



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ISAQUE DA SILVA MORAIS

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE OBTENÇÃO DO
HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR ENERGÉTICO NO ESTADO DO
TOCANTINS

Palmas, TO

2024

Isaque da Silva Morais

**Metodologia para Análise do Potencial de Obtenção do Hidrogênio Verde como Vetor
Energético no Estado do Tocantins**

Monografia apresentada à Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Palmas para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Barbosa de Oliveira Neto

Palmas, TO

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

M827m Morais, Isaque da Silva.

Metodologia para Análise do Potencial de Obtenção do Hidrogênio Verde como Vetor Energético no Estado do Tocantins. / Isaque da Silva Morais. – Palmas, TO, 2024.

56 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2024.

Orientador: Dr. Antonio Barbosa de Oliveira Neto

1. Disponibilidade hídrica. 2. Hidrogênio verde. 3. Geração solar fotovoltaica. 4. Vetor energético. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

FOLHA DE APROVAÇÃO


ISAQUE DA SILVA MORAIS

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE OBTENÇÃO DO HIDROGÊNIO VERDE COMO VETOR ENERGÉTICO NO ESTADO DO TOCANTINS


Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica, foi avaliada para a obtenção do título de graduação em engenharia elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: 04/12/2024


Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO BARBOSA DE OLIVEIRA NETO**
Data: 05/12/2024 14:05:15-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Antonio Barbosa de Oliveira Neto (Orientador), UFT

Documento assinado digitalmente
 **JADIEL CAPARRÓS DA SILVA**
Data: 05/12/2024 14:25:21-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Jádriel Caparrós da Silva, UFT

Documento assinado digitalmente
 **STEFANI CAROLLINE LEAL DE FREITAS**
Data: 05/12/2024 15:03:27-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof^a. Dra. Stefani Caroline Leal de Freitas, UFT

“Presentemente, eu posso me considerar um sujeito de sorte, porque apesar de muito moço, me sinto são, e salvo, e forte” - Belchior

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me proporcionar saúde e oportunidades de cada dia ser uma melhor pessoa.

Aos meus pais, Geudo Osório Morais e Nivia Maria Reis da Silva Morais, minhas eternas inspirações e meus maiores exemplos de caráter, integridade e vida. Foi com eles que aprendi os valores mais preciosos, como respeito, honestidade e perseverança. Os princípios que eles me ensinaram não só moldaram o homem que sou hoje, mas também guiam cada passo que dou na minha jornada. Sua sabedoria, dedicação e amor incondicional são a base de tudo o que conquistei e ainda pretendo alcançar. Obrigado por serem meu alicerce e minha fonte inesgotável de força e motivação.

Às minhas irmãs, Dra. Josina da Silva Morais, Dra. Bárbara da Silva Morais e Dra. Aricia da Silva Morais, que incansavelmente acreditaram nos meus sonhos e no meu potencial. Agradeço por estarem ao meu lado desde o início desta longa jornada. Este trabalho é um reflexo de todo o amor, apoio e inspiração que vocês me proporcionaram.

Aos meus irmãos de coração, Fernando Brito Jaques, Gabriel Conrado e Hugo Leonardo Moraes por me ajudarem nos momentos mais difíceis da minha trajetória.

Ao grupo Programa de Educação Tutorial (PET) de Engenharia Elétrica, a todos os petianos e a nossa tutora Dra. Kathy Camila Cardoza Osisnski Senhorini, que me proporcionaram experiências e momentos únicos.

À minha companheira, Ana Paula da Silva, por todo carinho, amor, apoio e suporte na minha vida.

Agradeço os meus colegas, Gabriel Soares, Luis Phellipe Gomes, Gustavo Lins, Gabriela Siqueira, Maria Clara Gomes, Gabriel Gonçalves e Regina Victoria, que compartilho momentos, seja no ambiente universitário quanto em momentos de diversão.

Meu muito obrigado ao professor Dr. Antonio Barbosa de Oliveira Neto, que me aceitou como orientando, e sempre mostrou interesse e disponibilidade para contribuir para a concretização deste trabalho. Além disto, sou eternamente agradecido por todo o conhecimento e conselhos fornecidos.

Por fim, quero agradecer a todos os professores que compõem o colegiado de Engenharia Elétrica - UFT, especialmente os professores, Me. Alcy Monteiro Junior, Dr. Jadiel Caparrós da Silva e Dr. Sérgio Gobira por todos os ensinamentos e dedicação.

RESUMO

Este projeto de pesquisa tem como objetivo propor uma metodologia para análise do potencial de obtenção do Hidrogênio Verde (H2V) como vetor energético no estado do Tocantins, por meio da Geração Solar Fotovoltaica (GSF) e da disponibilidade hídrica. Inicialmente, foram selecionadas e parametrizadas as características que influenciam a GSF. Estas variáveis foram integradas e analisadas utilizando o *software* Quantum GIS (QGIS), permitindo a sobreposição de camadas informativas e a identificação das áreas mais favoráveis para a GSF no estado do Tocantins. Paralelamente, foi realizada a coleta de informações de 18 estações fluviométricas distribuídas pelo estado Tocantins, nas quais os dados referentes à vazão foram empregados para elaborar um mapa de disponibilidade hídrica da região. Complementarmente, foi realizada a integração dos mapas de propiabilidade de GSF e de disponibilidade hídrica utilizando ferramentas avançadas do QGIS. Esta síntese possibilitou a identificação das áreas mais propícias para a obtenção do H2V, considerando tanto o potencial de GSF quanto os recursos hídricos disponíveis no estado do Tocantins. Por fim, a pesquisa contribui de maneira significativa para o planejamento energético da região, fornecendo uma base para a transição energética e decisões estratégicas que visem o aproveitamento eficiente dos recursos naturais para a produção de energia limpa, renovável e sustentável.

Palavras-chave: Disponibilidade hídrica; hidrogênio verde; geração solar fotovoltaica; vetor energético; QGIS.

ABSTRACT

This research project aims to propose a methodology for analyzing the potential for obtaining Green Hydrogen (GH₂) as an energy vector in the state of Tocantins, through Solar Photovoltaic Generation (SPG) and water availability. Initially, the characteristics that influence the SPG were selected and parameterized. These variables were integrated and analyzed using the Quantum GIS (QGIS) software, allowing the overlay of informative layers and the identification of the most favorable areas for SPG in the state of Tocantins. At the same time, information was collected from 18 fluviometric stations distributed across the state of Tocantins, in which flow data were used to create a map of water availability in the region. Additionally, the integration of SPG propituality maps and water availability maps was carried out using advanced QGIS tools. This synthesis made it possible to identify the most suitable areas for obtaining GH₂, considering both the SPG potential and the water resources available in the state of Tocantins. Finally, the research contributes significantly to the region's energy planning, providing a basis for energy transition and strategic decisions aimed at the efficient use of natural resources to produce clean, renewable and sustainable energy.

Key-words: Energetic vector, green hydrogen; photovoltaic solar generation, QGIS; water availability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Cadeia produtiva do H2V	23
Figura 2: Efeito fotovoltaico em uma célula solar	24
Figura 3: Delimitação da BHRTO e suas sub-bacias hidrográficas	26
Figura 4: Hidrografia do Estado do Tocantins.....	27
Figura 5: Obtenção de hidrogênio a partir de eletrólise baseada em energia solar	30
Figura 6: Estrutura raster e vetor de dados espaciais em um SIG.....	31
Figura 7: Fluxograma da metodologia adotada	32
Figura 8: Mapa de radiação solar do Tocantins	33
Figura 9: Mapa de insolação do Tocantins	33
Figura 10: Mapa de precipitação do Tocantins.....	34
Figura 11: Mapa de temperatura do Tocantins	34
Figura 12: Mapa eletrogeográfico existente do Tocantins.....	35
Figura 13: Mapa de umidade relativa do ar do Tocantins	35
Figura 14: Mapa de densidade demográfica do Tocantins	36
Figura 15: Mapa de unidade de conservação e reservas indígenas do Tocantins.....	36
Figura 16: Mapa de declividade do Tocantins.....	37
Figura 17: (a) LTs em cor vermelha, que atravessam o estado do Tocantins; (b) LTs em cor vermelha, no estado do Tocantins.....	37
Figura 18: (a) LTs em cor vermelha, no estado do Tocantins; (b) Distribuição da intensidade de gradiente, partindo das linhas mais próximas até os extremos do estado do Tocantins	38
Figura 19: GSF com pesos distintos no Tocantins por meio da Calculadora <i>Raster</i>	40
Figura 20: Propriedade de GSF no estado do Tocantins.....	43
Figura 21: Disponibilidade hídrica do estado do Tocantins	45
Figura 22: Mapa final da propriedade de obtenção do H2V no estado do Tocantins.....	47
Figura 23: Mapa final da propriedade de obtenção do H2V na região Norte do estado do Tocantins.....	48
Figura 24: Mapa final da propriedade de obtenção do H2V na região Nordeste do estado do Tocantins.....	48
Figura 25: Mapa final da propriedade de obtenção do H2V na região Centro-Leste do estado do Tocantins.....	49
Figura 26: Mapa final propriedade de obtenção do H2V na região Sul do estado do Tocantins	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação do hidrogênio em escala de cores.....	29
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comportamento das características que influenciam a GSF concentrada	39
Tabela 2: Fatores excludentes para a GSF	39
Tabela 3: Valores dos coeficientes de peso, por meio de questionário, para a GSF concentrada	40
Tabela 4: Maiores propialidades para GSF com pesos distribuídos no estado do Tocantins	44
Tabela 5: Vazão disponível nas estações fluviométricas	46
Tabela 6: Propialidade de obtenção de H2V no estado do Tocantins	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BHRTO	Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins
CO ₂	Dióxido de Carbono
GSF	Geração Solar Fotovoltaica
H ₂	Gás Hidrogênio
H2V	Hidrogênio Verde
LTs	Linhas de Transmissão
NATURATINS	Instituto Natureza do Tocantins
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
QGIS	Quantum GIS
Q ₉₀	Vazão Permanente em 90% do Tempo
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SisCAH	Sistema Computacional para Análises Hidrológicas

LISTA DE SÍMBOLOS

- P Propriedade de cada pixel, calculado individualmente, dada em %;
- P_N Porcentagem atribuída a cada uma das N características analisadas em um ponto, em %;
- α_N Coeficiente de peso distribuído a cada uma das N características analisadas.

SÚMARIO

1.INTRODUÇÃO	16
1.1 Problemática da Pesquisa	18
1.1.1 Hipótese	18
1.1.2 Justificativa.....	18
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Metodologia.....	20
1.4 Estrutura da Pesquisa	20
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1 Geração Solar Fotovoltaica.....	24
3.2 Caracterização da Bacia Hidrográfica	25
3.2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins (BHRTO).....	25
3.2.2 Hidrografia do Estado do Tocantins	26
3.3 Dados Hidrológicos.....	27
3.3.1 Outorga e Vazão de Referência.....	27
3.4 Hidrogênio.....	28
3.4.1 Classificação do Hidrogênio.....	29
3.4.2 Hidrogênio Verde (H2V)	30
3.4.3 Sistema de Informação Geográficas (SIG).....	30
4.METODOLOGIA E LEVANTAMENTO DE DADOS	32
4.1 Propriedade de Geração Solar Fotovoltaica no Estado do Tocantins.....	32
4.1.1 Material.....	32
4.1.2 Etapa de Padronização dos Mapas	37
4.1.3 Etapa de Parametrização para a Geração Solar Fotovoltaica	38
4.1.4 Etapa de Síntese no QGIS	40
4.2 Disponibilidade Hídrica no Estado do Tocantins	41
4.2.1 Levantamento de Dados das Estações Fluviométricas no Estado do Tocantins.....	41
4.2.2 Levantamento da Vazão de Permanência	41
4.2.3 Mapa de Disponibilidade Hídrica no Estado do Tocantins	41
4.3 Propriedade para Obtenção do Hidrogênio Verde	41

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1 Mapa de Geração Solar com Pesos Distintos no Estado do Tocantins	43
5.2 Mapa Final da Disponibilidade Hídrica no Estado do Tocantins	45
5.3 Mapa Final da Propriedade de Obtenção do Hidrogênio Verde no Estado do Tocantins.....	46
5.4 Conclusões do Resultados	50
6.CONCLUSÕES.....	51
6.1 Trabalhos Futuros	52
REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica tem sido um pilar fundamental na evolução do homem, tornando-se um dos elementos cruciais para o desenvolvimento social e econômico das sociedades. De acordo com Bilgili *et al.* (2015), ao início do século XXI, o crescimento exponencial da população mundial e o acelerado progresso econômico têm intensificado a demanda por recursos energéticos. Em vista disso, projeta-se que a demanda global por energia aumentará a um ritmo acelerado nos próximos anos.

Consequentemente, na esfera global, observa-se um movimento crescente para a transição dos atuais sistemas energéticos, caracterizados por alta intensidade de carbono e baixa eficiência, para um futuro energético profundamente descarbonizado, energeticamente eficiente e predominantemente baseado em fontes renováveis. Espera-se que tecnologias renováveis, como a energia eólica e solar desempenhem um papel fundamental no abastecimento de uma proporção significativa da eletricidade nos sistemas energéticos (ZHAO; YOU, 2020).

Contudo, o crescente emprego de fontes renováveis para a geração de energia elétrica em substituição aos combustíveis fósseis intensifica a exigência por tecnologias de armazenamento de energia. Em um cenário em que há ausência de reservatórios de acumulação, surge a necessidade de soluções de armazenamento alternativas para harmonizar a produção de energia renovável com a demanda contínua por eletricidade. A viabilização deste equilíbrio é essencial para assegurar a estabilidade dos sistemas elétricos diante da variabilidade da capacidade de geração das fontes renováveis.

Neste contexto, o hidrogênio se destaca como o elemento mais abundante do universo e o quarto mais presente da Terra (HAMMOND, 2000). Sua obtenção, por meio de fontes de energia de origem limpa, surge como uma solução para a problemática do armazenamento de energia em sistemas baseados em fontes renováveis. Assim, utilizando processos como a eletrólise, juntamente com uma energia limpa, o hidrogênio é produzido sem a emissão de gases poluentes (KUMAR; LIM, 2022).

Vale ressaltar que o hidrogênio é um transportador de energia e não uma fonte de energia primária como carvão e gás (AYODELE; MUNDA, 2019). Ademais, o hidrogênio está normalmente associado a outros elementos químicos, formando moléculas, a exemplo da água. Para a obtenção desse vetor energético, é necessário o uso de tecnologias apropriadas, demandando expressiva quantidade de energia no processo (BEZERRA, 2021).

Desta maneira, durante a maior parte do ano, o Brasil se beneficia da alta irradiação solar. De acordo com Braga (2008), o Brasil é um dos países de maior índice de radiação solar do mundo e considerado o país mais avançado no desenvolvimento de energias renováveis da América do Sul. O estado do Tocantins é um destaque nesse cenário. Com índices de irradiação solar global permanentemente altos e uma pequena variabilidade ao longo do ano, o Tocantins apresenta condições ideais para o processo e a implantação de sistemas de energia solar fotovoltaicos (MONTEIRO *et al.*, 2020). Essas características criam uma zona estratégica para investimentos em energia renovável, possibilitando não apenas a geração sustentável de eletricidade, mas também contribuindo para a variação da matriz energética do país.

Adicionalmente, a obtenção do Hidrogênio Verde (H2V) requer grande quantidade de água para realizar o processo de eletrólise em grande escala. Com isso, a bacia do rio Tocantins, com aproximadamente 2.400 quilômetros de extensão é a segunda maior bacia hidrográfica do Brasil, incluída na região hídrica Tocantins-Araguaia, ficando atrás somente dos cerca de 2.800 quilômetros do rio São Francisco, e corresponde a 10,8% do território brasileiro (ANA, 2021). A região apresenta importância no contexto nacional, pois se caracteriza pela expansão da fronteira agrícola, principalmente com relação ao cultivo de grãos, e pelo potencial hidroenergético (ANA, 2015).

Desta forma, o Tocantins é um dos principais estados do Brasil em termos de potencialidade hídrica, gerando uma vazão correspondente a 731,977 litros por segundo (SMARHTO, 2018). Deste potencial, apenas 5% são empregados para atender a demanda que o estado possui nos diversos setores produtivos que utilizam a água para se desenvolver, absorvendo o total de 35,945 litros por segundo (SMARHTO, 2018). Além disso, esta região abrange área de recarga de diversos aquíferos e rios importantes do Brasil, sendo reconhecida como o “berço das águas do Brasil” (LIMA, 2011). Complementarmente, o Rio Tocantins surge no interior do Distrito Federal, no planalto central de Goiás sendo formado pelos rios Almas e Maranhão. Descamba para o Norte do país, percorrendo cerca de 2.400 km até a sua foz, na Baía de Marajó (PA) (SCTO, 2008).

O Arquipélago do Marajó localiza-se na foz do rio Amazonas, recebendo uma descarga média de 209.000 m³/s valor medido próximo ao município de Afuá (IDEFLORBIO, 2023). Dessa maneira, torna-se claro que há um vasto potencial hídrico sendo não utilizado.

Uma estratégia que pode ser adotada para utilizar este potencial hídrico não aproveitado é por meio da utilização de processos como a eletrólise para a obtenção do H2V, conforme proposto por Botelho *et al.* (2024). Consequentemente, vale destacar que existem diversas

formas de produzir hidrogênio a partir de fontes de energia renovável, sendo o uso da eletrólise a mais próspera (AGATON *et al.*, 2022).

Neste contexto, a convergência do potencial hídrico do Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins (BHRTO) com a capacidade de geração de energia cria uma oportunidade para o armazenamento de energia por meio da obtenção do H2V no estado do Tocantins. Portanto, utilizando de maneira organizada esses recursos renováveis, é viável maximizar a sustentabilidade do sistema, contribuir com a transição energética, ao mesmo tempo em que se colabora para o crescimento socioeconômico local e nacional.

1.1 Problemática da Pesquisa

A problemática da pesquisa se fundamenta na necessidade da diversificação da matriz energética brasileira, especialmente considerando o crescimento do uso de fontes renováveis, como a Geração Solar Fotovoltaica (GSF) e disponibilidade hídrica no estado do Tocantins. Com o aumento da presença dessas fontes no sistema energético, há um aumento na complexidade de equilibrar a geração intermitente de energia solar com a demanda contínua e crescente por eletricidade. A variabilidade natural da geração solar exige soluções de armazenamento eficientes que garantam a estabilidade e a confiabilidade do sistema energético, especialmente em regiões estratégicas como o Tocantins, que possui grande potencial para a produção de energia renovável.

Assim, esta pesquisa se propõe em indicar os locais mais propícios para a obtenção de H2V no estado do Tocantins por meio da GSF e disponibilidade hídrica para atuar como vetor energético e contribuir para a resolução desta problemática.

1.1.1 Hipótese

A hipótese deste trabalho é que, é possível identificar as áreas mais propícias para a GSF no estado do Tocantins. Aliada a essa análise, a avaliação da disponibilidade hídrica da região permite correlacionar as características geográficas e identificar os locais mais adequados para a obtenção do H2V.

1.1.2 Justificativa

Segundo dados apresentados em ANA (2015), a disponibilidade hídrica na região hidrográfica Tocantins-Araguaia é de 5.447 m³/s, ou seja, 6% da disponibilidade hídrica nacional, e a vazão média é de 13.779 m³/s, correspondendo a 7,7% da vazão média nacional. O Brasil possui um dos maiores e mais diversos portfólios de energia renovável do mundo, em

razão de seus abundantes recursos naturais (GABRIELLI; TOKARSKI, 2018). Por consequência, o país tem buscado novas estratégias visando manter sua matriz de energia renovável e desenvolver e incentivar novas iniciativas de baixo carbono (BONDARIK *et al.*, 2018).

Na região do Tocantins, emerge uma oportunidade para a obtenção do H2V, utilizando a disponibilidade hídrica do Estado. Deste modo, um percentual da vazão disponível na BHRT0 seria aproveitado na formação do H2V. Esse processo não só aproveitaria o potencial energético do rio, mas também os altos índices de irradiação solar na região. O crescimento e o desenvolvimento de um país implicam no aumento do consumo de energia elétrica. Diante desse cenário, é praticamente impossível não atrelar o investimento em infraestrutura e o setor elétrico para suprir as necessidades da sociedade moderna, no qual, poucas pessoas são capazes de passar um dia sequer sem o fornecimento de energia.

Ao contextualizar a disponibilidade hídrica do estado do Tocantins e estabelecer uma correlação com GSF, percebe-se uma possibilidade de contribuir com a transição energética por meio da obtenção do H2V. Para tanto, seria utilizada a energia fotovoltaica para conduzir o processo de eletrólise. Por fim, a análise do potencial da GSF e disponibilidade hídrica para obtenção do H2V como vetor energético no estado do Tocantins possibilita maximizar a utilização dos recursos hídricos do estado do Tocantins, diversificar a matriz energética e contribuir com o desenvolvimento regional e nacional.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia para análise do potencial de obtenção do H2V como vetor energético no estado do Tocantins.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar e elencar as características que influenciam a GSF no estado do Tocantins;
- Elaborar um mapa de propiabilidade para a GSF no estado do Tocantins, incluindo a identificação dos locais mais propícios;
- Analisar a disponibilidade hídrica das estações fluviométricas das bacias hidrográficas no estado do Tocantins;

- Elaborar um mapa de disponibilidade hídrica no estado do Tocantins, incluindo a identificação dos locais mais propícios;
- Elaborar um mapa de propialidade para obtenção do H2V como vetor energético por meio da GSF e a disponibilidade hídrica.

1.3 Metodologia

A metodologia deste trabalho adota um método indutivo, analisando dados climáticos e geoespaciais para delimitar áreas propícias para obtenção do H2V no estado Tocantins. Caracteriza-se também como uma pesquisa quantitativa, com uso de ferramentas geoespaciais para análise e integração dos dados. A metodologia deste trabalho será detalhada de forma mais abrangente no Capítulo 4.

1.4 Estrutura da Pesquisa

A estrutura deste trabalho é organizada em seis capítulos fundamentais para alcançar os objetivos de pesquisa propostos. No Capítulo 2, são abordadas pesquisas relacionadas às características que influenciam a geração de H2V, fornecendo uma base inicial para o entendimento do tema. O Capítulo 3 tem como propósito apresentar os fundamentos teóricos e conceitos essenciais para compreender o papel do H2V no contexto energético atual e futuro. Já no Capítulo 4, é detalhada a metodologia adotada na pesquisa, abrangendo os métodos e os materiais utilizados na execução do estudo. No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, com análise detalhada de suas implicações. Ademais, o Capítulo 6 traz as conclusões do trabalho, relacionando os objetivos inicialmente propostos com os resultados alcançados, seguidos das sugestões de possibilidades para continuidade da pesquisa com base nas experiências adquiridas durante a execução deste estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Estudos referentes à diversificação da matriz energética do país são vinculados em diferentes pesquisas e suas aplicabilidades são fundamentais para o desenvolvimento e segurança energética. Dentre as diversas formas de diversificação, o H₂V, produzido por meio de fontes renováveis, destaca-se como uma ideia promissora, principalmente se houver uma disponibilidade de recursos hídricos na região. A seguir, são apresentadas pesquisas, e seus idealizadores, a respeito do H₂V, sua obtenção e aplicação no cenário energético.

O estudo conduzido por Nadaleti *et al.* (2021) indica um elevado potencial de produção de hidrogênio a partir da energia elétrica produzida em usinas hidrelétricas na Argentina, Paraguai e Uruguai. Este estudo destaca, também, o "desperdício" de água doce na lógica atual de geração de eletricidade, sugerindo a possibilidade do reaproveitamento para a produção de hidrogênio. A pesquisa demonstra que os resultados obtidos contribuem para a construção de um mercado do H₂V não apenas para o consumo interno destes países sul-americanos, mas também como países onde a obtenção de H₂ se ocorre por meio de fontes fósseis.

Em complemento, Scholz (2024) desenvolveu um modelo para identificar recursos hídricos sustentáveis destinados à obtenção do H₂V. O esquema proposto demonstra que fatores como densidade populacional, precipitação, níveis de águas subterrâneas, excesso de água corrente, e a proximidade com redes de infraestrutura são determinantes na identificação de recursos hídricos adequados para a geração de H₂V.

Dessa maneira, uma característica que deve ser analisada é a disponibilidade hídrica da região, uma vez que a obtenção do H₂V é intensiva em consumo de água devido ao processo de eletrólise. Projetos localizados em áreas em escassez hídrica podem enfrentar desafios significativos para garantir a viabilidade e aplicação de suas operações.

Outra característica que deve ser analisada é o recurso energético solar disponível. Alguns estudiosos, em suas pesquisas, agregaram diferentes características na geração de energia solar fotovoltaica, baseados em análises, e conseguiram identificar as localizações mais adequadas para a instalação dessa geração nos casos estudados, conforme descrito a seguir.

Oliveira Neto *et al.* (2022) propuseram um algoritmo para a avaliação do espaço territorial com o objetivo de identificar as regiões mais propícias para a instalação de usinas fotovoltaicas ou heliotérmicas e eólicas. A escolha da localização tecnicamente embasada para instalação de sistemas de GSF deriva de fatores como a incidência solar, proximidade de linhas de transmissão, proximidade de centros consumidores, presença de reservas florestais e presença de rios. Para realizar essa análise, os dados foram coletados e processados por meio

de um algoritmo desenvolvido especificamente para este propósito. A integração dessas informações resultou na elaboração de um mapa final de propensão para a região do estado do Pernambuco.

Segundo a pesquisa de Pereira *et al.* (2017), o Brasil está entre as nações com maior potencial em energia solar, com incidência solar de 1.500-2.500 kWh/m². Neste cenário, o Tocantins apresenta índices de irradiação solar equivalentes ao dobro dos registrados na Alemanha, o país com a maior capacidade instalada de geração fotovoltaica (CARLOS, 2018). Esse fato evidencia um aproveitamento precário da irradiação solar disponível em toda a extensão territorial do estado.

Dessa forma, analisando o recurso solar energético disponível, a investigação conduzida por Karayel e Dincer (2024) aponta o potencial para a produção de hidrogênio utilizando energia solar, introduzindo o conceito de "mapa de hidrogênio" para diferentes regiões do Canadá. Diferentemente de outras pesquisas que se concentram principalmente na quantificação da produção de hidrogênio com base na área disponível, esta investigação adota uma abordagem alternativa ao avaliar o potencial de produção com base na disponibilidade de espaços subutilizados dentro dos centros urbanos e na viabilidade das fontes específicas de energia renovável presentes nessas áreas. O estudo propõe uma metodologia que integra a análise de espaços urbanos ociosos e a avaliação de fontes de energia solar disponíveis, proporcionando uma alternativa sustentável e potencialmente eficiente para a produção de hidrogênio em contextos urbanos.

Uysal *et al.* (2021) investigaram o potencial de obtenção de Gás Hidrogênio (H₂) a partir das diversas águas naturais da Turquia, utilizando uma usina de energia solar simulada. A pesquisa utilizou radiações solares de diferentes regiões aplicadas a células solares policristalinas com uma potência de 110 W/m² (eficiência de 10,8%) para simular uma usina solar com uma área de 1.000 m², visando determinar a viabilidade deste método como uma alternativa para a conversão de energia. Desta maneira, a pesquisa aponta o pH da água como parâmetro chave para os estudos de viabilidade dos sistemas de produção de H₂ alimentados por energia fotovoltaica.

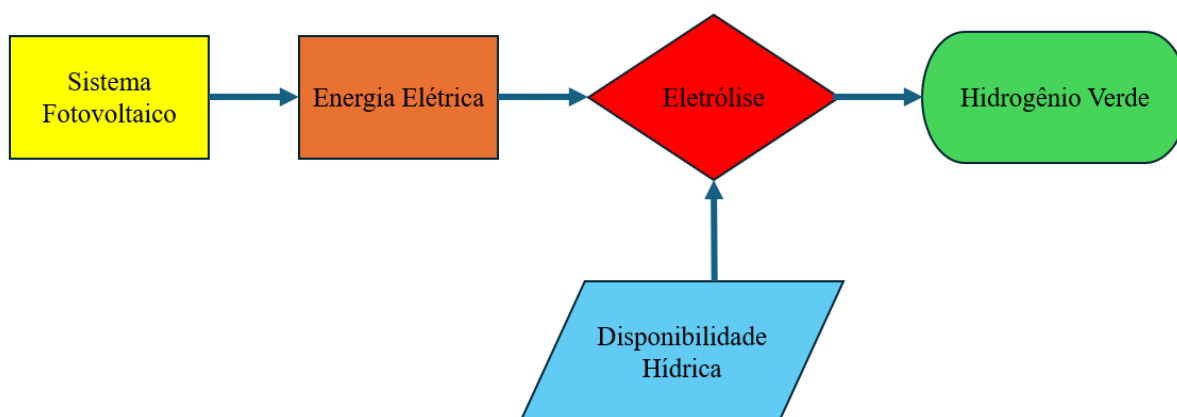
Segundo Jovan *et al.* (2022) o aproveitamento do excesso de acúmulo de água em uma usina hidrelétrica a fio d'água pode ser utilizado para a obtenção do H₂V. Em sua pesquisa, o cronograma de uma usina tem como base um plano que inclui as capacidades de obtenção disponíveis, previsões de consumo, acúmulo de água, condições caudais, previsões meteorológicas e estratégicas operacionais.

Também em sua pesquisa, Jovan *et al.* (2022), utilizaram dados reais sobre o cronograma e a vazão de água. Dessa maneira, foi estimado o excesso de energia hidrelétrica disponível para a produção de hidrogênio. Com isso, foi desenvolvido um algoritmo capaz de realizar o controle que regula a quantidade de hidrogênio produzido, levando em consideração o cronograma predefinido e o acúmulo real de água.

Em relação ao cenário brasileiro, Botelho *et al.* (2024) realizaram estudos avaliativos sistemáticos do potencial de obtenção do H2V no Brasil utilizando a energia hidrelétrica derramada. Neste estudo, foi realizada uma análise econômica para avaliar o custo energético necessário para a obtenção do H2V em diversos contextos.

Como observado, evidencia-se a relevância dos estudos relacionados à obtenção do H2V e seus impactos no cenário energético. Entretanto, a utilização de uma fonte de energia solar fotovoltaica para a obtenção do H2V é atrativa no contexto do estado do Tocantins devido às altas taxas de insolação e disponibilidade hídrica. De forma resumida, pode ser observado na Figura 1, um modelo de produção fotovoltaica para obtenção do hidrogênio utilizando o potencial das perdas hidrográficas de um rio.

Figura 1: Cadeia produtiva do H2V



Fonte: Próprio autor (2024).

Desta maneira, com o intuito de dar continuidade às linhas de pesquisa mencionadas, este trabalho contribui para o aprimoramento dos estudos relacionados ao H2V, com ênfase no desenvolvimento de uma metodologia que possibilita identificar a propiabilidade das áreas territoriais estudadas para obtenção do H2V por meio da GSF e da disponibilidade hídrica.

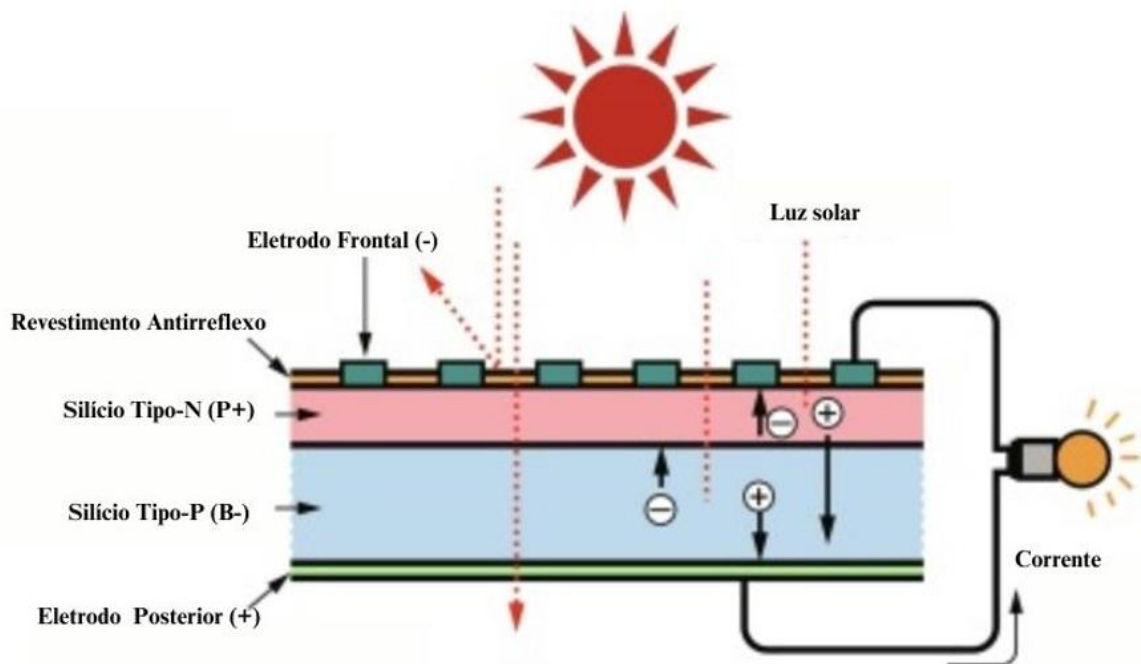
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, apresenta-se a fundamentação teórica essencial para o subsequente desenvolvimento da pesquisa. São delineadas definições de conceitos, pela análise das características das tecnologias disponíveis.

3.1 Geração Solar Fotovoltaica

A utilização direta da energia solar para a geração de eletricidade é viabilizada por meio do efeito fotovoltaico. Este fenômeno ocorre em materiais semicondutores dopados, os quais têm a capacidade de converter a luz solar em energia elétrica (DURING, 2018). Este fenômeno pode ser visto de acordo com a Figura 2.

Figura 2: Efeito fotovoltaico em uma célula solar



Fonte: Adaptado de Gorjian e Ebadi (2020).

Uma célula fotovoltaica é composta por materiais semicondutores contendo uma junção P-N. Quando a radiação solar incide sobre a célula, uma parte dos fótons é absorvida, resultando na liberação de elétrons, que ficam disponíveis para condução. Na presença de um circuito externo, a diferença de potencial elétrico faz com que os elétrons migrem da região N, onde há um excesso de elétrons, para a região P, onde há um déficit de elétrons, gerando uma corrente elétrica no circuito externo (ALEIXO, 2023).

Essa corrente gerada é em corrente contínua, o que significa que flui em uma única direção. No entanto, muitos dispositivos elétricos e a rede de distribuição de energia utilizam

corrente alternada, onde a direção da corrente muda periodicamente. Portanto, para que a energia gerada pelas células fotovoltaicas seja compatível com a maioria dos sistemas elétricos domésticos e comerciais, é necessário o uso de inversores. Esses dispositivos convertem a corrente contínua em corrente alternada, permitindo a integração da energia solar ao sistema elétrico convencional (LANA *et. al.*, 2015).

Além disso, um fator que influencia diretamente a geração de energia solar é a variação na incidência da radiação solar sobre a superfície terrestre. Essa variação depende da localização geográfica e do período do ano. A previsibilidade dos movimentos de rotação e translação da Terra permite estimar o perfil de incidência solar em uma determinada localidade ao longo do ano. Esse conhecimento é crucial para otimizar o posicionamento dos painéis solares, a fim de maximizar sua eficiência. Com isso, é possível planejar e implementar sistemas de energia solar com base em estimativas precisas da disponibilidade energética solar em um local específico ao longo do ano (PEREIRA *et al.*, 2017).

3.2 Caracterização da Bacia Hidrográfica

A área de influência para determinado curso hídrico e seus afluentes é definido como bacia hidrográfica. Neste sentido, a água superficial transcorre até o curso d'água do rio principal ou um sistema conectado de cursos d'água afluentes (MENDONÇA, 2021).

Deste modo, cabe ressaltar que a quantidade de água disponível para determinado uso, na quantidade necessária, em um trecho de corpo hídrico, durante determinado tempo é definida como disponibilidade hídrica (ANA, 2011).

Por fim, pode-se caracterizar vazão como o volume de água que passa por determinada seção de um rio ou um canal específico. Normalmente a unidade de medida é dada em litros por segundos, em metros cúbicos por segundos ou em metros cúbicos por hora (MAYS, 2010).

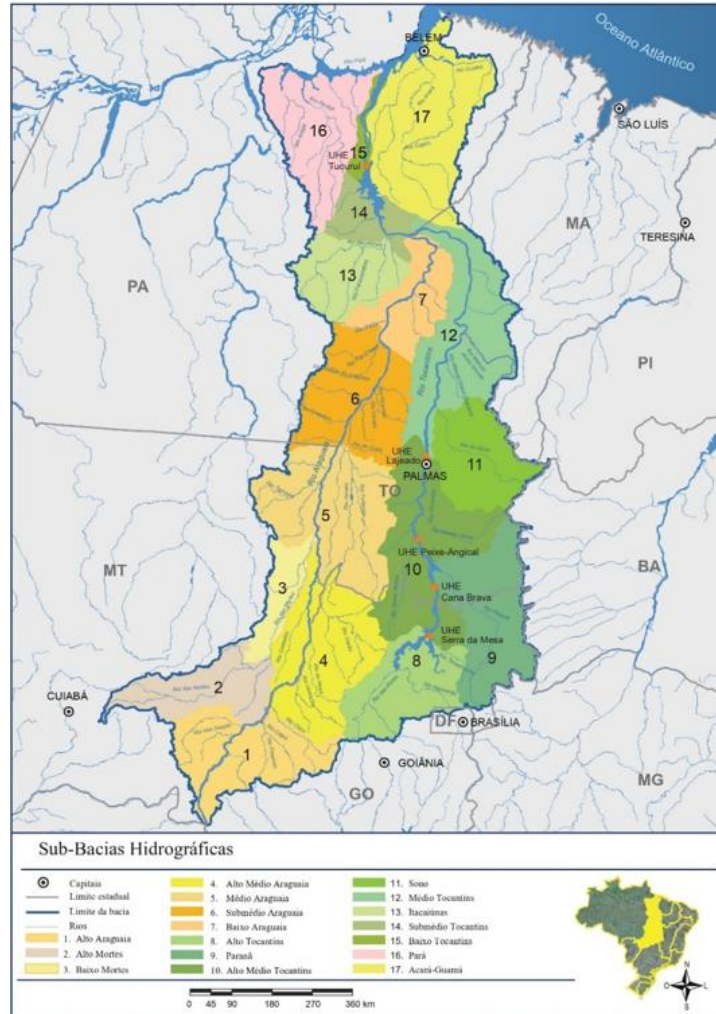
3.2.1 Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins (BHRTO)

A área da BHRTO, incluindo a desagua do rio Araguaia, está localizada entre os paralelos 4° e 18° Sul e entre os meridianos 46° e 55° Oeste e ocupa uma área de cerca de 760.000 km², o que equivale a aproximadamente 9% do território nacional (SILVA, 2000).

Como pode ser observado na Figura 3, os limites geográficos da BHRTO são: Planalto Central (ao Sul), Serra dos Carajás (a Oeste), Serra Geral de Goiás (a Leste) e o estuário do rio Amazonas (ao Norte). São três os mananciais superficiais mais importantes da bacia: rio Tocantins, rio Araguaia e rio das Mortes (SILVA, 2000).

A BHRTO é composta a partir dos rios das Almas e Maranhão, cujas nascentes estão localizadas no Planalto de Goiás, no Distrito Federal. (MONTEIRO, 2024). Conforme a Figura 3, essa via fluvial pode ser dividida em dezessete subdivisões (ANA, 2009).

Figura 3: Delimitação da BHRTO e suas sub-bacias hidrográficas

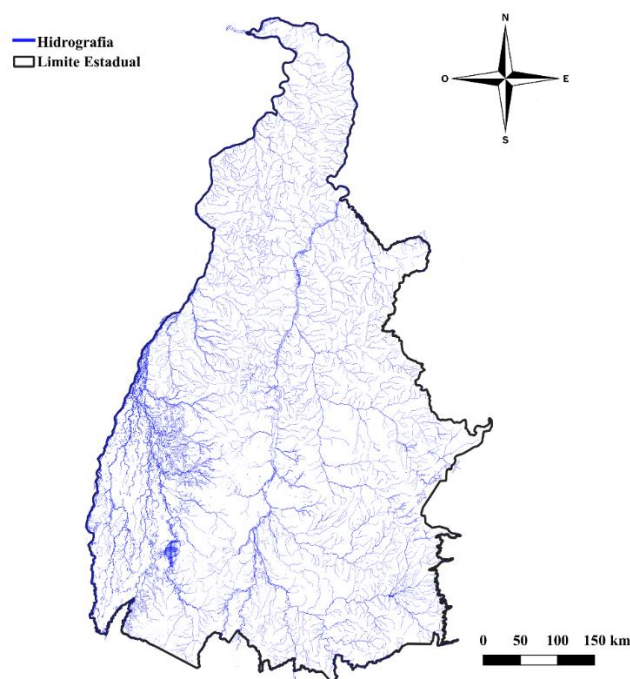


Fonte: Adaptado de ANA (2009).

3.2.2 Hidrografia do Estado do Tocantins

Conforme relatado pela Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Tocantins - SEMADES (2011), o estado do Tocantins integra a região hidrográfica Tocantins-Araguaia, cuja distribuição abrange aproximadamente 62% da área estadual pelo sistema hidrográfico do rio Tocantins, enquanto o sistema do rio Araguaia cobre cerca de 38% da superfície do estado. A hidrografia da área em estudo, ilustrada na Figura 4, reflete essa os cursos de água do estado, evidenciando a importância dos dois subsistemas hidrográficos para o território tocantinense.

Figura 4: Hidrografia do Tocantins



Fonte: Adaptado de SEPLAN (2020).

3.3 Dados Hidrológicos

A obtenção de dados hidrológicos é realizada por meio da coleta das estáticas básicas que analisam ao longo tempo e espaço. Dentre os dados que podem ser coletados, destaca-se a vazão. As informações referentes a vazão são coletadas em instalações que seguem padrões definidos e são chamados de postos de instalações ou estações. O conjunto destas instalações compõe a rede hidrogeológica, da qual depende a qualidade dos dados (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Ademais, é necessário estabelecer critérios para realizar uma análise mais concreta dos dados. Segundo Marcuzzo e Goularte (2013), o ano hidrológico corresponde ao período de 12 meses que começa no início do período chuvoso e se estende até o final do período seco. No tocante ao estado do Tocantins, os autores ainda destacam que o ano hidrológico se inicia no mês de outubro, se estendendo até as secas do início de setembro.

3.3.1 Outorga e Vazão de Referência

De acordo com Moreira (2006), um dos instrumentos essenciais da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) para a gestão das águas é o mecanismo de outorga de direito de uso da água. Esse instrumento concede, por um período determinado, o direito ao uso de uma quantidade específica de água, conforme a disponibilidade do recurso. A outorga permite ao

gestor o monitoramento quantitativo e qualitativo do uso da água, ao passo que assegura ao usuário um direito de uso exclusivo e intransferível. Esse mecanismo é fundamental para viabilizar a gestão sustentável dos recursos hídricos, atendendo às demandas dos diversos setores e promovendo a preservação dos ecossistemas aquáticos.

A outorga de direito de utilização dos recursos hídricos é solicitada ao órgão gestor para captação de água ou realizações de intervenções no curso d'água como barragens e desvios (MENDES 2007). No Tocantins, a responsabilidade pela emissão de declaração de reversa de disponibilidade hídrica e de outorga são fornecidas pelo Instituto Natureza do Tocantins (NATURATINS).

Conforme Cruz e Tucci (2008), a vazão superada em 90% do tempo (Q_{90}), também chamada de vazão de permanência, indica a porcentagem do tempo em que um determinado valor de vazão foi igualado ou superado durante o período de observação. A determinação dessa vazão de permanência é feita por meio de registro de vazões diárias e é preferível que se tenha uma série histórica representativa e com a menor ocorrência de falhas possíveis (MENDES, 2007).

Segundo a NATURATINS (2008), para o atendimento de um projeto, é necessário garantir que 25% da vazão Q_{90} . Esse valor de vazão deve ser mantido em quaisquer circunstâncias, assegurando a sustentabilidade do fluxo hídrico nesse segmento.

3.4 Hidrogênio

O hidrogênio é o elemento mais simples da tabela periódica, pois contém em sua composição apenas um próton e um elétron. Entretanto, na Terra esse elemento é geralmente encontrado em outros compostos com diferentes tipos de elementos como o carbono e o nitrogênio (CARVALHO; GARCIA, 2022).

O hidrogênio destaca-se por sua elevada densidade energética, apresentando uma concentração de 120,0 MJ/kg, o que equivale a 33,6 kWh de energia utilizável por quilograma. Em comparação, o diesel possui uma densidade energética de 45,5 MJ/kg, enquanto a gasolina apresenta 45,8 MJ/kg. Devido à facilidade de ignição da mistura do H_2 com ar, a molécula de hidrogênio emerge como um vetor energético promissor em termos de densidade energética mássica (ABE, 2007).

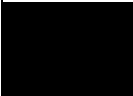








O H_2 , devido à sua capacidade de armazenamento, elevada densidade energética por unidade de massa e viabilidade de produção industrial, apresenta um vasto mercado consumidor potencial.

Com isso, a obtenção do hidrogênio pode ser realizada a partir da reforma a vapor do gás natural, de petróleo ou carvão. Entretanto, existem processos biológicos como a fermentação de biomassa e a gaseificação do carvão e da eletrólise da água. Por conseguinte, a produção de hidrogênio por meio de eletrólise da água não emite poluentes no processo produtivo, uma vez que utiliza energia renovável para separar a molécula de água (BALL; WEEDA, 2015).

3.4.1 Classificação do Hidrogênio

O hidrogênio é classificado na literatura por cores, em que a origem da sua cor depende fundamentalmente do acoplamento de tecnologias de captura e utilização. O Quadro 1 resume a categorização do hidrogênio de acordo com seu método de obtenção.

Quadro 1: Classificação do hidrogênio em escala de cores

Classificação	Descrição
	Hidrogênio Preto Produzido por gaseificação do carvão mineral (antracito).
	Hidrogênio Marrom Produzido por gaseificação do carvão mineral (hulha).
	Hidrogênio Cinza Produzido por reforma a vapor do gás natural.
	Hidrogênio Azul Produzido por reforma a vapor do gás natural (eventualmente, também de outros combustíveis fósseis).
	Hidrogênio Verde Produzido via eletrólise da água com energia de fontes renováveis (particularmente, energias eólicas e solar)
	Hidrogênio Branco Produzido por extração de hidrogênio natural ou geológico
	Hidrogênio Turquesa Produzido por pirólise de metano, sem gerar Dióxido de Carbono (CO ₂)
	Hidrogênio Musgo Produzido por reformas catalíticas, gaseificação de plásticos residuais ou biodigestão anaeróbica de biomassa
	Hidrogênio Rosa Produzido por fonte de energia nuclear

Fonte: Adaptada de CNI (2022).

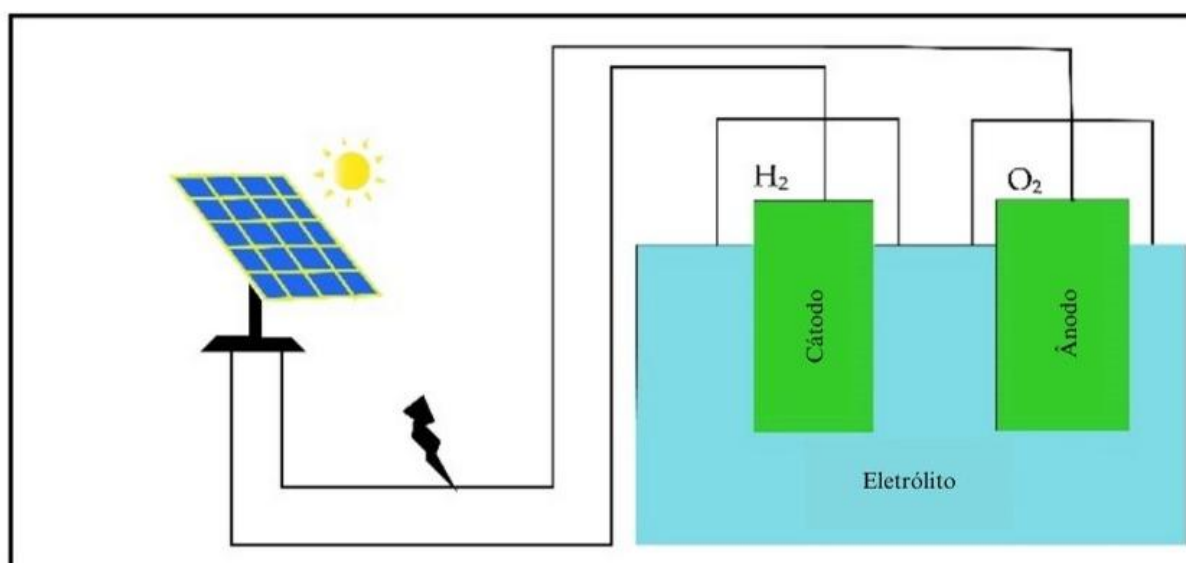
Diversas rotas conduzem à obtenção de hidrogênio. Contudo, o H₂V tem se destacado no mercado sustentável devido à contínua redução dos custos de produção de energia renovável.

Atualmente, mais de 95% das fontes utilizadas para a obtenção de hidrogênio provêm de recursos fósseis. Entretanto, um dos interesses no momento é a produção de hidrogênio de baixa intensidade de carbono, principalmente o H₂V (EPE, 2020).

3.4.2 Hidrogênio Verde (H2V)

A eletrólise da água é considerada a técnica mais promissora para a obtenção de hidrogênio, principalmente se os parâmetros analisados forem sustentabilidade e impactos ambientais. Neste procedimento, a molécula de água é fragmentada em hidrogênio e oxigênio por meio de uma corrente elétrica, conforme pode ser visto na Figura 5. Esta reação ocorre em eletrolisadores, equipamentos que consistem em um ânodo e um cátodo separados por um eletrólito (CARVALHO; GARCIA, 2022).

Figura 5: Obtenção de hidrogênio a partir de eletrólise baseada em energia solar



Fonte: Adaptado de Sarker *et al.* (2022).

A fonte selecionada para a obtenção da corrente elétrica a ser aplicada no processo de eletrólise é a responsável por dar a característica de baixa intensidade de carbono ao hidrogênio produzido. Dessa maneira, o H2V é necessariamente aquele obtido por meio de fontes renováveis de energia, como a solar e a eólica (CARVALHO; GARCIA, 2022).

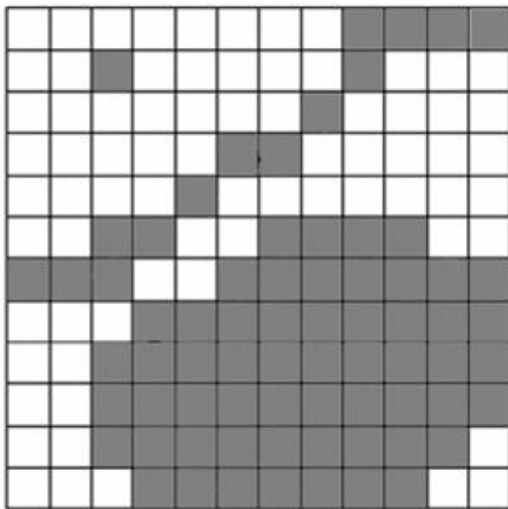
3.4.3 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Segundo Câmara *et al.* (2001), o Sistema de Informações Geográficas (SIG), possibilita a realização e aplicação de estudos complexos da superfície terrestre, uma vez que, viabiliza a união de dados de várias origens e gerar bancos de informações georreferenciadas. Um exemplo de SIG é o *software* gratuito e de código aberto denominado Quantum Gis (QGIS). Este *software* permite ao usuário realizar operações com dados espaciais. O QGIS, é um projeto oficial da *Open Source Geopatial*, podendo ser executado em diversos sistemas operacionais e suporta inúmeros formatos de arquivos (BUZÓN *et al.*, 2023).

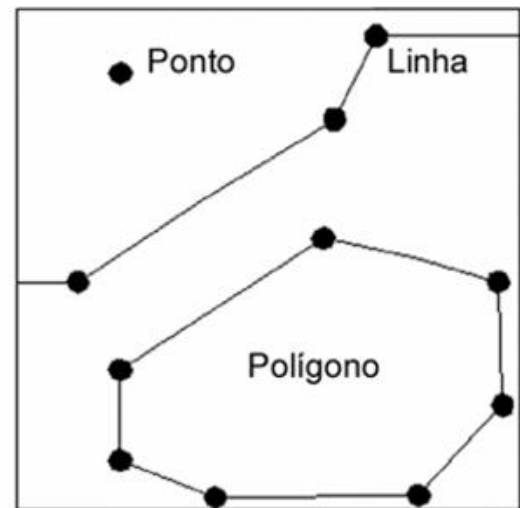
Vale ressaltar que, o QGIS suporta a entrada e o gerenciamento de diferentes tipos de dados, oferecendo flexibilidade e eficiência na análise geoespacial. Entre os formatos suportados pode-se destacar os dados no formato *raster* e vetorial. Os *raster* são amplamente usados para representar fenômenos contínuos, como altitude e temperatura enquanto as camadas vetoriais, descrevem objetos geográficos discretos por meio de pontos, linhas e polígonos, ideais para representar estradas, rios e áreas específicas (SABOYA, 2000). Essa diferença entre a estrutura *raster* e a estrutura vetorial pode ser vista na Figura 6.

Figura 6: Estrutura *raster* e vetor de dados espaciais em um SIG

Estrutura *Raster*



Estrutura Vetor



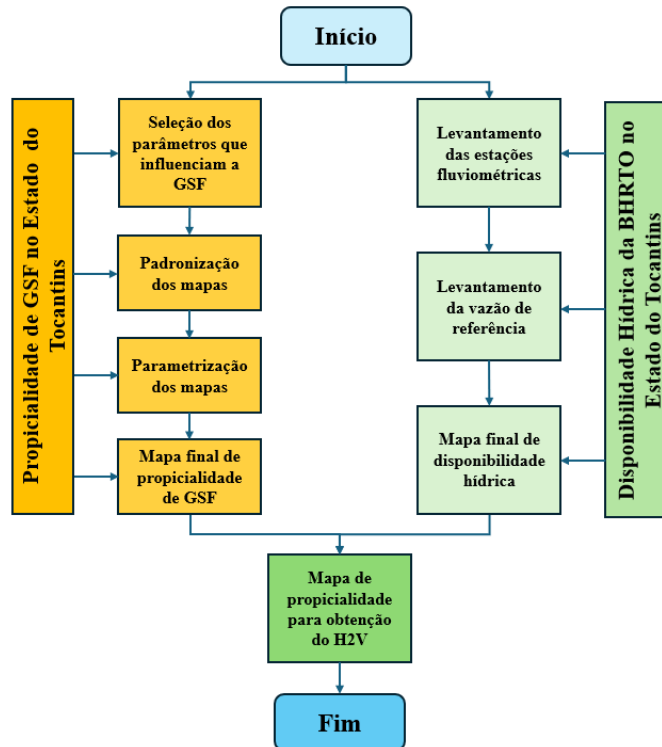
Fonte: Saboya (2000).

Adicionalmente, o QGIS dispõe de ferramentas avançadas e intuitivas, como a Calculadora *Raster*, que desempenham um papel fundamental na análise espacial e na tomada de decisões. Essa funcionalidade permite realizar operações matemáticas e lógicas diretamente sobre os dados *raster*, facilitando a integração e a interpretação de diferentes variáveis geográficas (TOMAZONI; GUIMARÃES, 2022). Por meio dessa ferramenta, é possível combinar camadas *rasters*, atribuir pesos a fatores específicos e criar mapas temáticos que destacam áreas prioritárias ou de maior potencial, como na análise de geração sustentável de energia no estado do Tocantins.

4. METODOLOGIA E LEVANTAMENTO DE DADOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e procedimentos necessários para a produção do mapa de propiçialidade de GSF, do mapa potencial da disponibilidade hídrica, e do mapa da propiçialidade para obtenção do H2V, todos no estado do Tocantins, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Fluxograma da metodologia adotada



Fonte: Próprio autor (2024).

Os procedimentos metodológicos apresentados na Figura 7 são detalhados nas seções subsequentes.

4.1 Propiçialidade de Geração Solar Fotovoltaica no Estado do Tocantins

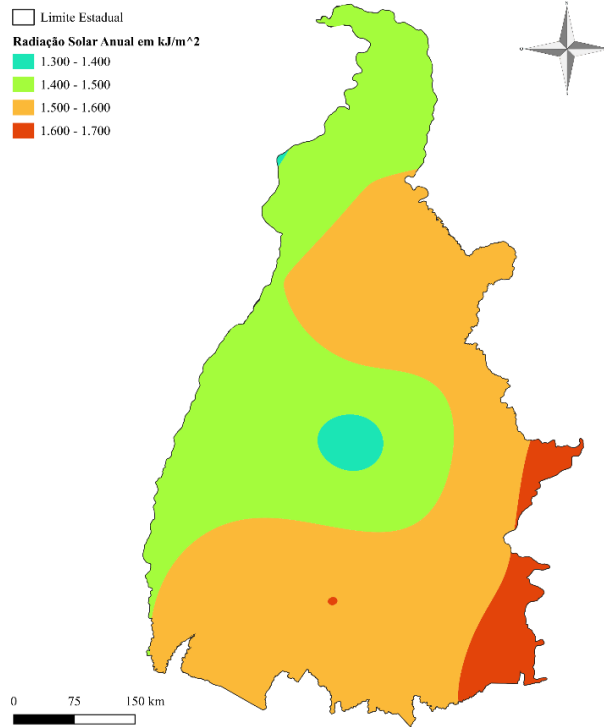
Nas subseções seguintes, são apresentados os detalhamentos metodológicos adotados para a análise e elaboração da propiçialidade da GSF no estado do Tocantins.

4.1.1 Material

Com a intenção de determinar os locais mais propícios para a GSF foram utilizadas informações em formas de mapas. Nesta pesquisa, para a GSF concentrada no estado do Tocantins, são utilizadas as características apresentadas por Oliveira Neto (2016), a saber: radiação solar, insolação solar, precipitação, temperatura, eletrogeografia, umidade relativa do ar, densidade demográfica, áreas de preservação, reservas indígenas e declividade.

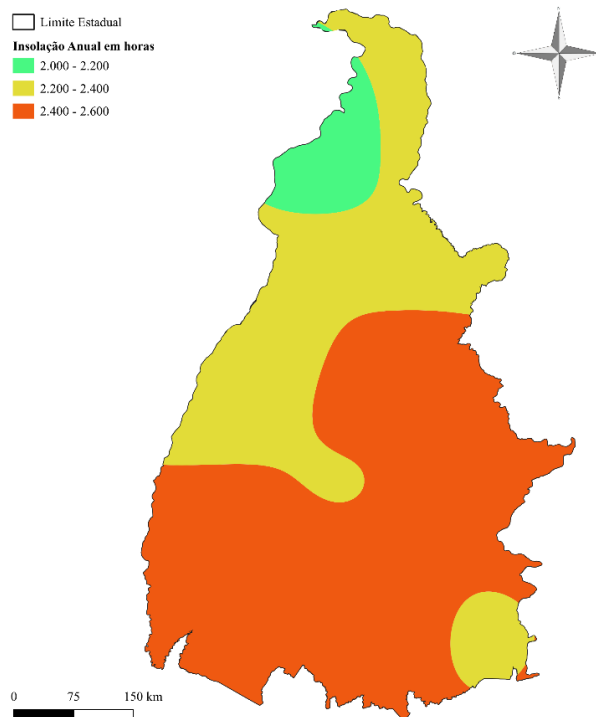
Logo, para o estudo da GSF no estado do Tocantins foram utilizados os mapas das Figuras 8 a 16.

Figura 8: Mapa de radiação solar do Tocantins



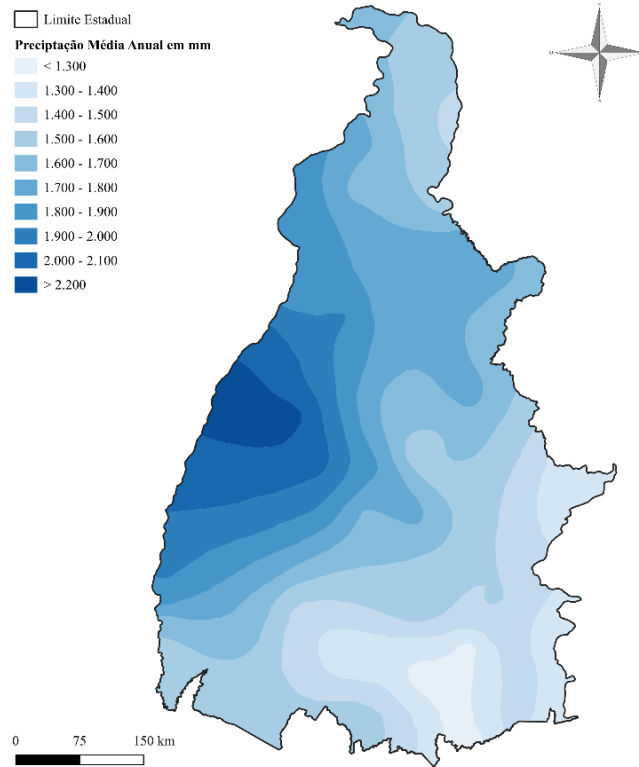
Fonte: Adaptado de SEPLAN (2020).

Figura 9: Mapa de insolação do Tocantins



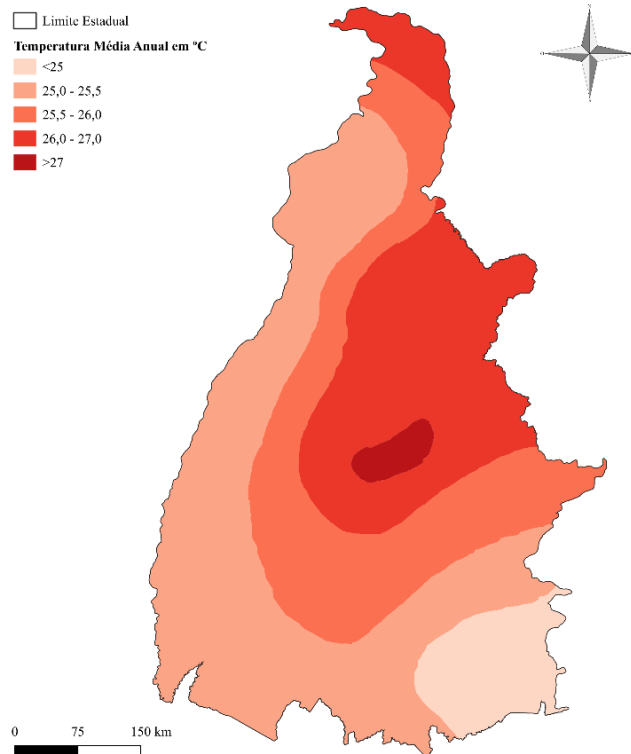
Fonte: Adaptado de SEPLAN (2020).

Figura 10: Mapa de precipitação do Tocantins



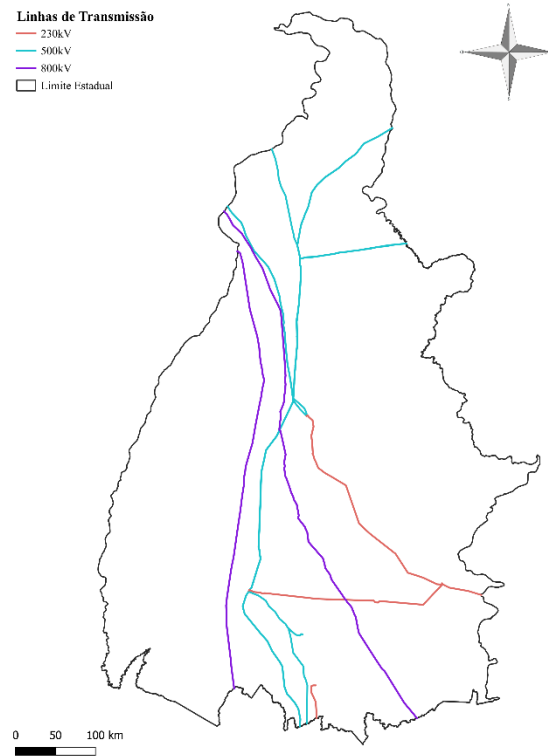
Fonte: Adaptado de SEPLAN (2020).

Figura 11: Mapa de temperatura do Tocantins



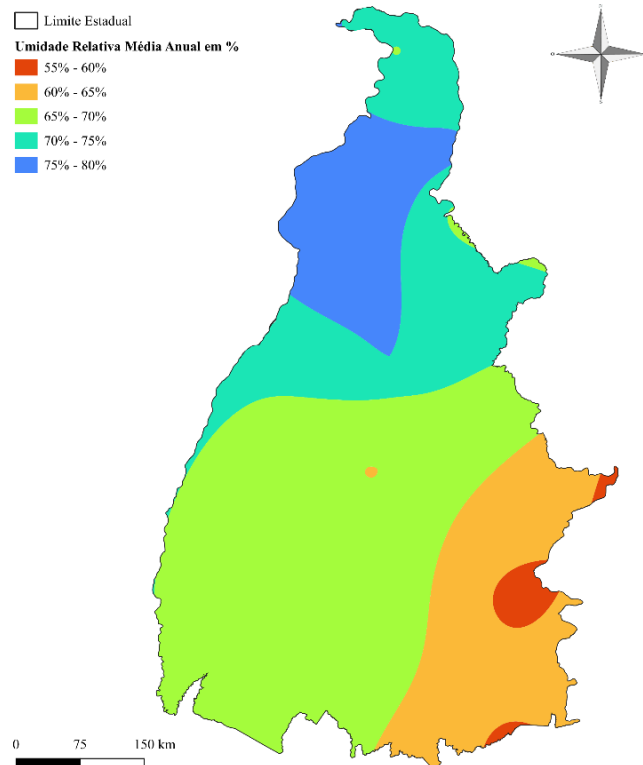
Fonte: Adaptado de SEPLAN (2020).

Figura 12: Mapa eletrogeográfico existente do Tocantins



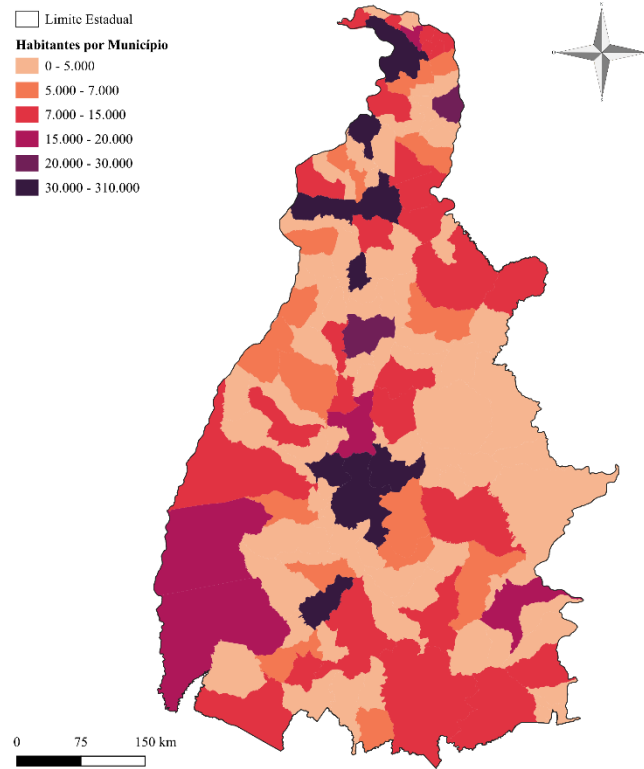
Fonte: Adaptado de EPE (2023).

Figura 13: Mapa de umidade relativa do ar do Tocantins



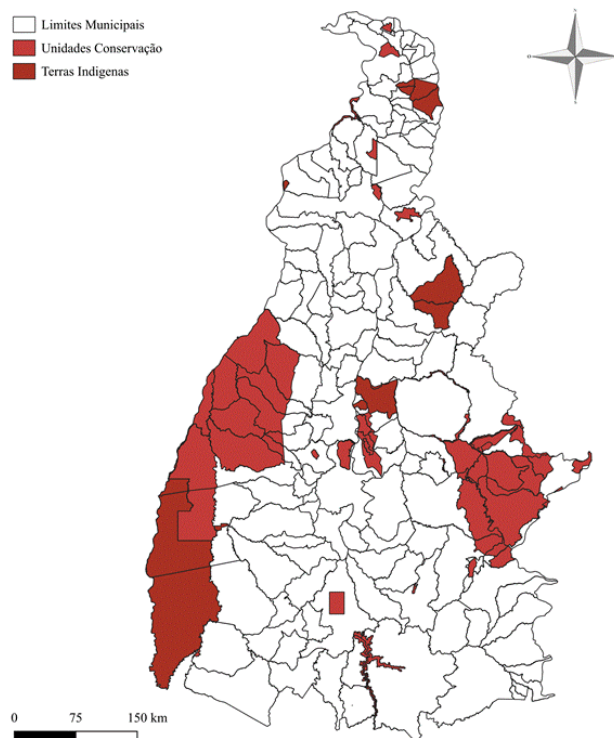
Fonte: Adaptado de SEPLAN (2020).

Figura 14: Mapa de densidade demográfica do Tocantins



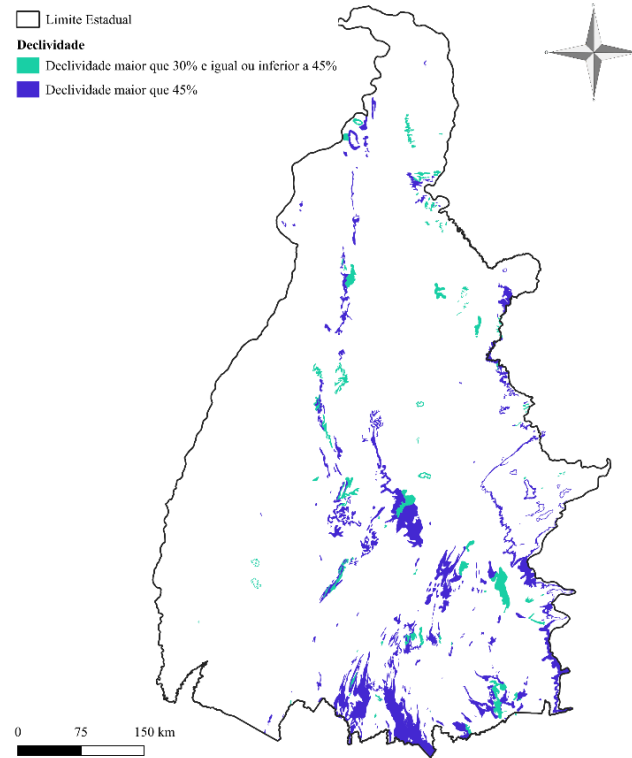
Fonte: Adaptado de IBGE (2022).

Figura 15: Mapa de unidade de conservação e reservas indígenas do Tocantins



Fonte: Adaptado de SEPLAN (2020).

Figura 16: Mapa de declividade do Tocantins

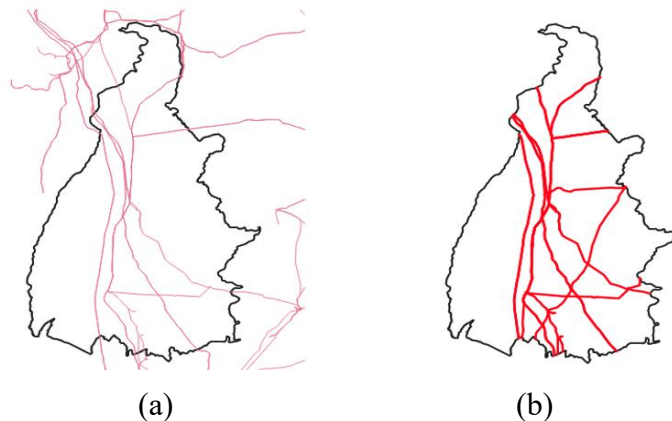


Fonte: Adaptado de SEPLAN (2020).

4.1.2 Etapa de Padronização dos Mapas

A padronização dos mapas no *software* QGIS foi realizada com o intuito de alinhar dados geospaciais de diferentes fontes a uma referência espacial comum, garantindo que todos estejam delimitados pelos limites do estado do Tocantins. Esta padronização dos mapas foi efetuada com por meio da ferramenta “Recortar”, como ilustrado na Figura 17, que destaca o recorte das Linhas de Transmissão (LTs) dentro do estado Tocantins.

Figura 17: (a) LTs em cor vermelha, que atravessam o estado do Tocantins; (b) LTs em cor vermelha, no estado do Tocantins



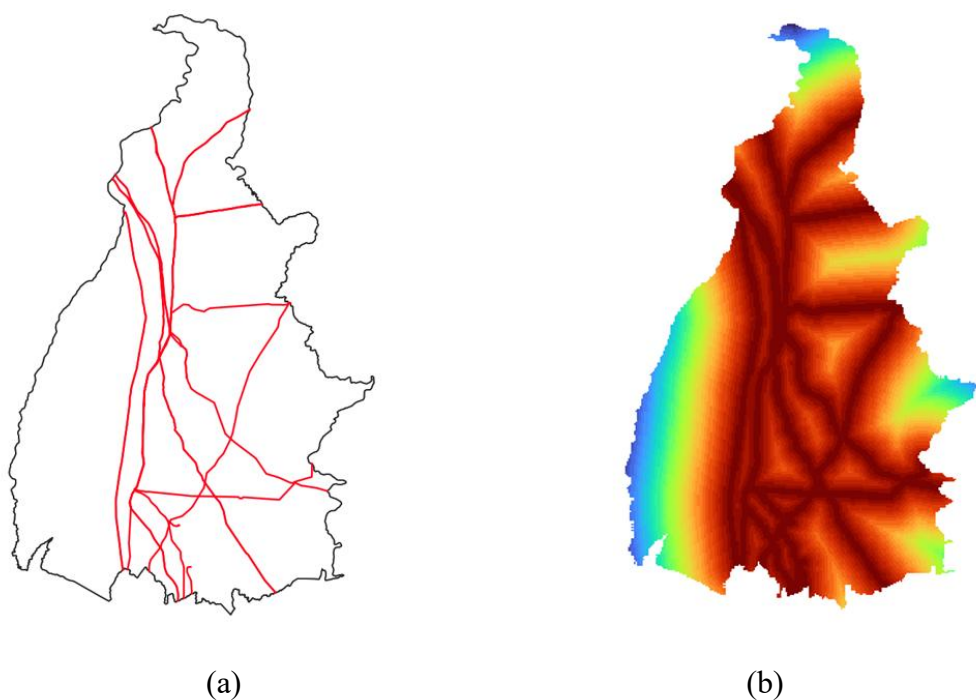
Fonte: Próprio autor (2024).

4.1.2.1 Etapa de Distribuição de Gradientes

A etapa de distribuição dos gradientes no QGIS faz uso da ferramenta *Buffer Multi-rings* para representar gradativamente o impacto ou influência de determinados elementos no espaço, como rodovias e Linha de Transmissão (LT). Esta ferramenta permite a geração de zonas concêntricas, onde cada anel representa uma distância específica. A utilização dessa etapa viabiliza a identificação de áreas com diferentes níveis de proximidade, conforme ilustrado na Figura 18.

Por meio da Figura 18, observa-se que, à medida que a distância em relação à LT aumenta, o valor do gradiente diminui progressivamente. Isso indica que a influência ou o impacto das LTs é mais pronunciado nas áreas mais próximas e vai se suavizando conforme se afasta delas.

Figura 18: (a) LTs em cor vermelha, no estado do Tocantins; (b) Distribuição da intensidade de gradiente, partindo das linhas mais próximas até os extremos do estado do Tocantins



Fonte: Própria do Autor (2024).

4.1.3 Etapa de Parametrização para a Geração Solar Fotovoltaica

Nesta etapa, foi realizada a parametrização das variáveis que influenciam a GSF, com base no comportamento descrito por Oliveira Neto (2016). As características selecionadas e seus respectivos parâmetros encontram-se detalhados na Tabela 1, em que P_N representa a porcentagem atribuída a cada uma das N analisadas em um ponto em %.

Tabela 1: Comportamento das características que influenciam a GSF concentrada

Item avaliado	P_N Máximo (100%)	P_N Mínimo (0%)
Radiação Solar	Onde há mais	Onde há menos
Insolação Solar	Onde há mais	Onde há menos
Precipitação	Onde há menos	Onde há mais
Temperatura	Onde há menos	Onde há mais
Eletrogeografia	Pontos mais próximos às LTs	Pontos mais distantes às LTs
Umidade Relativa do Ar	Onde há menos	Onde há mais
Densidade Demográfica	Onde há menos	Onde há mais

Fonte: Oliveira Neto (2016)

Além disso, Oliveira Neto (2016) propôs em seu trabalho os fatores excludentes para a GSF. Estes elementos excludentes são expostos na Tabela 2.

Tabela 2: Fatores excludentes para a GSF

Fatores Excludentes
Áreas de Reserva Ambiental
Áreas de Comunidade Indígenas
Declividade

Fonte: Adaptado de Oliveira Neto (2016).

No processo de parametrização foi realizada uma ponderação matemática relacionando o que é apreciada e não é apreciado de cada mapa. Dessa maneira, a parametrização foi realizada utilizando pesos distintos no valor contributivo das características.

Dessa maneira, a proporcionalidade de GSF, calculando individualmente, é dada por (1).

$$P = \frac{\alpha_1 p_1 + \alpha_2 p_2 + \dots + \alpha_N p_N}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N} = \frac{\sum_1^N \alpha_N P_N}{\sum_1^N \alpha_N} \quad (1)$$

Em que:

P é a proporcionalidade de cada pixel, calculado individualmente, dada em %;

P_N é a porcentagem atribuída a cada uma das N características analisadas em um ponto, em %;

α_N é o coeficiente de peso distribuído a cada uma das N características analisadas.

Outrossim, foi utilizado o questionário respondido por especialistas da área de energia renováveis elaborado por Oliveira Neto (2016). Este questionário tem o objetivo de determinar quais pesos cada característica terá no somatório dos mapas empregados. Os valores percentuais para cada característica avaliada nesta pesquisa são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Valores dos coeficientes de peso, por meio de questionário, para a GSF concentrada

Item Avaliado	Coefficiente de peso (α_N) x 100%
Radiação Solar	18,05
Insolação Solar	17,89
Precipitação	14,57
Temperatura	13,46
Eletrogeografia	12,59
Umidade Relativa do Ar	12,35
Densidade Demográfica	11,08

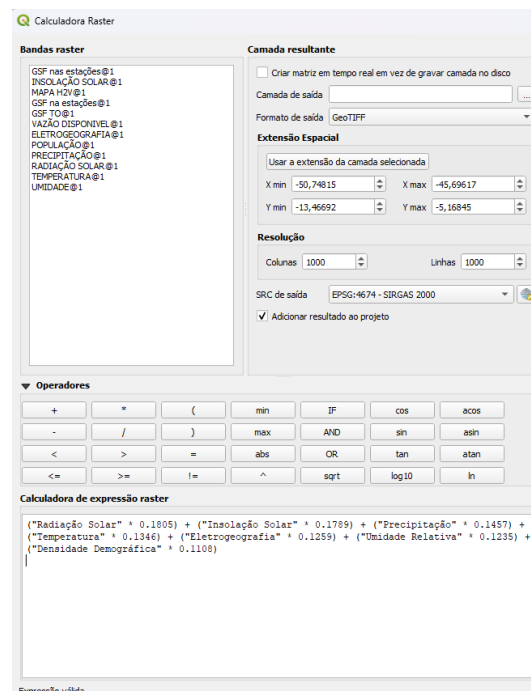
Fonte: Oliveira Neto (2016).

4.1.4 Etapa de Síntese no QGIS

No QGIS, a etapa de síntese foi implementada utilizando ferramentas como álgebra de mapas e combinação de camadas *raster*. Esse processo consiste na sobreposição de mapas temáticos, pixel a pixel, para gerar um mapa final consolidado, onde diferentes variáveis são integradas.

O somatório dos mapas empregados foi realizado utilizando a ferramenta de Calculadora *Raster*, em que fórmulas matemáticas são aplicadas aos valores de cada camada para gerar um novo *raster* que reflete a síntese das variáveis. O mapa gerado permite identificar os locais mais propícios para a GSF com pesos distintos no estado do Tocantins conforme Figura 19.

Figura 19: GSF com pesos distintos no Tocantins por meio da Calculadora *Raster*



Fonte: Própria do Autor (2024).

A integração das variáveis geoespaciais e da aplicação de pesos distintos por meio da utilização desta ferramenta, proporcionou uma avaliação precisa das condições locais, permitindo destacar as regiões com maior potencial para a GSF no estado do Tocantins, alinhada aos objetivos do estudo e aos critérios estabelecidos.

4.2 Disponibilidade Hídrica no Estado do Tocantins

Nesta etapa são apresentados os procedimentos metodológicos aplicados para a análise e elaboração de disponibilidade hídrica no estado do Tocantins.

4.2.1 Levantamento de Dados das Estações Fluviométricas no Estado do Tocantins

Para este procedimento metodológico, foi efetuada uma coleta dos dados de vazão e coordenadas geográficas das estações fluviométricas disponibilizadas no portal da HidroWeb. No Tocantins, há 306 estações ativas, entretanto, apenas 18 estações que possuem todos os dados completos (ANA, 2024).

4.2.2 Levantamento da Vazão de Permanência

Por meio do *software* Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SisCAH), desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa, foi possível realizar o cálculo da Q_{90} juntamente com as séries históricas dos últimos 10 anos disponíveis no site da HidroWeb. Além disso, foram desconsiderados os meses com mais 5% de erro. Entretanto, como já citado, o NATURATINS (2008) permite até 25% da vazão de referência. Dessa maneira, pode-se determinar a disponibilidade hídrica do estado do Tocantins.

Ademais, cabe ressaltar que no portal da HidroWeb pode ser consultado a área da drenagem de cada estação fluviométrica, entretanto não informa as coordenadas dessas áreas. Devido a problemática, este trabalho utilizou um diâmetro de aproximadamente 25 km para cada ponto das estações fluviométricas.

4.2.3 Mapa de Disponibilidade Hídrica no Estado do Tocantins

Após o tratamento adequado dos dados de vazão outorgável e a georreferência das coordenadas de cada estação fluviométrica, foi elaborado o mapa de disponibilidade hídrica no estado do Tocantins por meio do *software* QGIS.

4.3 Propriedade para Obtenção do Hidrogênio Verde

A partir da combinação do mapa de propriedade de GSF no estado do Tocantins com o mapa de disponibilidade da BRHTO também no estado do Tocantins, foi realizada a síntese

por meio da Calculadora *Raster* desses dois mapas, atribuindo-se pesos iguais de 50% a cada um. Este procedimento visou integrar as informações de ambas as variáveis de forma equilibrada, considerando a influência de cada fator no potencial geração do H2V no estado do Tocantins.

Assim, finalizando o detalhamento para a elaboração do mapa de propiabilidade de obtenção do H2V, incluindo as etapas de processamento e as parametrizações adotadas no QGIS, utilizando os mapas empregados nesta pesquisa, os resultados deste trabalho são apresentados no Capítulo 5.

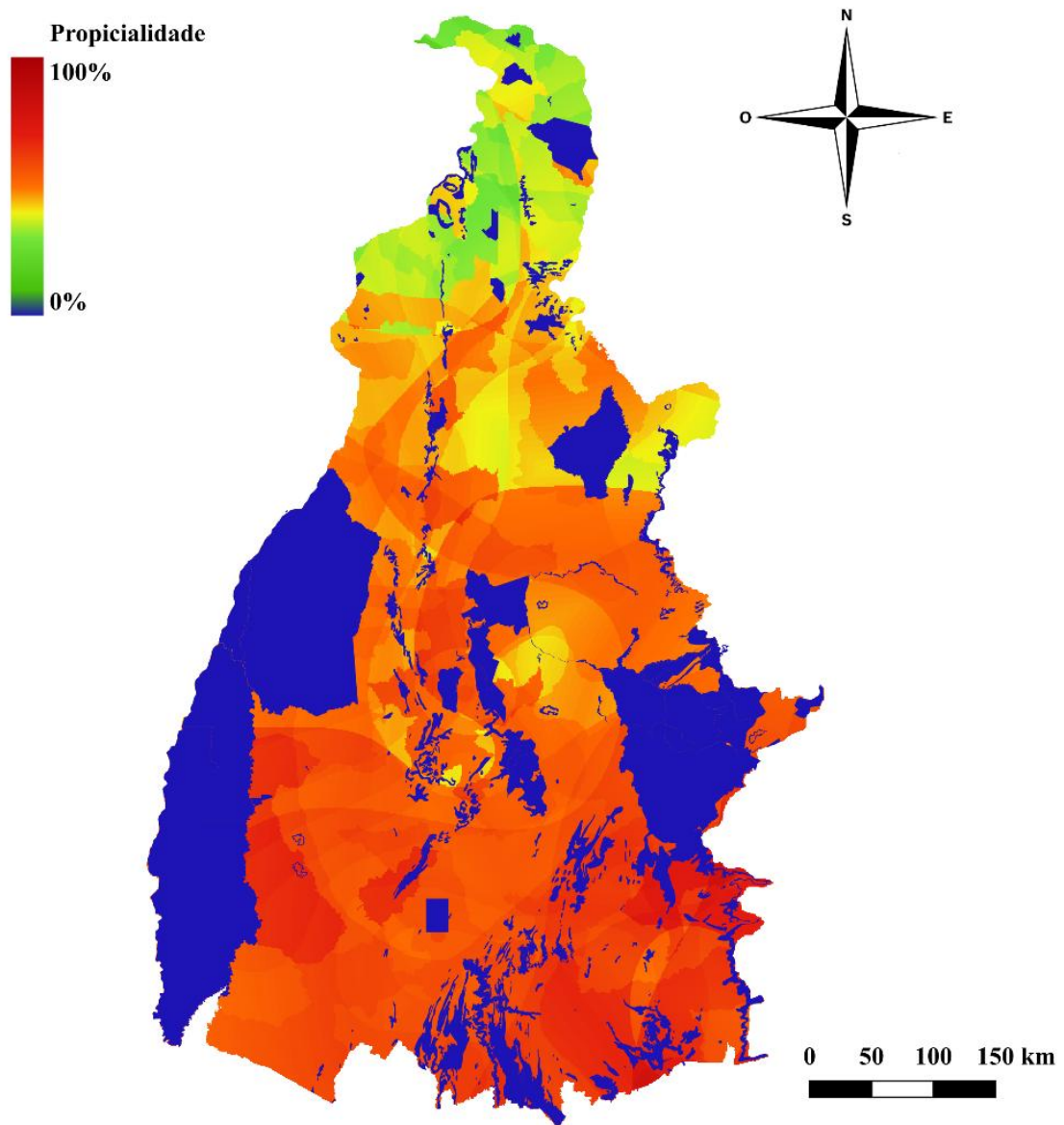
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados e as discussões pertinentes à pesquisa desenvolvida, focando na análise da propiabilidade de GSF e na disponibilidade hídrica no Estado do Tocantins para identificar as regiões mais propicias para a obtenção do H2V no estado do Tocantins.

5.1 Mapa de Geração Solar com Pesos Distintos no Estado do Tocantins

O mapa final, que reflete a propiabilidade para a implantação de GSF com pesos distintos no Estado do Tocantins, é apresentado na Figura 20.

Figura 20: Propiabilidade de GSF no estado do Tocantins



Fonte: Própria do Autor (2024).

Com base na metodologia de parametrização adotada, as áreas com propiçialidade 0%, como terras indígenas, unidades de conservação ambiental e regiões com alta declividade, são representadas pela cor azul. Por outro lado, as áreas de maior propiçialidade, indicativas de um maior potencial para a implementação de GSF, são destacadas em vermelho. Esse mapa proporciona uma visualização das zonas mais favoráveis para o desenvolvimento da geração de energia solar no estado do Tocantins, considerando os diferentes fatores influentes.

Além disso, vale ressaltar que, entre os fatores excludentes, as áreas de preservação ambiental e as terras indígenas representam as maiores extensões de áreas restritas. Adicionalmente, a declividade do terreno também se destaca como um fator limitante em diversas regiões, embora sua influência tenha uma menor área de atuação.

Com as zonas com maior propiçialidade de GSF no estado do Tocantins estabelecidas, foi possível elencar os municípios com maior propiçialidade para a geração solar concentrada com pesos distintos, conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Maiores propiçialidades para GSF com pesos distribuídos no estado do Tocantins

Cidades e suas proximidades	Propiçialidade (%)
Arraias	75
Dianópolis	75
Novo Jardim	74
Bom Jesus	74
Porto Alegre	73
Ponte Alta	72
Lagoa da Confusão	71

Fonte: Própria do Autor (2024).

Por meio da Figura 20, percebe-se que o sul do estado do Tocantins fornece os melhores índices de propiçialidade para GSF, principalmente na região Sudeste. Logo, pode-se afirmar que houve uma coerência no resultado obtido, uma vez que, a região o sul do estado do Tocantins proporciona as menores temperatura, maiores radiações, maiores insolações e outros fatores climáticos que favorecem as melhores condições para a GSF.

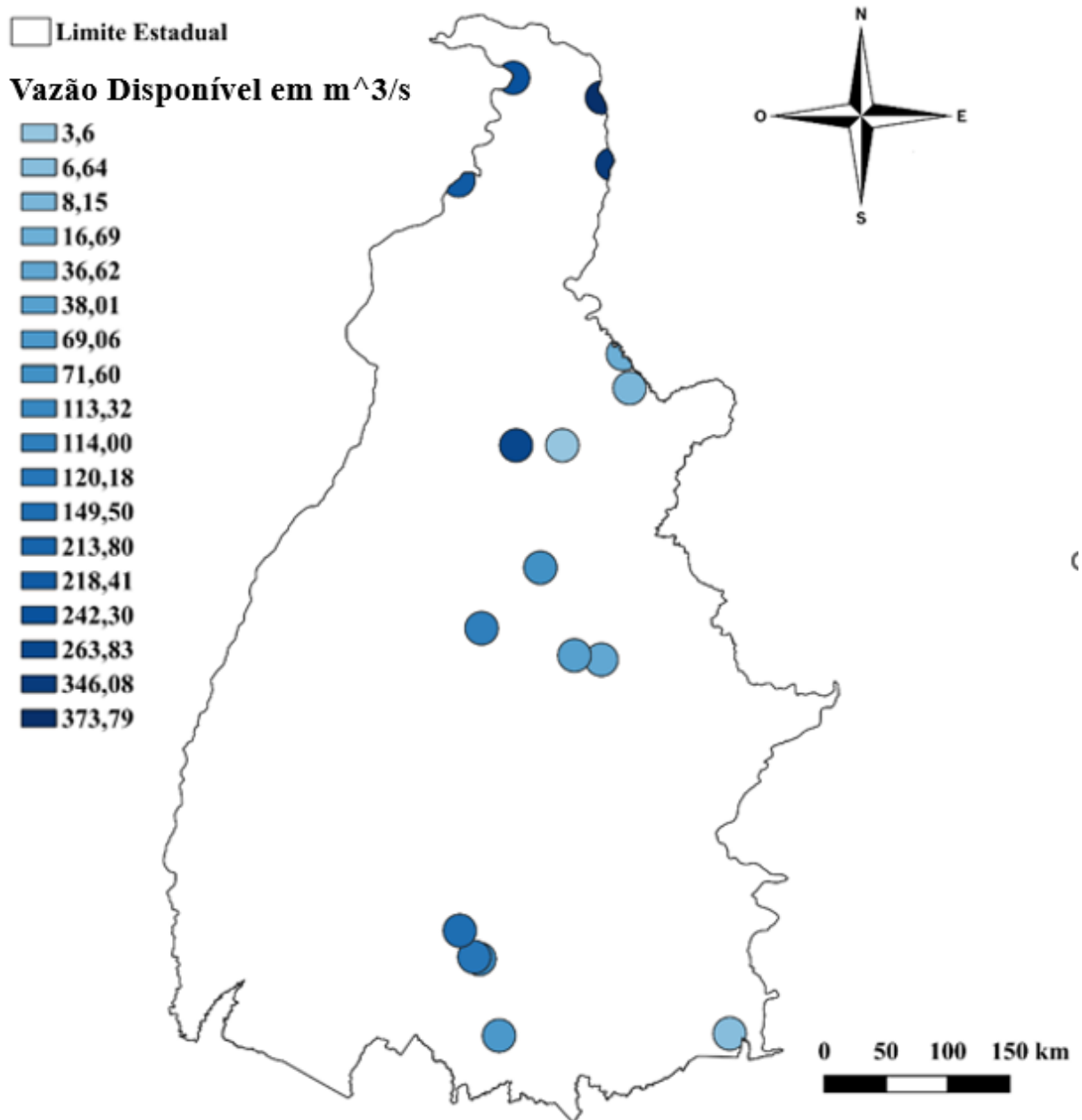
Por fim, a Figura 20 destaca que grande parte do estado do Tocantins apresenta um elevado potencial para a GSF, com índices de propiçialidade superiores a 50%. Esse cenário reforça a notável aptidão do estado do Tocantins para o aproveitamento dessa fonte renovável.

5.2 Mapa Final da Disponibilidade Hídrica no Estado do Tocantins

O mapa elaborado para a visualização da disponibilidade hídrica pode ser visto na Figura 21. As estações fluviométricas com as menores vazões são representadas com a cor azul clara, enquanto as maiores vazões disponíveis são apresentadas com a tonalidade azul escura.

Por meio da análise da Figura 21, observa-se uma descontinuidade nos valores apresentados entre as estações de medição, o que pode ser atribuído à ausência de dados em alguns pontos do estado do Tocantins. No entanto, é perceptível que a região com maior disponibilidade hídrica se concentra no norte do estado.

Figura 21: Disponibilidade hídrica do estado do Tocantins



Fonte: Própria do Autor (2024).

Além disso, em complemento às informações da Figura 21, na Tabela 5 são apresentados os detalhes específicos de cada estação, incluindo informações sobre a vazão disponível, permitindo uma compreensão mais aprofundada das condições hídricas de cada estação fluviométrica.

Tabela 5: Vazão disponível nas estações fluviométricas

Código HidroWeb	Nome da Estação	Q₉₀ (m³/s)	25% da Q₉₀ (m³/s)
21080000	São Salvador Barramento	276,22	69,06
21750000	Lavandeira	26,54	6,64
22043000	Peixe Angical Barramento	453,29	113,32
22045000	Peixe Angical Jusante	480,73	120,18
22050001	Peixe	598,00	149,50
22490500	Luís Eduardo Magalhães	456,00	114,00
22680000	Jatobá (Fazenda Boa Nova)	146,49	36,62
22700000	Novo Acordo	152,05	38,01
22900000	Porto Real	286,41	71,60
23100000	Tupiratins	1.055,30	263,83
23150000	Itacaja	14,41	3,60
23230000	Jacaré	32,60	8,15
23250000	Goiatins	66,74	16,69
23495000	Estreito Jusante	855,19	213,80
23600000	Tocantinópolis	1.384,33	346,08
23700000	Itaguatins	1.495,16	373,79
28300000	Xambioá	873,64	218,41
28850000	Araguatins	969,18	242,30

Fonte: Próprio autor (2024).

Por meio dos dados obtidos, foi possível elaborar o mapa de propiabilidade de obtenção do H2V no estado do Tocantins, que integra informações sobre a disponibilidade hídrica e o potencial da GSF, ambas no estado do Tocantins.

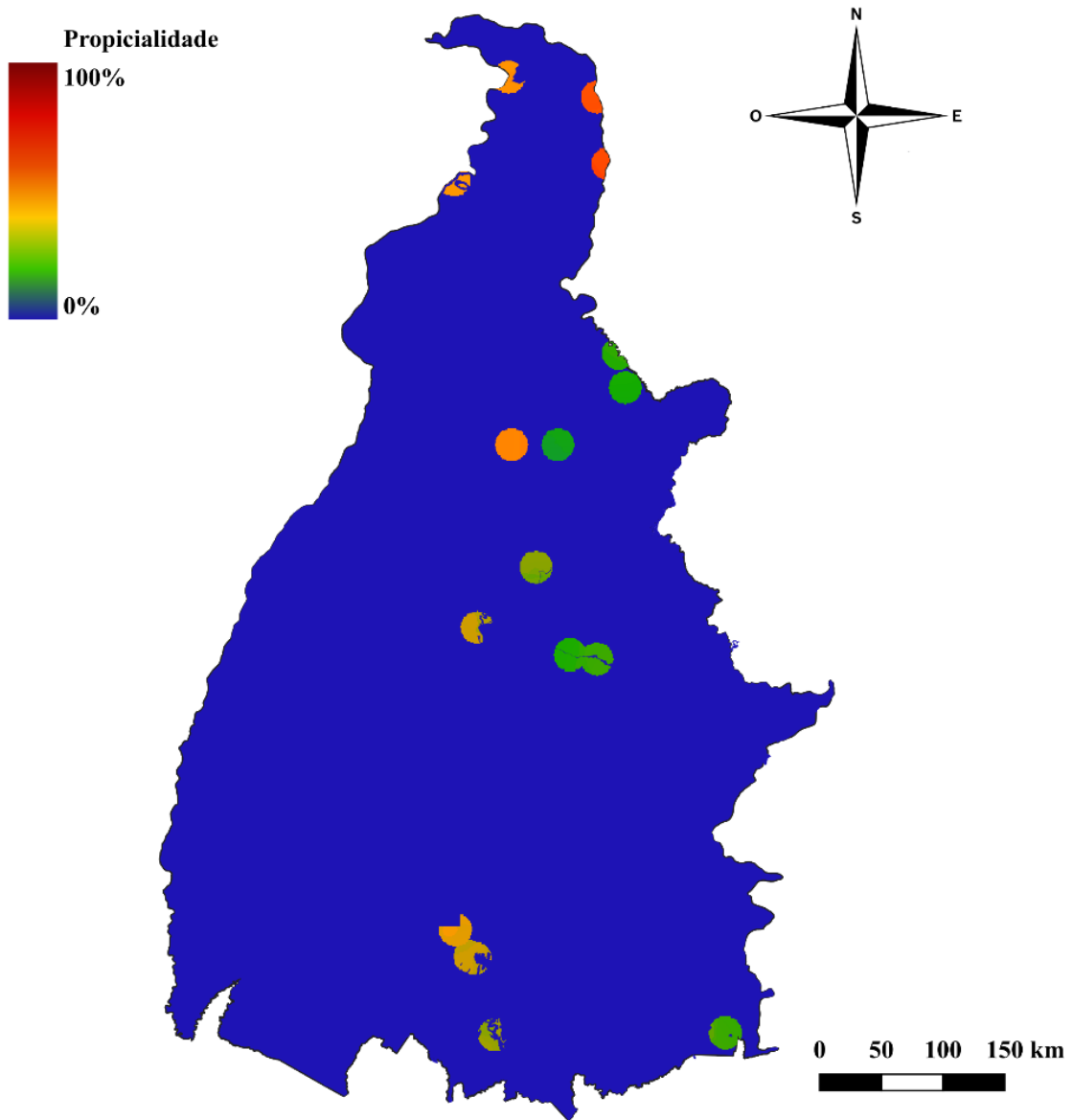
5.3 Mapa Final da Propiabilidade de Obtenção do Hidrogênio Verde no Estado do Tocantins

No estudo sobre os locais mais propícios para a obtenção do H2V no estado do Tocantins, levando em consideração a GSF e a vazão disponível, com pesos igualitários atribuídos aos fatores que influenciam a obtenção desse vetor energético. Estes resultados são apresentados na Figura 22.

Ademais, por meio da Figura 22 foi possível determinar as regiões menos propícias a obtenção do H2V, representadas por tonalidades de azul, indicando áreas com menor

propriedade em função das características analisadas e parametrizadas na pesquisa. Por outro lado, as áreas classificadas como mais propícias encontram-se destacadas em vermelho. Essa gradação de cores permite uma visualização clara e hierarquizada do potencial de viabilidade nas diferentes regiões.

Figura 22: Mapa final da propriedade de obtenção do H2V no estado do Tocantins



Fonte: Própria do Autor (2024).

Além disto, de acordo com a Figura 22, a região Norte do estado do Tocantins apresentou os locais mais propício para obtenção do H2V como vetor energético.

Cabe ressaltar que a atribuição de pesos igualitários aos fatores considerados pode não refletir a complexidade das interações entre as variáveis que influênciam a obtenção do H2V no estado do Tocantins.

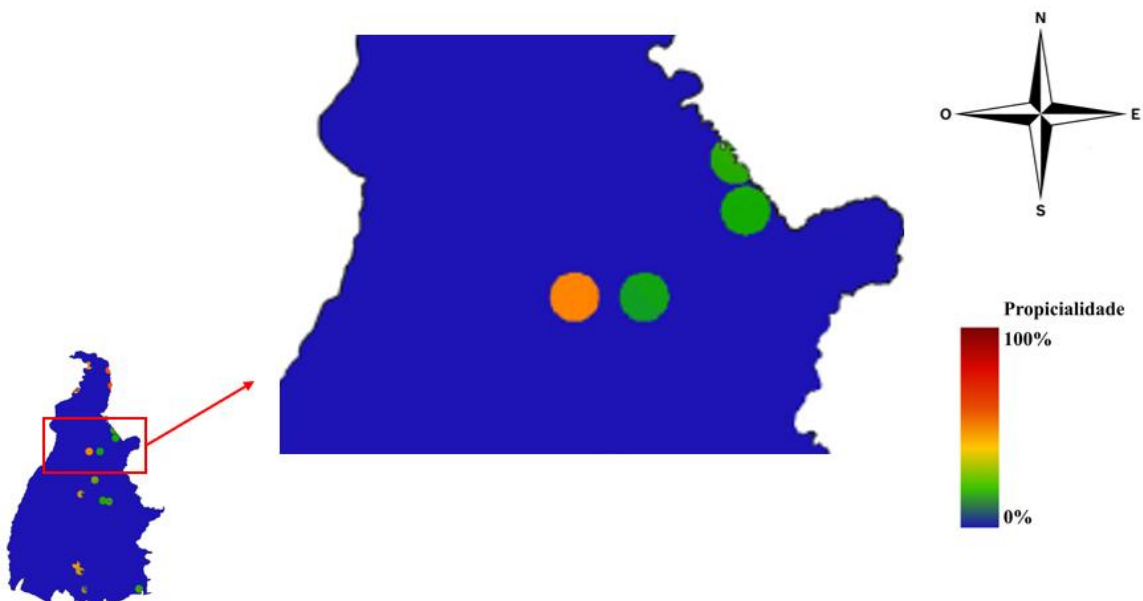
Com o intuito de aprimorar a visualização dos impactos da GSF e da disponibilidade hídrica na obtenção do H2V no estado do Tocantins, foi realizada uma fragmentação e ampliação em quatro partes da Figura 22: Norte, Nordeste, Centro-Leste e Sul do estado do Tocantins, conforme pode ser observado nas Figuras 23 a 26.

Figura 23: Mapa final da propiabilidade de obtenção do H2V na região Norte do estado do Tocatins



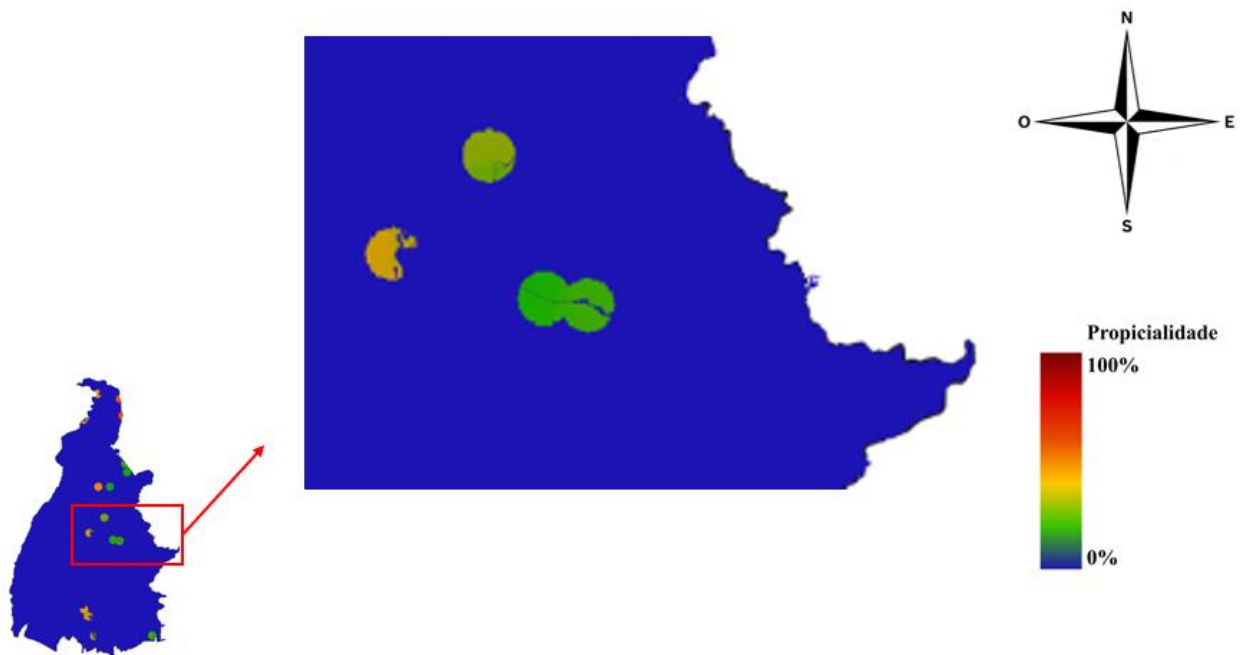
Fonte: Própria do Autor (2024).

Figura 24: Mapa final da propiabilidade de obtenção do H2V na região Nordeste do estado do Tocatins



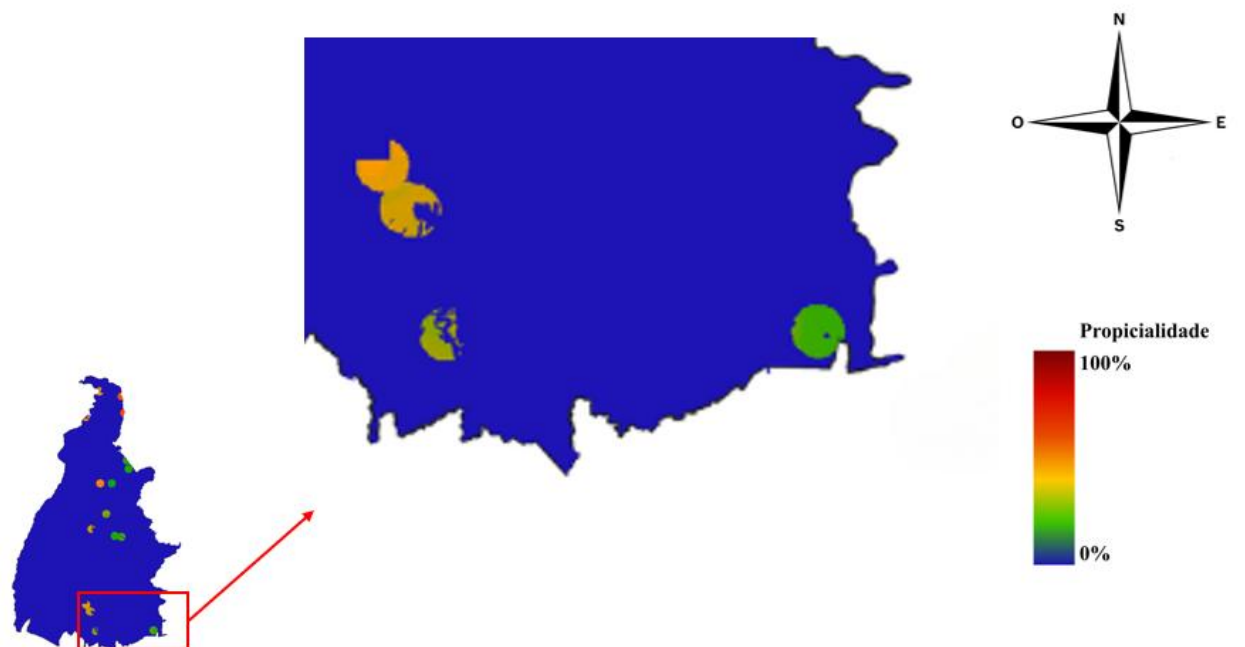
Fonte: Própria do Autor (2024).

Figura 25: Mapa final da propiçialidade de obtenção do H2V na região Centro-Leste do estado do Tocantins



Fonte: Própria do Autor (2024).

Figura 26: Mapa final propiçialidade de obtenção do H2V na região Sul do estado do Tocantins



Fonte: Própria do Autor (2024).

Ademais, com as propiçialidade de obtenção do H2V no estado do Tocantins elencadas, foi possível determinar os municípios com maior propiçialidade para a obtenção deste vetor energético.

Tabela 6: Propriedade de obtenção do H2V no estado do Tocantins

Cidades e suas proximidades	Propriedade (%)
Tocantinópolis	70
Itaguatins	65
Ipiratins	69
Araguatins	54
Xambioá	43

Fonte: Própria do Autor (2024).

Por meio da análise das Figuras 22 a 26, é apresentado que, parte norte do estado do Tocantins, foram localizadas as áreas mais propícias para a obtenção do H2V. Por meio da Tabela 6 foi possível reafirmar este resultado.

Entretanto percebe-se que maior parte do estado apresenta propriedade igual a 0%. Este resultado foi influenciado diretamente pela quantidade de dados ativos nas estações fluviométricas presentes no estado Tocantins.

5.4 Conclusões do Resultados

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam o potencial do estado do Tocantins para a obtenção do H2V, com base na combinação da GSF e da disponibilidade hídrica. O detalhamento das áreas com maior propriedade para GSF e o mapeamento da disponibilidade hídrica no estado do Tocantins permitiram identificar os locais mais propícios para a obtenção do H2V como vetor energético.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvida e aplicada com êxito uma metodologia para identificar as regiões mais propícias para a obtenção do H2V no estado do Tocantins, com base nos mapas da GSF e da disponibilidade hídrica, ambos do estado do Tocantins. A metodologia desenvolvida envolveu a combinação de diferentes variáveis espaciais, resultando em uma abordagem eficaz para mapear as zonas com maior viabilidade para o desenvolvimento de projetos de H2V.

Assim, no contexto da GSF, disponibilidade hídrica e obtenção do H2V no estado do Tocantins, pode-se concluir que:

- Foram realizadas análises detalhadas e elencadas as características que influenciam a GSF no estado do Tocantins, considerando fatores como radiação solar, insolação solar, precipitação, temperatura, eletrogeografia, umidade relativa do ar, e densidade demográfica;
- Foram identificadas as áreas com maior potencial para GSF no estado do Tocantins por meio da elaboração de um mapa de propiabilidade;
- Foi feita uma análise das vazões nas estações fluviométricas presentes no estado Tocantins, possibilitando a identificação das regiões com maior disponibilidade hídrica.
- Com base nos dados obtidos, foi elaborado um mapa de disponibilidade hídrica, que apresenta as áreas com maior potencial para a integração da geração do H2V, a partir do uso combinado de recursos hídricos e solares;

Complementarmente, os resultados apresentados neste trabalho evidenciam a aplicabilidade da metodologia desenvolvida, demonstrando que a combinação de GSF e disponibilidade hídrica oferecem um ferramental de tomada de decisão para obtenção do H2V no estado do Tocantins.

Além disso, a metodologia proposta pode ser utilizada para outras áreas em que se pretende analisar o potencial de obtenção do H2V, inclusive com outros tipos de geração, desde que se tenham mapas suficientemente detalhados das características que influenciam a geração a ser empregada.

Por fim, a pesquisa contribui de maneira significativa para o planejamento e transição energética da região, fornecendo uma base sólida para decisões estratégicas que visem o aproveitamento eficiente dos recursos naturais para a produção de energia limpa, renovável e sustentável.

6.1 Trabalhos Futuros

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, puderam ser identificadas algumas possibilidades de melhoria e de continuidade a partir de futuras pesquisas, as quais incluem:

- Estender a abordagem para a obtenção do H2V utilizando outra fonte de energia renovável, como a energia eólica, desde que sejam identificados e parametrizados os fatores específicos que influenciam a geração eólica;
- Coletar ou medir dados adicionais de vazão para cobrir uma área geográfica mais ampla, proporcionando maior representatividade nas análises;
- Adicionar variáveis relacionadas ao escoamento do produto, ou seja, variáveis de logística e distribuição do H2V, como rodovias e linhas ferroviárias, e realizar a parametrização dessas características;
- Adicionar níveis de tensão utilizadas para distribuição, como 13.8kV e 34.5kV, no mapa eletrogeográfico;
- Considerar variáveis externas não relacionadas às características territoriais e de projeto como o preço do kWh, a legislação aplicável, e o grau de maturidade dos processos de eletrólise.

Por fim, as propostas elencadas têm o potencial de contribuir significativamente para a otimização da elaboração do mapa de propialidade de obtenção de H2V. Com essas melhorias, seria possível integrar de forma mais abrangente os fatores geográficos, econômicos e tecnológicos, promovendo maior precisão. Além disso, essas perspectivas futuras poderiam auxiliar na expansão das análises para diferentes contextos e regiões, fomentando uma transição energética mais sustentável e adaptada às características locais, bem como ao avanço das tecnologias renováveis e de eletrólise.

REFERÊNCIAS

- ABE, I. **Physical and Chemical Properties of Hydrogen**. Energy Carriers and Conversion Systems, v.1, 2007.
- AGATON, C. B.; BATAK, K. I. T.; REYES Jr, E. M. Prospects and Challenges for Green Hydrogen Production and Utilization in the Philippines. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 41, p. 17859-17870, 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano Estratégico de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica dos Rios Tocantins e Araguaia: Relatório Síntese**, 2009.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos**. Brasília: SAG, 2011.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras**, 2015.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **As Regiões Hidrográficas Brasileiras**, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **HidroWeb - Séries Históricas**. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos. 2024 Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas> >. Acesso em: 1 out. 2024.
- ALEIXO, H. M. F. **Modelo de Produção de Hidrogênio Verde Baseado em Energia Fotovoltaica**, 2023.
- AYODELE, T. R. & MUNDA, J. L. The Potential Role of Green Hydrogen Production in the South Africa Energy Mix. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 11, n. 4, 2019.
- BALL, M.; WEEDA, M. The Hydrogen Economy - Vision or Reality?. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 40, n. 25, p. 7903–7919, 6 jul, 2015.
- BILGILI, M., OZBEK, A., SAHIN, B., & KAHRAMAN, A. An Overview of Renewable Electric Power Capacity and Progress in New Technologies in the World. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 323-334, 2015.
- BRAGA, R. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. UFRJ, 2008.
- BEZERRA, F. D. **Hidrogênio Verde: Nasce um Gigante no Setor de Energia**. 2021.
- BONDARIK, R.; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. Uma Visão Geral Sobre o Potencial de Geração de Energias Renováveis no Brasil. **Interciência**, v. 43, n. 10, p. 680-688, 2018.
- BOTELHO, D. F.; MORAES, C. A.; DE OLIVEIRA, L. W. Green Hydrogen Production from Hydro Spilled Energy in Brazilian Bydropower Plants. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 68, p. 575-585, 2024.
- BUZÓN, M. C. M.; ROMERO, A. M. P.; BONILLO, M. J. L.; ÁLVAREZ, R. M.; AGUGLIARO, F. M. **Introducción a los Sistemas de Información Geográfica: Análisis de Casos Prácticos con QGIS**. 2023.

CARLOS, I. Q. de C.; BRITO, B. H.; BITTENCOURT, F. T. Impacto da Lei Palmas Solar na análise financeira da microgeração fotovoltaica em Palmas – TO. In: **VII Congresso de Energia Solar** – Gramado, 2018.

CARVALHO, J. F.; GARCIA, J. V. S. **Hidrogênio Verde: Estudo de Caso do Brasil**. 2022.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, INPE, 2001.

CRUZ, J. C.; TUCCI, C. M. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. RBRH: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS. Vol. 13, N. 1 (jan./mar. 2008), p. 111-124, 2008.

CNI. **Hidrogênio Sustentável: Perspectivas e Potencial para a Indústria Brasileira**. Brasília, 2022.

DURING, F. A. **Estudo Técnico-Econômico de Dois Sistemas de Armazenamento de Energia em um Sistema Híbrido Hidrelétrico Fotovoltaico**. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia– PNE 2050**. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Linhas de Transmissão – Base Existente**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: < arqpublic.epe.gov.br/?projeto=metadadoswebmapepe >. Acesso em: 5 out. 2024.

GABRIELLI, J. S.; TOKARSKI, A. P. R. Estudos Regulatórios para a Certificação do Hidrogênio Verde no Brasil: Transição Energética. **Princípios**, v. 43, n. 170, p. 93-114, 2024.

GORJIAN, S.; EBADI, H. **Introduction Photovoltaic Solar Energy Conversion**, 1–26. 2020

HAMMOND, C. R. **The Elements**. Handbook of Chemistry and Physics, v 81, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022 – Downloads**. Disponível em: < <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/downloads.html> >. Acesso em: 15 out. 2024.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL E DA BIODIVERSIDADE DO ESTADO DO PARÁ (IDEFLORBIO). Diagnóstico Meio Físico - **SALVATERRA VF**. Belém, PA, 2023.

JOVAN, D. J.; DOLANC, G.; PREGELJ, B. Utilization of Excess Water Accumulation for Green Hydrogen Production in a Run-of-River Hydropower Plant. **Renewable Energy**, v. 195, p. 780-794, 2022.

KARAYEL, G. K.; DINCER, I. Green Hydrogen Production Potential of Canada with Solar Energy. **Renewable Energy**, v. 221, p. 119766, 2024.

KUMAR, S. S.; LIM, H. An Overview of Water Electrolysis Technologies for Green Hydrogen Production. **Energy Reports**, v. 8, p. 13793-13813, 2022.

- LANA, L. T. C., ALMEIDA, E., DIAS, F. C. L. S., ROSA, A. C. Energia Solar Fotovoltaica: Revisão Bibliográfica. **Engenharias On-line**, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.
- LIMA, J. E. F. W. Situação e Perspectivas Sobre as Águas do Cerrado. **Ciência e Cultura**, v. 63, n. 3, p. 27-29, 2011.
- MARCUZZO, F. F. N.; GOULARTE, E. R. P. **Caracterização do Ano Hidrológico e Mapeamento Espacial das Chuvas nos Períodos Úmido e Seco do Estado Do Tocantins**. 2013.
- MAYS, L. W. **Water Resources Engineering**. 2010.
- MENDES, L. A. **Análise dos Critérios de Outorga de Direito de Usos Consuntivos dos Recursos Hídricos Baseados em Vazões Mínimas e em Vazões de Permanência**. 2007.
- MENDONÇA, M. S. Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Providência no Estado do Tocantins. In: **Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas**, 18., 2021, Poços de Caldas. Anais [...]. Poços de Caldas: [s.n.], 2021.
- MOREIRA, M. C. **Gestão De Recursos Hídricos: Sistema Integrado para Otimização a Outorga de Uso da Água**. 2006.
- MONTEIRO, A J.; AMORIM, F. K.; PEREIRA, T. S.; GONCALVES, T. S. Levantamento do Impacto de Geração de Eletricidade Através de Unidades Fotovoltaicas na Matriz Elétrica no Estado do Tocantins. In: **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. 2020.
- MONTEIRO, R. M.; SANTOS; F. A. A., ROLIM; P. A. M.; JOSÉ, C. E. C. B. E.; ROCHA, P. Modelagem Estatística Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 2, p. 1158-1173, 2024.
- NADALETI, W. C.; LOURENÇO, V. A.; AMERICO, G. Green Hydrogen-Based Pathways and Alternatives: Towards the Renewable Energy Transition in South America's Regions—Part A. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 43, p. 22247-22255, 2021.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. CPRM, 2007.
- NATURATINS -INSTITUTO NATUREZA DO TOCANTINS -. **Portaria N° 904/2008**, Tocantins. 2008.
- OLIVEIRA NETO, A. B. **Identificação de Regiões Propícias à Geração Solar e Eólica Utilizando Processamento Digital de Imagens**. 2016.
- OLIVEIRA NETO, A. B.; COSTA, E. G.; FERREIRA, T. V.; ARAUJO, B. V. S.; ALVES, L. N. T. Multiparametric Identification of Favorable Regions for Wind or Solar Generation in the State of Pernambuco. **IEEE Latin America Transactions**, v. 20, n. 6, p. 891-900, 2022.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar (ABES)**. 2ª ed. São Jose dos Campos: INPE, 2017.
- SARKER, A. K.; AZAD, A. K., RASUL; M. G.; DOPPALAPUDI, A. T. Prospect of Green Hydrogen Generation from Hybrid Renewable Energy Sources: A Review. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1556, 2023.

SABOYA, R. T. Análises Espaciais em Planejamento Urbano. Novas Tendências. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, n. 3, p. 61-79, 2000.

SCHOLZ, M. New Methodology for Identifying Sustainable Freshwater Resources for the Production of Green Hydrogen. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 17, n. 1, p. 1-7, 2024.

SECRETARIA DA COMUNICAÇÃO (SCTO). **Navegação no Rio Tocantins é um Sonho Antigo da População**, 2008.

SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E ORÇAMENTO (SEPLAN), **Geoportal Tocantins – Cartas Climáticas**. 2020. Disponível em: <https://geoportal.to.gov.br/gvsigonline/core/load_public_project/cartasclimticas/>. Acesso em: 1 dez. 2024.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTAVÉL (SEMADES), **Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Tocantins**, 2011.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (SMARHTO). **Gestão Hídrica**, 2018.

SILVA, M. A. Águas Superficiais e Subterrâneas da Bacia Tocantins-Araguaia como Subsídio para um Estudo de Impacto Ambiental. **Águas Subterrâneas**, 2000.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. Introdução ao QGIS: OSGeo4W-3.22. 7. **Oficina de Textos**, 2022.

UYSAL, S.; KAYA, M. F.; DEMIR, N., HÜNER, B.; ÖZCAN, R. U.; ERDEM, Ö. N.; YILMAZ, M. Investigation of Hydrogen Production Potential from Different Natural Water Sources in Turkey. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 61, p. 31097-31107, 2021.

ZHAO, N.; YOU, F. Can Renewable Reneration, Energy Storage and Energy Efficient Technologies Enable Carbon Neutral Energy Transition?. **Applied Energy**, v. 279, p. 115889, 2020.