons, o que facilita seu armazenamento e torna o transporte semelhante ao petróleo, carvão, biomassa e gás natural caso não esteja no estado gasoso. Além disso, o H<sub>2</sub> pode ser uma solução para equilibrar o consumo

e a geração no sistema elétrico. Atualmente, esse balanceamento é feito por usinas termelétricas e por meio do controle de reservatórios de hidrelétricas. Com o aumento da participação de fontes renováveis intermitentes como solar e eólica, o sistema se torna mais complexo para a operação, necessitando de opções para suprir as lacunas quando a demanda for maior do que a geração. Como alternativa, o excedente de energia gerado em períodos fora de ponta (em que o consumo de energia é menor) pode ser utilizado em eletrolisadores para produção de hidrogênio. Conseqüentemente, no momento em que a demanda energética aumenta e é necessário uma geração de energia instantânea para auxiliar na operação do sistema de potência, o H<sub>2</sub> produzido pode ser utilizado para gerar eletricidade por meio de células a combustível. (AHK Rio, 2021)

Em relação a demanda global de hidrogênio, no ano de 2023 chegou a passar de 97 Mt, recorde em um setor que vem crescendo nos últimos anos. A China e os EUA são os principais consumidores, sendo que o país asiático representa cerca de um terço do consumo total (aproximadamente 28 Mt). Os setores que mais consomem são: o refino de hidrocarbonetos, produção de amônia e metanol e na metalurgia. A principal rota utilizada de produção é a reforma a vapor do gás natural de origem fóssil, em que ocorre a emissão de CO<sub>2</sub> impactando negativamente o clima e seguindo contra as diretrizes e políticas mundiais. (IEA, 2024)

O hidrogênio possui diversas rotas tecnológicas e sua classificação pode ser de acordo com a origem de sua obtenção. A FIGURA 4, demonstra algumas destas rotas da produção até o uso final. Embora seja um elemento químico abundante, não existem reservas naturais significativas disponíveis para exploração em larga escala. Dessa forma, é necessário utilizar compostos que possuem o hidrogênio em sua composição como a água, biomassa ou fontes fósseis. Com a necessidade de reduzir as emissões de GEE, ao invés da reforma a vapor do gás natural, outras rotas tecnológicas e inovações nos métodos de produção têm ganhado espaço, principalmente as que fazem uso de recursos renováveis na matéria-prima ou energia como o caso da eletrólise, além de processos com captura, utilização e sequestro de carbono (CCUS). (SENAI CIMATEC, 2023).

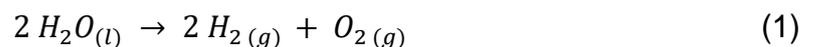
FIGURA 4 - ROTAS DE PRODUÇÃO DO H<sub>2</sub>

FONTE: EPE (2021).

### 2.2.1 Eletrólise

A eletrólise é uma reação química de oxirredução provocada pela passagem de corrente elétrica contínua aplicada à água que resulta na dissociação em hidrogénio e oxigénio (O<sub>2</sub>), na presença de um eletrólito. A reação não é um processo favorável termodinamicamente, sendo que o potencial padrão de uma célula eletrolítica é de -1,229 V a 25 °C com a possibilidade desse valor ser ainda maior devido à energia de ativação, transporte de íons, resistência dos condutores e fenômenos de superfície como formações de bolhas. (Gomes, 2022)

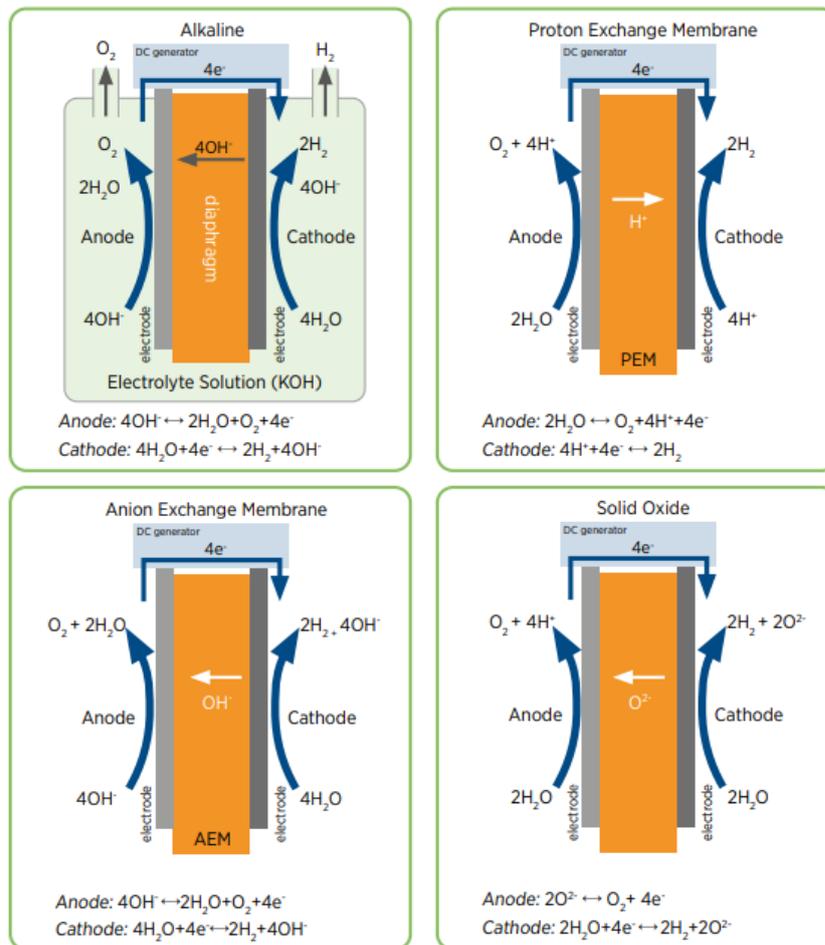
A reação de eletrólise da água pode ser representada pela equação (1).



A produção de H<sub>2</sub> por meio da eletrólise da água é a rota tecnológica mais cara dentre as já disponíveis no mercado com um valor entre 3 e 7,5 dólares por kg, enquanto em comparação, a reforma a vapor do gás natural que é a mais utilizada custa entre 0,9 e 3,2 dólares por kg. (EPE, 2021).

Existem quatro principais tipos de células eletrolíticas: a alcalina (*alkaline electrolysis cell* ou AEC), a membrana de troca de ânions (*anion exchange membrane* ou AEM) e a membrana de troca de prótons (*proton exchange membrane* ou PEM) e de óxido sólido (*solid oxide electrolyzers* ou SOEC). O funcionamento de cada modelo está representado na FIGURA 5.

FIGURA 5 – FUNCIONAMENTO DE CADA TIPO DE ELETROLISADOR

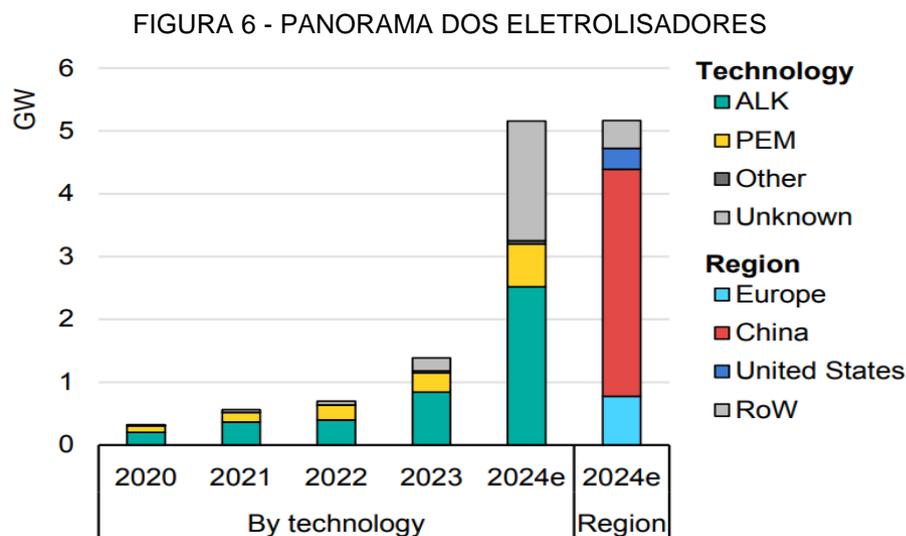


FONTE: IRENA (2020b).

Dos tipos de eletrolisadores, a AEC foi a primeira a estar disponível no mercado e por isso, é a mais estabelecida atualmente. Contudo, fatores como uma menor densidade de corrente aplicada, baixa pressão operacional e pouca eficiência energética são motivos para o desenvolvimento e investimento em outras tecnologias, como é o caso da AEM e PEM. Embora a eletrólise do tipo PEM supere as desvantagens técnicas da AEC, apresentando densidade de corrente maior e alta eficiência energética, ainda é uma tecnologia considerada cara, principalmente devido

ao alto custo dos materiais do eletrodo à base de platina para o cátodo. Além disso, esses equipamentos demandam uma elevada pureza da água a ser utilizada, necessitando de estações de tratamento para diminuir os sólidos totais dissolvidos e carga orgânica total. (IRENA, 2020b)

De acordo com o IEA (2024), a capacidade instalada de eletrolisadores no final de 2023 chegou a 1.4 GW, sendo quase o dobro da de 2022, indicando o crescimento nesse setor. O modelo mais utilizado é o AEC representando 60% da capacidade instalada em 2023, seguido pelo PEM com 22%. Apesar dessa diferença, projetos mais recentes estão optando por utilizar a tecnologia PEM por conta da melhor adaptabilidade com as fontes renováveis de energia podendo reduzir essa desigualdade nos próximos anos. A FIGURA 6 apresenta o crescimento da capacidade instalada de eletrolisadores nos últimos anos, assim como as regiões com maior investimento nesse setor.



FONTE: IEA (2024).

### 2.2.2 Hidrogênio eletrolítico renovável

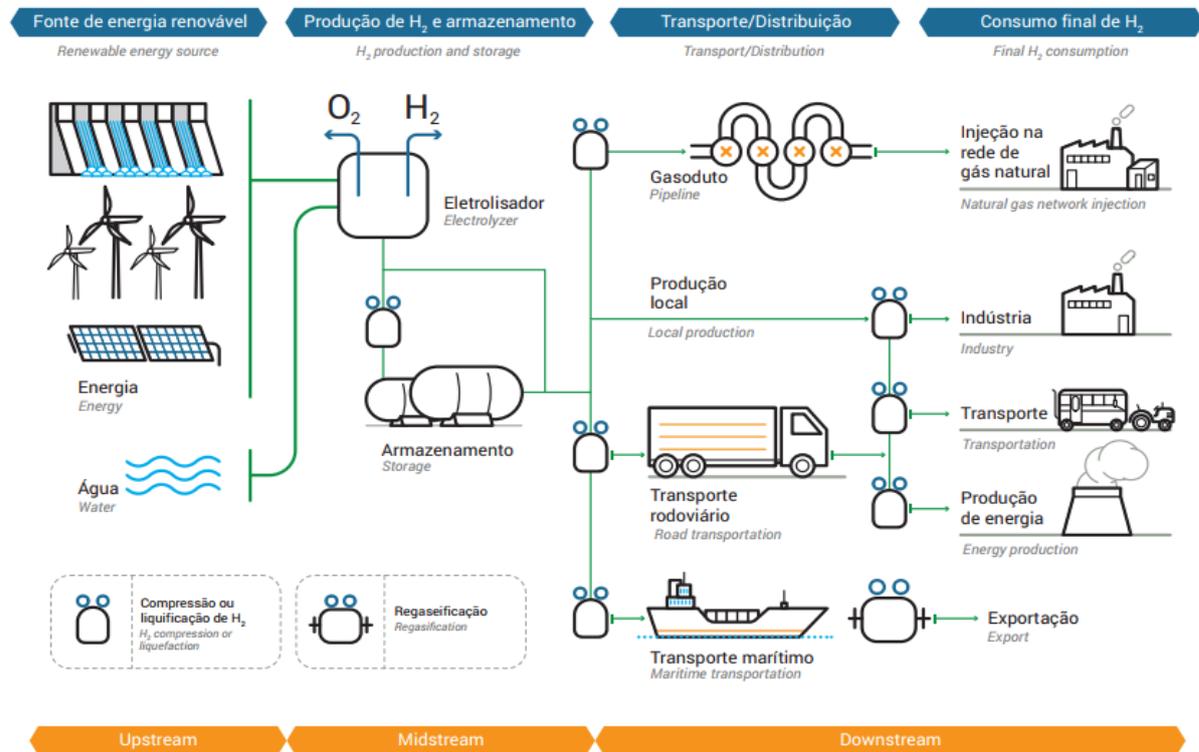
O hidrogênio eletrolítico renovável (H<sub>2</sub>ER), segundo a EPE (2021), é definido como hidrogênio verde (H<sub>2</sub>V), classificação a qual refere-se a produção a partir do processo de eletrólise da água utilizando energia elétrica obtida de fontes limpas e renováveis tais como eólica e solar, sendo uma produção sustentável e condizente às metas estabelecidas para redução de emissões de GEE. A geração de H<sub>2</sub> renovável

de baixo carbono como é o caso do H<sub>2</sub>ER, faz com que sua utilização como insumo em outros produtos ou processos diminua a pegada de carbono de toda a cadeia.

Oliveira (2022), caracteriza o processo de produção de hidrogênio verde por meio de fontes de energias renováveis solar, eólica ou hídrica produzem o H<sub>2</sub> por meio da eletrólise da água. O produto gerado pode ser armazenado através do processo de compressão ou liquefação e a distribuição pode ocorrer diretamente no local utilizando gasodutos, transporte rodoviário ou transporte marítimo. Para o consumo final, existem diversas alternativas como a utilização local, produção de energia elétrica e até a exportação.

De acordo com Oliveira (2022), o termo discutido pela *International Renewable Energy Agency* (IRENA) para incentivar novas rotas e criar oportunidades é o hidrogênio de baixo carbono, sendo também utilizada pela *International Energy Agency* (IEA). Com isso, a ideia é certificar que a origem de produção do H<sub>2</sub> possui baixa ou nenhuma emissão de GEE aumentando o valor de rotas com CCUS, que utilizam biomassa como matéria prima a exemplo do etanol e do biogás e ainda, inclui o H<sub>2</sub>ER. Essa certificação agregaria valor a produtos que utilizaram esse tipo de hidrogênio em seu processo como o aço ou fertilizantes.

Segundo o SENAI CIMATEC (2023), a cadeia de suprimento do H<sub>2</sub> eletrolítico renovável, representada na FIGURA 7, possui três etapas. A primeira é a *upstream*, a qual é composta por equipamentos de geração de energia como os aerogeradores, sistemas solares fotovoltaicos, hidrelétricas e os recursos hídricos. O *midstream* é a fase de produção e o armazenamento inicial do hidrogênio. Por último, o *downstream* é a etapa de distribuição e consumo final.

FIGURA 7 - CADEIA DE SUPRIMENTO DE H<sub>2</sub>ER

FONTE: SENAI CIMATEC (2023).

### 2.2.3 Armazenamento e transporte

De acordo com a EPE (2021), a cadeia do hidrogênio enfrenta desafios para casos em que o cliente está longe distante, sendo mais recorrente a proximidade da produção com o consumo. O armazenamento é um problema que o setor enfrenta já que demanda uma tecnologia avançada, visto que nas condições ambientes de temperatura e pressão o H<sub>2</sub> é um gás expansivo, sendo sua percepção quase indetectável por ser inodoro e incolor. Além disso, tem baixa densidade e pontos de ebulição e fusão o que dificulta sua manipulação. Uma maneira de superar essa dificuldade é utilizar compostos como amônia (NH<sub>3</sub>) para transporte do H<sub>2</sub> e depois separá-lo para sua utilização. (Fussuma *et al.*, 2024)

O armazenamento de hidrogênio pode ser realizado de várias maneiras, incluindo a compressão, liquefação e o uso de hidretos. A compressão é um dos métodos mais comuns para armazenar hidrogênio. Neste processo, o hidrogênio é comprimido em cilindros de alta pressão, sendo mais utilizado devido à sua simplicidade. A principal desvantagem deste método é o peso e o volume ocupado pelas estruturas que retêm o gás, que acaba sendo significativo e dificulta o transporte

em grandes quantidades. Já a liquefação, envolve resfriar o hidrogênio a temperaturas criogênicas abaixo de  $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$  ocupando menos espaço do que no Estado gasoso, permitindo o armazenamento de grandes quantidades em volumes menores. No entanto, este método requer isolamento térmico eficiente para manter a baixa temperatura e evitar a perda por evaporação. Outra forma de armazenamento é por meio dos hidretos, os quais são compostos que podem capturar o hidrogênio em suas estruturas químicas. Os dois principais tipos são os hidretos metálicos e os hidretos orgânicos. Os compostos formados entre hidrogênio e metais podem absorver e liberar hidrogênio sob determinadas condições de temperatura e pressão. Essa ligação química com o composto metálico faz com que o  $\text{H}_2$  fique mais estável, tornando o armazenamento mais seguro. Já os hidretos orgânicos são compostos portadores de hidrogênio como é o caso do metanol, amônia e outros líquidos orgânicos portadores de  $\text{H}_2$  (LOHCs). Esses compostos líquidos à temperatura ambiente, facilitam o armazenamento e o transporte, e podem ser decompostos para o uso específico do  $\text{H}_2$  em outro processo. (Hunt *et al.*, 2023)

Para a distribuição da produção de hidrogênio é importante considerar as perdas de energia ao longo de sua cadeia. Elas ocorrem no processo de eletrólise, no armazenamento e no transporte do gás. Sendo assim, a finalidade do uso do  $\text{H}_2$  é essencial para a escolha da rota a ser utilizada. O transporte como hidrogênio liquefeito apresenta maior pureza e seu escoamento por rodovias ou ferrovias é mais fácil, porém apresenta maiores perdas por evaporação quando comparado ao hidrogênio convertido em amônia. Uma outra forma para o escoamento do  $\text{H}_2$  é utilizando os dutos de gás natural já existentes. As principais preocupações em relação ao uso do sistema dutoviário já utilizado são em relação a fragilização do aço, o controle de vazamentos e o uso de compressores mais robustos. Sendo assim, a opção para transporte mais interessante é em gasodutos não metálicos dedicados ao gás hidrogênio, porém seria necessário o investimento em uma nova infraestrutura. (Fussuma *et al.*, 2024)

Segundo Hunt *et al.* (2023), o transporte de grandes volumes de  $\text{H}_2$  para longas distâncias é mais viável por gasodutos para distribuições terrestres e de forma líquida associados a outros compostos para o transporte marinho. Já para curtas distâncias e volumes menores, é possível economicamente e tecnicamente utilizar o gás na forma comprimida.

Os gasodutos são tubulações em que o H<sub>2</sub> é transportado em alta pressão. Durante o percurso, a pressão na linha de gás é reduzida por conta da perda de carga causada pelo atrito na tubulação, o que exige a instalação de compressores ao longo da distribuição. Outra desvantagem é em relação a corrosão interna causada pela elevada reatividade do hidrogênio, necessitando materiais mais resistentes, ou seja, de maior custo. Já o transporte por navios pode ser feito com o H<sub>2</sub> na forma comprimida ou liquefeita. Cabe ressaltar que para a mesma quantidade de energia de gás comprimido em um navio, seria necessário utilizar três navios com hidrogênio líquido. Por outro lado, o volume para transporte na forma líquida é muito maior do que na gasosa. O transporte marinho é mais flexível do que o feito por gasodutos devido a problemas geológicos ou geopolíticos em que a estrutura do duto está instalada. Sendo assim, a utilização de navios é mais segura para exportações, porém mais cara pela necessidade da alteração das condições do H<sub>2</sub> para o transporte. Por sua vez, os caminhões e as ferrovias possuem o mesmo impasse que os navios referente à compressão ou liquefação do gás para transporte. O modal terrestre é mais viável para curtas distâncias devido a restrição de menores volumes ainda que por meio das ferrovias, é possível maiores quantidades de maneira mais barata e segura do que por rodovias. (Hunt *et al.*, 2023)

### 2.3 REGULAMENTAÇÃO

A regulamentação é essencial para o desenvolvimento de mercados e indústrias com a criação de regras e diretrizes estabelecidas por autoridades governamentais ou organizações internacionais para garantir a segurança, conformidade de produtos, serviços e processos. Em setores emergentes, como o caso do H<sub>2</sub> de baixo carbono, a regulamentação é importante para orientar investimentos, promover inovações e alcançar metas ambientais, tornando o produto competitivo em um mercado tradicional e estabilizado como o setor energético.

De acordo com IEA (2024), 19 novas estratégias para o hidrogênio foram publicadas entre outubro de 2023 até o mesmo mês em 2024. São diversas diretrizes e legislações lançadas entre 60 países ou organizações distintas, alcançando 84% dos países comprometidos com a diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> e GEE. A maior parte das estratégias publicadas nesse intervalo de tempo são de países emergentes economicamente e que o principal alvo é relacionado à produção do H<sub>2</sub>. Os países e

organizações internacionais que possuem uma legislação definida publicada até 2024 são apresentados na FIGURA 8.

FIGURA 8 - ESTRATÉGIAS DE HIDROGÊNIO PUBLICADAS

2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Japan	France	Australia Korea	Canada Chile European Union Germany Netherlands Norway Spain Portugal Russia	Belgium Colombia Czech Republic Denmark Hungary Luxembourg Morocco Poland Slovak Republic United Kingdom	Austria China Costa Rica Croatia Namibia Oman South Africa	Algeria Argentina Bhutan Brazil Bulgaria ECOWAS Ecuador Estonia India Indonesia Ireland Israel Kenya Malaysia Mauritania New Zealand Panama Romania Singapore Sri Lanka Türkiye United Arab Emirates United States Uruguay	Iceland Egypt Kazakhstan Lithuania Tunisia Viet Nam

Note: ECOWAS = Economic Community of West African States.

IEA. CC BY 4.0.

FONTE: IEA (2024).

### 2.3.1 Cenário regulatório brasileiro

O Brasil tem progredido em suas regulamentações e iniciativas relacionadas ao hidrogênio como vetor energético, destacando-se desde 2005 com o lançamento do "Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil" pelo MME. Entre 2010 e 2018, documentos como o "Hidrogênio Energético no Brasil" e o "Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação para Renováveis e Biocombustíveis" incentivaram pesquisa e inovação no setor por parte do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI). A criação da Associação Brasileira do Hidrogênio (ABH2) em 2017 reforçou a colaboração entre atores do mercado. Em 2020, o hidrogênio ganhou destaque no Plano Nacional de Energia 2050, que reconheceu o potencial renovável do país e os desafios relacionados a transporte e armazenamento. No ano de 2021, o CNPE e a EPE publicaram resoluções e estudos estruturantes, incluindo o

"Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro", que analisou tecnologias e potenciais do hidrogênio eletrolítico renovável no Brasil em comparação com líderes globais. (AHK Rio, 2021; Oliveira, 2022b)

Ainda Em 2021, a EPE lançou a “Nota técnica: bases para a consolidação da estratégia brasileira do hidrogênio”, abordando desafios e oportunidades para o desenvolvimento do setor e destacando a importância de diversas rotas, como o hidrogênio azul, cinza e turquesa, para sua consolidação econômica. No mesmo ano, o MME, em parceria com a AHK Rio, apresentou o estudo “Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde”. Este estudo traçou um panorama da indústria de hidrogênio no Brasil, identificando os principais agentes acadêmicos e institucionais, além de avaliar a maturidade tecnológica do país em comparação com líderes globais no desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio e *Power-to-X*. (EPE, 2021; MME, 2021)

Com o crescimento do setor, o governo brasileiro lançou em agosto de 2021, as “Diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2)”. Foi oficialmente estabelecido pelo CNPE em 2022, com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria de H<sub>2</sub>, criando uma segurança para investimentos. Os 6 eixos propostos pelo PNH2 exibidos na FIGURA 9, definem os principais pilares temáticos da área, orientando os caminhos que a política nacional deve seguir e aprofundar ainda mais essas diretrizes. Em 2022, ao investigar diversas opções para a produção de hidrogênio, o governo brasileiro lançou uma série de documentos que resumem essas iniciativas. (ANP, 2024)

FIGURA 9 - DIRETRIZES DO PNH2



FONTE: MME (2021).

Em decorrência do PNH2, foi publicado em agosto de 2023 o “Plano de Trabalho Trienal 2023 – 2025” pelo MME. O referido plano contém as principais perspectivas para o mercado no Brasil, destacando o potencial de produzir até 1,8 Gt de hidrogênio por ano. Além disso, o documento elucida as principais estratégias e as metas do país no tema, que podem ser resumidas na FIGURA 10. (ANP, 2024)

FIGURA 10 - MARCOS TEMPORAIS PARA A ECONOMIA DO H<sub>2</sub>



FONTE: MME (2023).

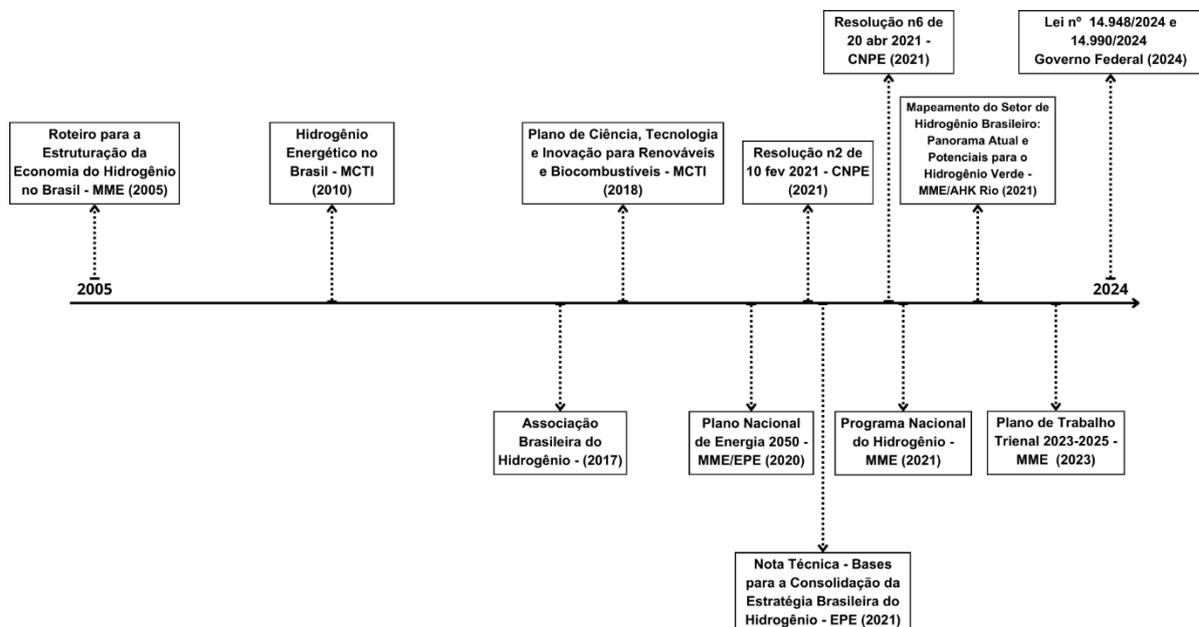
As mais recentes atualizações no setor brasileiro foram as sanções dos Projetos de Lei 14.948/2024 e 14.990/2024. O primeiro foi publicado em 2 de agosto de 2024, em que se instituiu a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono. Em resumo, a Lei nº 14.948/2024 estabelece três definições: o H<sub>2</sub> de baixa emissão de carbono, cuja deve ser menor ou igual a 7 kg de CO<sub>2</sub> para cada kg produzido; o H<sub>2</sub> renovável, que se enquadra na categoria anterior e é obtido como hidrogênio natural ou de fontes renováveis como biocombustíveis; e por fim, o H<sub>2</sub>V, que também se encaixa nas classificações anteriores e é gerado por eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis. Além disso, a legislação determinou que a ANP será o órgão responsável por regular e autorizar as atividades relacionadas ao tema e introduziu o Sistema Brasileiro de Certificação de Hidrogênio. A certificação ainda em desenvolvimento, seguirá critérios que serão definidos em regulamento e ainda será designada uma autoridade reguladora, encarregada de estabelecer e fiscalizar as diretrizes para garantir a conformidade com padrões internacionais de certificação. Por fim, o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro) com vigência de 5 anos (até 2029) que permitirá que

as empresas beneficiárias tenham isenção de taxas nas aquisições de materiais e equipamentos para projetos relacionados com o setor. (ANP, 2024)

Já a Lei 14.990/2024, sancionada em 27 de setembro de 2024, instituiu o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). O objetivo principal do programa é apoiar a transição energética por meio do uso de hidrogênio de baixa emissão de carbono, promovendo o desenvolvimento do hidrogênio renovável e incentivando a descarbonização em setores industriais de difícil redução de emissões, como o siderúrgico, fertilizantes, cimenteiro, químico e petroquímico. Além disso, o PHBC concede créditos fiscais para a comercialização de hidrogênio de baixa emissão de carbono e seus derivados produzidos no Brasil, com o objetivo de tornar o hidrogênio uma alternativa viável e sustentável. (GOV, 2024)

Um resumo referente ao progresso brasileiro com as legislações, diretrizes e documentos voltados à economia do H<sub>2</sub> é apresentado na FIGURA 11.

FIGURA 11 - PRINCIPAIS POLÍTICAS BRASILEIRAS VOLTADAS AO H<sub>2</sub>



FONTE: O autor (2024).

### 2.3.2 Regulamentação para o H<sub>2</sub> eletrolítico renovável

A certificação da origem do hidrogênio é importante para validar a diminuição de emissões de GEE e valorizá-lo no mercado e em consequência, os produtos dos

processos que utilizarem o H<sub>2</sub>ER. As moléculas de H<sub>2</sub> de origem fóssil são idênticas às de origem renovável e limpas. Por isso, é necessário um sistema de certificados que comprovem a origem e que possua reconhecimento das organizações e governos que atuam no setor. (IRENA, 2020a)

De acordo com Kelman *et al.* (2024) as certificações objetivam de forma criteriosa a confiabilidade das características do produto ao consumidor, garantem a adequação às metas de energias renováveis e reduções de emissão de GEE, além de permitir alcançar preços de acordo com a valorização de produtos sustentáveis nos mercados. Adicionalmente, os certificados devem estar de acordo com os marcos regulatórios em que o H<sub>2</sub> irá ser avaliado para ter validação.

Por conta de ser um setor nos estágios iniciais, ainda não existem certificações concretas e definidas, em que a maioria delas ainda se encontram no processo de validação. Pelo motivo de ainda não existir nada concreto, acaba dificultando investimentos em projetos de produção em larga escala, principalmente no âmbito de exportação, visto que as agências regulatórias de cada país divergem em algumas questões de termos e especificações do produto. Apesar de não ter um padrão definido, a *International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy* (IPHE) procura estabelecer uma metodologia em consenso de diversos países e organizações para determinar os níveis permitidos de GEE e poluentes resultantes da produção de hidrogênio. O objetivo é criar uma base para padronizar globalmente e permitir que seja aplicada a sistemas de certificações regionais posteriormente. (Kelman *et al.*, 2024)

Alguns países e organizações possuem certificações em uso que estão sendo validadas e possivelmente serão precursoras na definição dos termos e diretrizes no setor. Alguns certificados mais relevantes estão expostos na TABELA 2.

TABELA 2 - CERTIFICAÇÕES RELEVANTES DE H<sub>2</sub>

Certificado	Ano	Descrição
<i>CertifHy</i>	2014	Não governamental e o primeiro certificado de garantia de origem para o H <sub>2</sub> , operando dentro da UE e classifica o hidrogênio como H <sub>2</sub> V e H <sub>2</sub> de baixo carbono em conformidade com a RED II
<i>International Sustainability and Carbon Certification (ISCC)</i>	2023	Organização internacional com sistemas de certificação para matérias-primas e produtos sustentáveis. Há algumas

		tipologias de certificado como o ISCC EU em conformidade com os requisitos do RED II e o ISCC PLUS que cobre necessidades de diferentes mercados.
<i>Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB)</i>	2022	Organização internacional que desenvolveu um padrão a ser aplicado à produção de combustíveis, biomassa e materiais de origem biológica.
<i>TÜV SÜD Standard CMS 70</i>	2011	Desenvolvida por uma empresa alemã, é aplicada em toda UE com duas etiquetas na certificação. O <i>GreenHydrogen</i> , com os padrões mínimos da RED II e o <i>GreenHydrogen+</i> , que considera toda a cadeia até a entrega ao cliente, critério de adicionalidade e correlação temporal.
<i>Green Hydrogen Standard (GH2)</i>	2022	Feito por uma empresa Suíça, específico para o H <sub>2</sub> V, o qual define que toda a produção a partir da eletrólise deve ser no mínimo 95% de energia renovável.
<i>Zero Carbon Certification Scheme</i>	2020	Abrange somente a Austrália e certifica que o H <sub>2</sub> , amônia ou metal verde tenha sido feito a partir de fontes renováveis de energia.
Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE)	2022	A primeira certificação brasileira de hidrogênio renovável será feita em etapas com o objetivo de se adequar às regras do mercado que ainda estão sendo estabelecidas. Ainda considera somente o H <sub>2</sub> produzido a partir da eletrólise da água com duas etiquetas: hidrogênio de fonte renovável considera emissão de carbono igual a zero (apenas fontes renováveis). Enquanto isso, para o hidrogênio de fonte parcialmente renovável o teor de carbono é calculado a partir da emissão do SIN.

Fonte: Kelman *et al.* (2024).

Avaliando a TABELA 4, é evidenciada algumas das atuais certificações aplicadas na União Europeia, sendo a maioria desenvolvida a partir dos critérios da *Renewable Energy Directive* (RED II). O RED III, uma atualização mais recente desta diretiva, foi publicada recentemente em 18 de outubro de 2023 com o principal objetivo de direcionar a transição energética para a diminuição de emissões de GEE, com uma meta de no mínimo 42,5% da participação de energias renováveis até 2030. (Parlamento Europeu, Conselho da União Europeia, 2023)

De acordo com o RED III, os *renewable fuels of non-biological origin* (RFNBO), com a tradução para combustíveis renováveis de origem não biológica, são combustíveis são fatores cruciais para a implementação e consolidação de renováveis

pela Europa. Estes são definidos como combustíveis líquidos ou gasosos cuja energia é derivada de fontes renováveis que não envolvem a fração biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica. De acordo com a Comissão Europeia (2023), o hidrogénio gasoso produzido por um eletrolisador com fontes renováveis de energia é um RFNBO e combustíveis líquidos como o metanol, amônia e outros sintéticos entram nessa classificação caso forem produzidos a partir do H<sub>2</sub>ER. Os RFNBO, podem ser utilizados nos setores de transporte, indústria e energia para ajudar a atingir metas de descarbonização estabelecidas pelo Parlamento Europeu. (STONES, 2024)

Segundo o RED III, para a produção de RFNBO é necessário que alguns critérios sejam cumpridos. A energia elétrica para a sua produção deve ser de fontes renováveis de energia podendo estar conectadas diretamente *off-grid*. Caso estejam *on-grid*, devem existir um contrato de fornecimento de energia (PPA - *Power Purchase Agreement*). Se a conexão da produção do combustível for apenas com a rede elétrica, é necessário que a região de instalação da planta esteja em uma *bidding zone* com no mínimo 90% de geração de fontes renováveis (eólica, solar, hidrelétrica e biomassa) no ano anterior.

Para a produção de H<sub>2</sub> eletrolítico renovável com a conexão *on-grid* com PPA, o eletrolisador e as usinas renováveis devem ter relação temporal e serem localizados na mesma *bidding zone*. A geração pelas fontes renováveis deve ser maior ou igual ao consumo pelo processo de eletrólise mensalmente (período em que é avaliado o consumo da planta). Já referente à localização, o eletrolisador e a fonte de geração elétrica devem estar na mesma *bidding zone*, ou em uma região em que o preço do kWh seja maior na geração de energia ou igual do que a região em que a planta de eletrólise está situada. Além disso, todos os projetos que começarem a produção de H<sub>2</sub> a partir de 2028, haverá o critério de adicionalidade em que a energia elétrica utilizada no processo deve ser feita por usinas renováveis com até 36 meses de diferença de início de operação do eletrolisador. (Kelman *et al.*, 2024)

Com o objetivo de produção para a exportação, as diretrizes propostas pelo RED III serão aplicadas tanto ao H<sub>2</sub> produzido na Europa quanto ao produto importado pelos países da UE, sendo necessário seguir as recomendações deste regulamento para vender ao mercado europeu. Apesar de indefinições no cenário brasileiro quanto a certificação aceita, em relação às *bidding zones* e aos incentivos e auxílios permitidos pelo governo no contexto da adicionalidade, é importante o alinhamento

com as regras e normas propostas pelo RED III para a produção de H<sub>2</sub> renovável visando a comercialização internacional.

## 2.4 ENERGIA RENOVÁVEL

A energia renovável refere-se às fontes de energia que derivam de processos naturais e contínuos, caracterizadas pela inexauribilidade e baixa emissão de gases de efeito estufa. Exemplos de algumas fontes de geração renovável são a energia solar fotovoltaica, eólica, hidrelétrica e biomassa. A transição energética para fontes renováveis é essencial para a mitigação das mudanças climáticas e a diversificação da origem da energia e meios utilizados para segurança energética. Além do setor elétrico para geração de energia, áreas como processos térmicos industriais com a utilização de biomassa e o transporte com carros elétricos são exemplos de transição das fontes fósseis para as renováveis. Infelizmente, a competitividade com os meios tradicionais ainda é desfavorável economicamente, cenário que vem mudando por conta do desenvolvimento da tecnologia e políticas favoráveis para a utilização de energia renovável. A previsão é de que em 2028, a parcela mundial de energia elétrica gerada por fontes renováveis seja igual a 41,6%, a qual em 2022 foi de 29,5%. (IEA, 2023b)

### 2.4.1 Energia solar fotovoltaica

O Sol é uma fonte inesgotável de energia, a qual alimenta direta ou indiretamente os processos térmicos, dinâmicos e químicos da Terra. A geração solar fotovoltaica (FV) é um processo que transforma a energia de radiação solar em eletricidade utilizando painéis FV, os quais feitos de materiais semicondutores, como o silício. Quando ocorre a incidência da luz solar sobre as células FV, os fótons são absorvidos, excitando os elétrons dos átomos do material semicondutor. Esse movimento dos elétrons gera uma corrente elétrica. (Balfour *et al.*, 2016)

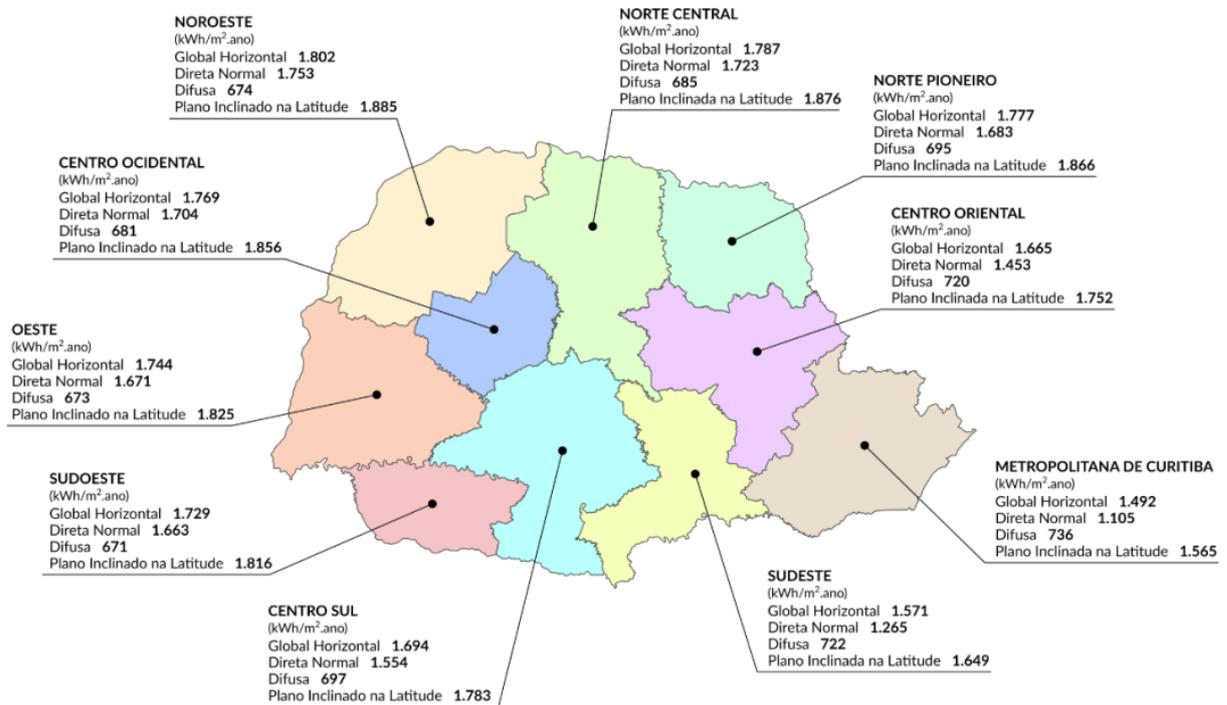
Fatores como a órbita elíptica da Terra e a inclinação do eixo terrestre fazem com que a quantidade de radiação solar varie ao longo do ano, influenciando a produção de energia elétrica dos sistemas FV. A hora solar também impacta diretamente na intensidade da radiação recebida durante o dia, sendo maior durante o meio-dia solar (horário de pico) menor no início da manhã e final da tarde. Além disso, o clima afeta significativamente o desempenho dos painéis solares.

Sombreamentos por nuvens ou outros objetos e temperaturas elevadas podem reduzir a eficiência e causar danos aos componentes do sistema FV. As células solares funcionam de maneira mais eficaz em condições mais frias devido às características dos semicondutores, que perdem eficiência em temperaturas altas por conta da excitação dos seus elétrons. (Balfour et al., 2016; Pereira et al., 2017)

Para a implementação de uma usina solar em um local, é indispensável conhecer o potencial da região e o quanto de energia é possível produzir. Por conta disso, é necessário avaliar a irradiância que representa a quantidade de potência solar recebida por unidade de área em uma superfície específica, medida em  $W/m^2$ . É uma medida instantânea da intensidade do sol que atinge uma determinada superfície a dado momento. A irradiância global horizontal (IGH) é a soma da radiação direta do sol, a radiação difusa decorrente do desvio do feixe solar e a radiação refletida pelo solo e outros objetos. A IGH é um indicador chave para avaliar o potencial de geração de energia solar em um local específico, considerando todas as formas de incidência da radiação. A Irradiação solar, por outro lado, é a quantidade total de energia solar recebida por unidade de área durante um determinado período, geralmente medida em  $kWh/m^2$ . Pode ser vista como a soma da irradiância ao longo do tempo, representando a energia total disponível em um dado período, como um dia, mês ou ano. (Pereira *et al.*, 2017)

De acordo com Tiepolo *et al.* (2018), o Estado do Paraná possui uma irradiação média global horizontal no ano igual  $1.705 kWh/m^2$ . Na FIGURA 12, é possível identificar as irradiações por mesorregião do Estado.

FIGURA 12 - IRRADIAÇÃO SOLAR POR MESORREGIÃO NO PARANÁ



Fonte: Tiepolo *et al.* (2018).

De acordo com IRENA (2024b), o setor de energia solar fotovoltaica registrou, em 2022, uma capacidade instalada mundial próxima a 1.064 GW, com uma geração total de 1.016.898 GWh no ano. A China lidera tanto em capacidade quanto em geração de energia solar, seguida pelos Estados Unidos, alguns países da União Europeia, Japão e Índia. O Brasil é o 6º país com maior capacidade de módulos FV instalados (25,5 GW).

Segundo dados do *Global Solar Atlas* (2024), a irradiação média anual na Alemanha, o principal país europeu no setor, é de 1076 kWh/m<sup>2</sup>, enquanto no Japão o valor sobe para 1237 kWh/m<sup>2</sup>. Esses dados destacam o potencial de geração solar fotovoltaica no Estado do Paraná, que possui uma disponibilidade de energia solar superior à de dois dos principais países que utilizam esse recurso.

#### 2.4.2 Energia eólica

O vento é essencialmente a manifestação visível da energia cinética no ar atmosférico. Essa energia cinética é originada do movimento de massas de ar, que se deslocam devido principalmente a diferenças de pressão e temperatura na superfície terrestre. Os movimentos de massa de ar resultam em correntes que podem ser fortes

ou suaves, dependendo da magnitude das diferenças de pressão. As turbinas eólicas são responsáveis por converter a energia cinética do vento em energia elétrica. As estruturas possuem geralmente entre 50 e 150 m de altura para atingir maiores velocidades. A passagem do vento ocorre pelas pás do aerogerador girando-os e rotacionando um eixo conectado a um gerador, o qual converte a energia mecânica em energia elétrica. (Fadigas, 2011)

No ano de 2022, o Brasil representou cerca de 2,7% da capacidade instalada de aerogeradores no mundo. Dos quase 902,9 GW instalados globalmente, a China (366 GW) e os Estados Unidos (141,7 GW) são os principais países desse setor em relação ao total de capacidade instalada. Segundo o BEN da EPE (2024), o Brasil gerou um total de 95.601 GWh de energia elétrica por fonte eólica. (IRENA, 2024b)

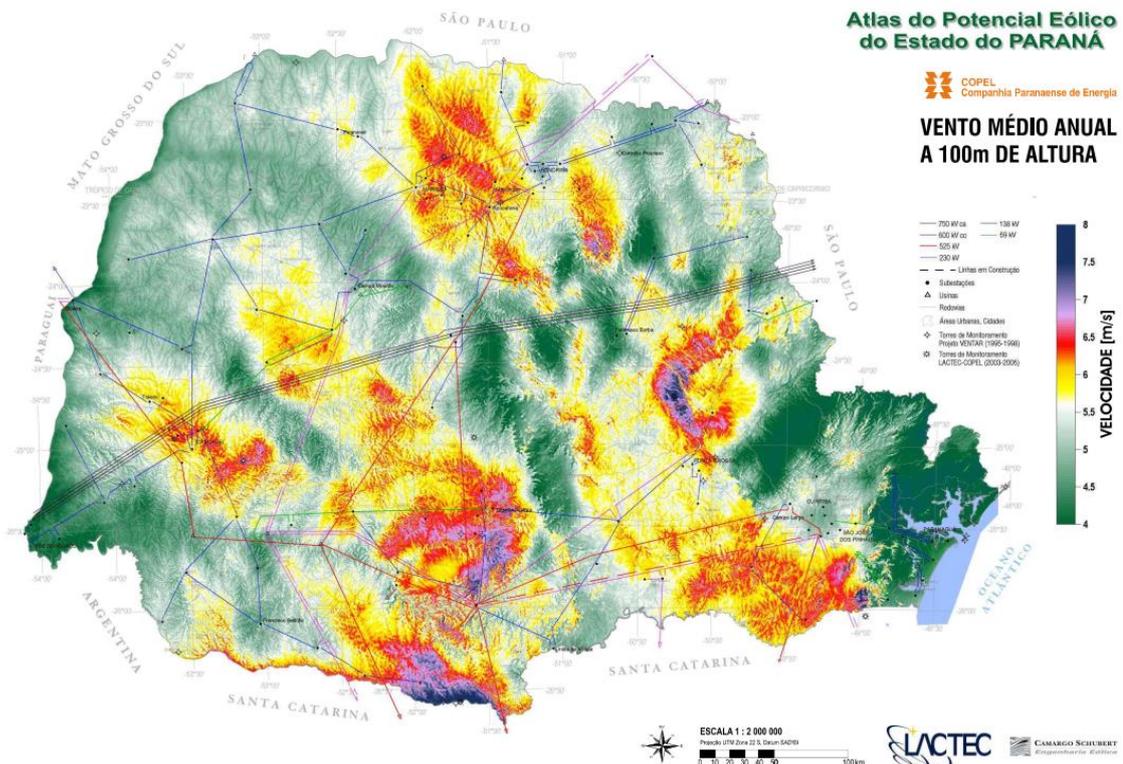
A principal dificuldade da geração de energia eólica é em relação à natureza estocástica do vento, a qual significa que ele é imprevisível e aleatório alterando constantemente sua direção e velocidade. Para lidar com essa variabilidade, utiliza-se a distribuição de Weibull, que ajuda a modelar a frequência das velocidades. A distribuição é caracterizada por parâmetros que representam a média da velocidade e a simetria dos dados. A construção de uma curva de permanência eólica permite avaliar a frequência com que uma determinada velocidade de vento ocorre em um intervalo de tempo, possibilitando estimar a produção de energia de acordo com as características da turbina eólica. (Pinto, 2012)

Em alturas em que as turbinas estão instaladas, o vento é afetado por condições de relevo, pela rugosidade aerodinâmica do terreno, presença de obstáculos e estabilidade térmica vertical. Essas condições combinadas com as constantes alterações climáticas dos movimentos de massa de ar, resultam em uma variação constante nas velocidades que atacam os aerogeradores. Usualmente, a geração elétrica se inicia com velocidades de vento da ordem de 2,5 m/s até 15 m/s a depender das especificidades e da curva de potência da turbina. Em condições de vento fraco, abaixo da velocidade de arranque em que a energia disponível não é suficiente para tirar a máquina da inércia, pode não ocorrer a geração energia ou estresse mecânico nos componentes. Por outro lado, em ventos excessivos, as turbinas sofrem com danos estruturais e principalmente na máquina elétrica. (Copel, 2007)

De acordo com a Copel (2007), o Paraná possui 2.053 km<sup>2</sup> de regiões com a velocidade média do vento acima de 7 m/s a 100 metros de altura e um potencial de

geração de 9.390 GWh anuais. Esse valor é muito próximo da demanda elétrica residencial total do Estado, igual à 9.504 GWh em 2023, e seria equivalente a cerca de 10% da geração eólica total do país, de acordo com as informações apresentadas no BEN, pela EPE (2024). Segundo Pinto (2012), o Estado possui um potencial para instalar 3.375 MW, sendo que as regiões de destaque eólico são cidades do sul, centro-sul e centro do Paraná, como Palmas, Guarapuava e Tibagi. As regiões de Londrina, Maringá, Cascavel e na Serra do Mar também possuem certo destaque. O BEN evidenciou a baixa utilização dos recursos eólicos no Estado apesar do cenário promissor desta fonte, com uma capacidade instalada de 12 MW em 2023, valor muito abaixo do potencial teórico. Na FIGURA 13, é possível perceber as regiões com maior potencial eólico do Estado.

FIGURA 13 - POTENCIAL EÓLICO DO PARANÁ



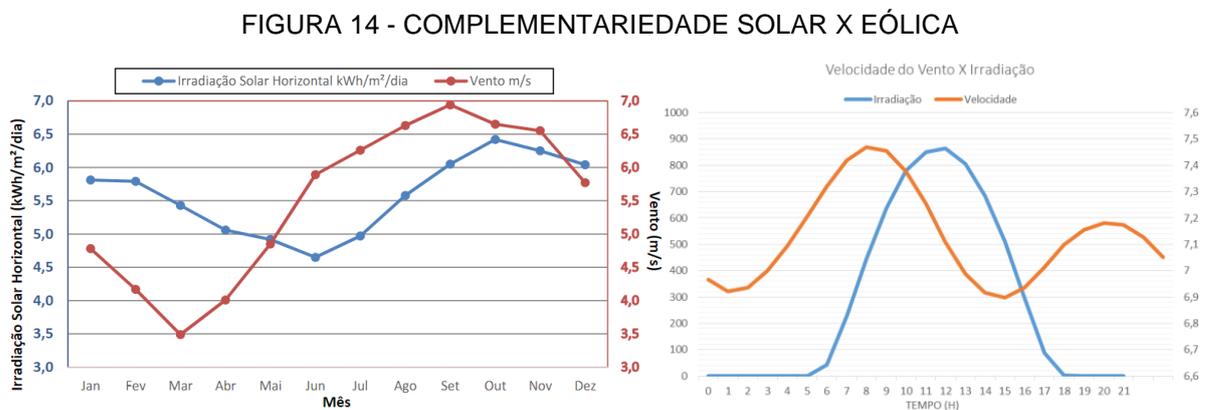
Fonte: Copel (2007)

#### 2.4.3 Complementariedade solar x eólica

Um sistema eólico-fotovoltaico pretende complementar a geração eólica com a solar, na tentativa de preencher lacunas causadas por condições desfavoráveis para

um dos processos de geração. A exemplo de um dia nublado ou com velocidades insignificantes de vento, a união das duas fontes de energia busca maior confiabilidade de geração, no aproveitamento conjunto dos recursos naturais disponíveis, evitando a utilização de fontes não renováveis como geradores a diesel para suprir as intermitências. A dificuldade deste sistema está em relação a complexidade de otimização entre os recursos e a possível utilização de um sistema de armazenamento de energia, pois mesmo com a complementaridade o sistema está suscetível a momentos sem geração elétrica. (Pinto, 2019; Silva *et al.*, 2020)

As FIGURAS 14 representam as médias mensais e horárias de disponibilidade dos recursos para geração eólica e solar fotovoltaica, possibilitando visualizar a complementaridade do sistema. As imagens representam as características de cidades distintas utilizadas apenas como uma forma de representação. Cada local possui uma particularidade e é necessário fazer um estudo de caso, pois as condições climáticas são específicas por diversos motivos que influenciam no perfil de cada região. Avaliando as FIGURAS 14, percebe-se as diferenças entre as duas fontes e complementariedade destas de acordo com as deficiências em relação ao clima.



Fonte: Silva *et al.* (2020); Aguiar (2023).

## 2.5 RECURSOS HÍDRICOS

A eletrólise utiliza eletricidade e água como matéria-prima para a produção de hidrogênio. Os recursos hídricos são todas as fontes de água disponíveis em diversas atividades humanas. Isso inclui água doce de rios, lagos, reservatórios e aquíferos, a água salgada dos oceanos e águas residuárias. Segundo IRENA (2020b) o uso da

água não é um fator limitante para o processo de eletrólise por conta das diversas alternativas de obtenção deste recurso para a produção de hidrogênio. Porém em locais com estresse hídrico e escassez, a fonte de água para a produção de hidrogênio deve ser considerada nas estratégias do planejamento do projeto. Acesso à água do mar e águas residuárias são opções para evitar competição com o abastecimento urbano, irrigação na agricultura e outros processos com outorgas.

Por conta da necessidade de utilizar a água com elevado teor de pureza por limitações dos eletrolisadores, principalmente os que utilizam a tecnologia PEM, é necessária uma estação para tratamento da água e a complexidade e custo deste processo inicial vai de acordo com o grau de impureza da origem desse recurso, sendo.

O documento “Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos do Estado do Paraná” publicado pelo IAT (2020) fornece as informações dos recursos hídricos no Estado. Nele é possível obter informações sobre a quantidade de água superficial e subterrânea disponível o uso dos recursos hídricos e a qualidade da água por bacia hidrográfica, por conta do monitoramento e gerenciamento feito pelas unidades hidrográficas. Na FIGURA 15, estão apresentadas as bacias do Estado do Paraná.

FIGURA 15 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DO PARANÁ



Fonte: IAT (2020).

## 2.6 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Geoprocessamento é o conjunto de técnicas e tecnologias utilizadas para coletar, processar, analisar e apresentar dados geográficos. Envolve o uso de sistemas de informações geográficas (SIG) e ferramentas de sensoriamento remoto para manipular e visualizar informações espaciais que descrevem objetos ou fenômenos sempre associados à sua localização. Isso permite a realização de análises complexas, como a modelagem de terrenos, a análise de uso do solo, planejamento urbano e diversas outras aplicações referentes a processamento de dados geograficamente referenciados. (Ibrahin, 2014; Stein *et al.*, 2021)

O SIG integra em uma única base de dados informações espaciais de diversas fontes como dados cartográficos ou imagens de satélites, combinando essas informações para gerar mapeamentos derivados, consultas e visualizações da base de geodados. Além disso, é uma ferramenta que auxilia a tomada de decisões, já que carrega diversas informações e permite cruzar e sobrepor os dados. (IBRAHIN, 2014)

De acordo com Stein *et al.* (2021), o SIG é uma ferramenta computacional utilizada para realizar a análise de dados geográficos em diferentes níveis de complexidade, integrando dados de fontes de origem diversas e criando um banco de dados georreferenciado. A possibilidade de coletar dados geoespaciais com temáticas diversas torna os SIGs aplicáveis a diversas áreas do conhecimento.

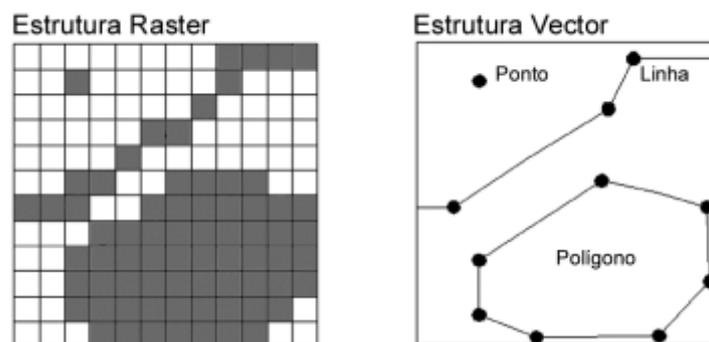
Para adquirir e construir os dados geográficos são realizados levantamentos em campo com a utilização de ferramentas, metodologias e aparelhos específico para a coleta de dado, que pode ser combinado com as imagens de satélite. Então, realiza-se a inserção dos dados em *software* SIG, para que sejam processados e possam ser utilizados na elaboração de mapeamentos derivados. A mesma informação pode ser obtida com o auxílio de estações totais e técnicas topográficas, que geram informação. Os *softwares* SIG foram desenvolvidos para serem utilizados em diversas aplicações, entretanto, podem ser diferenciados quanto às suas potencialidades. Isso significa dizer que o mesmo software pode ter desempenhos diferentes, dependendo da aplicação. (Stein *et al.*, 2021)

As operações possíveis em um *software* de SIG incluem o gerenciamento de banco de dados geográficos, integrando dados de diferentes fontes, formatos e temas em um banco de dados único. Além disso, realizam análises espaciais combinando e cruzando dados por meio de operações geométricas e topológicas, gerando novas

camadas que agregam as informações selecionadas. A produção cartográfica também é possível, com entrada, conversão e edição de dados, proporcionando uma apresentação final. (Ibrahin, 2014)

Os dados podem ser representados nos formatos vetorial ou matricial (*raster*). No modelo vetorial, as representações são feitas por pontos, linhas e polígonos. Pontos são definidos por um par de coordenadas, linhas por dois ou mais vértices que geram polígonos abertos e elementos como estradas e rios, e polígonos por três ou mais vértices conectados, formando áreas fechadas para delimitar elementos geográficos. Por outro lado, o modelo matricial organiza dados em uma matriz de células, cada uma com um valor que representa uma área no terreno. Imagens *raster* são compostas por *pixels*, em que cada um possui um valor que define sua localização e propriedades. Quanto menor o pixel, maior a resolução espacial da imagem. Em comparação as camadas vetoriais possuem uma estrutura mais complexa, com melhor resolução e são adequadas para todas as escalas, sendo que o modelo matricial é mais viável para realizações de cálculos entre sobreposições por ter uma estrutura menos complexa. Alguns softwares possuem ferramentas para realizar conversões entre os dois tipos de representação. Com a FIGURA 16, é possível diferenciar os dois tipos de camada em uma representação semelhante. (Ibrahin, 2014; Stein *et al.*, 2021)

FIGURA 16 - MODELO VETORIAL E MATRICIAL

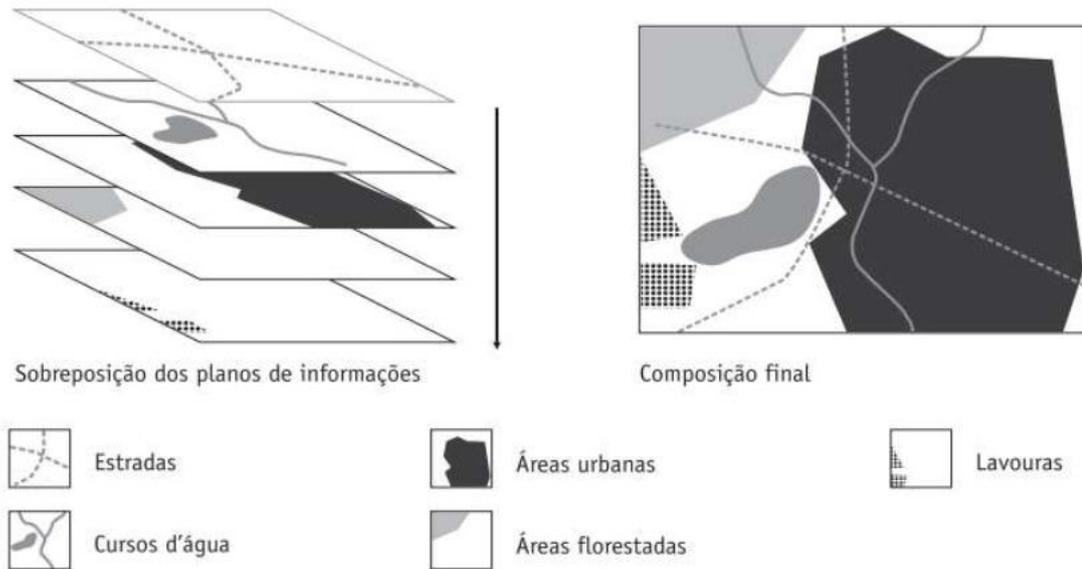


Fonte: Saboya (2000).

De acordo com Stein *et al.*, (2021), a sobreposição de diversas camadas temáticas para a geração de mapas de síntese deve utilizar a estrutura matricial. Averlan (2019) cita que para Fitz (2008), o procedimento mais importante SIG é

relacionar o sobrepor camadas para a criação de novas informações com dados previamente coletados. A FIGURA 17 mostra sobreposições de planos de informações individuais e como a camada resultante armazena as informações das anteriores.

FIGURA 17 - SOBREPOSIÇÕES DE CAMADAS SIG



Fonte: Fitz (2008) e Averlan (2019)

Além das sobreposições, é possível manipular as camadas e as informações de interesse com operações dentro do *software* SIG. Camadas vetoriais permitem relações de duas ou mais camadas como, intersecções, elementos contidos em ambas, apenas elementos contidos em todas ou em apenas uma delas. Já em consideração com demais ferramentas para utilizar com camadas *raster*, além das relações e sobreposições espaciais, é possível realizar operações matemáticas em formato matricial por conta dos *pixels* carregarem valores numéricos. (Stein *et al.*, 2021)

## 2.7 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Para uma tomada de decisão, é necessário a existência de um conjunto de alternativas disponíveis para sua composição associados a um ganho ou uma perda. O processo decisório pode ser aplicado por várias metodologias, sendo os que utilizam a análise multicritério aplicados para apoiar e conduzir as decisões. Uma

análise multicritério é uma metodologia utilizada para avaliar e comparar várias alternativas com base em múltiplos critérios. É especialmente útil em situações complexas onde decisões precisam ser tomadas considerando diversos fatores que podem ser conflitantes entre si. Essa análise envolve a identificação dos critérios relevantes, a atribuição de pesos a esses critérios com base em sua importância relativa, e a avaliação das alternativas em relação a cada critério. Um dos primeiros métodos, o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) desenvolvido por Thomas L. Saaty por volta de 1970, dedicado à decisão multicritério, é hoje talvez o mais extensivamente usado em todo o mundo, o qual o problema de decisão pode ser geralmente decomposto em níveis hierárquicos, facilitando assim, sua compreensão e avaliação. (Gomes, 2019)

### 2.7.1 Método de Análise Hierárquica (AHP)

De acordo com Saaty (1990), método AHP é uma técnica de tomada de decisão multicritério que descompõe problemas complexos em partes menores e mais gerenciáveis. Segundo Marins *et al.* (2009), O método pode ser dividido em três principais etapas: construção de hierarquias, definição de propriedades e consistência lógica.

Inicialmente, o problema a ser resolvido é claramente definido e os critérios de avaliação dos parâmetros devem ser identificados. Em seguida, o problema é estruturado em uma hierarquia que vai do objetivo principal aos critérios de menor influência no cenário em avaliação. Para isso, é criada a matriz de comparações pareadas, onde cada alternativa é comparada com as demais em relação a cada critério utilizando a escala fundamental de Saaty. Essa etapa permite avaliar a importância relativa de cada parâmetro de acordo com a TABELA 3. (SAATY, 1990)

TABELA 3 - ESCALA FUNDAMENTAL DE SAATY

Grau da Importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Contribuem igualmente para o mesmo objetivo
3	Importância pequena	Um parâmetro é julgado mais favorável que outro
5	Importância moderada	Um parâmetro é julgado moderadamente mais favorável que outro
7	Importância forte	Um parâmetro é julgado fortemente mais favorável que outro

9	Importância absoluta	Um parâmetro é julgado mais favorável que outro
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários	Escala para ordens mais complexas que não possuem definição nos intervalos definidos

FONTE: Adaptado de Saaty (1990).

Depois, os ponderadores de cada critério e alternativa são determinados, refletindo a sua importância relativa. Esses ponderadores são então utilizados para multiplicar os valores das alternativas, resultando em uma classificação final que orienta a decisão. Por último, para determinar se os critérios foram julgados de forma coerente, calcula-se a razão de consistência a qual deve ser menor do que 0,1. (MARINS *et al.*, 2009)

A metodologia AHP é amplamente utilizada em diversas áreas devido à sua abordagem estruturada e quantitativa para resolver problemas de decisão complexos. Em Averlan (2019), essa metodologia foi utilizada para realizar o mapeamento do potencial de geração de energia solar fotovoltaica no Estado de Santa Catarina. Já em Javarini *et al.* (2021), utilizou-se o método AHP para análise e indicadores de potencialidade na implantação de parques eólicos.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Para o mapeamento das regiões do Paraná com potencial de produção de hidrogênio eletrolítico renovável, a metodologia aplicada para o referido trabalho foi motivada pelos estudos realizados pelo SENAI CIMATEC (2023) em que se caracterizou o Estado da Bahia para a produção de H<sub>2</sub>V por meio da análise multicritério auxiliando a tomada de decisão, Averlan (2019) que aplicou a metodologia AHP para o mapeamento do potencial solar no Estado de Santa Catarina para geração fotovoltaica e Javarini et al. (2021) que utilizou do mesmo método para avaliar indicadores de potencial para parques eólicos. As etapas realizadas para a execução do trabalho são apresentadas na FIGURA 18.

FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DA METODOLOGIA



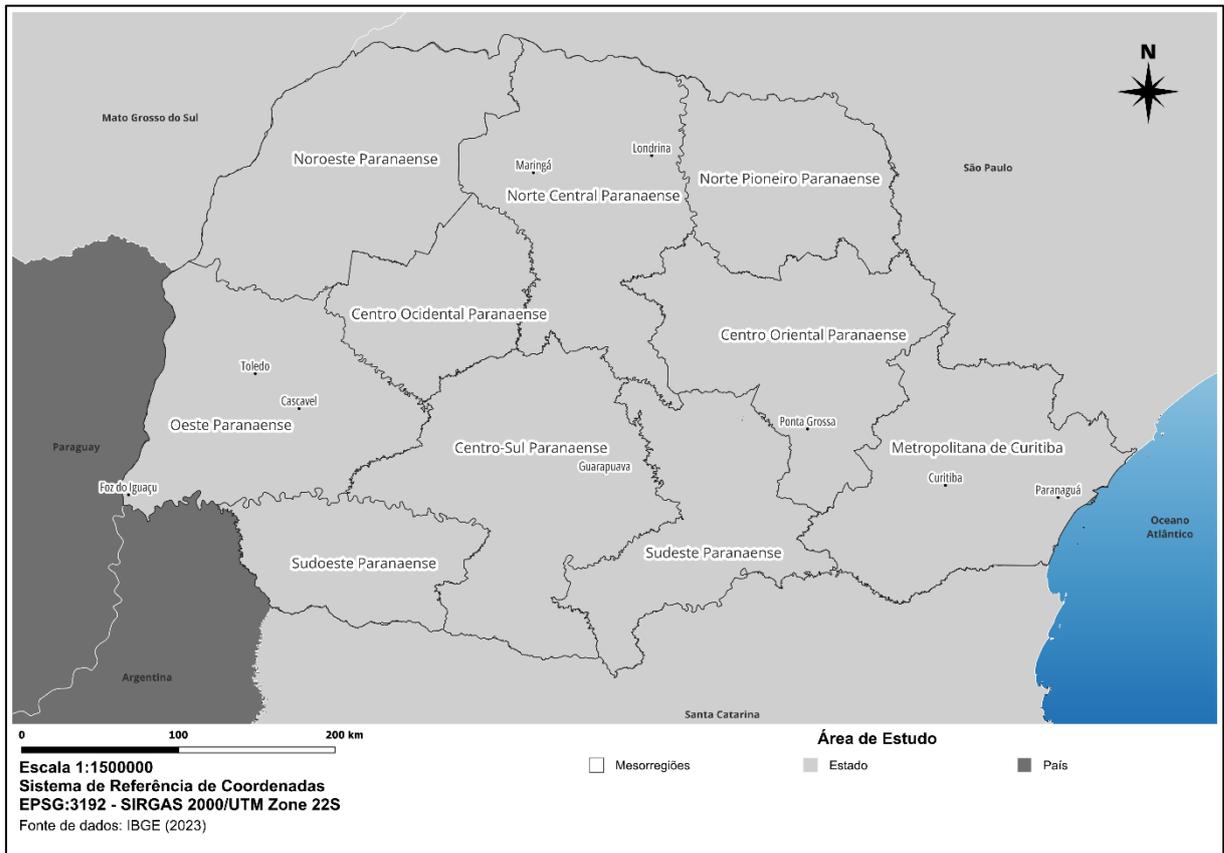
FONTE: O autor (2024).

Os tratamentos dos dados, cálculos e mapas deste trabalho foram realizados utilizando o *software* QGIS® - versão 3.36.1 - o qual é livre e de código aberto sendo utilizado para SIG.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo escolhida para a análise foi o Estado do Paraná, o qual possui 10 mesorregiões e está localizado na região sul do Brasil, fazendo fronteira com os Estados do Mato Grosso do Sul, São Paulo e Santa Catarina, além dos países Paraguai e Argentina conforme FIGURA 19. A base cartográfica utilizada para representar essa região e a camada vetorial do Estado e das mesorregiões para usar como recorte dos dados são disponibilizadas pelo IBGE (2023), o qual indica que o Paraná possui uma área territorial igual a 199.298,98 km<sup>2</sup>.

FIGURA 19 - ÁREA DE ESTUDO



FONTE: O autor (2024).

### 3.2 IDENTIFICAÇÃO E OBTENÇÃO DOS DADOS GEORREFERENCIADOS

Dentre várias possibilidades de rotas e cenários para a produção e utilização do H<sub>2</sub>, foi escolhido para este trabalho a implementação de um empreendimento de grande porte em que o recurso energético para o eletrolisador será disponibilizado por fontes renováveis de usinas recém-instaladas (solar e eólica), integradas no SIN e localizadas próximas à planta de eletrólise por conta do critério de adicionalidade adotado pela legislação europeia no RED III. O enquadramento na normativa europeia será utilizado como base para a planta de eletrólise por não existir uma regulamentação definida para o mercado interno brasileiro e com isso, atendendo uma das requisições internacionais existentes, provavelmente será adequado ao cenário doméstico. Dessa forma, a exportação será a primeira rota a ser analisada em que provavelmente será feita por transporte marítimo, sendo necessário uma logística de escoamento do RFNBO produzido de forma eficiente para regiões portuárias, em que se torna determinante a presença de modais de transporte disponíveis para possibilitar isso. Em adição a estes fatores, a implementação da planta de eletrólise não pode comprometer a disponibilidade hídrica da região ou atingir áreas socioambientais regularizadas. Não serão considerados conflitos econômicos com outros setores, parâmetros sociais ou recursos hídricos provenientes de águas residuárias ou do mar para a geração de H<sub>2</sub>.

Os parâmetros definidos influenciam na tomada de decisão para selecionar regiões que possuam a combinação de infraestrutura já instalada no Paraná, recurso hídrico e complementariedade no potencial de geração de energia renovável necessários para instalação do empreendimento. Sendo assim, foram selecionados 11 parâmetros existentes no Estado considerados atrativos (pelo autor) para a implementação de uma planta de eletrólise, em que estes estão dispostos no QUADRO 1 junto com a justificativa de escolha. Os fatores foram classificados como recurso, infraestrutura ou socioeconômico e ambiental. As medidas consideradas como recursos são aquelas que disponibilizam o essencial para eletrólise (energia e água). Já os critérios de infraestrutura são aqueles que fornecem suporte e viabilidade para um empreendimento desse segmento. Por último, os parâmetros socioeconômicos e ambientais considerados são as regiões em que a construção de uma planta de eletrólise seria permitida ou não.

QUADRO 1 – PARÂMETROS ADOTADOS

<b>Classificação</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Justificativa</b>	<b>Fonte</b>
Recurso	Irradiação global anual média	Potencial de geração fotovoltaico	Global Solar Atlas (2024)
	Velocidade do vento	Potencial de geração eólico	Global Wind Atlas (2024)
	Bacias hidrográficas	Disponibilidade de água para eletrólise	IAT (2007)
Infraestrutura	Malha ferroviária	Transporte do produto	IBGE (2023)
	Rodovia federal	Transporte do produto	DNIT (2022) - INDE
	Rodovia estadual	Transporte do produto	DNIT (2021) - INDE
	Porto	Ponto final da carga para exportação	MP (2015) - INDE
	Porto seco	Unidades alfandegárias terrestres com logística implementada para escoamento do produto até zonas portuárias	MP (2015) - INDE
	Subestação	Conexão com o SIN	EPE (2023)
Socioeconômico e ambiental	Uso e ocupação do solo	Caracterização das regiões do Estado	IBGE (2022)
	Áreas de restrição	Áreas sem possibilidade de implementação do empreendimento	EMBRAPA (2024)

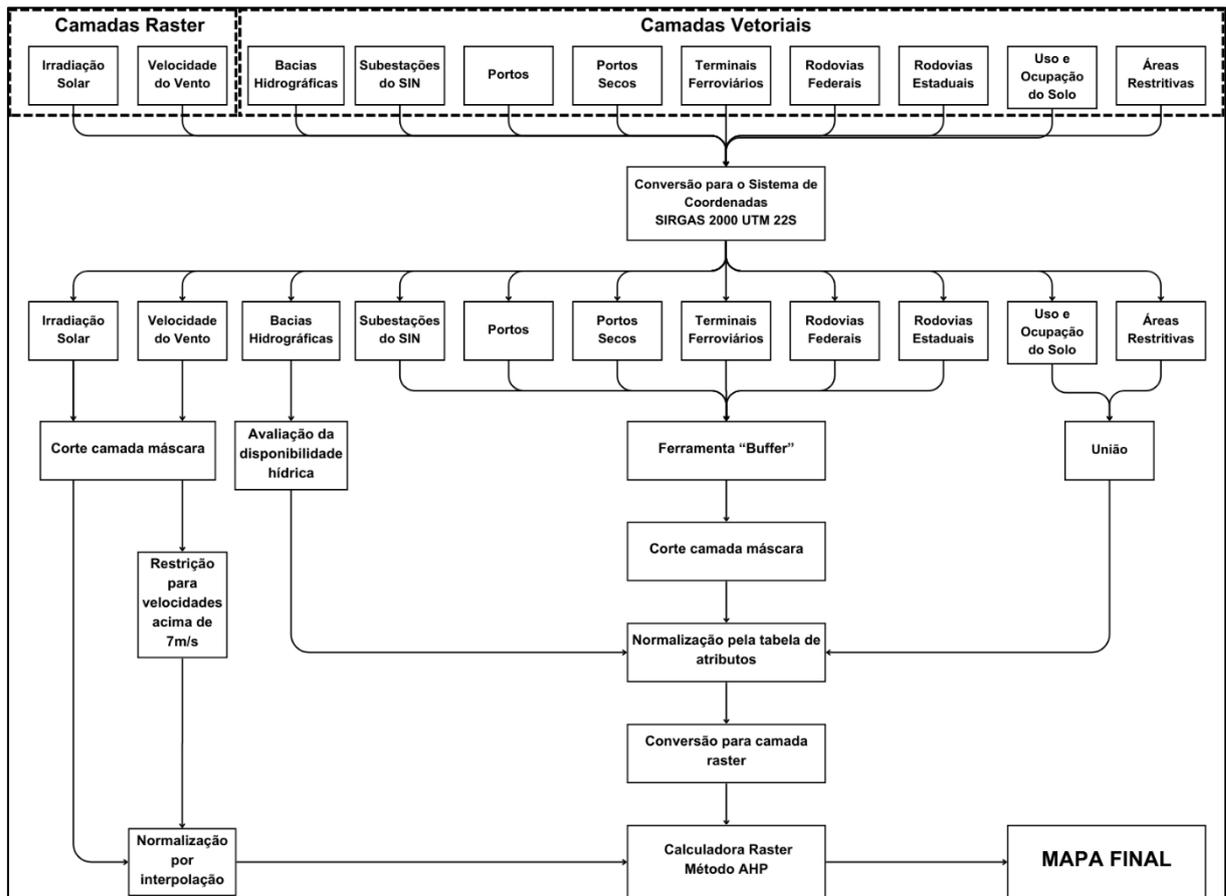
FONTE: O autor (2024).

Os dados selecionados foram obtidos através das páginas *web* das organizações responsáveis ou por meio do site da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), os quais disponibilizam de forma gratuita para *download* os arquivos *shapefile* das camadas.

### 3.3 PROCESSAMENTO E NORMALIZAÇÃO DAS CAMADAS

Após a obtenção dos dados georreferenciados de cada parâmetro, foi necessário um tratamento em cada um deles para possibilitar a análise multicritério. Para isso, foram feitos os procedimentos demonstrados em resumo na FIGURA 20, os quais foram específicos para cada critério, visto que cada um era representado de maneira distinta e possuíam características diferentes.

FIGURA 20 – MANIPULAÇÕES E OPERAÇÕES COM AS CAMADAS



FONTE: O autor (2024).

Os dados georreferenciados obtidos nas organizações internacionais de recursos energéticos estavam projetados no Sistema de Coordenada de Referência *World Geodetic System 84 (WGS 84)* e os nacionais no Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas de 2000 (*SIRGAS 2000*). Com isso, para trabalhar com as camadas em um mesmo projeto, foi necessário utilizar a ferramenta “reprojetar” disponível no *software*. Buscando praticidade com a manipulação das camadas e sendo necessário uma projeção que integrasse a região da área de estudo, foi escolhido a projeção *SIRGAS 2000 UTM* na zona 22S, possibilitando trabalhar com a unidade de medida de distância em metros ao invés de graus geográficos (latitude e longitude) como nas projeções anteriores. De acordo com *Borges et al. (2016)*, o sistema de referência *WGS 84*, é compatível com o *SIRGAS 2000*, sendo a diferença ao reprojetar essas camadas próxima a centímetros.

Em seguida, cada uma das camadas passou por um processo de normalização e as ferramentas disponíveis no *software* aplicadas de acordo com o formato obtido desses dados como resumido na TABELA 4.

TABELA 4 - PROCESSO DE NORMALIZAÇÃO DAS CAMADAS

Formato da camada	Tipo	Ferramentas Utilizadas
<i>Raster</i>	-	Recorte, calculadora <i>raster</i> .
Vetor	Ponto	Recorte, dissolver, buffer, tabela de atributos e <i>rasterizar</i> .
-	Linha	Recorte, dissolver, buffer, tabela de atributos e <i>rasterizar</i> .
-	Polígono	Recorte, dissolver, tabela de atributos e <i>rasterizar</i> .

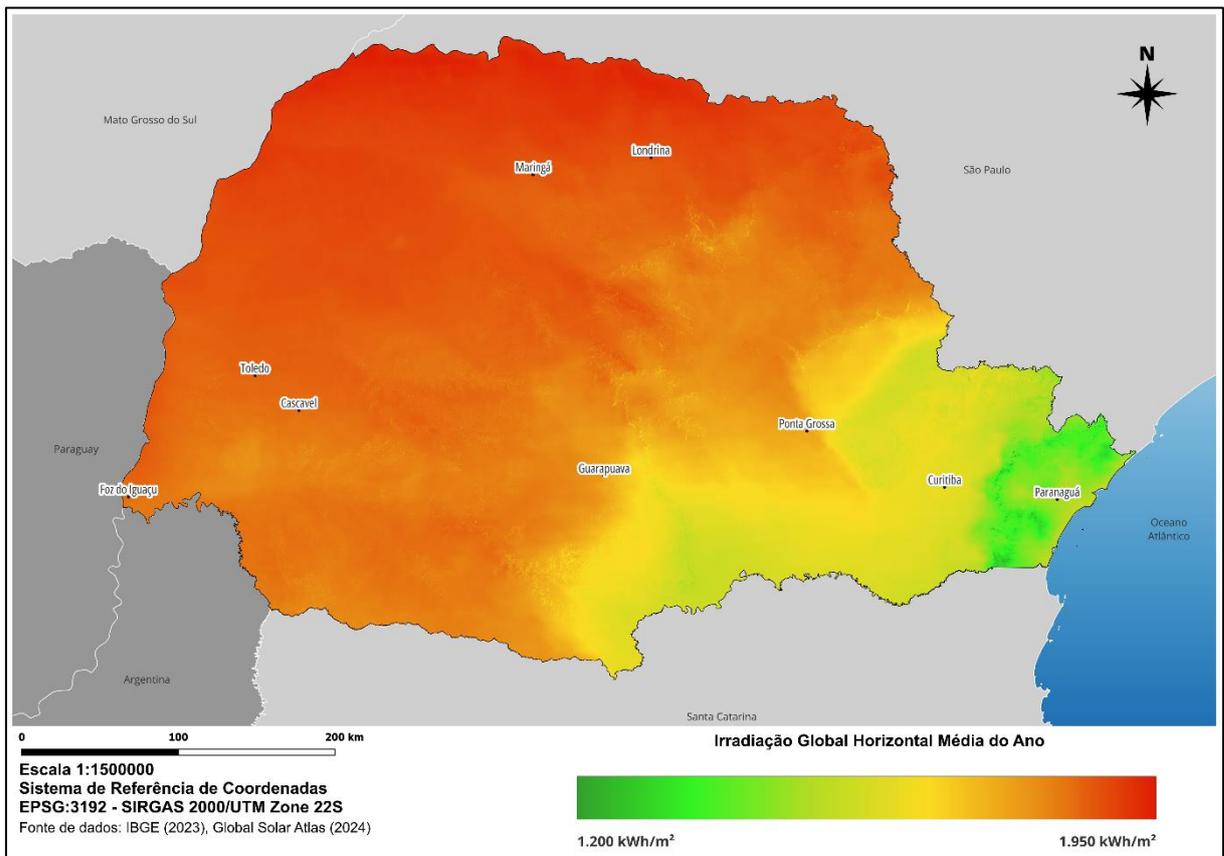
FONTE: O autor (2024).

A normalização dos critérios reavaliou os valores existentes da base de dados para um intervalo de 0 a 1, em que valores próximos de 1 indicam uma maior influência do critério no local, enquanto valores próximos de 0 indicam que não há efeito do parâmetro. Com isso, o processo para a normalização de cada camada vai ser apresentado na sequência.

### 3.3.1 Irradiação solar global

O arquivo inicial disponibilizado pelo *Global Solar Atlas* (2024) apresenta a irradiação solar global média anual em kWh/m<sup>2</sup> para todo o Brasil em formato *raster*. Após o processo inicial de “reprojeção” para o sistema selecionado como referência, foi feito o recorte utilizando a camada máscara da área de estudo, sendo representado na FIGURA 21.

FIGURA 21 - IRRADIAÇÃO GLOBAL MÉDIA NO PARANÁ



FONTE: O autor (2024).

Para finalizar a normalização da camada, foi necessário fazer uma interpolação linear dos valores de irradiação para o intervalo proposto. Esse método numérico é amplamente utilizado para estimar valores intermediários entre dois pontos conhecidos em um intervalo de dados assumindo que relação entre eles é linear. Para a reclassificação da camada, foi utilizada a equação (2) alterando os valores de irradiação solar global horizontal (IGH) média no local para medidas entre 0 e 1. (Chapra *et al.*, 2016; Hamilton, 2023)

$$Y = \frac{X - MÍN}{MÁX - MÍN} \quad (2)$$

Onde:

$Y$  = camada *raster* reclassificada

$X$  = camada *raster* com valor da IGH

$MÁX$  = maior valor do intervalo camada *raster* de IGH

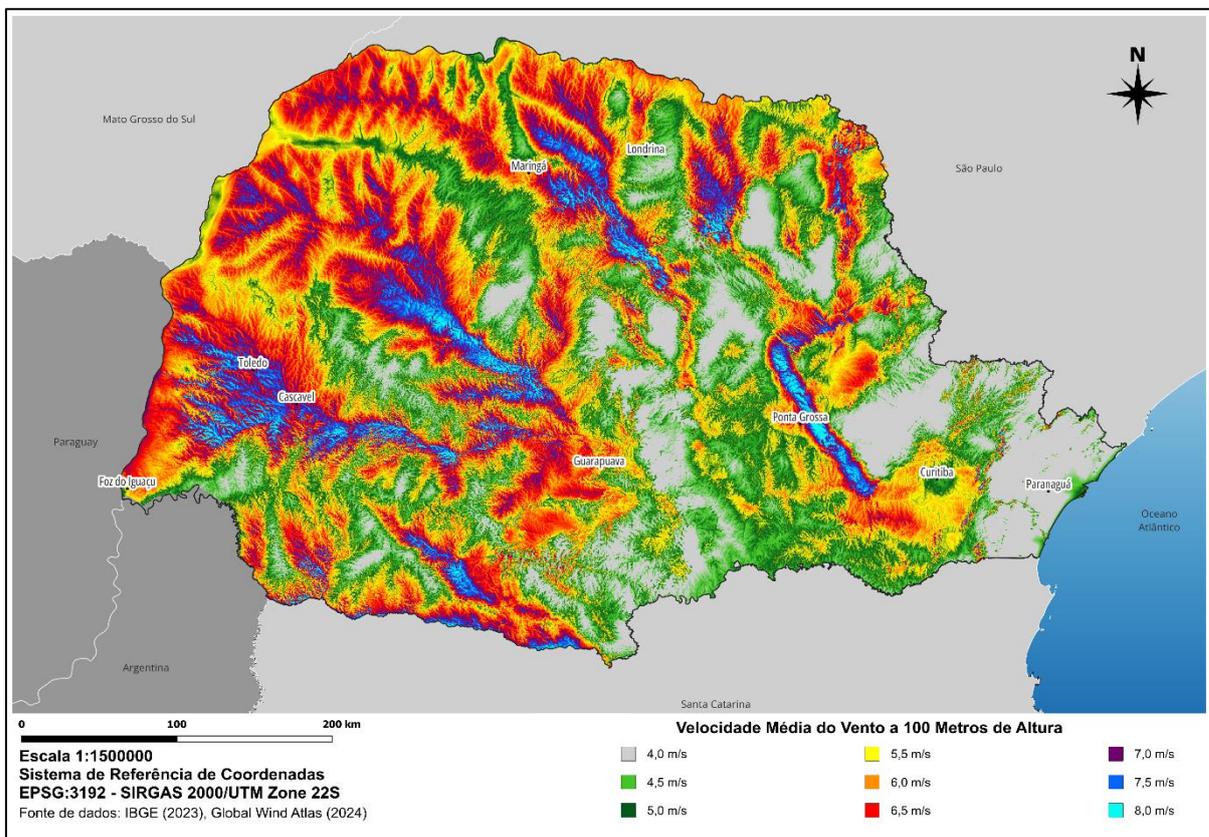
$MÍN$  = menor valor do intervalo da camada *raster* IGH

Buscando evitar com que o menor valor da camada de IGH e os valores mais próximos fossem nulos quando normalizados, utilizou-se um valor de 80% do valor mínimo. Nesse caso como o menor valor era próximo de 1200 kWh/m<sup>2</sup>, o valor  $MÍN$  foi próximo de 960 kWh/m<sup>2</sup>. Essa medida foi utilizada pois, apesar de um valor mais baixo de irradiação solar, ainda há potencial nessas regiões.

### 3.3.2 Velocidade do vento

Assim como a irradiação solar, os dados georreferenciados da velocidade média anual do vento a 100 metros de altura já foram disponibilizados como camada *raster* pelo *Global Wind Atlas (2024)* sendo necessário aplicar o mesmo processamento do critério anterior, em que a camada que configura o potencial eólico é representada na FIGURA 22.

FIGURA 22 - VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A 100 METROS DE ALTURA NO PARANÁ



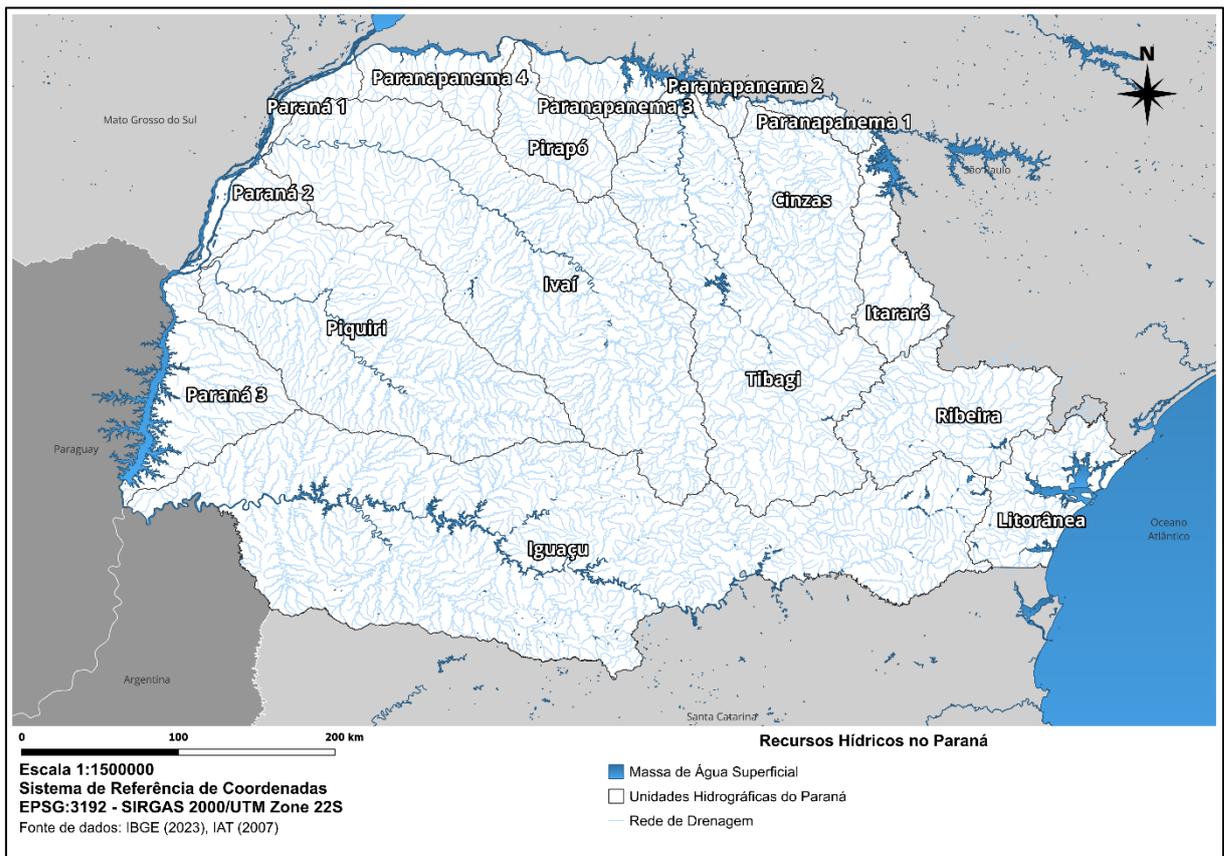
FONTE: O autor (2024).

Para a reclassificação dos valores de velocidade do vento a 100 metros de altura, assim como para a normalização da irradiação solar, foi utilizada a equação (1). Para o valor MÁX foi adotado a maior valor de velocidade da camada de aproximadamente 10 m/s e *para o MÍN foi 0 m/s. Assim como o “Atlas H2V Bahia”* realizado por SENAI CIMATEC (2023), serão consideradas apenas as regiões em que a velocidade média do vento seja superior ou igual a 7 m/s, em que a instalação de torres eólicas seja viável para um empreendimento de maior porte.

### 3.3.3 Recursos hídricos

Diferente dos recursos energéticos, não há uma camada com dados georreferenciados disponível da quantidade de água em um determinado local. Com isso, o critério de análise adotado foi a disponibilidade hídrica por bacia hidrográfica (BH) do Estado do Paraná. Não foram consideradas águas residuárias, marinhas ou a proximidade com reservatórios. A camada da BH do Paraná, obtida por meio do IAT (2007), é um vetor em forma de polígono apresentada na FIGURA 23 e não dispunha de nenhuma atribuição de valores.

FIGURA 23 - BH NO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: O autor (2024).

Os valores apresentados na TABELA 5 de disponibilidade hídrica e da demanda por BH foram retirados do Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos do Estado do Paraná (IAT, 2020) indicando a situação de cada uma das bacias.

TABELA 5 – DISPONIBILIDADE HÍDRICA POR BH

Bacia Hidrográfica	Disponibilidade Total (L/s)	Demanda da Disponibilidade (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Disponibilidade Hídrica Por km <sup>2</sup> (L/s)
Tibagi	218.243	13%	24.937	8,752
Ribeira	78.782	3%	9.736	8,092
Pirapó	38.001	31%	5.098	7,454
Piquiri	200.705	13%	24.172	8,303
Paranapanema 4	23.352	12%	4.135	5,647
Paranapanema 3	24.418	29%	3.564	6,851
Paranapanema 2	3.325	13%	664	5,008

Parapanema 1	5.537	48%	1.231	4,498
Paraná 3	75.774	19%	7.979,4	9,496
Paraná 2	18.921	6%	2.256	8,387
Paraná 1	10.808	12%	1.267	8,530
Litorânea	81.232	5%	5.631	14,426
Ivaí	379.647	8%	36.540	10,390
Itararé	39.589	5%	4.845	8,171
Iguaçu	582.046	7%	54.821	10,617
Cinzas	39.761	15%	9.113	4,363
Total	1.820.141	-	195.989,4	9,287

FONTE: Adaptado IAT (2020).

A partir dos valores calculados por km<sup>2</sup> de cada BH, foi realizado uma classificação de acordo com a TABELA 6 para avaliar quais possuem a maior quantidade de água disponível para poder utilizar na eletrólise.

TABELA 6 - CLASSIFICAÇÃO POR INTERVALO

Disponibilidade por km <sup>2</sup> (L/s)	Demanda (%)	Valor
> 10	< 10	1,00
7,5 até 10	10 até 20	0,75
5,0 até 7,5	20 até 30	0,50
< 5,0	> 30	0,25

FONTE: O autor (2024)

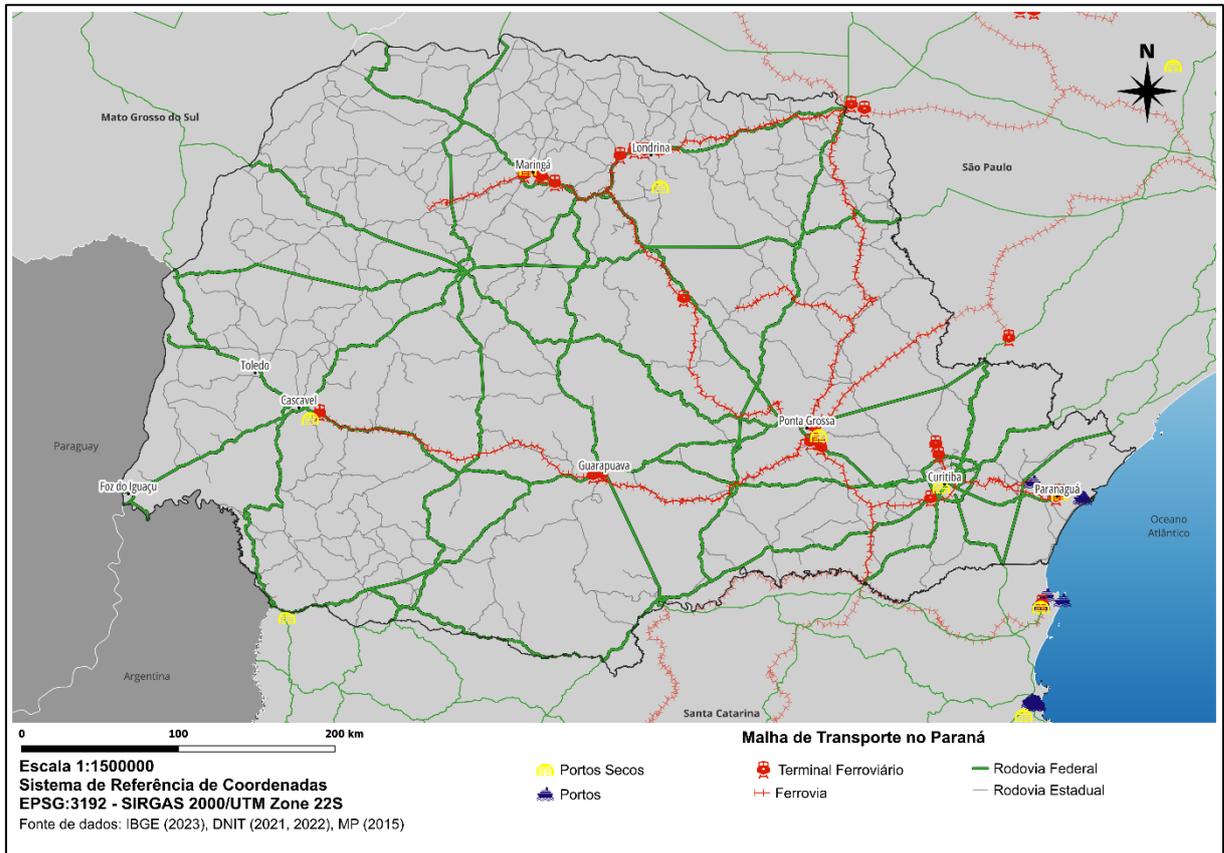
Com os intervalos caracterizados, atribuiu-se a média dos valores de disponibilidade e demanda para cada feição da camada por meio da tabela de atributos, as quais representam as bacias hidrográficas do Estado.

### 3.3.4 Infraestrutura de transporte

O destino do RNFBO produzido deve ser as zonas portuárias, em que o produto será transportado por navios para outros países. Para que a carga chegue até o porto, é necessária uma logística em que a escolha do meio de transporte é fundamental por conta do preço, qualidade e tempo que esse produto leva para chegar até seu destino. As camadas dos meios de transporte existentes no Estado para uso

logístico (malha ferroviária, as rodovias e as estações portuárias) são mostradas na FIGURA 24.

FIGURA 24 - MALHA DE TRANSPORTE NO PARANÁ



FONTE: O autor (2024).

### 3.3.4.1 Portos, portos secos e malha ferroviária

Os vetores obtidos das zonas portuárias são pontos referentes à localização desses terminais. Além dos portos de Paranaguá e Antonina, existe a possibilidade de utilização dos portos de Itajaí e São Francisco do Sul em Santa Catarina devido à proximidade com o Paraná. Após o tratamento inicial da camada, foram feitos *buffers* dos pontos em que é criada uma área circular em sua volta. Essas regiões foram consideradas como as zonas de influência dos portos e com isso, sendo um raio de 50 km como último valor considerado para favorecer a instalação o empreendimento próximo aos terminais portuários. Com isso, foi feita a classificação de acordo com a distância do ponto até a distância limite pela tabela de atributos da camada como demonstrado na TABELA 7.

TABELA 7 - VALOR ATRIBUÍDO DE ACORDO COM A DISTÂNCIA PORTUÁRIA

<b>Distância (km)</b>	<b>Valor</b>
> 50	0,0
40 até 50	0,2
30 até 40	0,4
20 até 30	0,6
10 até 20	0,8
< 10	1,0

FONTE: O autor (2024)

Assim como os portos, foi realizado o mesmo tratamento para os portos secos, em que foram consideradas zonas de pontos fora do estado, mas que o raio de influência acaba atingindo alguma parte do território paranaense. Já a malha ferroviária é representada por dois vetores: a linha férrea e os terminais ferroviários. Por conta do abastecimento do trem com o produto ocorrer apenas nos terminais, foi desconsiderada a via férrea. Sendo assim, para os terminais que são vetorizados por pontos indicando sua localização, utilizou-se o mesmo procedimento de normalização com os valores apresentados na TABELA 7.

#### 3.3.4.2 Malha rodoviária

Em relação ao mapeamento das rodovias, foram utilizadas duas camadas vetoriais em formato de linha representando as vias estaduais e federais. A normalização dos vetores foi feita de forma separada por conda das distintas condições em que as rodovias se encontram. As rodovias federais (RF) no Paraná apresentam melhores condições do que as estaduais devido à quantidade de investimentos, pavimentação e sinalização das vias. Enquanto muitas rodovias estaduais (RE) são de pista única, limitando a fluidez do tráfego e aumentando o risco de acidentes, as RF geralmente possuem duas ou mais faixas, o que melhora significativamente a segurança e a eficiência do transporte. Em termos de extensão, o Paraná possui por volta de 3.968 km de RF e 11.931 km de RE, sendo que 67,4% das federais no Paraná são encontradas em ótimas ou boas condições, comparado a apenas 45,2% das rodovias estaduais. Além disso, as RF possuem melhores índices de pavimento, com 70% classificadas positivamente, contra 50% das estaduais. (CNT, 2023)

Apesar da diferença na infraestrutura, a distância atribuída para a influência e o processo de normalização serão iguais para ambas as camadas, divergindo apenas na ponderação por meio da hierarquização das camadas na análise multicritério. Considerando que a malha rodoviária é mais densa que as demais opções e possui menor capacidade, um custo mais elevado e um tempo de transporte maior, a região de influência vai ser menor do que os demais meios. A instalação da planta de eletrólise não é viável para locais muito afastados de rodovias, pois por ser normalmente o principal meio utilizado para a logística de transporte, ao menos o deslocamento inicial em curtas distâncias para algum outro terminal será feito por estradas. Por isso, quanto maior a dificuldade e a distância de acesso à essas vias, menor o valor atribuído.

Sendo assim, o processamento inicial das camadas, foram realizados os *buffers* de 500 metros até 10 km. Com as distâncias definidas das vias foi utilizado a tabela de atributos para inserir os valores determinados de acordo com a TABELA 8 para a normalização.

TABELA 8 - VALOR ATRIBUÍDO DE ACORDO COM A DISTÂNCIA DAS RODOVIAS

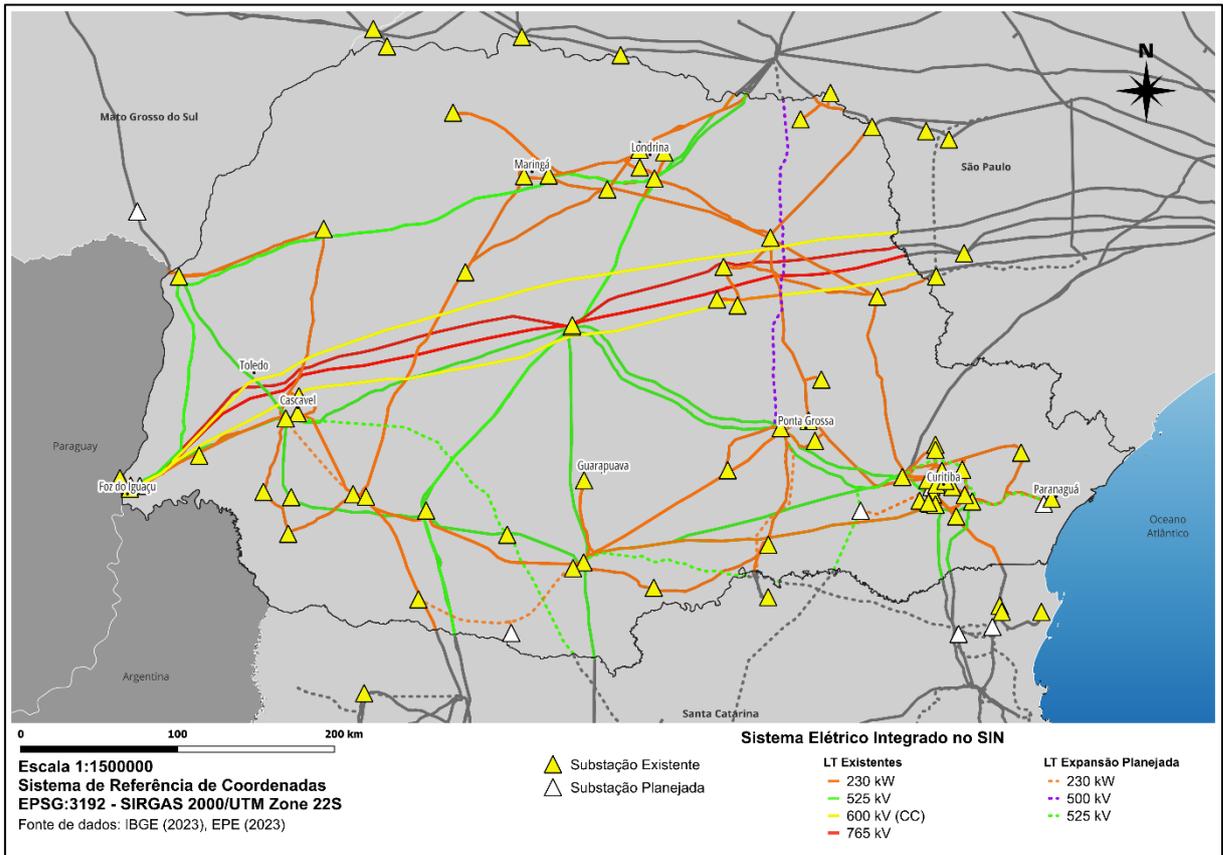
<b>Distância da rodovia (km)</b>	<b>Valor</b>
> 10	0,0
5,0 até 10	0,4
2,5 até 5,0	0,6
0,5 até 2,5	0,8
< 0,5	1,0

FONTE: O autor (2024)

### 3.3.5 Sistema elétrico

Os dados vetoriais das subestações (SE) e linhas de transmissão integrados no SIN foram obtidos em forma de pontos e linhas respectivamente. Além do sistema existente, também foram considerados as bases planejadas, as quais de acordo com a EPE (2023), possuem projetos catalogados e definidos para a expansão do sistema elétrico. Os dados georreferenciados estão apresentados na FIGURA 25.

FIGURA 25 - SISTEMA ELÉTRICO INTEGRADO AO SIN NO PARANÁ



FONTE: O autor (2024)

De acordo com o Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia (2023), para a produção de H<sub>2</sub>ER ser considerada RFNBO, deve ocorrer a utilização de fontes renováveis atendendo o critério de adicionalidade estabelecido pelo RED III. Com isso, as usinas devem ser instaladas próximas à planta de eletrólise, certificando que o hidrogênio está sendo gerado por fontes como solar e eólica, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Considerando que a planta de eletrólise e as usinas serão instaladas em conjunto, a proximidade de subestações conectadas ao SIN permite a integração do empreendimento com o sistema elétrico brasileiro. Além de reduzir custos, existe a possibilidade de contratar ou vender energia para o Ambiente Livre de Comercialização (ACL) para suprir faltas ou evitar perdas com excedentes de energia gerados. Portanto, a SE é o ponto onde essa conexão é realizada, sendo responsável pela transformação da tensão da energia gerada, em que são categorizadas conforme sua função e a tensão de operação. As subestações classificadas como elevadoras são indicadas para receber a energia das usinas geradoras, as quais aumentam e

padronizam a tensão para que a energia possa ser transmitida de maneira eficiente, operando em tensões que variam de 138 kV a 765 kV. (ENGIE, 2024)

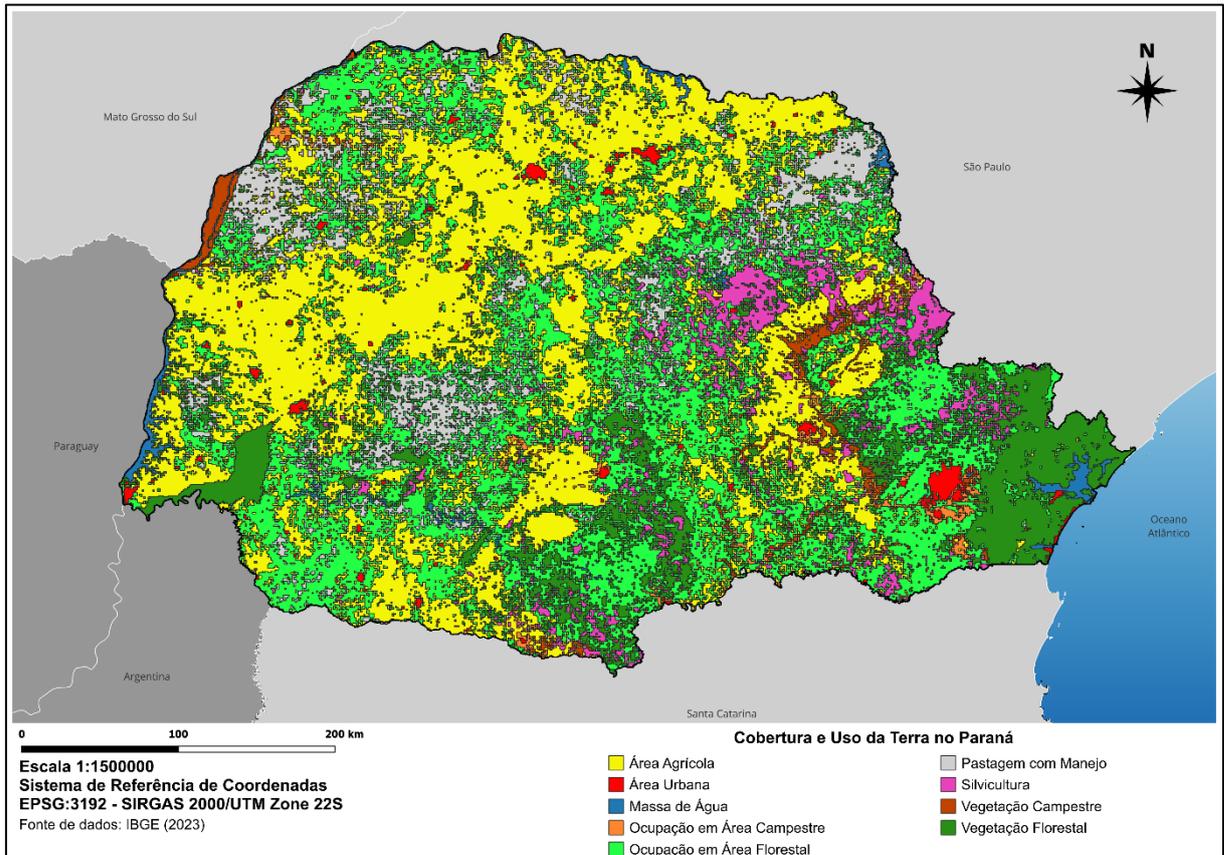
Sendo assim, antes da normalização, as tensões de operação de cada SE foram verificadas por meio de informações do próprio arquivo disponibilizado pela EPE (2023) e se confirmou que todas as unidades eram elevadoras, apresentando uma tensão de atuação acima de 230 kV. Essas SE tendem a ter maior capacidade remanescente para receber grandes empreendimentos de ordem acima de 100 MW.

Para normalizar as camadas, foram desconsideradas as linhas de transmissão e utilizadas apenas os pontos indicando as subestações existentes e planejadas. A intenção do trabalho é aproveitar a infraestrutura existente no Estado, por isso não foi considerado um cenário para a construção de uma nova subestação para conectar o empreendimento ou fazer uso de sistemas *off-grid*. Por conta de a camada ser representada por pontos, criou-se *buffers* de 10 até 50 km do centro assim como nos portos e terminais ferroviários, com os valores representando as zonas de influência indicados pela TABELA 8.

### 3.3.6 Uso e ocupação do solo e áreas de restrição

A camada de uso e ocupação do solo foi obtida pelo IBGE (2023), o qual fez o monitoramento e obtenção dos dados por interpretação com imagens de satélite. Ela se refere à maneira como o terreno é utilizado e distribuído nas áreas urbanas e rurais, indicando as zonas representadas na FIGURA 26.

FIGURA 26 - USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO PARANÁ



FONTE: O autor (2024).

A área de estudo possui 9 classificações de cobertura apresentando as regiões mais favoráveis ou restritas para a instalação da planta de eletrólise. Conforme discutido por Averlan (2019), as classes com possibilidade para a implementação de um empreendimento possuem valor igual a 1, enquanto as que não há viabilidade de utilização com valor igual a 0. Os valores utilizados na tabela de atributos e a descrição para cada feição da camada estão dispostos no QUADRO 2.

QUADRO 2 - CLASSES DA COBERTURA DO SOLO NO PARANÁ

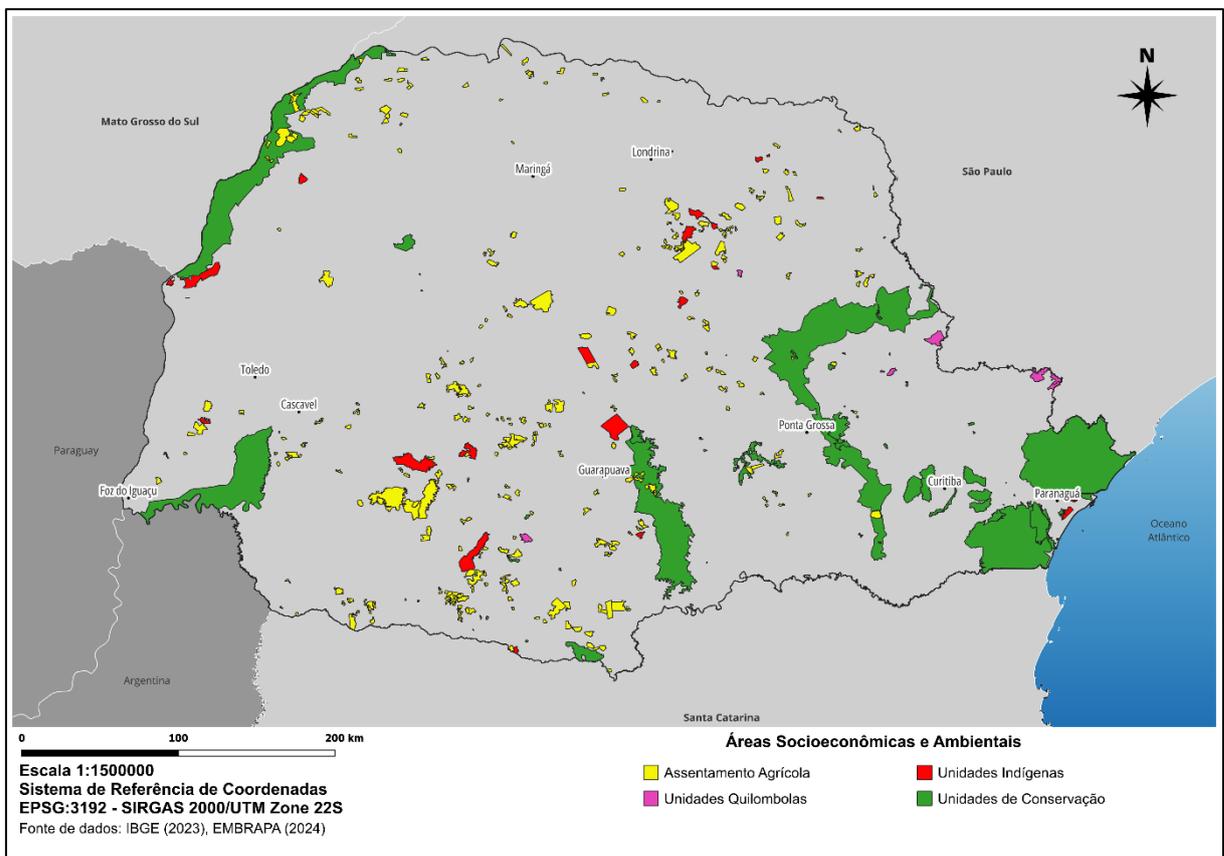
Classe	Descrição	Valor
Área agrícola	Utilização para produção de alimentos, combustíveis ou matéria-prima	1
Área urbana	Superfícies antrópicas com densidade de construção	1
Massas de água	<i>Corpos d'água</i> superficiais	0
Ocupação em área campestre	Ocupação mista (área agrícola, pastagem ou silvicultura) associada a remanescente de vegetação campestre	1
Ocupação em área florestal	Ocupação mista (área agrícola, pastagem ou silvicultura) associada a remanescente de vegetação florestal	1
Pastagem com manejo	Pastoreio de animais com alterações antrópicas na vegetação	1

Classe	Descrição	Valor
Silvicultura	Monoculturas de vegetação florestal exótica ou nativa	1
Vegetação campestre	Estrato predominantemente arbustivo (restinga, estepes, savanas, etc.)	0
Vegetação florestal	Florestas com formações arbóreas superiores a 5 metros de altura	0

FONTE: Adaptado IBGE (2023).

Diferente das feições de uso e ocupação do solo, as áreas de restrição são os dados georreferenciados de atividades mais específicas representadas pela união das regiões legalmente atribuídas do Brasil. São consideradas unidades de conservação, terras indígenas, áreas militares, assentamentos agrícolas e quilombolas. De acordo com a EMBRAPA (2024), as áreas foram representadas utilizando os vetores em formato de polígonos disponibilizados de diversos outros órgãos, em que a disposição das regiões de restrição ficou configurada de acordo com a FIGURA 27.

FIGURA 27 - ÁREAS DE RESTRIÇÃO NO PARANÁ



FONTE: O autor (2024).

Cada uma das feições apresentadas na FIGURA 27 representa um fator socioeconômico ou ambiental em que a descrição e construção das áreas representadas geograficamente foram realizadas pelas organizações apresentadas QUADRO 3.

QUADRO 3 – DESCRIÇÃO DAS ÁREAS RESTRITAS

Área	Motivo	Fonte
Unidade de conservação	Áreas protegidas para conservação da biodiversidade e dos recursos naturais	MMA (2024)
Unidade indígena	Territórios tradicionalmente ocupados por povos indígenas, reconhecidos legalmente	FUNAI (2024)
Unidade quilombolas	Territórios ocupados por remanescentes de quilombos, reconhecidos como comunidades étnicas	INCRA (2024b)
Assentamento agrícola	Áreas destinadas à reforma agrária e à distribuição de terras para agricultura familiar	INCRA (2024a)

FONTE: O autor (2024)

Foi atribuído um valor igual a zero para todos polígonos das regiões de restrição, indicando que não há a possibilidade de implementação da planta de eletrólise e das usinas nessas áreas.

Para utilizar uma única camada *raster* com a normalização de 0 ou 1 relacionada às áreas disponíveis para o empreendimento, optou-se por unir os arquivos de uso e ocupação do solo com as áreas de restrição para facilitar na etapa de análise multicritério. Como ambos indicam as regiões inviáveis para a implementação de uma planta de eletrólise, o processamento dos dados representou em uma só camada as áreas disponíveis com valor igual a 1 e as indisponíveis igual a 0.

### 3.4 ANÁLISE MULTICRITÉRIO PELO MÉTODO AHP

Após a definição dos parâmetros a serem considerados para a produção de hidrogênio eletrolítico renovável em grande escala para exportação de acordo com as diretrizes do RED III, classificou-se os parâmetros selecionados de maneira hierárquica, por meio da escala fundamental de Saaty apresentada na TABELA 3. Nessa etapa, o uso e ocupação do solo e as áreas de restrição não serão avaliadas por conta de não possuírem relação de peso na tomada de decisão com os outros critérios e serem indicadores da possibilidade ou não da construção da planta no local.

Com a definição do grau de hierarquia dos critérios selecionados, foi construída a matriz de decisão, a qual obedece a teoria da matriz recíproca (FIGURA 28). Nessa estrutura, a diagonal principal equivale a 1 em que os parâmetros são comparados a si mesmo, quando o critério  $i$  for comparado com o critério  $j$ ,  $a_{ij} = 1/a_{ji}$ . (Gomes et al., 2016)

FIGURA 28 - MATRIZ RECÍPROCA

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

FONTE: Gomes *et al.* (2016).

Após a construção da matriz de decisão, os julgamentos foram feitos pelo autor a partir da revisão de materiais que abordam o tema de exportação de H<sub>2</sub>. Para o critério de velocidade do vento, foi considerado que todo o local na área de estudo que possui potencial eólico com uma velocidade média anual maior que 7 m/s também possui potencial solar, sendo que não ocorre ao contrário. Sendo assim, as regiões com velocidades médias anual favoráveis para a instalação de projetos eólicos foram consideradas áreas com potencial de complementariedade solar x eólica. Então, a matriz de decisão é representada na FIGURA 29, em que se julga o parâmetro da linha em relação ao parâmetro da coluna.

FIGURA 29 - MATRIZ DE DECISÃO

Parâmetros		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
Velocidade do vento	P1	1	3	3	4	5	6	6	6	9
Subestação	P2	1/3	1	1	3	4	4	4	4	9
Disponibilidade hídrica	P3	1/3	1	1	3	4	4	4	4	9
Porto	P4	1/4	1/3	1/3	1	2	3	3	4	7
Irradiação	P5	1/5	1/4	1/4	1/2	1	3	3	3	6
Porto seco	P6	1/6	1/4	1/4	1/3	1/3	1	2	2	6
Terminal ferroviário	P7	1/6	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1	2	6
Rodovia federal	P8	1/6	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1	5
Rodovia estadual	P9	1/9	1/9	1/9	1/7	1/6	1/6	1/6	1/5	1

FONTE: O autor (2024).

A partir da construção da matriz, foi realizado a soma de todos os elementos de cada linha. Em seguida, foi feito o somatório de todos esses resultados e a classificação de cada parâmetro foi obtida pela divisão entre a soma dos elementos da linha da matriz referente pelo somatório encontrado. Depois de obter as classificações, verificou-se a consistência dos valores obtidos determinando pelo valor da Razão de Consistência (RC) que deve ser menor do que 0,1. Para isso, inicialmente foi calculado o autovetor ( $w_i$ ) de cada parâmetro, sendo encontrado por meio da equação (3). (Saaty, 1991; Marins *et al.* 2009)

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (3)$$

Onde:

$w_i$  = autovetor do parâmetro  $i$

$n$  = ordem da matriz (número de parâmetros)

$a_{ij}$  = elemento da matriz

Para obter o RC, deve ser calculado o autovalor máximo ( $\lambda_{máx}$ ), o qual representa a média das matrizes resultantes do produto da matriz comparação pelos pesos do parâmetro  $w_i$  sendo obtido por meio da equação (4).

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\eta} \times \sum_{j=1}^n \frac{AW}{w_i} \quad (4)$$

Onde:

$\lambda_{m\acute{a}x}$  = autovalor máximo

$w_i$  = autovetor do parâmetro  $i$

$n$  = ordem da matriz (número de parâmetros)

$AW$  = matriz resultante do produto da matriz comparao (resultados dos autovetores) pelos pesos do parâmetro  $W_i$

Com o valor de  $\lambda_{m\acute{a}x}$ ,  possível encontrar ndice de Consistência ( $IC$ ) por meio da equao (5).

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (5)$$

Onde:

$IC$  = ndice de consistência

$n$  = ordem da matriz (número de parâmetros)

$\lambda_{m\acute{a}x}$  = autovalor máximo

Por último, calcula-se o valor de  $RC$  utilizando a equao (6) em que o ndice randômico ( $IR$ )  encontrado consultando a TABELA 9 de acordo com o número de parâmetros utilizados na comparao.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (6)$$

Onde:

$RC$  = razão de consistência

$IC$  = ndice de consistência

$IR$  = ndice randômico.

TABELA 9 - ÍNDICE RANDÔMICO (*IR*)

<i>n</i>	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b><i>IR</i></b>	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,54

FONTE: Adaptado de Saaty (1991).

Vale ressaltar que todo o procedimento de cálculo para essa seção foi utilizando o programa *Microsoft Excel*® versão 2409.

### 3.5 CONSTRUÇÃO DO MAPA DAS ÁREAS FAVORÁVEIS

Obtidos os valores de hierarquização para cada parâmetro multiplicado por respectivo dado georreferenciados normalizado, foi feito o cruzamento das camadas por meio da calculadora *raster*. Para isso, utilizou-se o método de combinação linear ponderada apresentado por Averlan (2019), em que será feito a soma da multiplicação de cada critério com a sua respectiva classificação obtida pelo método AHP. Depois disso, será aplicado a camada das áreas de restrições removendo as regiões indisponíveis para instalação do empreendimento. Para isso, aplicou-se a equação (7) na ferramenta calculadora *raster* disponível no *QGIS*®.

$$CR_f = (\sum X_i * CR_i) * (CR_{AR}) \quad (7)$$

Em que:

$CR_f$  = camada *raster* final

$X_i$  = peso encontrado do parâmetro de acordo com o método AHP

$CR_i$  = camada *raster* do parâmetro

$CR_{AR}$  = camada *raster* de união do uso e ocupação do solo com as áreas de restrição

Posteriormente, foi feita uma reclassificação dos resultados obtidos por interpolação assim como realizado nas camadas de irradiação solar e velocidade do vento, buscando padronizar os intervalos dos resultados.

## 4 RESULTADOS

Aplicando a metodologia descrita neste trabalho, foram obtidas as camadas em formato *raster* normalizadas, os valores das classificações realizadas pelo método AHP, a verificação de consistência da hierarquização e por fim, o mapa final com a união dos dados normalizados indicando as regiões com a possibilidade de receber uma planta de H<sub>2</sub> eletrolítico em grande escala para exportação.

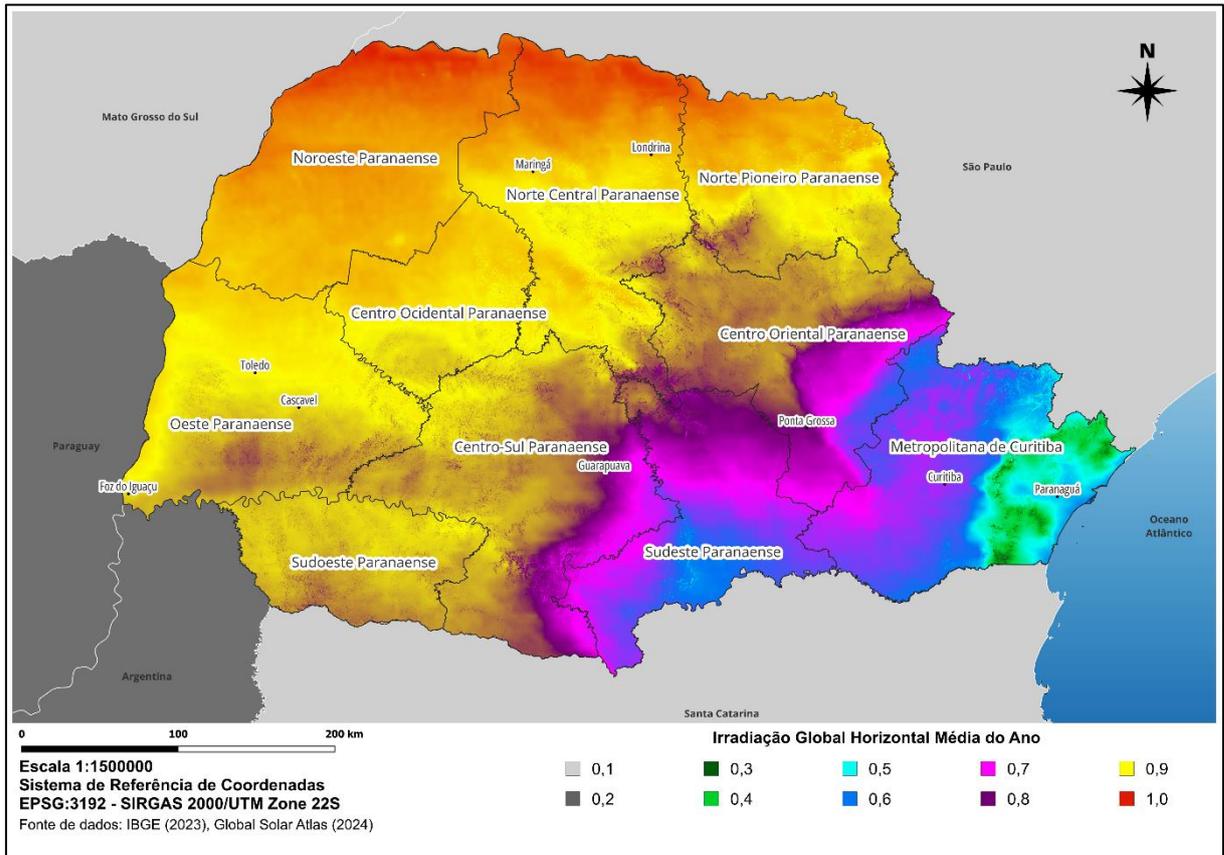
### 4.1 NORMALIZAÇÕES

As camadas normalizadas que variam entre 0 e 1 serão apresentadas a seguir, em que quanto mais próximo de um, maior a influência positiva do parâmetro para a viabilidade da implantação de uma planta de eletrólise para comercialização internacional.

#### 4.1.1 Irradiação solar global

Por conta de possuírem médias anuais maiores de irradiação, as mesorregiões Noroeste e Norte Central do Estado possuem os maiores valores após a normalização, sendo as regiões mais próximas de um. Na FIGURA 30, é possível verificar os resultados padronizados, os quais na região leste do Paraná ocorrem os menores valores (verde e azul) e ao seguir em direção oeste e norte do mapa, o valor vai se aproximando do máximo. A camada *raster* antes de normalizada apresentou um valor médio de irradiação global anual igual a 1784,47 kWh/m<sup>2</sup>, sendo 1008,82 kWh/m<sup>2</sup> o mínimo e 1948,97 kWh/m<sup>2</sup> o máximo. Esse valor é próximo da média igual a 1.705 kWh/m<sup>2</sup> apresentado por Tiepolo *et al.* (2018).

FIGURA 30 - MAPA DA IRRADIAÇÃO GLOBAL NORMALIZADA



FONTE: O autor (2024).

Com a ferramenta “*r.report*” do software utilizado, foi possível gerar um relatório em relação ao total da área em que ocorrem os intervalos de irradiação solar. Sendo assim, na TABELA 10 é apresentado os valores de área em quilômetros quadrados para cada intervalo e o quanto estes representam do total do Estado. A área total da camada matricial que carrega os dados de irradiação é em torno de 25,6 km<sup>2</sup> menor do que o formato vetorial da camada da área de estudo, por conta da imprecisão e distorção em que os *pixels* apresentam ao representar o limite territorial em que há mais curvas.

TABELA 10 - OCORRÊNCIA DOS VALORES DE IRRADIAÇÃO SOLAR

Intervalo	Área (km <sup>2</sup> )	Área em relação ao total (%)
0 – 0,2	4,52	≈ 0,00
0,2 – 0,4	1.739,26	0,87
0,4 – 0,6	11.667,55	5,85
0,6 – 0,8	40.023,92	20,08

0,8 – 1	145.854,27	73,19
Total	199.289,53	100

FONTE: O autor (2024).

A partir dos dados apresentados na TABELA 11, é possível confirmar os resultados dos *pixels* da camada matricial de IGH em que as mesorregiões Noroeste e Norte Central possuem os maiores potenciais para geração de energia solar fotovoltaica. Com isso, será agregado maior valor nesse parâmetro para a tomada de decisão dos locais favoráveis para a implementação do empreendimento. Apesar da mesorregião Metropolitana de Curitiba e da região Sudeste apresentarem os menores resultados, ainda há um potencial solar para a geração de energia elétrica resultando em uma normalização maior do que 0,5 para todas as regiões do Estado.

TABELA 11 - MÉDIA DE IRRADIAÇÃO POR MESORREGIÃO

Mesorregião paranaense	Irradiação Solar média (kWh/m <sup>2</sup> )	Média normalização
Noroeste	1896,93	0,95
Centro Ocidental	1859,60	0,91
Norte Central	1870,70	0,92
Norte Pioneiro	1861,46	0,91
Centro Oriental	1752,62	0,80
Oeste	1839,88	0,89
Sudoeste	1825,25	0,87
Centro-Sul	1785,85	0,83
Sudeste	1645,53	0,69
Metropolitana de Curitiba	1539,00	0,58

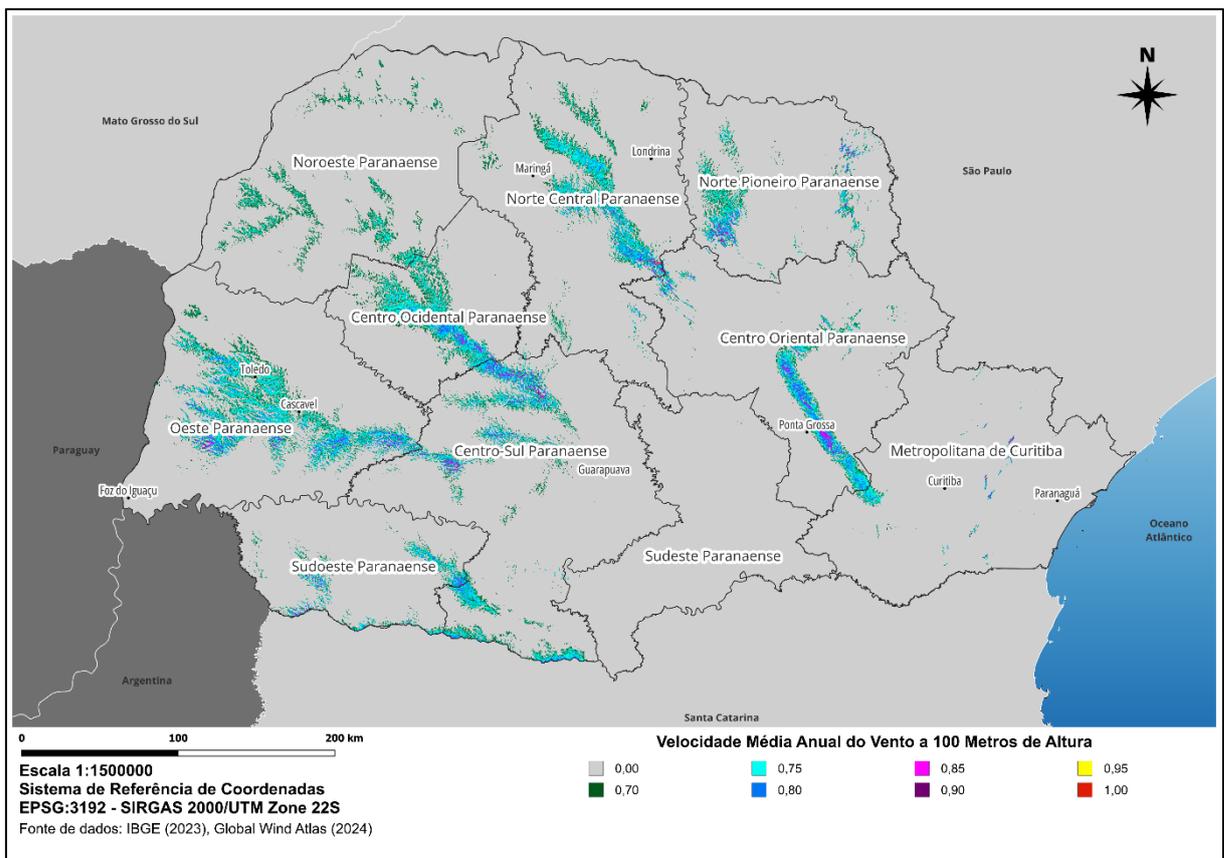
FONTE: O autor (2024).

#### 4.1.2 Velocidade do vento

Diferente do potencial solar, o parâmetro eólico é mais regional e acontece em locais mais característicos. Analisando a camada *raster* utilizada, a média do Estado referente a velocidade do vento a 100 metros de altura por todo o território é de aproximadamente 5,5 m/s durante o ano. Ao excluir todos os valores abaixo de 7 m/s para filtrar as velocidades adequadas à aplicação em empreendimentos eólicos

de maior porte, é possível verificar a formação de “corredores” pelo Estado, ilustrados na FIGURA 31, os quais preenchem 15.873,76 km<sup>2</sup>, cerca de 8% do total, do território paranaense. Por conta dessas ocorrências mais localizadas, a geração de energia eólica é um dos fatores limitantes para a instalação de uma planta que pretende utilizar essa fonte no Estado.

FIGURA 31 - MAPA DA VELOCIDADE DO VENTO NORMALIZADA



FONTE: O autor (2024).

Em relação ao parâmetro normalizado, 94,3% dos dados estão entre 0,7 e 0,8 caracterizando as regiões esverdeadas e azuladas da FIGURA 32. Esse resultado indica uma elevada ocorrência de velocidades entre 7 e 8 m/s comparadas a valores maiores do que este intervalo, sendo que velocidades médias anuais acima de 9 m/s representam aproximadamente 0,25% das regiões selecionadas. Além disso, as mesorregiões do Estado possuem diferenças nas ocorrências de velocidade. A TABELA 12 apresenta a frequência de ventos com média anual acima de 7 m/s por área em cada mesorregião do Paraná *retirada da camada raster por meio do “r.report”*.

TABELA 12 - OCORRÊNCIA EÓLICA POR MESORREGIÃO DO ESTADO

Mesorregião paranaense	Área da mesorregião (km <sup>2</sup> )	Área com velocidade acima de 7 m/s (km <sup>2</sup> )	Frequência (%)
Noroeste	24.488,72	1.326,47	5,42
Centro Ocidental	11.935,29	1.977,88	16,57
Norte Central	24.555,76	2.389,15	9,73
Norte Pioneiro	15.726,69	1.176,40	7,48
Centro Oriental	21.879,89	1.590,71	7,27
Oeste	22.844,51	3.900,94	17,08
Sudoeste	11.650,95	777,18	6,67
Centro-Sul	26.456,57	2.514,24	9,50
Sudeste	16.940,96	0,00	0,00
Metropolitana de Curitiba	22.819,63	220,79	0,97

FONTE: O autor (2024).

Na TABELA 13, é possível perceber que a mesorregião Oeste é a que possui a maior disponibilidade eólica no Estado, seguida pela Centro-Sul e pelo Norte Central. A região Sudeste demonstra baixo potencial para a geração dessa fonte de energia, não apresentando nenhuma velocidade acima de 7 m/s por toda sua área. Por outro lado, a mesorregião Metropolitana de Curitiba não possui um potencial significativo em relação à sua extensão territorial, porém há disponibilidade em alguns pontos da faixa litorânea, o que pode ser vantajoso para a exportação de RFNBO.

#### 4.1.3 Recursos hídricos

Os valores normalizados de acordo com a disponibilidade de água e o consumo já existente por bacia hidrográfica estão dispostos na TABELA 13, em que a área representada por cada BH tem o valor final da feição atribuído, indiferente se o local é próximo a um rio, reservatório ou algo relacionado.

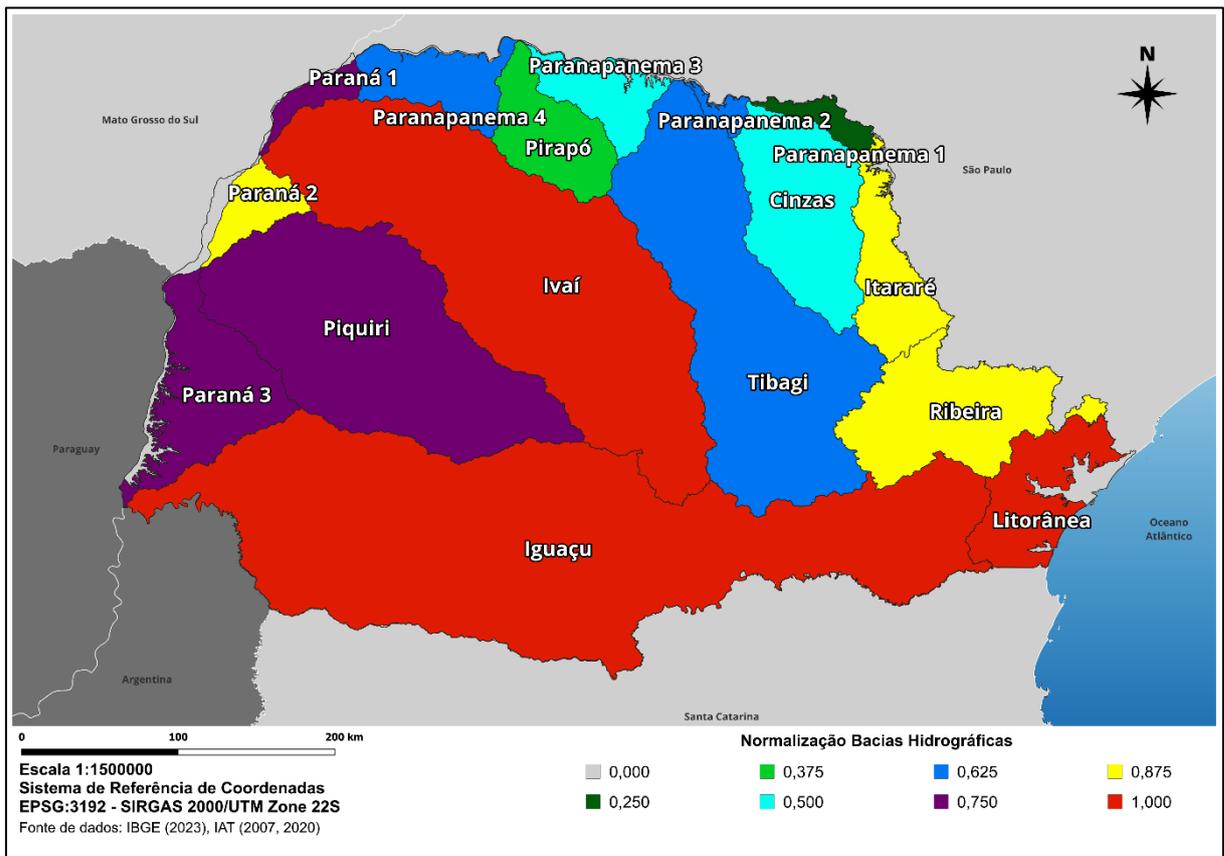
TABELA 13 - VALOR ATRIBUÍDO PARA CADA BH

Bacia Hidrográfica	Valor atribuído pela disponibilidade	Valor atribuído pela demanda	Valor final da feição
Tibagi	0,75	0,50	0,625
Ribeira	0,75	1,00	0,875
Pirapó	0,50	0,25	0,375
Piquiri	0,75	0,75	0,750
Paranapanema 4	0,50	0,75	0,625
Paranapanema 3	0,50	0,50	0,500
Paranapanema 2	0,50	0,75	0,625
Paranapanema 1	0,25	0,25	0,250
Paraná 3	0,75	0,75	0,750
Paraná 2	0,75	1,00	0,875
Paraná 1	0,75	0,75	0,750
Litorânea	1,00	1,00	1,000
Ivaí	1,00	1,00	1,000
Itararé	0,75	1,00	0,875
Iguaçu	1,00	1,00	1,000
Cinzas	0,25	0,75	0,500

FONTE: O autor (2024).

A normalização dos recursos hídricos feita por bacia hidrográfica apresenta valores mais baixos para as regiões ao norte do Paraná, principalmente as que fazem fronteira com o Estado de São Paulo. Por meio da FIGURA 32, apresenta-se as notas de cada BH classificadas de acordo com a disponibilidade hídrica e o consumo existente de água, em que as bacias que estão em vermelho são as mais favoráveis para a instalação da planta de eletrólise e as regiões em verde indicam que o recurso hídrico pode ser um fator limitante da produção.

FIGURA 32 - MAPA DAS BH NORMALIZADO



FONTE: O autor (2024).

#### 4.1.4 Infraestrutura do Estado

As camadas relacionadas à infraestrutura existente no Paraná foram avaliadas separadamente por cada parâmetro. Para a visualização dos mapas das normalizações, verificar o APÊNDICE A. Na TABELA 14, são exibidas as áreas de ocorrência dos valores normalizados para cada parâmetro avaliado.

TABELA 14 - ÁREA REPRESENTADA POR VALOR NORMALIZADO

Tipo	0 (km <sup>2</sup> )	0,2 (km <sup>2</sup> )	0,4 (km <sup>2</sup> )	0,6 (km <sup>2</sup> )	0,8 (km <sup>2</sup> )	1,0 (km <sup>2</sup> )
Porto	191.221,67	2.077,77	2.191,07	1.662,04	1.260,86	852,18
Porto Seco	153.677,15	15.315,91	13.224,92	9.358,57	5.773,06	1.915,98
Terminais Ferroviários	134.938,84	20.191,38	17.470,84	13.596,12	9.187,52	3.880,89
Rodovia Estadual	41.478,75	-	55.768,78	44.899,82	44.772,85	12.345,40
Rodovia Federal	105.644,14	-	41.211,14	24.358,83	22.031,53	6.019,94

Subestações	29.890,30	30.748,66	41.584,99	44.460,72	36.008,56	16.572,37
-------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

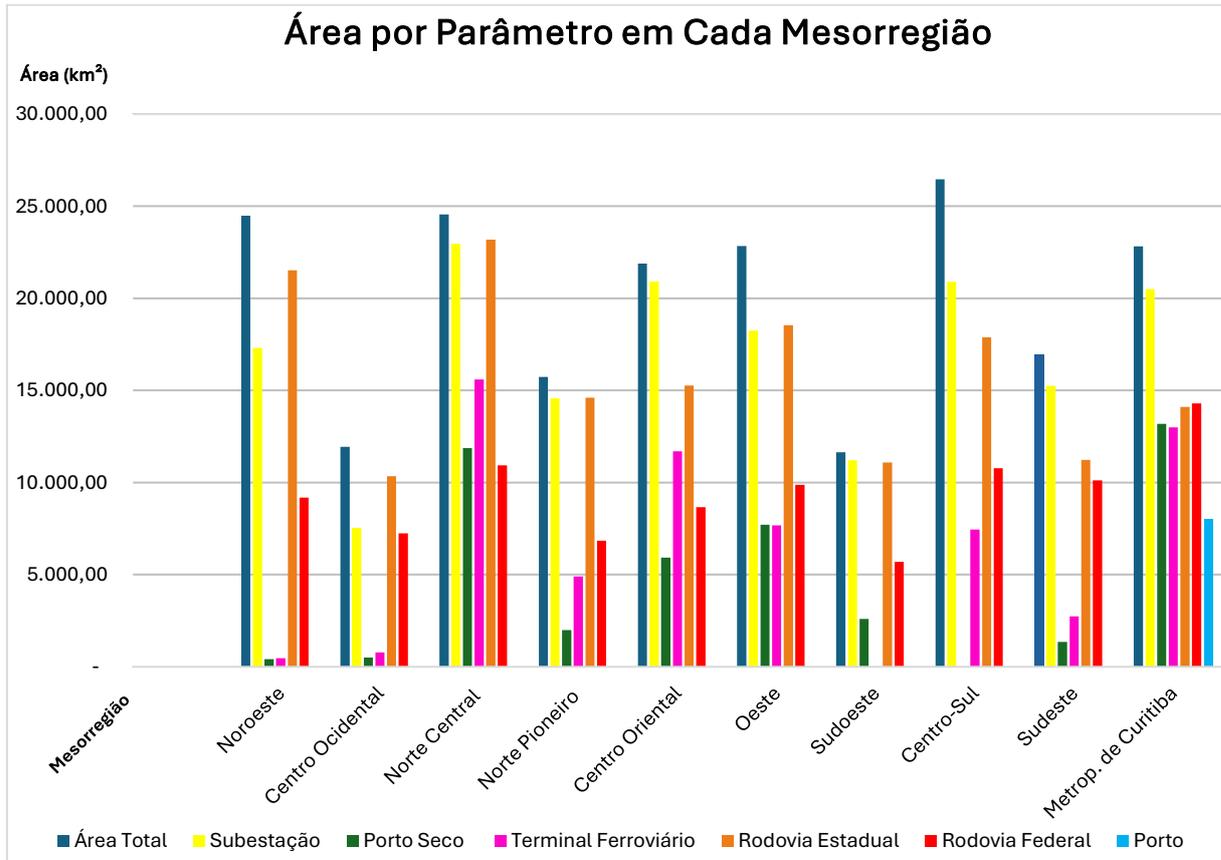
FONTE: O autor (2024).

A partir dos valores mostrados na TABELA 14, observa-se uma interessante densidade de subestações integradas ao SIN próximo a 85% de frequência de ao menos um valor normalizado em relação ao território paranaense. Com isso, apenas 29.890,30 km<sup>2</sup> por todo Estado não possui proximidade com alguma subestação e apresentaria dificuldade de integração das novas usinas de geração de energia *on-grid*. Em relação ao transporte para a logística de escoamento, nota-se uma maior presença de malhas rodoviárias em que as rodovias estaduais e federais se complementam, permitindo sem muitas restrições o acesso a esse meio. A exclusão de regiões sem proximidade com as rodovias indica locais de difícil acesso e provavelmente de baixa atividade econômica com outras regiões, já que o transporte rodoviário é o mais utilizado no país e no Estado para o fluxo de produtos.

O acesso a outros meios de transporte é exclusivo a locais com uma atividade econômica característica presente em que o transporte de produtos já ocorre, sendo a região Metropolitana de Curitiba o destino principal com a presença da capital ou dos portos no litoral. Além disso, a baixa influência de portos frente ao território do Estado ocorre por conta da pequena faixa litorânea em relação à área total do Paraná. Com isso, regiões mais ao interior ficam distantes do porto resultando em uma maior dificuldade para logística de exportação do hidrogênio gasoso, sendo os combustíveis líquidos de origem não-biológica uma alternativa para esse problema.

No GRÁFICO 1, é apresentado a área de influência de cada parâmetro por mesorregião do Estado, indicando os locais com maior desenvolvimento e uma rede estrutural de apoio já disponível para a implementação de uma planta de eletrólise de grande porte. Os valores utilizados para a construção do GRÁFICO 1 estão disponíveis no APÊNDICE B.

GRÁFICO 1 - ÁREA POR PARÂMETRO EM CADA MESORREGIÃO



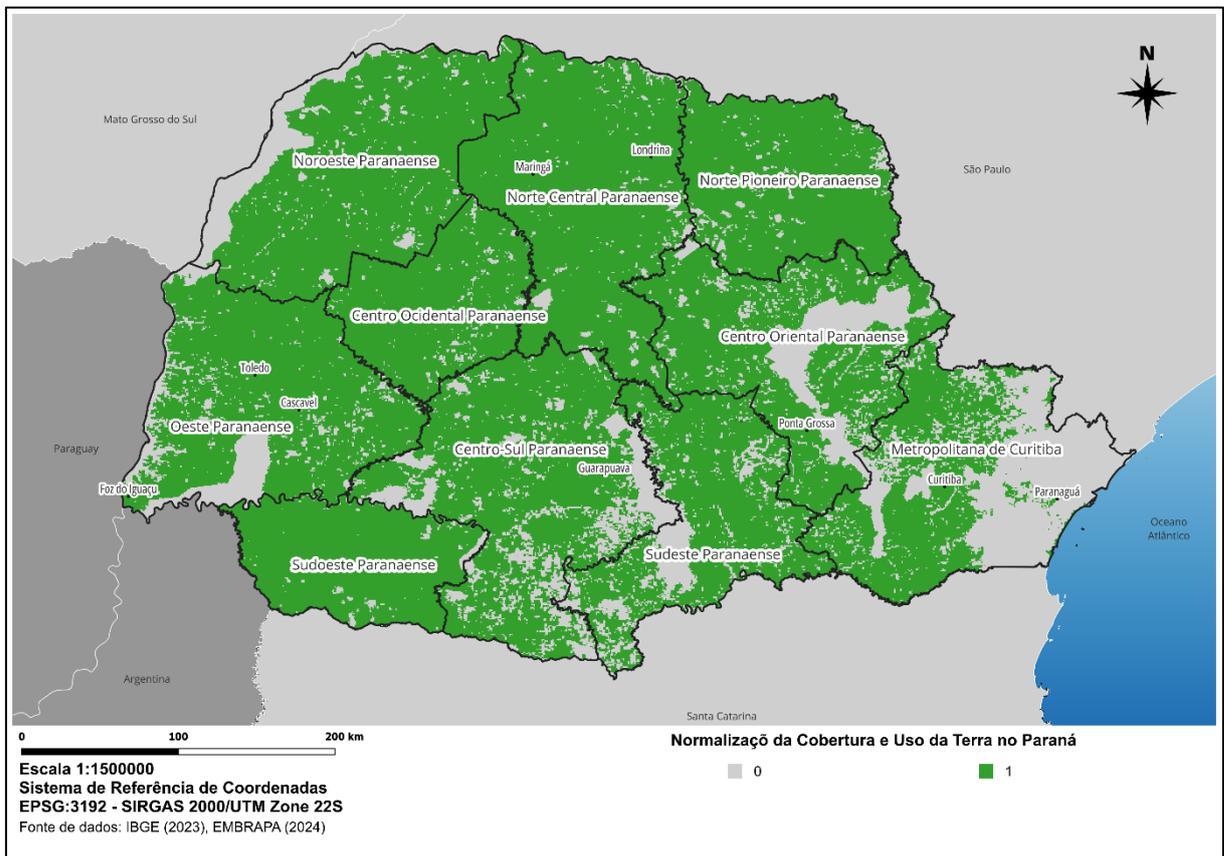
FONTE: O autor (2024).

Avaliando o GRÁFICO 1, a Região Metropolitana de Curitiba é a mesorregião mais estruturada e possui todos os parâmetros julgados necessários com presença territorial interessante de infraestrutura pela área. Apesar de distantes da região portuária, as mesorregiões paranaenses Oeste e Norte Central também possuem uma estruturação de base vantajosa para a instalação do empreendimento, sendo a distância e a complexidade de logística até o porto, o principal ponto negativo destes locais. Já as demais regiões, apesar de possuírem uma estrutura elétrica viável, há muitas áreas que não possuem uma infraestrutura de transporte instalada viável para o projeto, principalmente as que dependem apenas das rodovias e não possuem terminais ferroviários. Com isso, o principal limitador é a questão de como será feito o escoamento do H<sub>2</sub> para o porto, em que pode ser necessário um investimento maior no setor logístico do que em áreas com essa infraestrutura já existente.

#### 4.1.5 Áreas de restrição

A normalização das feições de uso e ocupação do solo em união com as áreas de restrição, resultou em uma camada que apresenta as áreas disponíveis (iguais a 1) para a construção do empreendimento. A FIGURA 33 indica as regiões possíveis de implementar uma planta de eletrólise representadas pela cor verde. De uma área total deste arquivo igual a 199.269,09 km<sup>2</sup>, apenas 39.340,54 km<sup>2</sup> são indisponíveis, ou seja, aproximadamente 80% da área do Estado pode ter a instalação do empreendimento caso viável.

FIGURA 33 - REGIÕES POSSÍVEIS PARA UTILIZAÇÃO



FONTE: O autor (2024).

## 4.2 CLASSIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

A relação hierárquica dos parâmetros para o cenário proposto de produção de H<sub>2</sub>ER para exportação é exibida na FIGURA 34. O motivo da escolha da velocidade do vento como principal fator é por conta da restrição e especificidade desta ocorrência, sendo as regiões com potencial eólico limitantes para a construção de um empreendimento que busca a complementariedade das fontes solar e eólica. Já referente às subestações e à disponibilidade hídrica, apesar desses fatores não serem limitantes como a presença de energia, não foi possível determinar qual seria mais importante para a viabilidade de uma planta de eletrólises onde às subestações são necessárias para a conexão com a rede se sem elas não há energia, enquanto a água é indispensável para o processo e sua ausência inibe a produção de H<sub>2</sub>ER. Em seguida, o porto é considerado essencial por conta do cenário de exportação, sendo o destino final do produto e conseqüentemente a proximidade com o terminal facilita a logística e a viabilidade do projeto. Em relação à irradiação solar média anual do Estado, todo o território possui potencial de geração fotovoltaica e ao relacionar com a complementariedade das fontes de energia, todas as áreas com potencial eólico também há potencial solar, enquanto o contrário não se aplica.

Os demais parâmetros foram categorizados de acordo com a preferência logística de distribuição do H<sub>2</sub>, por conta disso os portos secos que já possuem uma estrutura implementada de fluxo até o porto litorâneo e atividade alfandegária são mais interessantes que os demais meios. Por último, as ferrovias são mais interessantes do que as rodovias por conta de conseguir transportar um maior volume, se maneira mais segura e com um menor custo do que as rodovias. Cabe ressaltar que a hierarquização definida na FIGURA 34 é sugerida para o cenário avaliado neste trabalho e todos os parâmetros considerados viabilizam a instalação da planta de eletrólise, porém alguns são mais essenciais do que outros.

FIGURA 34 - RELAÇÃO HIERÁRQUICA DOS PARÂMETROS



FONTE: O autor (2024).

Aplicando a metodologia de Saaty (1991), foi obtida a classificação de cada parâmetro avaliado como importante para a tomada de decisão. Buscando a ponderação de cada critério de acordo com o benefício e influência para a implementação da planta de eletrólise, os valores encontrados por meio da matriz de decisão construída com a Escala Fundamental de Saaty são exibidos na TABELA 15.

TABELA 15 - VALOR DA CLASSIFICAÇÃO DE CADA PARÂMETRO

Parâmetro	Valor da classificação
Eólica	0,24530
Subestação	0,17304
Bacia Hidrográfica	0,17304
Porto	0,11932
Irradiação	0,09812
Porto Seco	0,07036
Terminal Ferroviário	0,06133
Rodovia Federal	0,04706
Rodovia Estadual	0,01241
Total	1,00000

FONTE: O autor (2024).

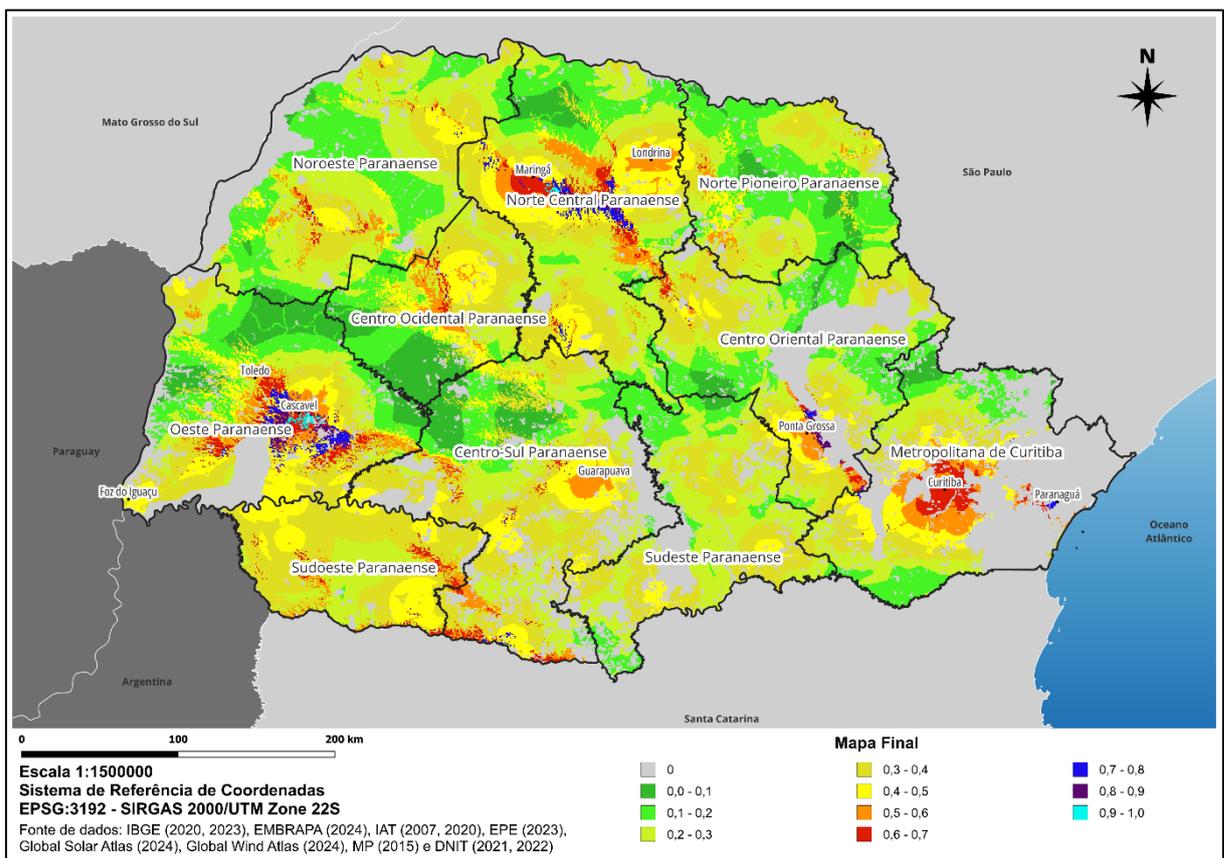
Ao realizar os cálculos para determinar a razão de consistência, o resultado encontrado foi de 0,094. De acordo com Saaty (1991) e Marins *et al.* (2009), um valor menor do que 0,1 indica coerência nas relações feitas entre os parâmetros para o cenário proposto, sendo possível utilizar as ponderações no cruzamento das camadas para a construção do mapa com as regiões favoráveis para a construção do

empreendimento por meio da análise multicritério feita. Os resultados realizados no *Microsoft Excel*<sup>®</sup> de cada etapa da metodologia para chegar nos valores de classificação e na razão de consistência estão disponíveis no APÊNDICE C.

#### 4.3 MAPA FINAL DAS ÁREAS FAVORÁVEIS

O cruzamento das camadas dos parâmetros avaliados com os valores das classificações realizadas pela análise multicritério resultou no mapa representado pela FIGURA 35, o qual pode auxiliar a tomada de decisão para a escolha do local para construção de uma planta de eletrólise objetivando a exportação de RFNBO.

FIGURA 35 - MAPA FINAL DAS ÁREAS FAVORÁVEIS PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UMA PLANTA DE ELETRÓLISE PARA EXPORTAÇÃO DE RFNBO



FONTE: O autor (2024).

Na FIGURA 35, percebe-se que as regiões com mais favoráveis para a instalação de uma planta de H<sub>2</sub> eletrolítico renovável são aquelas representadas por azul ou roxo. As áreas em verde e amarelo carecem de um ou mais dos critérios

selecionados, principalmente os de maior influência na ponderação realizada, tendendo a serem menos viáveis para a construção do empreendimento apenas com a estrutura já disponível. Locais com valores acima de 0,6 indicam a proximidade com os parâmetros mais importantes, sendo favoráveis para implementação da planta em que quanto mais próximo de 1 for o local, maior a disponibilidade dos recursos avaliados. Na TABELA 16, é apresentada a área de ocorrência para cada intervalo de resultados do cruzamento dos parâmetros.

TABELA 16 - ÁREA PARA CADA INTERVALO DE NORMALIZAÇÃO

Intervalo de normalização	Área relacionada ao intervalo (km <sup>2</sup> )
0,0 – 0,1	49.736,46
0,1 – 0,2	32.068,15
0,2 – 0,3	44.410,46
0,3 – 0,4	39.737,79
0,4 – 0,5	19.722,75
0,5 – 0,6	7.965,02
0,6 – 0,7	3.797,13
0,7 – 0,8	1.082,31
0,8 – 0,9	603,10
0,9 – 1,0	145,92
Total desconsiderando os valores nulos	159.928,55
Total	199.269,09

FONTE: O autor (2024).

De acordo com os dados apresentados na TABELA 16, identifica-se poucas regiões com valor acima de 0,6 com uma representatividade de 2,8% do total da área do Estado totalizando 5.628,46 km<sup>2</sup>. Mediante aos resultados da FIGURA 35, destacam-se as mesorregiões Oeste, Norte Central e Metropolitana de Curitiba. As duas primeiras possuem complementariedade entre o potencial energético solar e eólico, principalmente nas regiões das cidades mais desenvolvidas como Cascavel e Maringá. Essas regiões, por serem mais distantes das zonas portuárias e o setor apresentar dificuldade quanto a distribuição e transporte em longas distâncias, podem ser interessantes para abastecer o mercado interno, em que há uma demanda doméstica por amônia (fertilizantes) e metanol (biodiesel) ou produzir RFNBO líquido para facilitar o escoamento e a logística de transporte.

Em relação à faixa litorânea do Estado, essa região possui um interessante potencial por conta da presença dos portos somada à disponibilidade hídrica, principalmente da água do mar, que apesar de não ser considerado na análise multicritério seria mais um motivo para avaliar a região para produção de H<sub>2</sub>ER. Já na região próxima à Curitiba, percebe-se maior influência da disponibilidade de infraestrutura do que ao potencial energético, em que existe uma predisposição de ser o local mais favorável para implementação da planta pela proximidade portuária alinhada com a estrutura existente. Por outro lado, as demais mesorregiões não possuem um ponto focal como ocorre nas que foram citadas, ocasionando em situações isoladas especialmente em que há potencial eólico sem um grande centro urbano desenvolvido próximo com infraestrutura disponível. Já na região Central Oriental, mais específico próximo de Ponta Grossa, o principal potencial da região acabou ficando majoritariamente indisponível por conta da presença de uma área de restrição.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou auxiliar na localização e mapeamento de áreas com infraestrutura já existente para produção de hidrogênio eletrolítico renovável com o intuito de exportação atendendo às diretrizes europeias RED III para a categorização de combustível não-biológico renovável. Para atender o mercado interno, é possível a caracterização de um cenário mais brando quanto à regulamentação e seria possível refazer a hierarquização deste trabalho com novos pesos a critérios que foram entendidos como menos impactantes para um empreendimento que busca exportar H<sub>2</sub>. Sendo assim, o reconhecimento dos locais foi realizado por meio de sistemas de informações geográficas utilizando dados georreferenciados disponibilizados por diferentes organizações em que a construção do mapa final foi realizada por da análise multicritério com avaliação hierárquica. Com isso, o mapa apresentado auxilia na tomada de decisão para a escolha de uma localização com intuito de comercialização de RFNBO, sendo necessário uma avaliação mais criteriosa do local antes da implementação do empreendimento.

A produção de H<sub>2</sub> com baixa emissão de gases de efeito estufa é uma alternativa para o alcance de metas internacionais referente aos impactos ambientais com a utilização desse recurso em diversos setores. No cenário internacional, a exportação em forma de gás tende a ser desafiadora e inviável, em que a utilização de RFNBO se apresenta como uma possível solução. Por conta da pouca disponibilidade ou utilização de fontes de energia renovável em diversos países, a importação de recursos limpos tende ser uma alternativa para a descarbonização da economia destes. Por isso, é importante localizar o potencial de produção e investir em diversas rotas de produção de H<sub>2</sub> de baixo carbono buscando suprir a demanda doméstica e ter destaque na exportação. Além disso, a possibilidade de utilização do hidrogênio renovável em setores como na produção de fertilizantes, síntese de combustíveis e na geração de energia elétrica possibilita o aumento de cadeias sustentáveis por conta deste vetor energético.

O Paraná não é citado recorrentemente em relação a produção de H<sub>2</sub>ER como outros Estados no país, sendo mais relacionado a projetos com produção de hidrogênio a partir da biomassa devido principalmente ao enorme setor agropecuário da região. Porém, ao alinhar a produção de H<sub>2</sub> por eletrolisadores em conjunto com demais rotas com baixa pegada de carbono, o Paraná pode se tornar um dos

principais produtores de H<sub>2</sub> renovável no país. Esse destaque na produção, resultaria em um crescimento econômico criando oportunidade e incentivo para a instalação de novas indústrias na região por conta da geração de um insumo muito utilizado em diversas áreas.

Portanto, o objetivo deste estudo de utilizar a metodologia AHP para a construção do mapa potencial de produção de H<sub>2</sub> eletrolítico renovável no Paraná foi atingido, visto que se criou uma ferramenta para tomada de decisão a partir da hierarquização dos parâmetros avaliados como importantes para um empreendimento no cenário proposto. Por isso, o trabalho pode servir como um direcionamento inicial dos empreendedores para um local com potencial, em que depois da validação, pode ser implementado uma planta de eletrólise visando a exportação de RFNBO.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para futuros trabalhos, é possível realizar uma simulação de uma usina integrada solar-eólica para uma estimativa de produção de H<sub>2</sub>ER com uma planta de eletrólise projetada, utilizando dados e informações de alguma das áreas destacadas neste projeto. Também, tem como aplicar outras metodologias de análise multicritério para o cenário proposto ou objetivar outras rotas de produção de H<sub>2</sub> de baixo carbono. Por fim, uma oportunidade seria a construção da matriz de decisão visando o mercado interno de hidrogênio ou pesquisar as comparações e graus de importância com organizações ou pesquisadores da área, para visões distintas ao aplicar a metodologia dos critérios selecionados, permitindo avaliar qual o fator classificado como mais importante em visões distintas.

## REFERÊNCIAS

ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal. **Anual 2018**. Disponível em: <<http://abpa-br.com.br/storage/files/relatorio-anual-2018.pdf>>. Acesso em 17 de abril de 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Bibliografia Temática: modelos do setor elétrico brasileiro**. Brasília, nov. 2021. 12 p.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Implementação do Marco Regulatório do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono no Brasil**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/relatorios/relatorio-de-implementacao-do-marco-regulatorio-do-hidrogenio-de-baixa-emissao-de-carbono-no-brasil>>. Acesso em: 21 out. 2024.

AGUIAR, A. B. de. **Sistema híbrido eólico-fotovoltaico para diminuição da geração termelétrica em Fernando de Noronha**. 2023. p. 60. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/50374>>. Acesso em: 24 out. 2024

AVERLAN, M. S. **Mapeamento do Potencial de Geração de Energia Fotovoltaica no Estado de Santa Catarina**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Departamento Acadêmico de Construção Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2019.

BALFOUR, J. *et al.* **Introdução ao Projeto de Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: LTC, 2016. E-book. p.241. ISBN 9788521635314. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521635314/>>. Acesso em: 23 out. 2024.

BORGES, A. F.; TIMBÓ, M. A.; NERO, M. A.; TEMBA, P. da C. **Sistemas geodésicos de referência adotados no Brasil e a conversão dos dados geográficos para o sistema oficial SIRGAS2000: transformações e avaliação de erros**. *Revista Geografias*, 12(1), 45–63. 30 de jun. 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13414>>. Acesso em: 05 out. 2024

CÂMARA DE COMÉRCIO E INDÚSTRIA BRASIL-ALEMANHA (AHK Rio). **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde**. 27 out. 2021. Disponível em: <<https://brasilien.rio.ahk.de/pt/news/news-details/camara-de-comercio-e-industria-brasil-alemanha-lanca-estudo-com-o-mapeamento-do-setor-brasileiro-de-hidrogenio>>. Acesso em: 17 out. 2024.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos numéricos para engenharia**. 7ª ed. Porto Alegre, AMGH. 2016. E-book. p.448 - 479. ISBN 9788580555691. Disponível

em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788580555691/>>. Acesso em: 07 out. 2024.

COMISSÃO EUROPEIA. **Perguntas e respostas sobre os atos delegados da UE relativos ao hidrogênio renovável**. Bruxelas, 12 fev. 2023. Disponível em: <[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/qanda\\_23\\_595](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/qanda_23_595)>. Acesso em: 18 nov. 2024.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (Copel). **Atlas do potencial eólico do Estado do Paraná**. Curitiba, PR. 2007. p.62. ISBN 9788588519039. Disponível em: <<https://www.memoriadaeletricidade.com.br/acervo/17174/atlas-do-potencial-eolico-do-Estado-do-parana>>. Acesso em: 07 out. 2024

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2023**. Brasília. 2023. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/pesquisa>>. Acesso em: 09 out. 2024.

DIAS, L. T. **Mercado de hidrogênio verde: entre oportunidade e submissão**. 24 de maio de 2024. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/radio-usp/mercado-de-hidrogenio-verde-entre-oportunidade-e-submissao/>>. Acesso em 17 set. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Geoinfo**. 2024. Disponível em: <<https://geoinfo.dados.embrapa.br/catalogue/#/dataset/5955>>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2024: Ano base 2023**. Rio de Janeiro – RJ, 2024(a). p. 274. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>>. Acesso em: 14 out. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio: Revisão 1**. Rio de Janeiro – RJ, 14 de junho de 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-bases-para-a-consolidacao-da-estrategia-brasileira-do-hidrogenio>> Acesso em: 18 out. 2024

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **WebMap EPE**. 2024(b). Disponível em: <<https://gisepeprd2.epe.gov.br/WebMapEPE/>>. Acesso em 12 set. 2024

ENGIE Brasil. **Subestação: energia com qualidade e segurança**. 2024. E-book. Disponível em: <[https://www.engie.com.br/wp-content/uploads/2024/09/eBook\\_Guia-de-subestacoes-de-Energia.pdf](https://www.engie.com.br/wp-content/uploads/2024/09/eBook_Guia-de-subestacoes-de-Energia.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2024

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia Eólica**. Barueri: Manole, 2011. E-book. p. 39-88. ISBN 9788520446539. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788520446539/>. Acesso em: 23 out. 2024.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p. ISBN 9788586238826.

FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS (FUNAI). **Terras Indígenas - Demarcação**. 23 ago. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/funai/pt-br/atuacao/terras-indigenas/demarcacao-de-terras-indigenas>>. Acesso em: 10 out. 2024

FUSSUMA, T. M. D.; GIMENES, A. L. V.; UDAETA, M. E. M.; NASCIMENTO, V. T. **ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO E EXPORTAÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE NO NORDESTE BRASILEIRO**. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2024. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2475>>. Acesso em: 20 out. 2024.

**Global Solar Atlas**. [Data/information/map] obtained from the “Global Solar Atlas 2.0, a free, web-based application is developed and operated by the company Solargis s.r.o. on behalf of the World Bank Group, utilizing Solargis data, with funding provided by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). For additional information: <https://globalsolaratlas.info>. 2024.

**Global Wind Atlas**. [Data/information/map] obtained from the Global Wind Atlas version 3.3, a free, web-based application developed, owned and operated by the Technical University of Denmark (DTU). The Global Wind Atlas version 3.3 is released in partnership with the World Bank Group, utilizing data provided by Vortex, using funding provided by the Energy Sector Management Assistance Program (ESMAP). For additional information: <https://globalwindatlas.info>. 2024.

GOMES, J. **Eletrólise da água na obtenção de hidrogênio**. Revista Ciência Elementar, v. 10, n. 2, jun. 2022. Disponível em: <<https://rce.casadasciencias.org/rceapp/art/2022/025/>>. Acesso em: 20 out. 2022.

GOMES, L. F. A. M. **Princípios e Métodos para Tomada de Decisão Enfoque Multicritério**. 6ª ed. Rio de Janeiro. 2019. E-book. p.62. ISBN 9788597021592. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788597021592/>. Acesso em: 13 out. 2024.

GOMES, V. A. P.; Julio, T. S.; Freitas, R. R. **IPSPA: Construção de um Índice de Potencialidade Socioeconômico, Produtivo e Ambiental Pesqueiro utilizando o Método AHP**. Brazilian Journal of Production Engineering, São Mateus, Espírito Santo, Brazil, v. 2, n. 1, p. 72–83. 2016. Disponível em: [https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/PO02\\_2016](https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/PO02_2016). Acesso em: 13 out. 2024.

GOVERNO FEDERAL BRASILEIRO (GOV). **Lei nº 14.990, de 27 de setembro de 2024**. Institui o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera a Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2024/lei/l14990.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/lei/l14990.htm)>. Acesso em: 11 dez. 2024.

HAMILTON, L. **Interpolação Linear: Explicação & Exemplo, Fórmula**. 12 de set. 2023. Disponível em: <<https://educareforma.com.br/interpolacao-linear-explicacao-exemplo-formula>>. Acesso em: 05 out. 2024.

HUNT, J. D. *et al.* **Aspectos sobre o armazenamento e transporte de hidrogênio.** Brasília, DF, 2023. v. 4, p. 139. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/378078577\\_Aspectos\\_sobre\\_o\\_armazena mento\\_e\\_transporte\\_de\\_hidrogenio](https://www.researchgate.net/publication/378078577_Aspectos_sobre_o_armazena mento_e_transporte_de_hidrogenio)>. Acesso em: 21 out. 2024.

IBRAHIN, F. I. D. **Introdução ao Geoprocessamento Ambiental.** Rio de Janeiro: Érica, 2014. E-book. p.76 - 86. ISBN 9788536521602. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536521602/>. Acesso em: 25 out. 2024.

INFRAESTRUTURA NACIONAL DE DADOS ESPACIAIS (INDE). **Catálogo de Metadados.** 2024. Disponível em: <<https://metadados.inde.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search;jsessionid=8C87478FF2810BAE5870F9BA8B6453BF#/home>>.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). **Dados e Informações Geoespaciais Temáticos.** 2007. Disponível em: <<https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Dados-e-Informacoes-Geoespaciais-Tematicos>>.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA (IAT). **Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos do Estado do Paraná.** Curitiba. 2020. ISBN 9786587716008. Disponível em: <[https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos\\_restritos/files/documento/2020-07/relatorio\\_conjuntura\\_recursos\\_hidricos\\_2020.pdf](https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/relatorio_conjuntura_recursos_hidricos_2020.pdf)>. Acesso em: 07 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Bases cartográficas contínuas – Brasil.** 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/bases-cartograficas-continuas/15759-brasil.html?=&t=sobre>>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Monitoramento da cobertura e uso da terra do Brasil: 2018/2020.** Rio de Janeiro, RJ. 2022. p. 39. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101966>> Acesso em: 09 out. 2024

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). **Incra notifica beneficiários da reforma agrária para regularizar situação em assentamentos.** 07 out. 2024(a). Disponível em: <<https://www.gov.br/incra/pt-br/assuntos/noticias/incra-notifica-beneficiarios-da-reforma-agraria-para-regularizar-situacao-em-assentamentos>>. Acesso em: 10 out. 2024

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). **Quilombolas.** 02 set. 2024(b). Disponível em: <<https://www.gov.br/incra/pt-br/assuntos/governanca-fundiaria/quilombolas?form=MG0AV3>>. Acesso em: 10 out. 2024

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review 2024.** Paris, 2024. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>>. Acesso em 23 de set. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Electricity Market Report 2023**. Paris, 2023(a). Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023>>. Acesso em: 15 out. 2024

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2023: Analysis and forecasts to 2028**. Paris, 2023(b). Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2023>>. Acesso em: 15 out. 2024

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green Hydrogen: A guide to policy making**, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi, 2020(a) Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications/2020/Nov/Green-hydrogen>>. Acesso em: 20 out. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal**. Abu Dhabi, 2020(b). Disponível em: <<https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction>>. Acesso em: 20 out. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Meta da COP28 de triplicar as energias renováveis só será viável com uma correção global urgente da rota**. 19 de mar. 2024(a). Disponível em: <<https://www.irena.org/News/pressreleases/2024/Mar/COP28-Goal-of-Tripling-Renewables-Feasible-Only-with-Urgent-Global-Course-Correction-PT>>. Acesso em: 15 nov. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Energy Statistics 2024**. Abu Dhabi, 2024(b). Disponível em: <<https://www.irena.org/Publications/2024/Jul/Renewable-energy-statistics-2024?form=MG0AV3>>. Acesso em: 23 out. 2024.

JAVARINI, N. S.; GOMES, V. A. do P.; FREITAS, R. R. de. **Análise da aplicação do método AHP em indicadores de potencialidade na implantação de parques eólicos**. Brazilian Journal of Production Engineering, São Mateus, Espírito Santo, Brazil, v. 7, n. 1, p. 17–30. 2021. DOI: 10.47456/bjpe.v7i1.33518. Disponível em: <<https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/33518>>. Acesso em: 13 out. 2024.

KELMAN, R. et al. **Aplicação de sistemas internacionais de certificação de hidrogênio em projetos brasileiros – Relatório final**. Projeto H2Brasil, Brasília-DF, jul. 2024. Disponível em: <<https://bivica.org/file/view/id/7066>>. Acesso em: 21 out. 2024

MARINS, C. S.; Souza, D. D. O; Barros, M. D. S. **O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais—um estudo de caso**. Xli Sbp. 2009. p. 49.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Descarbonização, um processo que pode ajudar o meio ambiente**. 17 de out. 2023(a). Disponível em:

<<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/descarbonizacao-um-processo-que-pode-ajudar-o-meio-ambiente>>. Acesso em 17 de set. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Diretrizes do Programa Nacional do Hidrogênio**. 20 abr. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1>>. Acesso em 26 de set. 2024.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Plano de Trabalho Trienal 2023-2025**. 23 de ago. 2023(b). Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/PlanodeTrabalhoTrienalPNH2.pdf>>. Acesso em 26 de set. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇAS CLIMÁTICAS (MMA). **Cadastro Nacional de Unidades de Conservação — CNUC**. 2024. Disponível em: <<https://cnuc.mma.gov.br>>. Acesso em: 10 out. 2024.

NOJIMA, D. **Energia no Paraná: breve panorama e indicações sobre a demanda futura**. Revista Paranaense de Desenvolvimento, v. 43, n. 143, p.81-94. 2022. Disponível em: <<https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/1254>>. Acesso em: 17 out. 2024.

OLIVEIRA, Y. P. L. O. **Desafios do mercado de carbono após o Acordo de Paris: uma revisão**. Meio Ambiente (Brasil), v. 4, n. 1, p. 2–20. fev. 2022(a). DOI: 10.5281/zenodo.6302409. Acesso em 17 de set. 2024.

OLIVEIRA, R. C. dos. **Panorama do hidrogênio no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2022(b). Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/11291>>. Acesso em: 20 out. 2023.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Sobre o SIN**. 2024. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 16 out. 2024.

PARLAMENTO EUROPEU;  
CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva (UE) 2023/2413, de 18 de outubro de 2023, relativa à promoção da utilização de energias renováveis, e que altera a Diretiva (UE) 2018/2001, o Regulamento (UE) 2018/1999 e a Diretiva 98/70/CE, e revoga a Diretiva do Conselho (UE) 2015/652**. Diário Oficial da União Europeia, L 2413, 31 de outubro de 2023. p. 1-45. Disponível em: <[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L\\_202302413](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202302413)>. Acesso em: 09 out. 2024.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p. Disponível em: <<http://doi.org/10.34024/978851700089>>. Acesso em: 23 out. 2024

PINTO, M. **Fundamentos de Energia Eólica**. Rio de Janeiro: LTC. 2012. E-book. p.1 - 330. ISBN 9788521621935. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2193-5/>>. Acesso em: 07 out. 2024.

PINTO, M. **Energia Eólica - Princípios e operação**. Rio de Janeiro: Érica, 2019. E-book. p.325. ISBN 9788536532226. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788536532226/>. Acesso em: 24 out. 2024.

SAATY, T. L. **How to make a decision: the analytic hierarchy process**. European Journal of Operational Research, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0377221790900571>>

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1991.

SABOYA, R.T. **Análises espaciais em planejamento urbano**. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais 3, 2000. p. 61-79. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/235436779\\_Analises\\_espaciais\\_em\\_planejamento\\_urbano\\_novas\\_tendencias/citations](https://www.researchgate.net/publication/235436779_Analises_espaciais_em_planejamento_urbano_novas_tendencias/citations)>. Acesso em: 26 out. 2024

SENAI CIMATEC. **Atlas H2V Bahia**. Salvador, Bahia, 2023. p. 128. ISBN 9788560771202. Disponível em: <<https://static.poder360.com.br/2024/05/AtlasH2VBahia-1.pdf>>.

SILVA, J. V. L.; RODRIGUES, M. I.; TAPIA, G. I. M. **Análise técnica e econômica de um sistema híbrido eólico-solar off-grid em uma região rural no Estado do Rio Grande do Norte**. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2020. Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/942>>. Acesso em: 24 out. 2024.

SOBREIRA, M. de G. **Análise tarifária de modalidades de contratação de energia no setor elétrico brasileiro**. 2023. p. 72. TCC (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/50339>>. Acesso em: 14 out. 2024

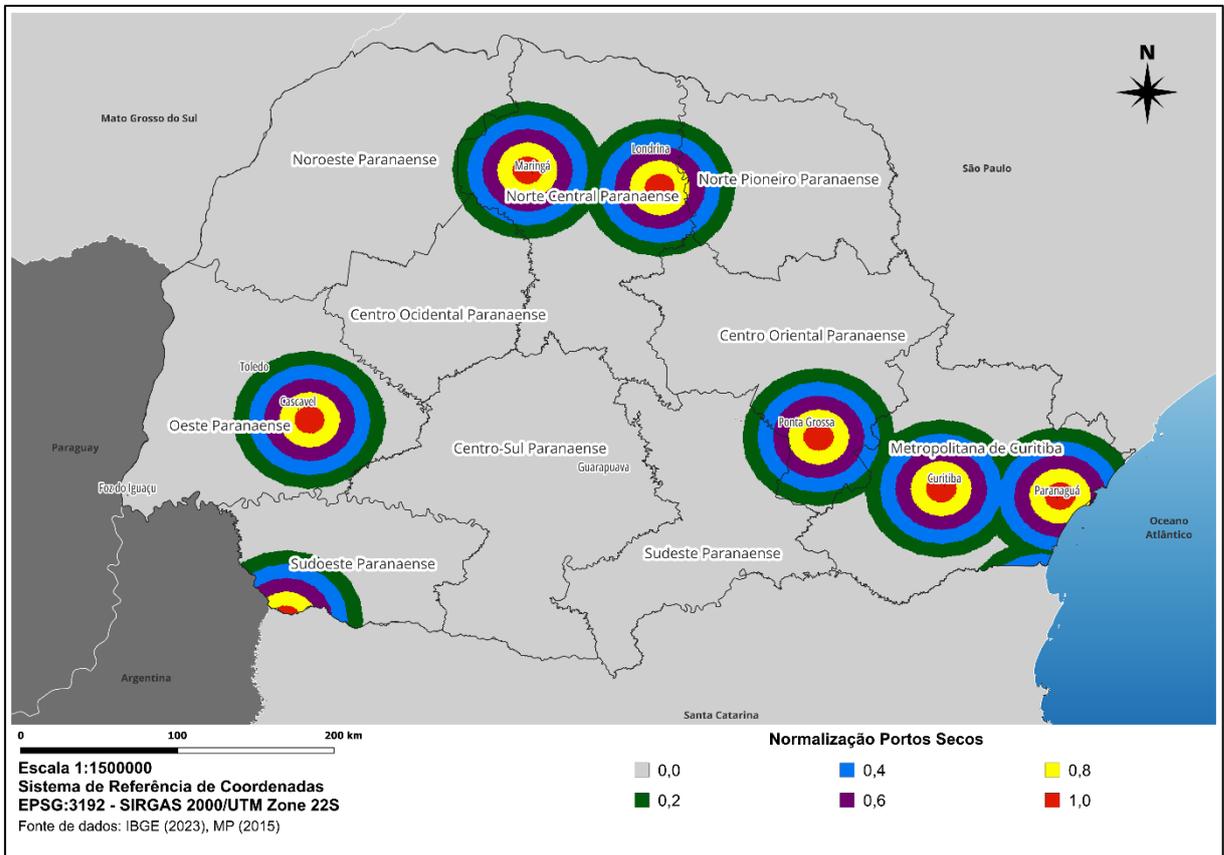
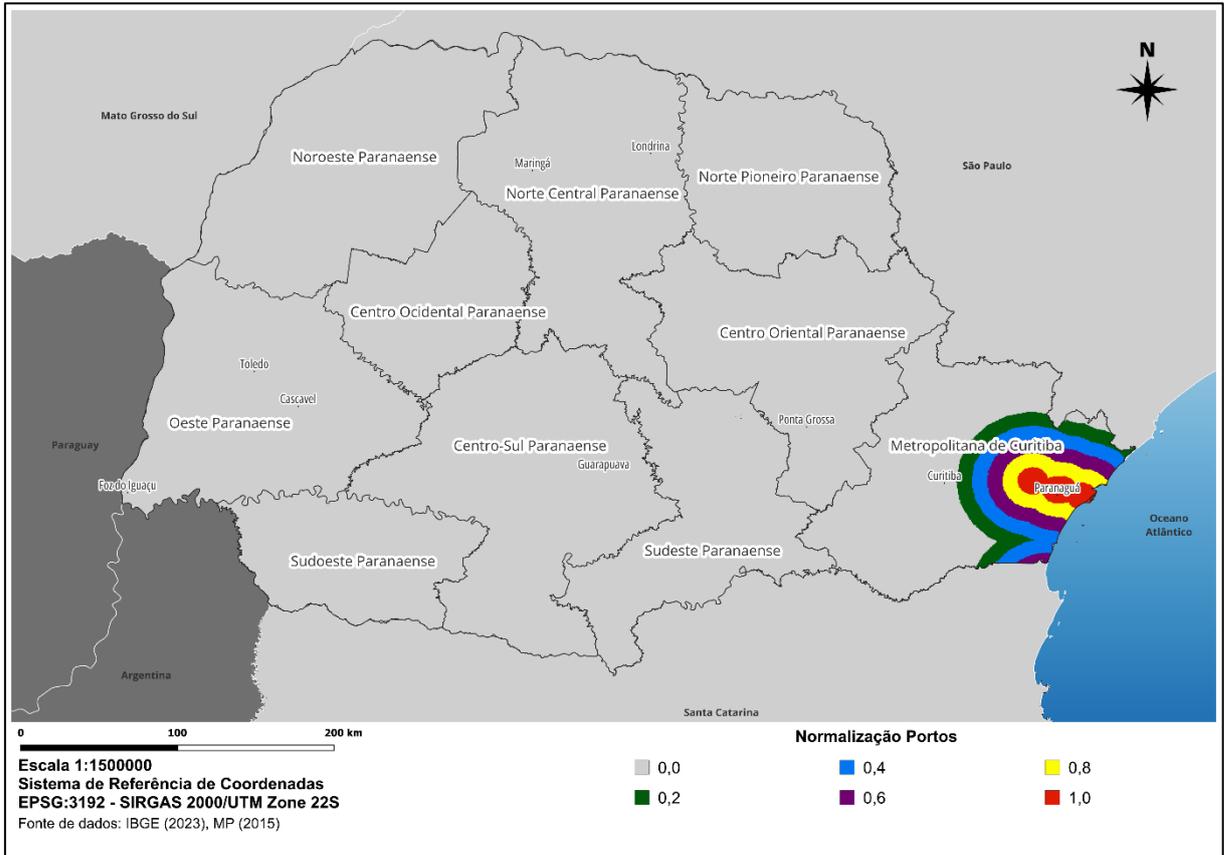
STEIN, R. T. *et al.* **Geoprocessamento**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. E-book. p.65 - 186. ISBN 9786556902852. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556902852/>. Acesso em: 25 out. 2024.

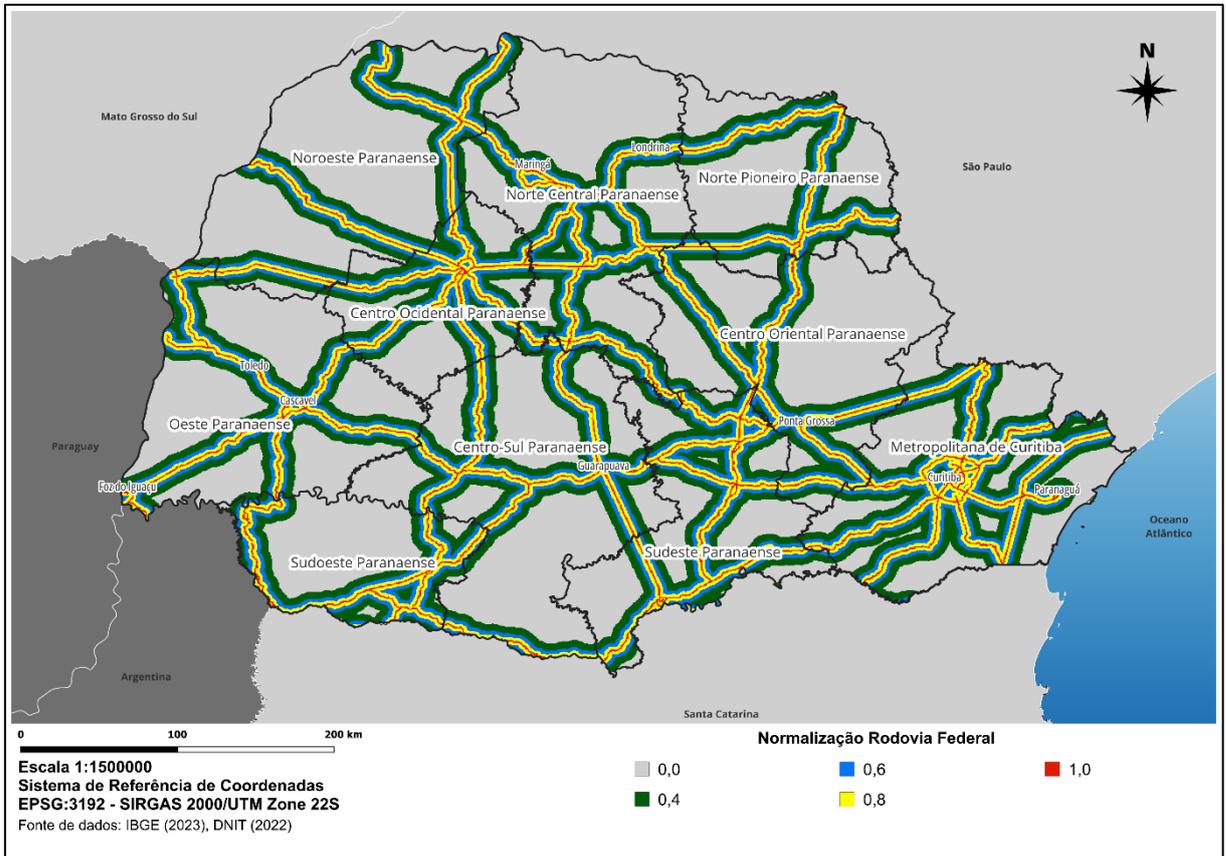
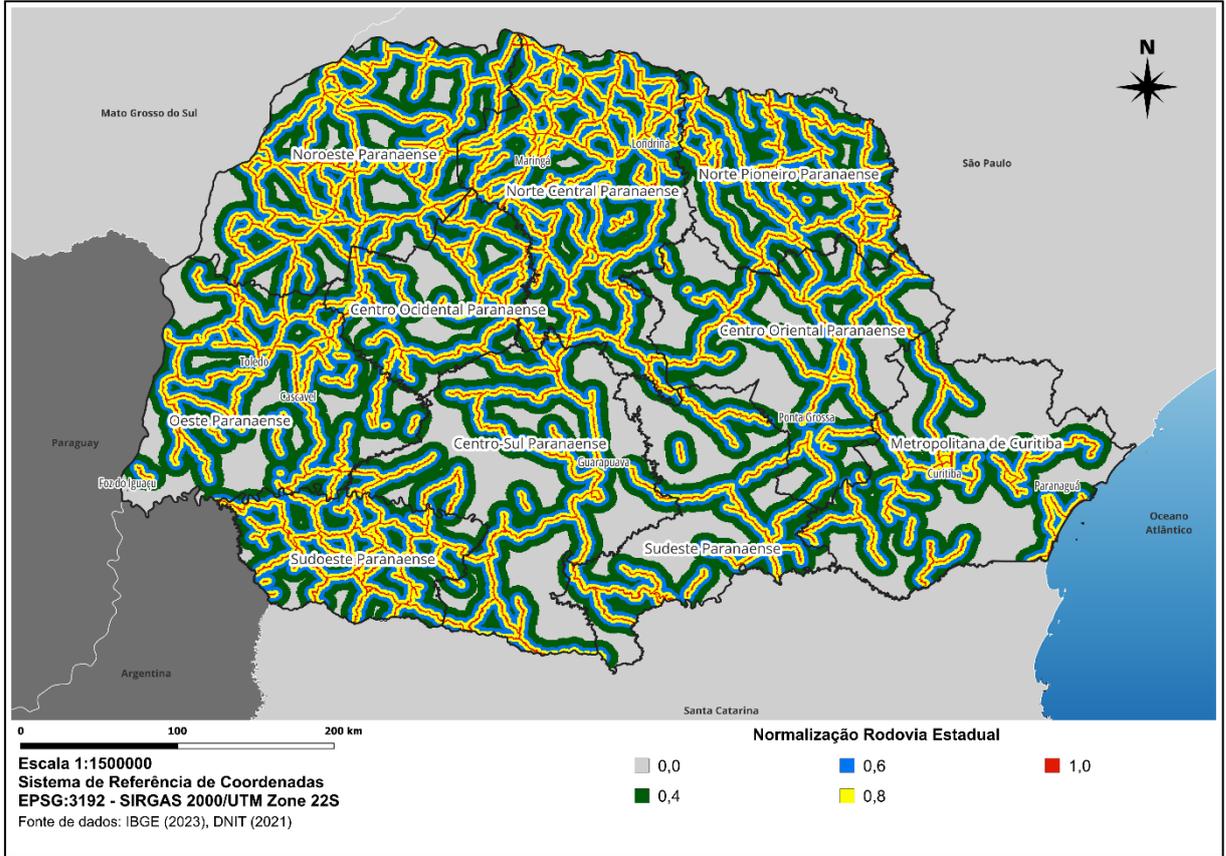
STONES, J. **RED III & Hydrogen Infogram**. 2024. Disponível em: <<https://infogram.com/1pd30pr1xmwqumz9q9n7722dhkr2d600d?live>>. Acesso em: 22 out. 2024.

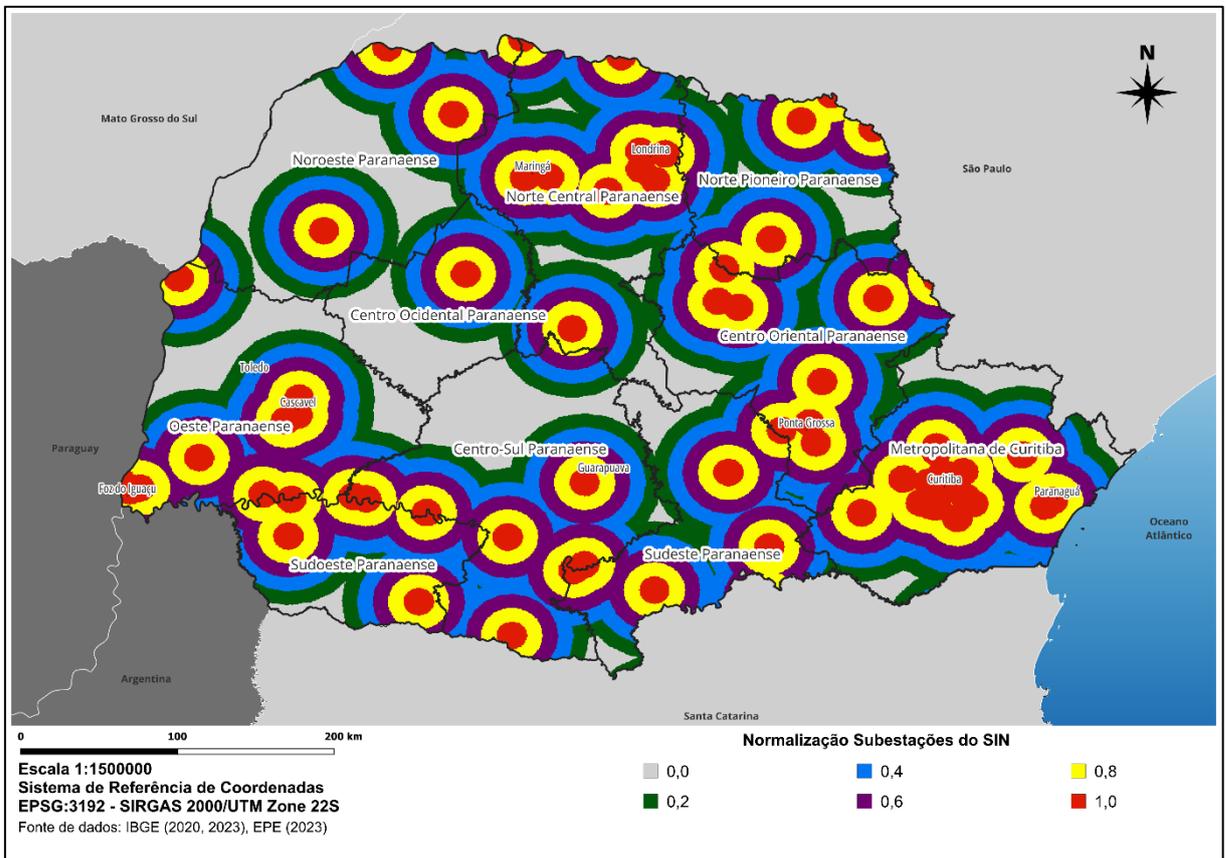
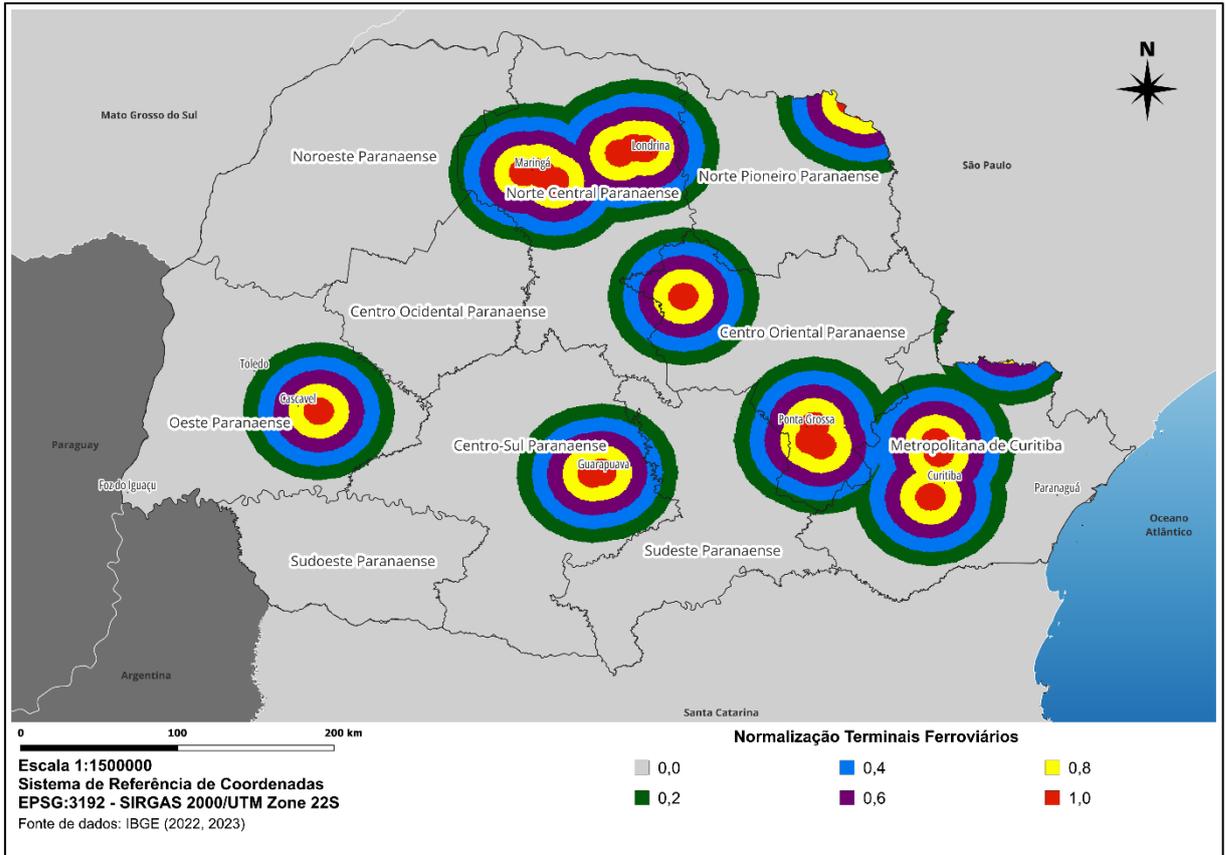
TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, E. B.; JUNIOR, J. U.; PEREIRA, S. V.; GONCALVES, A. R.; DE LIMA, F. J. L.; COSTA, R. S.; ALVES, A. R. **Atlas de energia solar do Estado do Paraná - resultados**. Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS, 2018. Disponível em: Disponível em: <<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/671>>. Acesso em: 05 out. 2024.

VASCONCELOS, Y. **The path to sustainable hydrogen**: Brazil begins producing the fuel, which is seen as key to the transition to a low-carbon economy. Revista Pesquisa FAPESP, nov. 2023. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/en/the-path-to-sustainable-hydrogen/>>. Acesso em: 15 out. 2024

## APÊNDICE A – MAPAS DAS NORMALIZAÇÕES DE INFRAESTRUTURA







## APÊNDICE B - OCORRÊNCIA DOS PARÂMETROS AS MESORREGIÕES

Mesorregião paranaense	Área Total (km <sup>2</sup> )	Subestação (km <sup>2</sup> )	Porto Seco (km <sup>2</sup> )	Terminal Ferroviário (km <sup>2</sup> )	Rodovia Estadual (km <sup>2</sup> )	Rodovia Federal (km <sup>2</sup> )	Porto (km <sup>2</sup> )
Noroeste	24.488,72	17.314,85	424,10	467,79	21.526,29	9.177,51	-
Centro Ocidental	11.935,29	7.540,12	503,47	784,69	10.347,91	7.249,56	-
Norte Central	24.555,76	22.953,86	11.872,06	15.595,09	23.192,31	10.939,91	-
Norte Pioneiro	15.726,69	14.565,30	1.999,79	4.907,19	14.615,63	6.842,96	-
Centro Oriental	21.879,89	20.911,01	5.919,58	11.703,21	15.264,67	8.656,46	-
Oeste	22.844,51	18.240,95	7.707,45	7.672,22	18.546,59	9.870,70	-
Sudoeste	11.650,95	11.206,53	2.607,04	-	11.086,85	5.693,25	-
Centro-Sul	26.456,57	20.901,71	13,21	7.450,01	17.877,75	10.777,92	-
Sudeste	16.940,96	15.243,41	1.349,19	2.744,26	11.231,34	10.113,92	-
Metrop. de Curitiba	22.819,63	20.497,56	13.192,55	13.002,29	14.097,51	14.299,25	8.043,92

## APÊNDICE C - RESULTADOS DO MÉTODO AHP

Parâmetros	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	Soma das linhas	Classificação	n	Autovalor	Lambda	Lambda Máx	IC	IR	Razão de Consistência
Ediça	P1 1	3	3	4	5	6	6	6	9	43,00000	0,24530		3,4357	14,00587				
Subestação	P2 0,333	1	1	3	4	4	4	4	9	30,33333	0,17304		2,0050	11,58689				
Disponibilidade Hídrica	P3 0,333	1	1	3	4	4	4	4	9	30,33333	0,17304		2,0050	11,58689				
Porto	P4 0,25	0,333	0,333	1	2	3	3	4	7	20,91667	0,11932		1,1625	9,74210				
Irradiação	P5 0,2	0,25	0,25	0,5	1	3	3	3	6	17,20000	0,09812	9	0,9041	9,21408	10,08891	0,136114	1,45	0,09387
Porto Seco	P6 0,167	0,25	0,25	0,333	0,3333	1	2	2	6	12,33333	0,07036		0,5615	7,98076				
Terminal Ferroviário	P7 0,167	0,25	0,25	0,25	0,3333	0,5	1	2	6	10,75000	0,06133		0,4551	7,42043				
Rodovia Federal	P8 0,167	0,25	0,25	0,25	0,3333	0,5	0,5	1	5	8,25000	0,04706		0,3649	7,75375				
Rodovia Estadual	P9 0,111	0,111	0,111	0,143	0,1667	0,167	0,167	0,2	1	2,17619	0,01241		0,1429	11,50942				
										175,29286	1							