

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
CURSO DE BACHARELADO EM GEOGRAFIA**

LUCAS AZZOLIN MARCHI

Transição Energética no Rio Grande do Sul: Análise da Matriz Elétrica do Estado a Partir da Assinatura do Protocolo de Quioto (1997 - 2024)

Porto Alegre

2025

LUCAS AZZOLIN MARCHI

Transição Energética no Rio Grande do Sul: Análise da Matriz Elétrica do Estado a Partir da Assinatura do Protocolo de Quioto (1997 - 2024)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção de título de Bacharel em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Prof^a. Dra^a Teresinha Guerra.

Porto Alegre

2025

LUCAS AZZOLIN MARCHI

Transição Energética no Rio Grande do Sul: Análise da Matriz Elétrica do Estado a Partir da Assinatura do Protocolo de Quioto (1997 - 2024)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção de título de Bacharel em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadora: Prof^a. Dra^a Teresinha Guerra.

Porto Alegre, 29 de janeiro de 2025.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dra^a Teresinha Guerra
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Darci Barnech Campani
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Robinson da Silva Samuel
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Teresinha Guerra por toda a disponibilidade e auxílio durante o Trabalho de Conclusão de Curso, suas aulas foram determinantes para a minha formação.

Agradeço todo o apoio e paciência da minha família. Em especial, aos meus pais e madrasta, que ofereceram todo o seu suporte no processo de graduação. Também agradeço aos meus colegas, Pablo, Vitória, Sara e Marcelo, que proporcionaram tantos momentos felizes e ajudaram a superar os desafios de forma mais leve.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo seu ótimo ensino, o qual foi essencial na minha vida acadêmica e pessoal.

RESUMO

O presente trabalho analisa a transição energética no estado do Rio Grande do Sul, com foco no setor elétrico, desde a assinatura do Protocolo de Quioto em 1997 até 2024. A pesquisa busca descrever as emissões de gases de efeito estufa (GEEs) na matriz elétrica estadual, examinar as políticas públicas voltadas para a transição energética e sugerir caminhos para acelerar o processo de descarbonização. A pesquisa segue uma abordagem quali-quantitativa, utilizando levantamento bibliográfico e pesquisa documental, com análise de políticas públicas, dados técnicos e relatórios oficiais. Os resultados evidenciam que, apesar de avanços na diversificação da matriz elétrica com fontes renováveis, como energia eólica, solar e biomassa, persiste uma dependência histórica do carvão mineral, responsável por significativas emissões de GEEs. Observa-se também que políticas públicas estaduais apresentam contradições, como a continuidade de subsídios para termelétricas a carvão, enquanto se promove a expansão de fontes de baixo carbono. Adicionalmente, o estudo destaca desafios técnicos e econômicos, como a intermitência das fontes renováveis, a defasagem nas redes de transmissão e a necessidade de tecnologias avançadas de armazenamento de energia. No aspecto socioeconômico, identificou-se que a dependência econômica de algumas regiões do estado em relação à indústria carbonífera exige políticas específicas para garantir uma transição energética justa, com foco na requalificação profissional e na diversificação econômica local. A pesquisa conclui que o Rio Grande do Sul possui potencial significativo para liderar a transição energética no Brasil, mas necessita de políticas mais robustas, investimentos direcionados e uma governança mais integrada para alinhar-se efetivamente às metas de redução de emissões de GEEs estabelecidas internacionalmente.

Palavras-chave: Transição Energética, Matriz Elétrica, Rio Grande do Sul, Descarbonização, Políticas Públicas.

ABSTRACT

This study analyzes the energy transition in the state of Rio Grande do Sul, focusing on the electricity sector, from the signing of the Kyoto Protocol in 1997 to 2024. The research aims to describe greenhouse gas (GHG) emissions in the state's electricity matrix, examine public policies aimed at energy transition, and suggest pathways to accelerate the decarbonization process. Methodologically, the study adopts a qualitative and quantitative approach, using bibliographic research and documentary analysis, including public policy reviews, technical data, and official reports. The results show that despite advances in diversifying the electricity matrix with renewable sources such as wind, solar, and biomass energy, there remains a historical dependence on coal, responsible for significant GHG emissions. The study also identifies contradictions in state public policies, such as the continued subsidies for coal-fired power plants alongside efforts to expand clean energy sources. Furthermore, technical and economic challenges are highlighted, including the intermittency of renewable sources, outdated transmission networks, and the need for advanced energy storage technologies. From a socioeconomic perspective, the study reveals that the economic dependence of certain regions on the coal industry requires targeted policies to ensure a just energy transition, focusing on workforce retraining and local economic diversification. The research concludes that Rio Grande do Sul has significant potential to lead Brazil's energy transition but requires more robust policies, targeted investments, and integrated governance to align effectively with internationally established GHG reduction targets.

Keywords: Energy Transition, Electricity Matrix, Rio Grande do Sul, Decarbonization, Public Policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: As Quatro Fases da Pesquisa em Geografia:.....	14
Figura 2: Consumo de Energia Primário Global em 2023.....	17
Figura 3: Matriz Energética Brasileira por Fonte de Energia (1997 – 2023).....	21
Figura 4: Matriz Elétrica Brasileira por Fonte de Eletricidade (1997 – 2023).....	22
Figura 5: Mapa da Potência Outorgada de Usinas Termelétricas Movidas a Combustíveis Fósseis por Município do Rio Grande do Sul em 2024.....	23
Figura 6: Mapa da Potência Outorgada de Usinas Eólicas por Município do Rio Grande do Sul em 2024.....	29
Figura 7: Geração Distribuída Fotovoltaica nos 10 Municípios Gaúchos de Maior Potência Outorgada em 2024.....	30
Figura 8: Mapa da Quantidade Anual de Conexões de Usinas Fotovoltaicas na Geração Decentralizada (2011 – 2024).....	31
Figura 9: Mapa da Potência Outorgada de Geração Elétrica a partir de Biomassa por Município do Rio Grande do Sul em 2024.....	32
Figura 10: Emissões do Setor de Energia e da Geração de Eletricidade (Serviço Público) entre 1997 e 2023.....	38
Figura 11: Geração de Eletricidade no Rio Grande do Sul por Fonte (2011 – 2023).....	39
Figura 12 Potência Instalada Acumulada por Fonte no Rio Grande do Sul em 2023.....	40
Figura 13: Geração de Eletricidade no Rio Grande do Sul por Fonte em 2023.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CRM	Companhia Riograndense de Mineração
DIEESE	Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	Agência Internacional de Energia
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ONG	Organização Não Governamental
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
RS	Rio Grande do Sul
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos Geral e Específicos	11
2. METODOLOGIA	12
2.1 Pesquisa Bibliográfica	12
2.2 Pesquisa Documental.....	12
2.3 Organização Metodológica.....	13
2.4 Limitações da Metodologia.....	14
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO	16
3.1 Combustíveis Fósseis e Gases do Efeito Estufa.....	16
3.2 Matriz Energética e Matriz Elétrica.....	17
3.3 Definição e Relevância da Transição Energética.....	18
3.4 Energia e Desenvolvimento Sustentável.....	19
3.5 Acordos Internacionais e o Protocolo de Quioto	19
4. MATRIZ ENERGÉTICA E MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA: PANORÂMA GERAL	21
5. MATRIZ ELÉTRICA GAÚCHA: FONTES FÓSSEIS	23
5.1 Carvão Mineral.....	23
5.2 Impactos do Carvão na Saúde Humana.....	25
5.3 Gás Natural	26
5.4 Derivados de Petróleo.....	27
6. MATRIZ ELÉTRICA GAÚCHA: TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO	28
6.1 Energia Eólica	28
6.2 Energia Solar Fotovoltaica	29
6.3 Bioenergia	32
6.4 Integração e atualização de Redes e Infraestrutura.....	33
6.5 Sistemas de Armazenamento de Energia	34
7. POLÍTICAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO RIO GRANDE DO SUL	36
8. ANÁLISES DAS EMISSÕES DE GEES NA MATRIZ ELÉTRICA GAÚCHA (1997 – 2024)	38
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS	43

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento exponencial da concentração de gases do efeito estufa (GEEs) na atmosfera no último século, criou-se a necessidade de substituir as fontes fósseis por renováveis na matriz energética. Esse processo, conhecido como transição energética, é, atualmente, um dos maiores desafios da humanidade na tentativa de frear o aquecimento global. Nesse contexto, uma das táticas mais bem-sucedidas para reduzir as emissões de GEEs foi a diminuição da utilização do carvão mineral em favor de outras formas de geração de energia. Segundo o IPCC (2014), a combustão do carvão é o método mais poluente de geração de eletricidade, com um valor mediano de emissões ao longo do ciclo de vida igual a 820 gCO₂eq/kWh. Esse valor é 59,8% superior às emissões do gás natural (490 Gco₂eq/kWh) e aproximadamente 74,5 vezes maior que as emissões da energia eólica *onshore* (11 gCO₂eq/kWh).

A Agência Internacional de Energia (IEA) aconselha que os países devam ter como meta uma redução quase total da produção de carvão até 2040, diminuindo também a produção de petróleo e gás em três quartos até 2050 (em comparação com os níveis de 2020), além de triplicar a capacidade instalada de renováveis até 2030. Essas medidas representariam a maior redução das emissões de gases do efeito estufa no Cenário Net Zero para 2030 (IEA, 2023). Dessa forma, mesmo que a maioria das emissões brasileiras não seja proveniente do setor energético, o qual representou cerca de 17% das emissões de GEEs em 2021, conforme o Observatório do Clima (2023), é imprescindível que os governos federais e estaduais efetivem medidas para acelerar a transição energética, possibilitando ao país alcançar suas metas ratificadas no Acordo de Paris.

Nesse contexto, o tema da pesquisa se justifica pela necessidade de refletir sobre o andamento da descarbonização em todas as escalas, visando construir subsídios para traçar estratégias mais eficientes de redução de emissões em todos os setores, incluindo o energético. Quanto à escolha da área da pesquisa, o estado do Rio Grande do Sul (RS) tem 19% da sua capacidade instalada de geração de energia elétrica dependente de fontes fósseis, enquanto a média nacional é de 15,17% (ANEEL, 2024a), o RS conta com 80% das reservas minerais de carvão do país (CRM, 2020), além de ser o 5º maior emissor de GEEs, considerando apenas o setor de energia (Observatório do Clima, 2024a). Ademais, A escolha do período

temporal da pesquisa (1997 - 2024) se justifica porque o Protocolo de Quioto foi o primeiro acordo internacional a tratar da redução da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera.

1.1 Objetivos Geral e Específicos

O presente trabalho tem como objetivo principal fazer uma análise do processo de transição energética do Rio Grande do Sul, focando no setor elétrico, a partir de 1997, ano da assinatura do Protocolo de Quioto.

Considerando o objetivo geral proposto da pesquisa, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Descrever as emissões de GEEs na matriz elétrica do Rio Grande do Sul durante o período analisado;
- Analisar as políticas do estado gaúcho quanto ao tema transição energética na matriz elétrica;
- Sugerir caminhos para a aceleração da descarbonização do setor energético do estado do Rio Grande do Sul.

2. METODOLOGIA

Este trabalho tem como base a pesquisa explicativa, com abordagem quali-quantitativa, com levantamento bibliográfico e pesquisa documental, com enfoque político e ambiental. Quanto às fontes utilizadas na pesquisa documental de análise do estudo o período de 1997 a 2024.

A técnica utilizada para o levantamento de dados referente, ao período da pesquisa, é da documentação indireta, imprescindível por trazer conhecimentos já elaborados e fundamentais para remontar a sucessão de fatos que construíram o problema da pesquisa. É a etapa em que se busca informações prévias, por meio da pesquisa documental e a pesquisa bibliográfica (Lakatos e Marconi, 2003).

2.1 Pesquisa Bibliográfica

Sobre a pesquisa bibliográfica, foi desenvolvida com base em publicações, livros e artigos científicos, de acordo com Gil (2002). Em um primeiro momento, foram realizadas leituras de artigos científicos, livros e relatórios técnicos sobre a transição energética, a fim de embasar o referencial teórico do trabalho, os quais têm o objetivo de responder a um problema com a utilização de materiais que passaram pelo crivo da Ciência para serem divulgados em diferentes meios, como jornais, revistas, páginas de artigos online e livros, entre outros. O pesquisador deve selecionar o material bibliográfico disponível, optando por fontes renomadas e seguras, dentre a extensa lista de publicações que tangem o paradigma definido para o estudo. Alguns cuidados para alcançar bons objetivos devem ser tomados, como a priorização de títulos originais em detrimento de traduções, ler obras mais gerais antes das mais específicas, recorrer à formulação de autores clássicos e utilizar registros midiáticos, tal qual reportagens, apenas para ilustrar um contexto, nunca para comprovar, diretamente, uma suposição científica (Bastos e Ferreira, 2016).

2.2 Pesquisa Documental

Em um segundo momento, foi realizada a pesquisa documental. Segundo Gil (2002), esse tipo de pesquisa assemelha-se muito à pesquisa bibliográfica. A diferença essencial entre ambas está na natureza das fontes. Enquanto a pesquisa

bibliográfica se utiliza fundamentalmente das contribuições dos diversos autores sobre determinado assunto, a pesquisa documental vale-se de materiais que ainda não receberam um tratamento analítico, ou que ainda podem ser reelaborados conforme os objetos da pesquisa.

A Pesquisa Documental caracteriza-se pela fonte de coleta de dados ser restrita a documentos, como relatórios, pesquisas estatísticas, material cartográfico, gráficos, publicações parlamentares e administrativas etc. Para buscar dados precisos, os documentos oficiais terão prioridade na recolha de dados, já que apresentam fontes de caráter público, portanto, carregam compromissos de veracidade aos seus leitores (Lakatos e Marconi, 2003). Do mesmo modo, também serão analisados documentos organizacionais (relatórios de organizações governamentais e Organizações Não Governamentais – ONGs), documentos jurídicos (leis e relatórios), além de base de dados estatísticos que sejam pertinentes ao tema “Transição energética no estado do Rio Grande do Sul”.

2.3 Organização Metodológica

A pesquisa é parte da organização metodológica com base no trabalho de Libault (1971), no qual são propostos quatro níveis da pesquisa geográfica, sintetizando como o pesquisador deve subdividir as etapas do seu trabalho (Figura 1). Começando pelo nível compilatório, momento da coleta de dados, seguido pelo nível correlatório, quando se avalia o grau de fidedignidade dos dados e o peso que cada um deles deve ter conforme a proposta da pesquisa. Nesse sentido, sobre o nível correlatório, Libault (1971, p 6) afirma:

“Nessa altura, podemos considerar como completo, sob qualquer forma, o conjunto dos dados necessários. Mas sabemos também que todas as linhas não merecem o mesmo grau de fidedignidade. Com efeito, aqueles que podem provir de sondagens apresentam um intervalo de confiança calculável; aqueles que provém da mediação direta sobre os mapas geográficos apresentam a exatidão que caracteriza o documento, e que pode ser calculada pela cartometria; aqueles subjetivos introduzidos pela função escalão sim ou não, valem o que valem a alternativa. Os fornecidos pelas repartições públicas devem ser considerados como exatos, porque não temos a possibilidade de verificar. Uma primeira distinção consistirá em aplicar para cada série um coeficiente verdade de 0 a 100 (sem esquecer que a maior certeza do espírito humano raramente ultrapassa 98%). Esta avaliação pode ser utilizada depois para decidir da inclusão ou da exclusão do resultado na conclusão do trabalho. [...]”.

Figura 1 – As Quatro Fases da Pesquisa em Geografia



Fonte: Adaptado de Libault (1971).

Seguindo a lógica de pesquisa estabelecida pelo autor, as próximas etapas correspondem ao nível semântico e ao nível normativo, cujo principal objetivo está nas reflexões aferidas sobre os conjuntos de dados já levantados e organizados conforme a relevância do objeto de pesquisa. A primeira, determina objetivamente os fatos e relaciona-os entre si, busca localizar os problemas parciais e organizar seus elementos em um problema geral. A segunda, apesar do autor trabalhar em cima de dados estatísticos e possíveis regras matemáticas como ferramentas na obtenção de resultados, pode ser adequada a presente pesquisa mediante uma proposta para reorientar os caminhos da transformação da matriz energética do Rio Grande do Sul, sustentada pela estrutura geral da ciência geográfica, explicando, contextualizando e quantificando os elementos de uma determinada região (Libault, 1971).

2.4 Limitações da Metodologia

O levantamento bibliográfico enfrentou limitações que impactaram o desenvolvimento do estudo, embora os objetivos iniciais da pesquisa incluíssem uma análise completa da transição da matriz energética, então optou-se por restringir o foco à matriz elétrica. Essa decisão justifica-se pela amplitude do tema, que demandaria um tempo incompatível com os prazos disponíveis.

Nesse contexto, o surgimento de lacunas em documentos que abordem os registros históricos de emissões de GEEs e nos arquivos de políticas energéticas, representa um desafio. Para uma maior confiabilidade, os registros de dados secundários foram consultados em fontes oficiais, como órgãos governamentais, institutos de pesquisas independentes e organizações não governamentais.

A utilização de dados secundários implica na dependência de fontes pré-existentes, que nem sempre estão alinhadas aos objetivos específicos da análise proposta. Nesse contexto, a ausência de coleta de dados primários e de pesquisa de campo demanda um esforço ampliado para sistematizar informações que subsidiem o direcionamento metodológico do estudo. Outra limitação reside na inexistência de entrevistas com atores estratégicos, como formuladores de políticas públicas, representantes do setor energético e integrantes da sociedade civil, o que restringe a captação de nuances e perspectivas subjetivas capazes de elucidar fatores influentes na transição energética estadual. Essas lacunas metodológicas decorreram das restrições temporais inerentes ao cronograma estabelecido.

Quanto à análise de políticas públicas voltadas para o setor energético, o desafio observado ocorreu pela pluralidade de atores envolvidos com a questão, já que passa pelo escopo de órgãos internacionais, pela política nacional e as iniciativas do próprio estado para desenvolver planos de transformação da matriz energética. Também, a dinâmica política, econômica e social pode influenciar significativamente os resultados das políticas, e essas influências nem sempre são capturadas de forma completa em documentos oficiais.

O recorte temporal da pesquisa (1997-2024) compreende um período extenso, de rápidas transformações nos cenários tecnológico, econômico e ambiental, significando a mudança e a reformulação da compreensão do uso da matriz energética. Sendo assim, as constantes alterações nas políticas públicas e a curta longevidade de medidas para a geração de energia dificultam a interpretação e a real atribuição de resultados das iniciativas tomadas a época.

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 Combustíveis Fósseis e Gases do Efeito Estufa

O efeito estufa é um fenômeno atribuído à emissão de gases que, ao serem lançados na atmosfera, absorvem e reemitem radiação infravermelha, resultando no aquecimento do sistema climático (IPCC, 2023). Substâncias como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e o vapor d'água são denominadas Gases de Efeito Estufa (GEEs) e figuram entre os principais responsáveis pelo aquecimento global. Enquanto o vapor d'água tem concentração regulada naturalmente pelo ciclo hidrológico, os demais GEEs são intensificados por atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, agropecuária e processos industriais. Além disso, outros óxidos de nitrogênio (NO_x), como NO e NO₂, contribuem indiretamente para o efeito estufa ao participarem da formação de ozônio troposférico (O₃), outro GEE. A emissão desses gases altera o clima global e impacta a saúde humana, principalmente pelo aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, como ondas de calor, secas, enchentes e ciclones (IPCC, 2021).

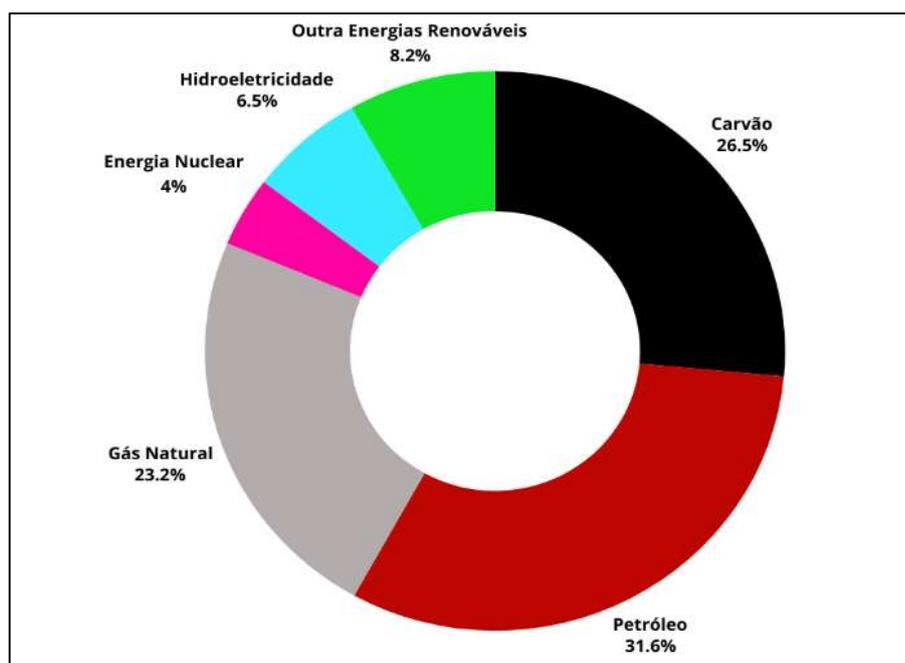
Desse modo, perante os efeitos que alteram a dinâmica atmosférica da Terra, tornaram-se necessárias medidas para reduzir as emissões geradas pelo setor energético, significando uma estratégia de prioridade global. Para melhor quantificar esses gases foi criado o termo "carbono equivalente" que se refere a uma unidade de medida utilizada para expressar as emissões de GEEs em termos equivalentes ao CO₂. Essa conversão é realizada com base no Potencial de Aquecimento Global (PAG) de cada gás, que indica o impacto de aquecimento global de cada GEE em comparação ao CO₂, considerando um horizonte de tempo específico, geralmente de 100 anos. Por exemplo, o metano (CH₄) possui um PAG de 28-34 vezes maior que o CO₂, o que significa que uma tonelada de CH₄ equivale ao efeito de 28-34 toneladas de CO₂ no aquecimento global (IPCC, 2021).

Quanto às fontes de emissões de GEE, estas derivam, em grande parte, da queima de combustíveis fósseis. Tais combustíveis são definidos como fontes de energia não renováveis, formados há milhares de anos a partir da decomposição de matéria orgânica. Sua exploração ocorre há séculos, mas foi intensificada com o avanço tecnológico. Durante a Primeira Revolução Industrial, entre o final do século XVIII e o início do século XIX, a extração de combustíveis fósseis deixou de ser

localizada e restrita a fontes superficiais, tornando-se uma atividade em larga escala. Atualmente, recursos como petróleo, carvão mineral e gás natural são amplamente empregados na geração de energia elétrica, no transporte e em processos industriais (IPCC, 2021).

O consumo de energia primária global a partir de combustíveis fósseis em 2023 totalizou 81,5% da matriz energética. Apesar de esse ser o menor percentual já registrado, a demanda por esses combustíveis continua em uma trajetória ascendente. No setor de energia, registrou-se o recorde nas emissões de GEE, ultrapassando 40 gigatoneladas de CO₂ equivalente em 2023 pela primeira vez (Energy Institute, 2024). A Figura 2 mostra a relevância de cada fonte no setor global de energia primária.

Figura 2 – Consumo de Energia Primária Global em 2023



Fonte: Adaptado de Statistical Review of World Energy 2024: 73rd edition (Energy Institute, 2024).

3.2 Matriz Energética e Matriz Elétrica

Uma distinção se faz necessária neste trabalho e cabe ressaltar as diferenças conceituais empregadas entre a matriz energética e a matriz elétrica. Para (EPE, 2022), a matriz energética é um termo amplo e engloba os seguintes setores: industrial (destinando ao consumo energético em processos produtivos); transportes

(responsável pelo uso de combustores de gasolina e diesel); residencial (referente ao consumo de eletricidade e gás natural para uso doméstico); comercial e de serviços (uso de eletricidade para manter suas atividades); público (instalações governamentais) e o setor agrícola (utiliza energia em atividades como irrigação e operação de maquinário).

A matriz elétrica faz parte da composição da matriz energética e compreende apenas a geração de eletricidade. O Brasil, possui a vantagem de possuir uma matriz elétrica predominantemente renovável, com cerca de 80% da geração advinda de hidrelétricas, parques eólicos, usinas solares e biomassa. Além disso, o quadro geral da matriz energética no Brasil é mais diversificado, utilizando-se de fontes não renováveis, como o petróleo e o gás natural, direcionados principalmente ao transporte e indústria (Brasil, 2023; ANEEL, 2024c).

3.3 Definição e Relevância da Transição Energética

A transição energética parte do pressuposto de uma transformação necessária para limitar o aquecimento global a 1,5°C acima das condições pré-revolução-industrial. Para isso, define-se pela mudança de uma matriz energética de alta emissão de carbono, produzida pela transformação de combustíveis fósseis, para uma matriz energética mais limpa e viavelmente econômica, focada em fontes renováveis, como a energia solar, eólica, hídrica e biomassa, assim como, opções de baixo carbono, como a energia nuclear (IPCC, 2018; IEA, 2021). Dado que o setor de energia é responsável por aproximadamente 35% das emissões globais de CO₂, a transição energética se consolida como uma medida urgente de mitigação das mudanças climáticas (IEA, 2021).

Nas últimas décadas foram elaborados relatórios como o *Special Report: Global Warming of 1.5 °C* (IPCC, 2018) e o *Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach* (IEA, 2021) e foram estabelecidas agendas globais sobre desenvolvimento energético e sustentabilidade como o Protocolo de Quioto e o Acordo de Paris, os quais convergem sobre a necessidade de esforços ambiciosos para reduzir substancialmente os níveis de emissões de GEE (Gases de Efeito Estufa).

O objetivo dos acordos internacionais é alcançar as metas de emissões líquidas zero até 2050, através de medidas que promovam a descarbonização do setor

energético, o aumento da eficiência energética, a transformação do setor de transporte, o desenvolvimento de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, a mudança no uso da terra e agricultura, a modificação do setor industrial e a mudança de políticas e governanças que determinam as iniciativas ambientais. (IPCC, 2018; IEA, 2021).

É importante ressaltar que a transição energética não é um processo geograficamente uniforme, variando conforme as políticas, infraestrutura e recursos disponíveis em cada região. No Brasil a presença de hidrelétricas na matriz energética é elevada, o que confere ao país um perfil de baixo carbono comparado com as nações industrializadas (Brasil, 2023).

3.4 Energia e Desenvolvimento Sustentável

A transição para fontes renováveis é parte integral do desenvolvimento sustentável, conceito que engloba crescimento econômico, inclusão social e proteção ambiental. Essa perspectiva é enfatizada nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especificamente no ODS 7, que visa garantir o acesso à energia de baixo carbono e acessível para todos (ONU, 2015). O acesso à energia sustentável é fundamental para a erradicação da pobreza e para a promoção de uma sociedade mais equitativa e saudável. O IPCC (2021) afirma que a expansão da energia renovável e de baixo carbono pode reduzir significativamente as emissões de GEEs e, ao mesmo tempo, gerar empregos e estimular a inovação tecnológica em diferentes setores econômicos, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável.

3.5 Acordos Internacionais e o Protocolo de Quioto

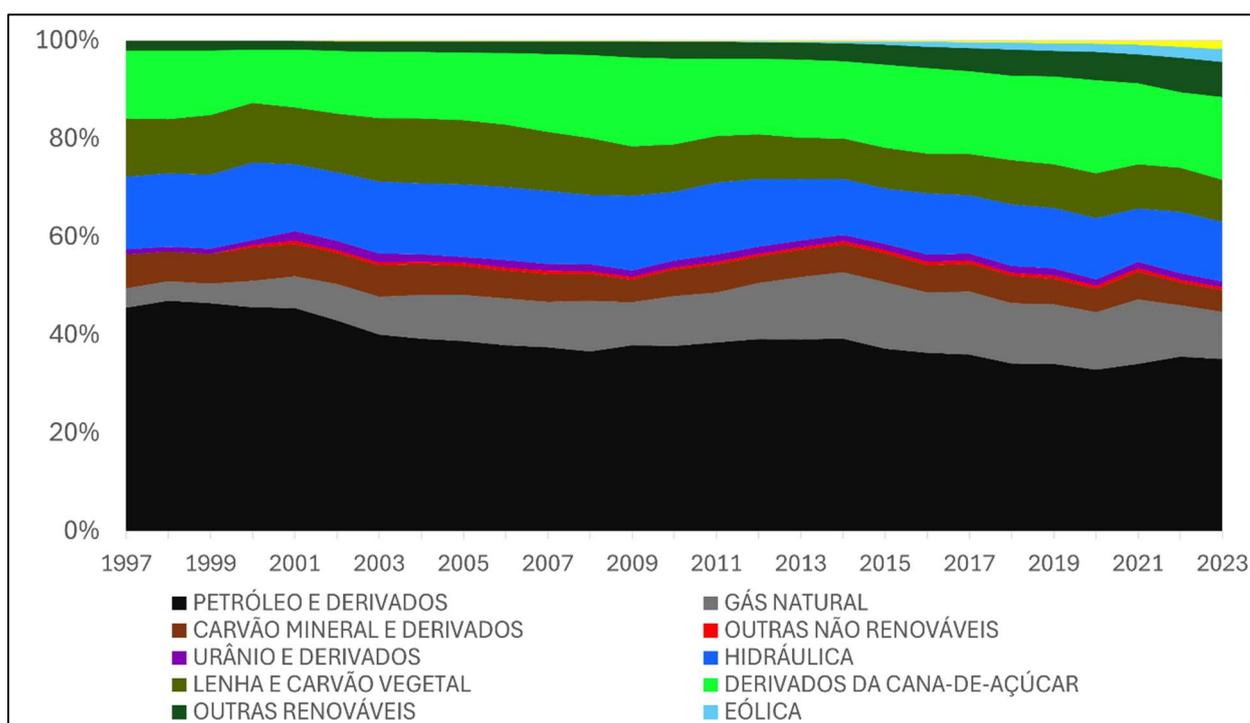
O Protocolo de Quioto, assinado em 1997, foi um marco na política climática internacional, representando o primeiro tratado vinculativo para a redução das emissões de GEEs por parte dos países desenvolvidos. Este acordo introduziu mecanismos inovadores, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o Comércio de Emissões, que permitiram aos países e empresas compensar suas emissões investindo em projetos de redução de GEEs em nações em desenvolvimento (UNFCCC, 1997). Conforme descreve o IPCC (2021), o Protocolo

de Quioto estabeleceu as bases para o Acordo de Paris, assinado em 2015, que ampliou os compromissos climáticos a uma escala global e incluiu metas de mitigação para todos os países.

4. MATRIZ ENERGÉTICA E MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA: PANORÂMA GERAL

A matriz elétrica brasileira caracteriza-se por uma predominância de fontes renováveis, particularmente a energia hidrelétrica, que responde por aproximadamente 60% da geração de eletricidade nacional (Figura 3). Segundo a ANEEL (2024a), o Brasil é um dos países com a maior participação de fontes renováveis em sua matriz elétrica, incluindo também a energia eólica e solar, que vêm crescendo exponencialmente nos últimos anos. Embora esse perfil confira ao Brasil uma posição privilegiada em termos de sustentabilidade energética, no que tange à matriz energética, o país ainda enfrenta desafios para reduzir a dependência de combustíveis fósseis no setor de transportes, que utiliza majoritariamente gasolina e diesel (IEA, 2021).

Figura 3 – Matriz Energética Brasileira por Fonte de Energia (1997 – 2023)



Fonte: Adaptado de BEN (Séries Históricas e Matrizes), Capítulo 1: Análise Energética e Dados Agregados no período de 1970 a 2023 (EPE, 2024a).

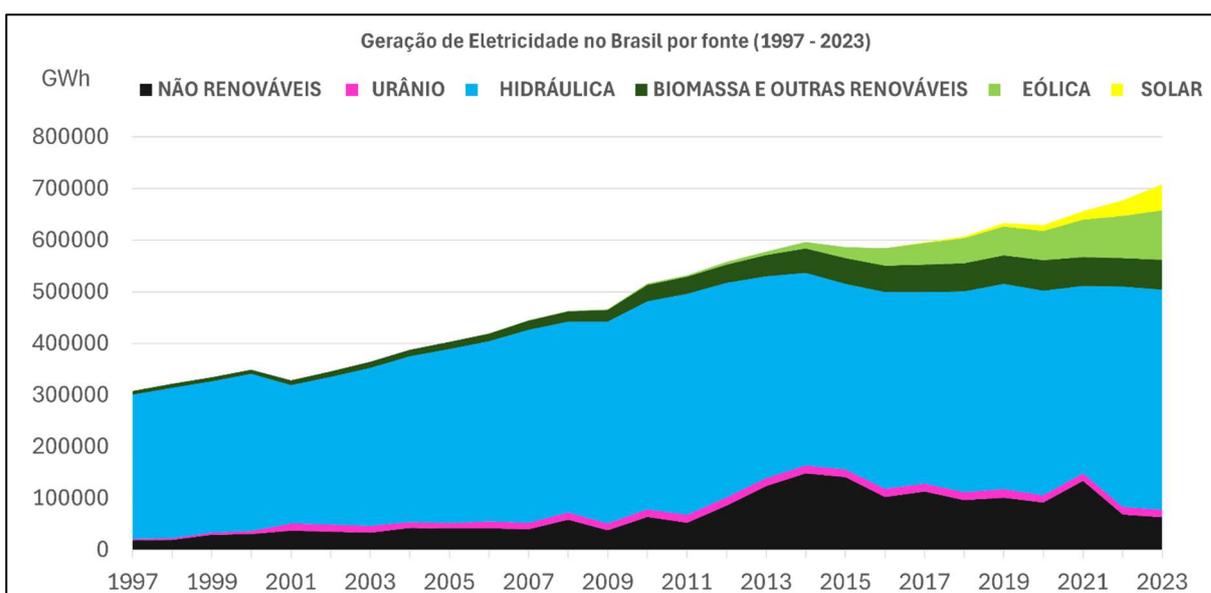
Ainda sobre a matriz energética brasileira, a transição para as fontes renováveis no setor de eletricidade, tem se intensificado desde a década de 2010, com um crescimento significativo da geração distribuída, especialmente de energia solar fotovoltaica. Conforme dados da ANEEL (2024b), a capacidade instalada de

energia solar no Brasil passou de menos de 1 GW em 2015 para mais de 12 GW em 2023, refletindo políticas de incentivo e redução de custos das tecnologias solares. A IEA (2021) observa que o Brasil tem um potencial elevado para expandir sua geração de energias renováveis, particularmente em regiões com alta incidência solar e potencial para energia eólica, como o Nordeste.

O Observatório do Clima (2023) revela que o setor energético brasileiro contribui com cerca de 17% das emissões de GEEs nacionais, destacando-se as emissões de CO₂ associadas à geração térmica e ao transporte (Figura 4).

Para avançar nas metas climáticas, o Brasil tem investido em políticas de incentivo à geração distribuída e à expansão de tecnologias renováveis, visando diversificar ainda mais sua matriz energética e reduzir as emissões do setor de energia.

Figura 4 – Matriz Elétrica Brasileira por Fonte de Eletricidade (1997 – 2023)



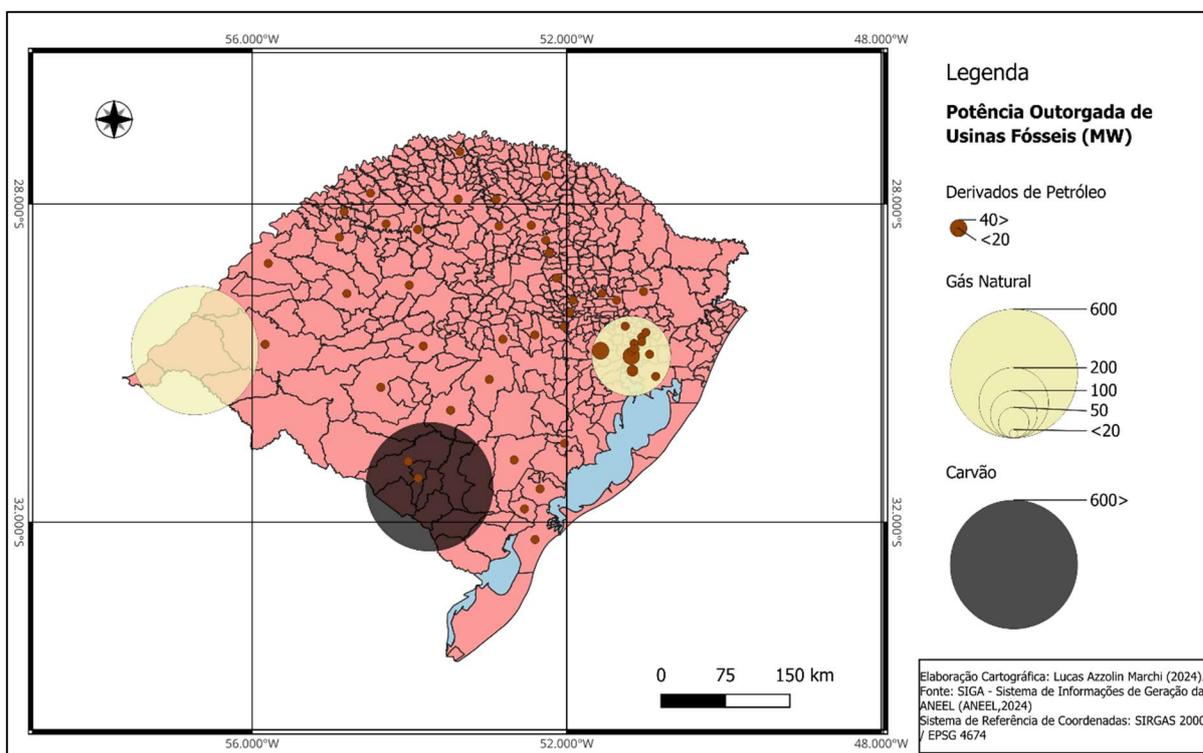
Fonte: Adaptado de BEN - Séries Históricas e Matrizes - Capítulo 5 (Balanço dos Centros de Transformação) 1970 a 2023 (EPE, 2024a).

5. MATRIZ ELÉTRICA GAÚCHA: FONTES FÓSSEIS

Segundo a ANEEL (2024a) as Usinas termelétricas fósseis representam 1,8 GW de potência instalada no Rio Grande do Sul, cerca de 18,47% do total, estimado em 9,91 GW. Entretanto, a espacialização dessas fontes é variada. Enquanto as termelétricas a carvão estão presentes apenas no município de Candiota, a potência outorgada das termelétricas que utilizam gás natural está concentrada em dois polos: Uruguaiana e Canoas.

Quanto à potência das usinas termelétricas de derivados de petróleo, pode-se dizer que é espacialmente dispersa e tende a uma capacidade menor por município, quando comparada as outras fontes (Figura 5). Nos próximos subcapítulos o papel dessas fontes será abordado de maneira individual.

Figura 5 – Mapa da Potência Outorgada de Usinas Termelétricas Movidas a Combustíveis Fósseis por Município do Rio Grande do Sul em 2024



Elaboração do autor com fundamento em Sistema de Informações de Geração da ANEEL (ANEEL, 2024a).

5.1 Carvão Mineral

No início da elaboração deste trabalho, a potência outorgada de termelétricas a carvão estava concentrada em apenas duas usinas: Pampa Sul e Candiota 3.

A termelétrica Candiota foi desligada em 1º de janeiro de 2025, após o término do acordo de comercialização de energia e, posteriormente, a Companhia Riograndense de Mineração (CRM) prorrogou por 60 dias o contrato de fornecimento de carvão à usina (KLEIN, 2025). Diante desse contexto, optou-se por utilizar no estudo as informações referentes às duas usinas, que somavam cerca de 7% da capacidade de geração elétrica do estado em 2024 (ANEEL, 2024a).

Nesse sentido, a importância da geração de eletricidade por meio da queima de carvão mineral no Rio Grande do Sul, frente a um protagonismo menor em escala nacional (1,47% da potência outorgada), pode ser explicada pelas reservas de carvão mineral do estado, estimadas em 80% das reservas brasileiras (ANEEL, 2024a; CRM, 2020). As camadas de carvão das jazidas gaúchas estão situadas na formação geológica Rio Bonito, parte da Bacia do Paraná, fonte dos depósitos de carvão dos demais estados sulistas (GOMES *et al*, 1998).

O Rio Grande do Sul possui um histórico de exploração de carvão mineral na região do Baixo Jacuí (Lei Nº 15047 de 29/11/2017) compreende o Complexo Carboquímico do Baixo Jacuí, abrangendo os territórios dos municípios de Arroio dos Ratos, Barão do Triunfo, Butiá, Charqueadas, Eldorado do Sul, General Câmara, Minas do Leão, São Jerônimo e Triunfo). Atualmente o Baixo Jacuí não possui termelétricas a carvão (RS, 2017 e CRM, 2020).

Atualmente localização de termelétricas a carvão no estado do Rio Grande do Sul estão situadas no município de Candiota, dentro do Complexo Carboquímico da Campanha, abrangendo os territórios de Aceguá, Bagé, Caçapava do Sul, Dom Pedrito, Hulha Negra, Lavras do Sul, Pinheiro Machado e Pedras Altas.

Economicamente, a mineração de carvão e a operação das usinas termelétricas movidas a carvão sustentam uma cadeia produtiva que inclui serviços de transporte, processamento e manutenção, o que, segundo a CRM, representa uma contribuição significativa para o Produto Interno Bruto (PIB) do estado (CRM, 2020). No entanto, em 2019 existiam somente 606 trabalhadores empregados na extração e beneficiamento de carvão mineral no Rio Grande do Sul, número que representa 0,02% do total de vínculos de emprego formal no estado naquele ano. Essa quantidade de trabalhadores formais significa um decréscimo quando comparada a 2014 (861 empregados) e 2006 (632 empregados). Apesar da pequena porcentagem

no contexto estadual, o impacto econômico do carvão é expressivo em municípios específicos, como Butiá e Candiota, os quais somam 481 trabalhadores formais nas atividades de extração e beneficiamento de carvão mineral, ou 79,4% de todos os trabalhadores formais do estado (Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos – DIEESE, 2019). Corroborando para o caráter localizado da indústria carvoeira no Rio Grande do Sul, pode-se dizer que:

O município de Candiota contava, em 2019, com um total de 2.533 trabalhadores formais, sendo que os vinculados à extração de carvão mineral (257) e ao beneficiamento de carvão mineral (30) representavam 11,3% da mão de obra da localidade. (...) A remuneração média dos trabalhadores do setor ficou acima da média salarial do conjunto de atividades no município (R\$ 3.200,29). Na extração de carvão mineral, a média correspondeu a R\$ 4.683,92 - 46% superior à média geral; e, no beneficiamento do carvão, a R\$ 6.823,34 - mais que o dobro da média geral (Dieese, 2019, p. 10)

Esse contexto de grande discrepância entre municípios quanto a relevância econômica do carvão, somado ao número total de empregos formais diretos, apontam para a possibilidade de descontinuar a utilização desse mineral no Rio Grande do Sul. Quantificar o impacto econômico e social dessa descontinuação, que é mais amplo que o número de vínculos empregatícios diretos, não faz parte desse trabalho. No entanto, considerando a emergência climática e a consequente necessidade de diminuir as emissões de GEEs, bem como o valor médio das emissões CO₂, equivalente do carvão na geração de eletricidade (cerca de 60% maior que a segunda fonte mais emissora, o gás natural), é necessário questionar o futuro das termelétricas movidas por essa fonte na rede elétrica do estado (IPCC, 2014). O arquivamento do Projeto da Mina Guaíba em 2022, que faria parte do Complexo Carbonífero do Baixo Jacuí pode ser visto, em parte, por essa ótica.

5.2 Impactos do Carvão na Saúde Humana

Sobre a geração de energia a partir do carvão mineral, é preciso constatar que está associada a riscos significativos à saúde humana, especialmente devido à emissão de poluentes durante sua combustão.

A queima do carvão em termelétricas libera material particulado fino (PM_{2,5}), dióxido de enxofre (SO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x), que elevam a incidência de doenças respiratórias, como asma e bronquite crônica, e agravam condições cardiovasculares, incluindo infartos e acidentes vasculares cerebrais (HENDRYX;

ZULLIG; LUO, 2020). Esses autores, indicam que estudos realizados em comunidades próximas às usinas apresentam taxas elevadas de mortalidade prematura e hospitalizações, com correlação direta entre a proximidade geográfica e a severidade dos impactos.

Além da poluição atmosférica, a liberação de metais pesados, como mercúrio e chumbo, contamina solos e recursos hídricos, comprometendo a segurança alimentar e hídrica. Crianças expostas a esses contaminantes têm maior risco de distúrbios neurológicos e de desenvolvimento (HENDRYX; ZULLIG; LUO, 2020). O descarte de cinzas, resíduo tóxico da combustão, intensifica a exposição a elementos radioativos e metais, perpetuando ciclos de intoxicação crônica. Esses impactos são agravados em populações vulneráveis, reforçando desigualdades socioambientais (HENDRYX; ZULLIG; LUO, 2020).

5.3 Gás Natural

Além do carvão mineral, a matriz elétrica do Rio Grande do Sul inclui 903 MW de potência outorgada para termelétricas a gás natural, correspondendo a 9,12% de sua capacidade total de geração. Esse montante posiciona o gás natural como a terceira principal fonte energética do estado (considerando apenas a geração centralizada), atrás apenas das hidrelétricas (56,53%) e da energia eólica (20,60%) (ANEEL, 2024a). Geograficamente, a geração a gás concentra-se em Uruguaiana (640 MW) e Canoas (249 MW), municípios estratégicos devido à proximidade com gasodutos bolivianos e à demanda industrial, respectivamente. No entanto, a dependência de importação de gás natural expõe vulnerabilidades geopolíticas e logísticas, uma vez que o estado não possui reservas expressivas desse recurso em seu território (ANEEL, 2024b).

Mesmo que o gás natural represente uma parcela significativa na matriz elétrica do estado, seu consumo no Rio Grande do Sul é ainda mais expressivo em setores industriais, como o de alimentos, o petroquímico e o de fertilizantes, que necessitam de fontes de energia consistentes e de alta densidade para atender suas demandas produtivas. Além disso, o gás natural também desempenha um papel crescente na geração elétrica em usinas termelétricas de menor escala, que complementam a oferta de energia em períodos de alta demanda ou baixa disponibilidade de fontes renováveis (ANEEL, 2024c).

No cenário da transição energética, o gás natural tem sido frequentemente defendido como um combustível de transição devido à sua menor intensidade de emissões de dióxido de carbono em comparação com o carvão e o petróleo. Contudo, essa narrativa é contestada. Primeiramente, destaca-se que, embora suas emissões de CO₂ sejam relativamente mais baixas, o gás natural é composto majoritariamente por metano (CH₄), um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento global significativamente maior que o dióxido de carbono. Vazamentos durante a extração, transporte e distribuição do gás natural podem neutralizar os benefícios esperados em termos de redução de emissões (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2023; Lewenkopf, 2021). Vale destacar que o investimento contínuo em infraestrutura para exploração e distribuição de gás natural pode atrasar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias verdadeiramente renováveis, como a solar e a eólica, perpetuando a dependência de combustíveis fósseis e comprometendo os objetivos de descarbonização a longo prazo (Coalizão Energia Limpa, 2024).

5.4 Derivados de Petróleo

Embora o Rio Grande do Sul não seja produtor de petróleo, o estado possui infraestrutura relevante para refino, desempenhando um papel importante na cadeia nacional de derivados, contribuindo com 8,1% da transformação nacional, com destaque para óleo diesel (9,5%) e gasolina A (9,2%). Esses produtos são prioritariamente destinados ao consumo nos setores de transporte e indústria, com participação residual na geração elétrica (RS, 2024c). Por consequência, a utilização de derivados de petróleo na matriz elétrica estadual permanece restrita, enquanto o estado foca no avanço de fontes renováveis para suprir suas demandas energéticas.

Ainda nesse contexto, segundo a ANEEL (2024a), em 2023, apenas 0,44% da eletricidade no Rio Grande do Sul foi gerada por derivados de petróleo. As duas maiores usinas termelétricas que utilizam esse combustível estão próximas de grandes centros de consumo: Canoas (72 MW de potência) e Triunfo (74 MW de potência). Sendo assim, a função das usinas que utilizam diesel, óleo combustível, e outros energéticos de petróleo está relacionada com a segurança do sistema elétrico no caso de intermitência das demais fontes. Esse papel é adequado para as usinas dessa classe de combustível devido a facilidade de transporte dos derivados de petróleo.

6. MATRIZ ELÉTRICA GAÚCHA: TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO

O estado do Rio Grande do Sul é um dos pioneiros no Brasil no que diz respeito à implementação de energias renováveis, um processo que começou a ganhar força nas décadas de 1990 e 2000 (EPE,2024a). Isso foi impulsionado por políticas nacionais e internacionais que buscavam mitigar as mudanças climáticas e diversificar as matrizes energéticas regionais. A partir de 2010, o estado passou a se consolidar como referência em energia eólica e, mais recentemente, em energia solar fotovoltaica, aproveitando suas condições geográficas e climáticas favoráveis. Embora o estado tenha avançado consideravelmente, ainda enfrenta desafios, como a dependência de financiamentos privados para expandir a infraestrutura necessária e a adaptação das redes de transmissão para integrar a energia gerada por fontes renováveis (IEA, 2021). Pensando nesse contexto, neste capítulo serão abordados, de maneira sintética, as potencialidades e desafios dessas tecnologias.

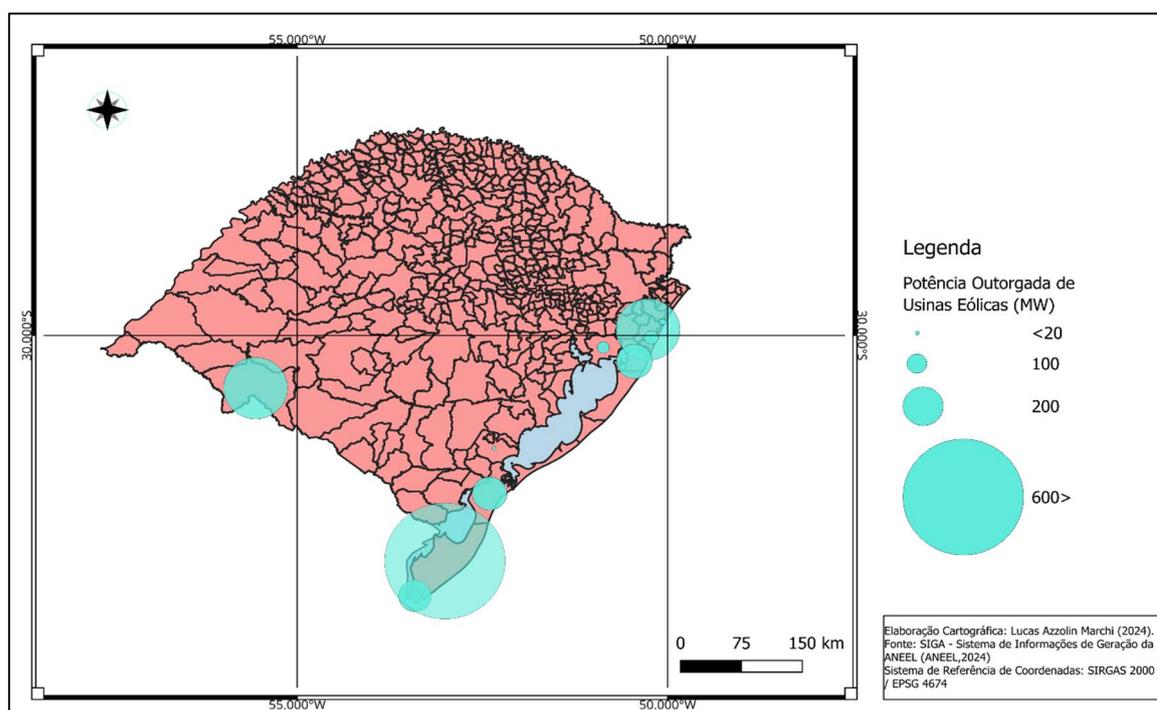
6.1 Energia Eólica

Nas últimas duas décadas, políticas públicas e incentivos fiscais foram determinantes para o crescimento do setor eólico. Leilões de energia realizados pelo governo federal fomentaram a construção de parques eólicos, muitos dos quais em áreas com baixa densidade populacional, reduzindo conflitos de uso do solo (Borges *et al*, 2023) Consequentemente, impulsionada pelas características geográficas favoráveis, a energia do vento se tornou um dos principais “combustíveis” de eletricidade do estado. Em 2024, o Rio Grande do Sul totalizou 1,95 GW da potência outorgada da fonte eólica (20% de toda a matriz gaúcha), o que denota 5,95% da capacidade nacional e posiciona o estado na 5ª posição entre os entes da federação (ANEEL, 2024a). Todavia, a capacidade instalada não é uniforme entre as regiões gaúchas, conforme demonstrado na Figura 6.

Naturalmente, as usinas eólicas estão instaladas nas regiões que apresentam ventos com alta regularidade e intensidade, características fundamentais para a eficiência das turbinas. Segundo o Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (RS, 2014), o litoral norte, abrangendo municípios como Osório, Tramandaí e Xangri-lá, é uma área privilegiada devido aos ventos constantes provenientes do oceano, com velocidade média acima de 7 m/s. Além disso, a região do extremo sul, em municípios como

Santa Vitória do Palmar e Rio Grande, também se destacam pela alta intensidade e estabilidade dos ventos, bem como a Campanha Gaúcha, que inclui os municípios de Bagé, Santana do Livramento e Dom Pedrito, os quais se caracterizam por terrenos planos, que propiciam a produção de energia em larga escala, oferece oportunidades para integrar a geração de energia renovável com atividades agrícolas e pecuárias.

Figura 6 – Mapa da Potência Outorgada de Usinas Eólicas por Município do Rio Grande do Sul em 2024



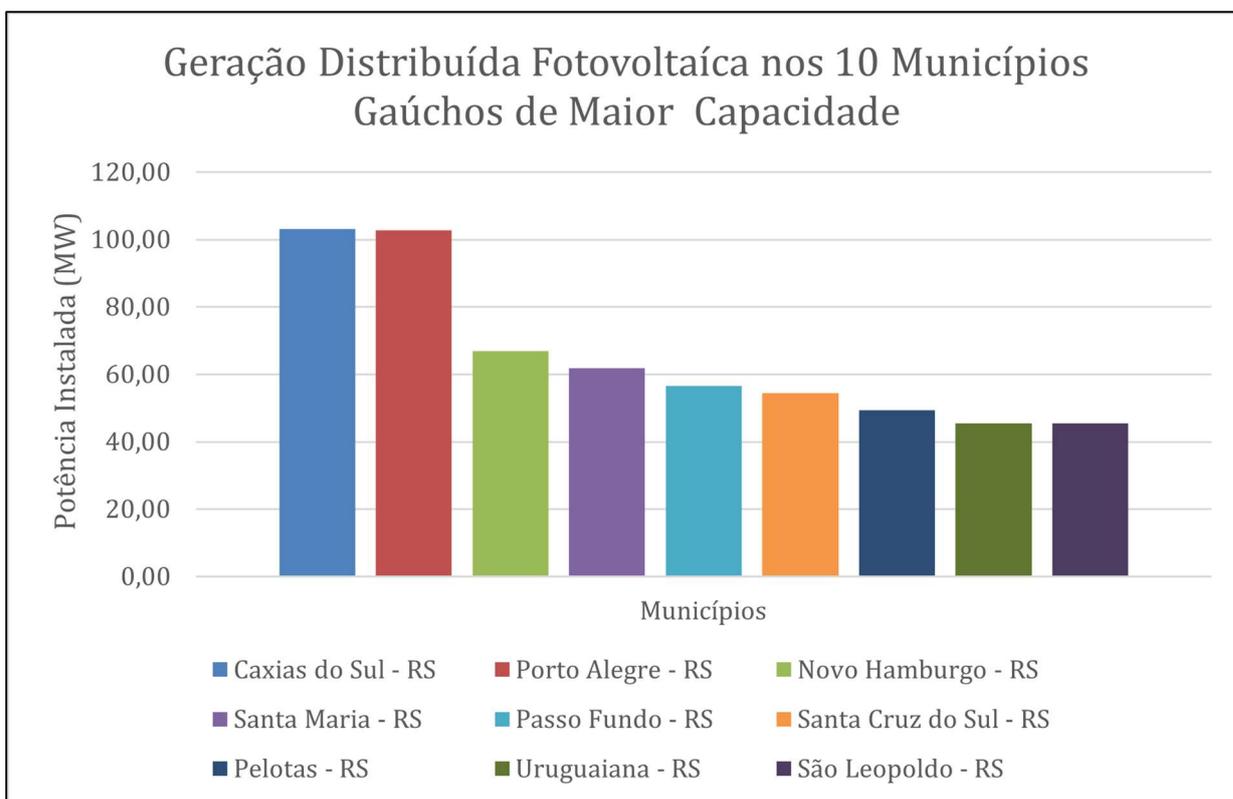
Elaboração do autor com fundamento em Sistema de Informações de Geração da ANEEL (ANEEL, 2024a).

Ainda que o estado tenha avançado na implementação de projetos, desafios permanecem, considerando que a integração da energia eólica à matriz elétrica requer modernização das redes de transmissão e planejamento para minimizar os impactos ambientais/sociais associados à instalação de grandes empreendimentos. A expansão das redes é essencial para que a energia gerada por parques eólicos seja integrada ao sistema elétrico nacional.

6.2 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica tem apresentado um crescimento vertiginoso no Rio Grande do Sul na última década, especialmente devido à expansão da geração distribuída, ou seja, aquela que ocorre próxima ou no local de consumo, geralmente nos telhados das casas e empresas. Segundo a ANEEL (2024a), considerando a geração centralizada, o estado gaúcho possui 47,84 MW de potência fiscalizada, o que representa 0,38% do total da geração fotovoltaica. No entanto, de acordo com a ANEEL (2024b), a capacidade total da geração descentralizada da energia fotovoltaica distribuída é de 3.131 MW, o que equivale a 99% desta categoria, espalhados por todos os 497 municípios do estado do Rio Grande do Sul (Figura 7).

Figura 7 – Geração Distribuída Fotovoltaica em municípios Gaúchos de Maior Potência Outorgada em 2024



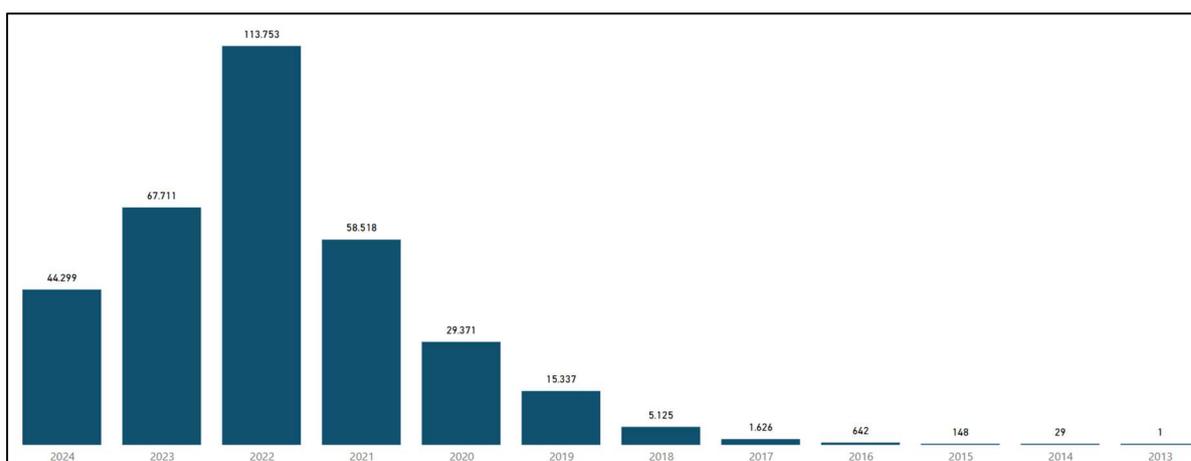
Fonte: Adaptado de Dados de Geração Distribuída da ANEEL (2024b).

Percebe-se, que o fatores climáticos são secundários para a espacialização da energia solar fotovoltaica distribuída, sendo que o fator determinante parece ser a população residente. Apesar disso, de acordo com o Atlas Solar do Rio Grande do Sul (Haag et al., 2018) existem diferenças de potencial entres as regiões gaúchas. Assim, a região oeste, que inclui cidades como Uruguaiana, Alegrete e São Borja, é uma das

mais promissoras para projetos solares, devido à alta incidência de luz solar e à disponibilidade de grandes áreas para instalação de usinas fotovoltaicas. A região noroeste, com destaque para municípios como Cruz Alta e Ijuí, também apresenta condições favoráveis para a geração de energia solar, sendo uma área em que pequenos e médios produtores agrícolas têm investido em sistemas fotovoltaicos para reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência energética. Já a região central, que abrange municípios como Santa Maria, Cachoeira do Sul e São Gabriel, combina boa irradiação solar com infraestrutura relativamente desenvolvida, tornando-se atrativa para investimentos em geração distribuída e centralizada.

Segundo (CORREIA DA SILVA *et al*, 2020), o crescimento da geração distribuída no Rio Grande do Sul reflete políticas públicas que facilitaram o acesso ao crédito a tecnologias renováveis, tornando viável a instalação de sistemas solares, em propriedades menores (Figura 8).

Figura 8 – Usinas Fotovoltaicas na Geração Decentralizada no período de 2011 a 2024



Fonte: Adaptado de Dados de Geração Distribuída (ANEEL, 2024b).

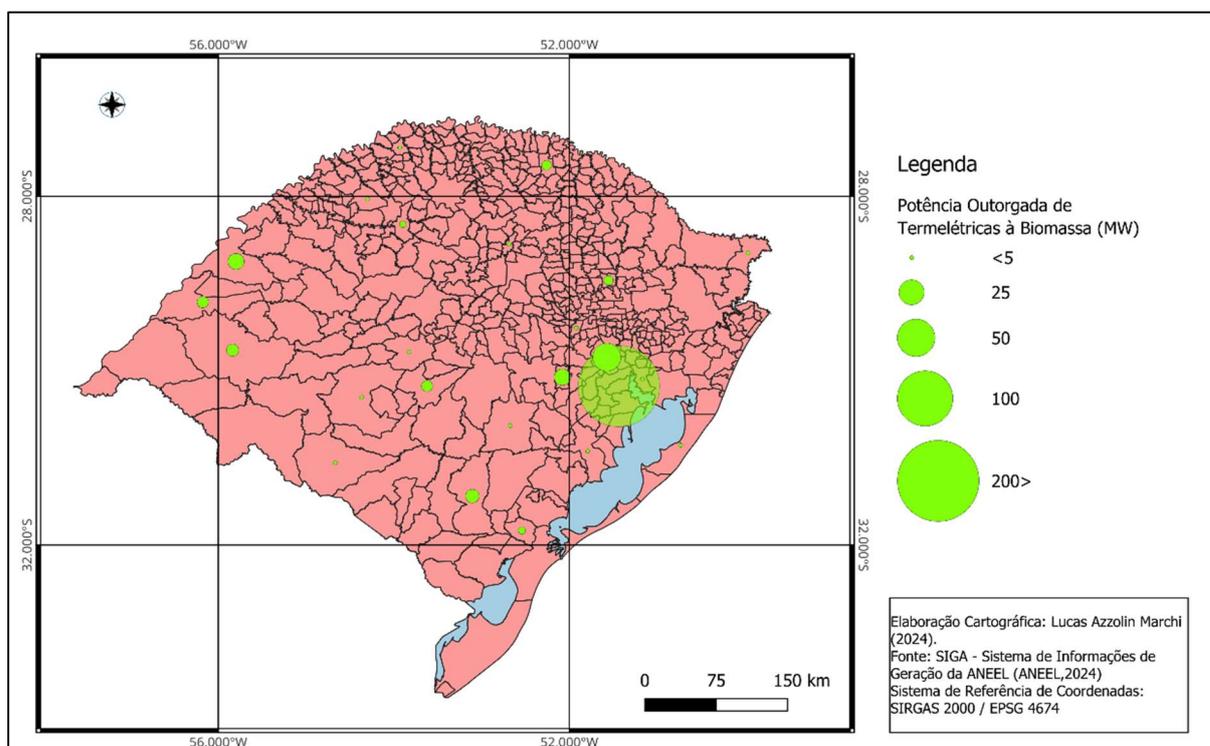
Os desafios estruturais e econômicos que ainda dificultam a expansão do setor estão na dependência de importações de componentes fotovoltaicos, como painéis solares, necessidade de capacitação técnica para instalação e manutenção de sistemas, os quais demandam maior atenção por parte do governo e da iniciativa privada e a intermitência dessa fonte, que não gera eletricidade durante a noite e exige a instalação de sistemas de armazenamento de energia, ainda incipientes na rede elétrica gaúcha.

6.3 Bioenergia

A geração de eletricidade a partir da biomassa contribuiu com cerca de 3,8% da matriz elétrica do Rio Grande do Sul em 2024 (EPE, 2024a), considerando que o estado do RS tem forte vocação agroindustrial e apresenta abundância de resíduos de origem agrícola, florestal e animal, os quais possuem alto potencial energético.

Para Konrad *et al* (2016), as principais fontes de biomassa utilizadas no estado incluem a casca de arroz, proveniente da expressiva produção arroseira; resíduos florestais, originários do setor madeireiro; resíduos agroindustriais, como bagaço de cana, palha de trigo e subprodutos do processamento de soja, além de dejetos animais provenientes da pecuária bovina e suína, utilizados na produção de biogás. As usinas termelétricas a biomassa tem ampla distribuição no território gaúcho, (Figura 9), mas a concentração da potência outorgada se situa na região metropolitana de Porto Alegre, considerando que essa concentração se refere à usina termelétrica da CMPC, no município de Guaíba/RS que utiliza o licor negro como combustível, um subproduto da produção de celulose.

Figura 9 – Mapa da Potência Outorgada de Geração Elétrica a partir de Biomassa por Município do Rio Grande do Sul em 2024



Fonte: Adaptado de Sistema de Informações de Geração da ANEEL (ANEEL, 2024a).

Quanto aos pontos positivos da geração de eletricidade pela queima de biomassa em qualquer hora do dia e que a biomassa contribui não apenas para a geração elétrica, mas também para o desenvolvimento socioeconômico de regiões produtoras, criando empregos e incentivando a economia circular. Além disso, o uso de resíduos reduz impactos ambientais ao evitar o descarte inadequado e emissões descontroladas de gases de efeito estufa (Barum, 2012).

Bandeira (2023) destaca que a pirólise surge como uma tecnologia promissora para aumentar o aproveitamento energético da biomassa disponível no estado, ressaltando seu potencial de conversão em produtos energéticos de maior valor agregado e que esse processo possibilita maior eficiência na conversão dos resíduos e abre novas oportunidades para a exploração energética de subprodutos agrícolas e florestais, porém algumas desvantagens precisam ser consideradas: a eficiência energética da biomassa na geração de eletricidade pode ser relativamente baixa quando comparada a outras fontes de energia.

Os custos logísticos associados à coleta, armazenamento e transporte de resíduos biomássicos, especialmente em longas distâncias, representam um grande desafio para a viabilidade econômica e ambiental da biomassa. (Lautala *et al*, 2018). A concorrência com outros usos potenciais para os resíduos, como sua aplicação na produção de fertilizantes ou na alimentação animal.

Segundo o IPCC (2014), a eletricidade gerada através da biomassa emite mais CO₂ equivalente, quando comparado a outras de baixo carbono, como a solar, eólica, hídrica e nuclear.

6.4 Integração e atualização de Redes e Infraestrutura

Como mencionado anteriormente, as regiões de maior potencial eólico e solar no Rio Grande do Sul frequentemente carecem de infraestrutura de transmissão adequada. Projetos de modernização da rede, como a implementação de redes inteligentes, são cruciais para viabilizar o crescimento sustentável dessas fontes. A implementação desses sistemas reduz as perdas de transmissão e melhora a confiabilidade do fornecimento (Piran *et al*, 2020).

Essas redes representam um elemento fundamental para viabilizar a transição energética no Rio Grande do Sul, já que permitem gerenciar de forma mais eficiente o consumo energético nos períodos de pico. Adicionalmente, sistemas avançados de

medição permitem que consumidores monitorem seu consumo em tempo real, promovendo hábitos mais sustentáveis e reduzindo custos.

6.5 Sistemas de Armazenamento de Energia

O armazenamento de energia elétrica desempenha um papel estratégico no atual contexto de transição energética, uma vez que permite mitigar a intermitência das fontes renováveis, como a solar e a eólica, garantindo maior estabilidade ao sistema elétrico (Silva & Morais, 2024). Esse sistema consiste em tecnologias que armazenam eletricidade em momentos de baixa demanda ou excesso de geração para liberá-la quando há maior necessidade, contribuindo para o equilíbrio entre oferta e demanda no sistema elétrico (Brondani, 2023).

Entre as principais tecnologias utilizadas para armazenamento de energia, destacam-se as baterias de íons de lítio, os sistemas de armazenamento por bombeamento hidráulico (*pumped hydro storage*) e os sistemas baseados em hidrogênio verde (EPE, 2019). As baterias de íons de lítio têm se popularizado devido à alta eficiência, rápida resposta e redução significativa nos custos nos últimos anos. Contudo, desafios relacionados ao descarte adequado e à escassez de materiais críticos, como o cobalto, permanecem como obstáculos para sua ampla adoção (ANEEL, 2024c).

Os sistemas de armazenamento por bombeamento hidráulico, por sua vez, representam a tecnologia mais madura e amplamente utilizada globalmente, devido à sua elevada capacidade de armazenamento e longa vida útil. Contudo, a implementação desses sistemas depende de condições geográficas específicas, o que pode limitar sua aplicação em algumas regiões (Silva & Morais, 2024). Alternativamente, o armazenamento de energia por meio de hidrogênio verde tem ganhado destaque, especialmente pela possibilidade de utilização em setores além do elétrico, como na indústria química (Müller, 2024).

Além das barreiras tecnológicas e econômicas, existem desafios regulatórios e de planejamento que devem ser superados para viabilizar a inserção desses sistemas no mercado elétrico. De acordo com a EPE (2019), é essencial estabelecer modelos regulatórios que reconheçam os múltiplos serviços prestados pelos sistemas de armazenamento, como suporte à rede, controle de frequência e participação no mercado de capacidade. Políticas públicas e incentivos regulatórios têm sido

fundamentais para fomentar projetos-piloto e pesquisas na área, visando aumentar a eficiência dos sistemas e reduzir os custos de implementação (ANEEL, 2024c).

Esses sistemas de armazenamento de energia elétrica representam uma solução de destaque para a modernização e resiliência dos sistemas elétricos, especialmente em cenários de crescente penetração de fontes intermitentes. A combinação de avanços tecnológicos, políticas públicas eficazes e investimentos estratégicos será determinante para que o Rio Grande do Sul possa maximizar os benefícios dessas tecnologias no processo de transição energética.

7. POLÍTICAS DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO RIO GRANDE DO SUL

O processo de transição energética no Rio Grande do Sul insere-se em um contexto mais amplo de esforços globais para mitigar os impactos das mudanças climáticas e reduzir as emissões de GEEs. Desde a assinatura do Protocolo de Quioto, em 1997, o estado tem buscado aproveitar as oportunidades apresentadas pela ascensão das novas energias renováveis. Inicialmente, as ações foram pouco ambiciosas, pautadas principalmente pela adequação às políticas públicas federais, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), criado em 2004. Entretanto, é preciso reconhecer que o Rio Grande do Sul implementou políticas públicas para incentivar a geração de energia eólica em 1999, com o Programa Ventos do Sul, que serviu como ponto de partida para investimentos no setor. Esse programa promoveu iniciativas como o primeiro Seminário Internacional de Energia Eólica no Rio Grande do Sul, campanhas de medição de ventos em diversas regiões e a elaboração do primeiro Atlas Eólico do Rio Grande do Sul, que se tornou referência nacional para novos projetos e pesquisas na área (Borges *et al*, 2023).

Ao longo das décadas seguintes, algumas políticas estaduais foram criadas, refletindo a necessidade de diversificar a matriz elétrica e reduzir a dependência histórica do carvão mineral, fonte tradicionalmente utilizada no estado. Esse movimento tornou-se mais estruturado a partir dos anos 2010, quando políticas públicas estaduais passaram a considerar explicitamente o uso de fontes renováveis além da energia hídrica. Nesse sentido, em 2012, foi instituído o Programa Gaúcho de Estruturação, Investimento e Pesquisa em Energia Eólica e na mesma década, foram publicados o Atlas das Biomassas e o Atlas Solar do Rio Grande do Sul, lançados pelo governo estadual, que mapearam o potencial do estado nessas fontes, oferecendo subsídios técnicos para a elaboração de políticas mais eficazes (Borges *et al*, 2023; SEMA, 2021).

No início dos anos 2020, com o aumento das pressões internacionais por descarbonização e o avanço tecnológico em fontes renováveis, o estado intensificou suas ações. Programas como o Biogás-RS ganharam destaque ao incentivar a produção de biogás a partir de resíduos agroindustriais, setor de grande importância econômica para o estado (RS, 2024d). Paralelamente à criação de políticas específicas para o desenvolvimento de projetos de hidrogênio verde objetiva

consolidar o Rio Grande do Sul como um dos estados pioneiros neste campo no Brasil, com a assinatura de memorandos de entendimento com empresas internacionais voltadas para essa tecnologia emergente (RS, 2024b). Entretanto, apesar do aparente entusiasmo do setor privado quanto ao hidrogênio verde, a tecnologia é criticada por apresentar baixa eficiência energética e custos elevados, o que reduz o seu nicho de aplicação enquanto à solução climática (Odenweller e Ueckerdt, 2024).

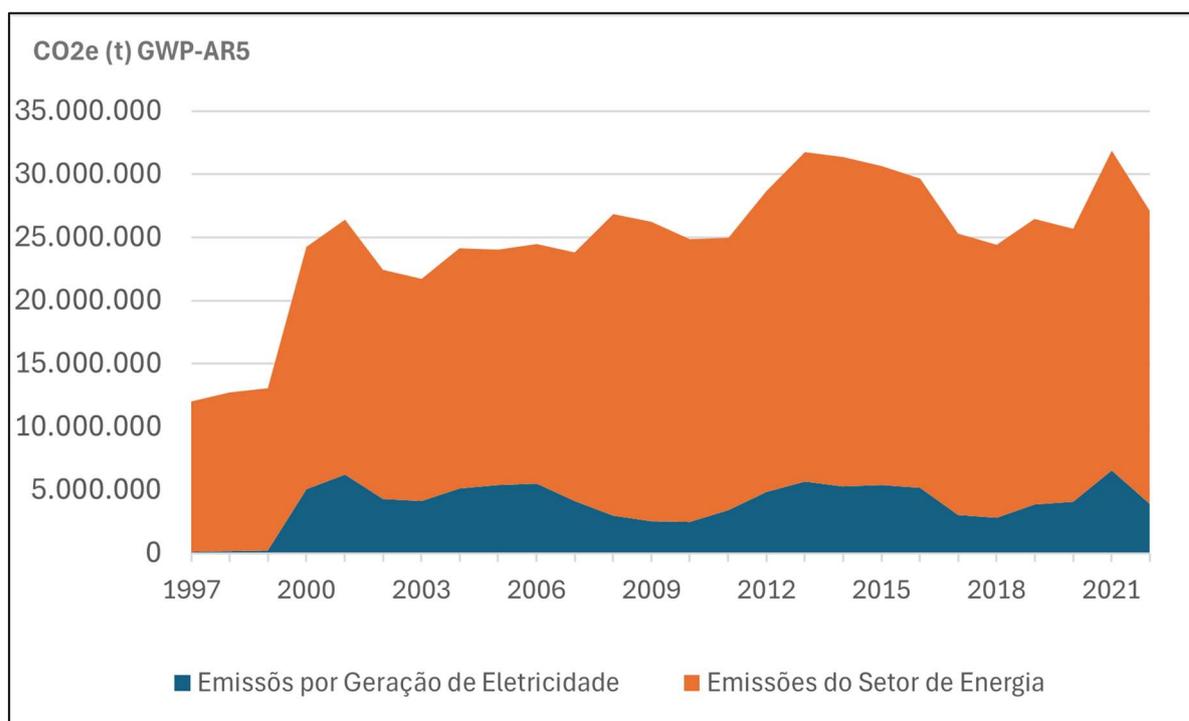
Em 2024 o Plano Estadual de Transição Energética Justa foi formalmente anunciado pelo governo estadual. Este plano tem como objetivo principal garantir que a transição energética ocorra de maneira inclusiva, minimizando os impactos socioeconômicos nas regiões dependentes do carvão mineral, como a região carbonífera do estado (RS, 2024a). Além disso, o plano visa atrair investimentos privados e fomentar a inovação tecnológica voltada para o setor energético.

A trajetória das políticas de transição energética no Rio Grande do Sul evidencia um avanço gradual, porém significativo, desde a década de 1990 até o momento atual. A combinação de esforços públicos e privados, somada à participação ativa da sociedade civil e ao suporte técnico de estudos como o Atlas de Energias Renováveis, tem sido determinante para o progresso do estado em direção a uma matriz energética mais limpa e resiliente (SEMA, 2021). Contudo, algumas iniciativas do governo estadual e de representantes gaúchos na esfera federal configuram um retrocesso, no que tange aos objetivos climáticos. Exemplo disso são a Política Estadual do Carvão Mineral (Lei Nº 15047 DE 29/11/2017), que previa a criação da maior mina a céu aberto de carvão da América Latina e o Projeto de Lei nº 4.653/2023, que prorrogaria subsídios para a utilização do carvão mineral para geração elétrica até 2040.

8. ANÁLISE DAS EMISSÕES DE GEES NA MATRIZ ELÉTRICA GAÚCHA no período de 1997 a 2024

As emissões de gases GEES no setor elétrico do Rio Grande do Sul, após um aumento vertiginoso entre 1997 e 2000, oscilaram entre 2,49 milhões de toneladas CO₂ no ano de 2010 e 6,58 milhões toneladas de CO₂ em 2021. A Figura 10 demonstra que, nos períodos de 2008 a 2010, as emissões se mantiveram abaixo de 3 milhões CO₂ de toneladas, enquanto no período de 2013 a 2016, se mantiveram acima de 5 milhões toneladas de CO₂. A média do período de 2012 a 2022 foi 7,7% maior que a média do período de 2000 a 2011 e, nesse período o setor energético seguiu um padrão semelhante (Observatório do Clima, 2024a).

Figura 10 – Emissões do Setor de Energia e da Geração de Eletricidade no período de 1997 e 2023

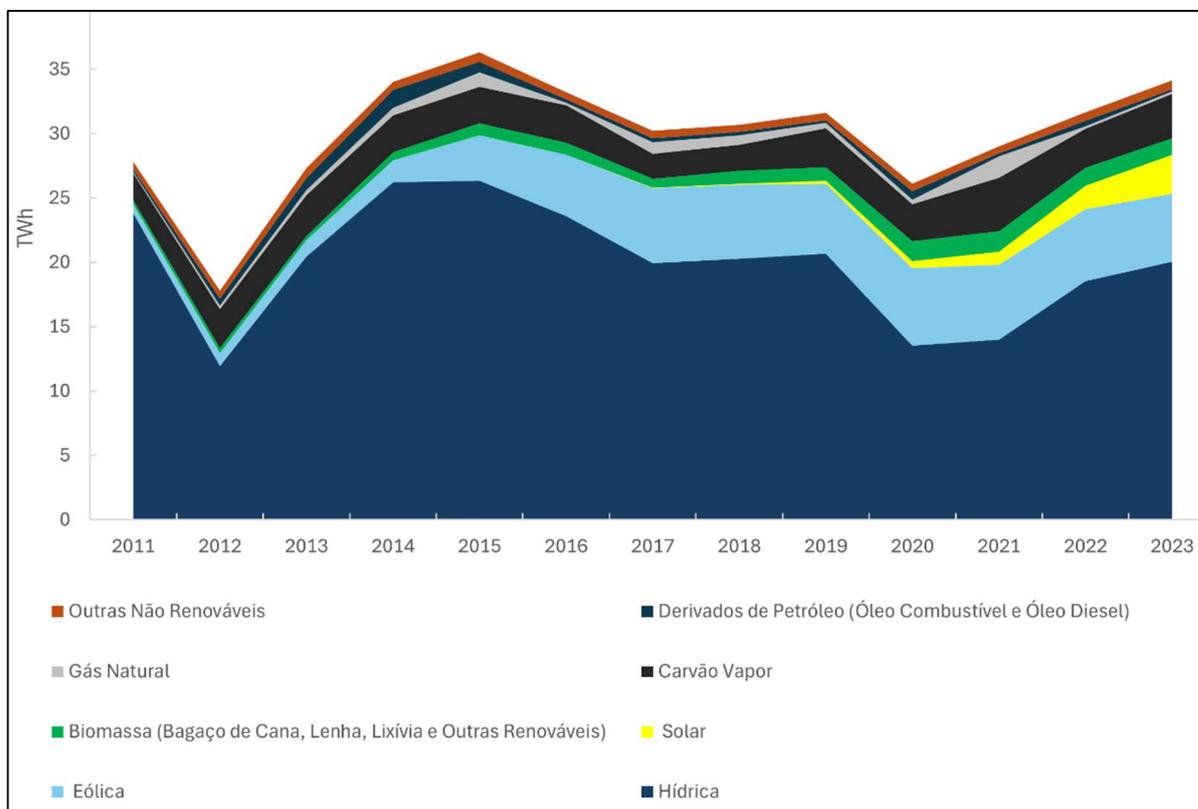


Fonte: Adaptado de Observatório do Clima (2024a).

A Figura 11 evidencia que, no período 2011 a 2023, o total de geração de energia elétrica variou com a geração hidrelétrica, dependente da quantidade de chuva. Essa variação teve impacto na quantidade de emissões de GEES emitidas a cada ano, visto que, em épocas de escassez hídrica no Rio Grande do Sul, as termelétricas são acionadas. Essas condições conduziram no aumento da eletricidade

eólica nos anos 2000s e o surgimento da energia solar fotovoltaica, a partir de 2019, às quais mitigaram parte dos gases de efeito estufa, emitidos por fontes fósseis.

Figura 11 – Geração de Eletricidade no Rio Grande do Sul por Fonte no período de 2011 a 2023

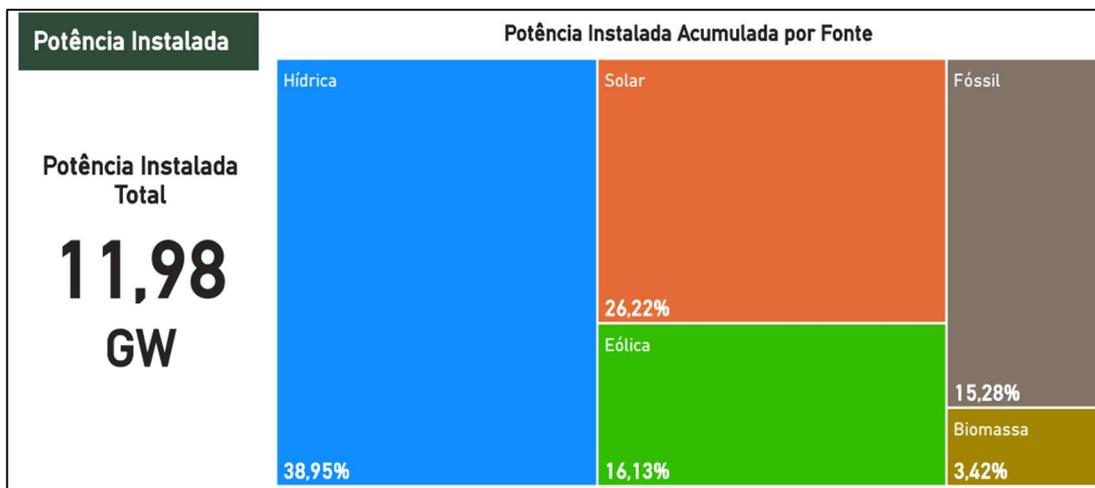


Fonte: Adaptado de BEN - Séries Históricas e Matrizes/Capítulo 8. (EPE, 2024a).

O impacto climático do setor elétrico gaúcho poderia ser ainda mais baixo, caso fosse resolvida a dependência de infraestrutura antiga em algumas usinas termelétricas. Muitas dessas plantas operam com tecnologias ultrapassadas e de baixa eficiência energética, o que agrava ainda mais suas emissões de CO₂, metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Um exemplo disso são as usinas Candiota III e Pampa Sul, que registraram as maiores taxas de emissão de CO₂ e/GWh e 2020 entre todas as termelétricas do Brasil (Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEMA, 2022).

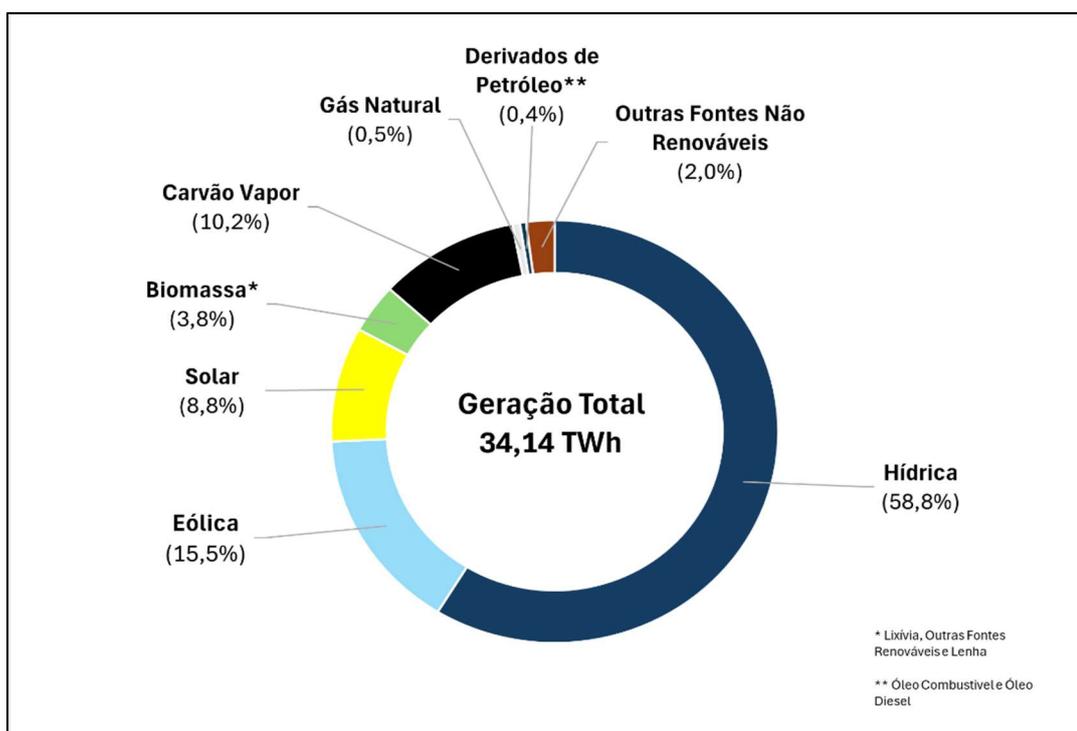
A ausência de políticas robustas de incentivo à transição energética no início dos anos 2000 contribuiu para a estagnação no processo de descarbonização do setor elétrico estadual. Essa inércia não impediu que o Rio Grande do Sul alcançasse, em 2024, uma matriz elétrica composta 84,72% por fontes renováveis (Figura 12) e gerasse 24,3% de sua eletricidade a partir das fontes eólica e solar em 2023 (Figura 13).

Figura 12 – Potência Instalada Acumulada por Fonte no Rio Grande do Sul em 2024



Fonte: Boletim Energético do Rio Grande do Sul, n°9 (SEMA, 2024).

Figura 13 – Geração de Eletricidade no Rio Grande do Sul por Fonte em 2023



Fonte: Adaptado de BEN - Séries Históricas e Matrizes/Capítulo 8 (EPE, 2024a).

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição energética no estado do Rio Grande do Sul, analisada no contexto do período entre 1997 e 2024, evidencia tanto avanços importantes quanto desafios persistentes. O estudo revelou que, apesar de o estado ter avançado consideravelmente na diversificação de sua matriz elétrica com fontes de baixo carbono, como eólica, solar e biomassa, a dependência histórica do carvão mineral ainda se mantém como um obstáculo para alcançar as metas globais de mitigação de carbono. Esse paradoxo reflete a necessidade urgente de políticas públicas mais robustas e integradas, que conciliem a realidade socioeconômica regional com os compromissos climáticos internacionais.

O setor elétrico gaúcho demonstrou um crescimento expressivo na adoção de fontes renováveis, especialmente a partir da década de 2010. O investimento em energia eólica e solar colocou o Rio Grande do Sul em posição de destaque no cenário nacional. Entretanto, a intermitência dessas fontes e as limitações de infraestrutura, como redes de transmissão defasadas e ausência de sistemas eficientes de armazenamento de energia, continuam a representar gargalos técnicos e econômicos que precisam ser superados.

Em relação às políticas públicas, verificou-se que houve uma evolução significativa desde a assinatura do Protocolo de Quioto. Planos como o Proinfa e mais recentemente o Plano Estadual de Transição Energética Justa refletem um esforço estadual para alinhar-se às diretrizes globais de sustentabilidade. Contudo, algumas iniciativas, como a Política Estadual do Carvão Mineral, demonstram a existência de interesses conflitantes que retardam a efetivação de uma transição energética mais ambiciosa. Assim, a manutenção de usinas movidas a carvão, aliada à continuidade de subsídios e políticas que favorecem essa fonte fóssil, levanta questionamentos sobre a coerência das políticas estaduais com os compromissos ambientais internacionais assumidos pelo Brasil.

No aspecto socioeconômico, a dependência econômica de algumas regiões do estado, particularmente aquelas ligadas à exploração do carvão mineral, emerge como um desafio central para a transição energética. A necessidade de garantir justiça social e inclusão no processo de descarbonização torna imprescindível a elaboração de políticas públicas específicas, que promovam a requalificação profissional, a

diversificação econômica local e a mitigação dos impactos sociais negativos da descontinuidade do uso do carvão.

A análise também destacou a importância do armazenamento de energia e da modernização das redes elétricas para garantir a estabilidade do sistema energético estadual. Tecnologias como baterias de íons de lítio e sistemas de bombeamento hidráulico representam soluções promissoras, mas que ainda enfrentam desafios relacionados a custos elevados, falta de infraestrutura adequada e ausência de políticas regulatórias claras.

Diante desse cenário, é possível afirmar que o Rio Grande do Sul possui um potencial significativo para liderar a transição energética no Brasil, tanto pelo seu potencial renovável quanto por sua capacidade de inovação tecnológica. Para que isso ocorra, será necessário um compromisso político mais consistente, investimentos direcionados e políticas públicas alinhadas com as metas globais de redução de emissões de GEEs. Além disso, a participação ativa da sociedade civil e do setor privado será fundamental para impulsionar esse processo.

Por fim, este estudo contribuiu para ampliar a compreensão sobre os desafios e oportunidades que envolvem a transição energética no Rio Grande do Sul. Recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a análise dos impactos socioeconômicos e ambientais das políticas energéticas adotadas, além de explorarem novas tecnologias e modelos de governança capazes de acelerar o processo de descarbonização no estado. Somente por meio de uma abordagem integrada e multidisciplinar será possível garantir uma transição energética eficiente, justa e sustentável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. 2024a. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao>>. Acesso em: 8 out. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Unidades com Geração Distribuída**. 2024b. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/micro-e-minigeracao-distribuida>>. Acesso em: 18 set. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resultados da chamada de P&D Estratégico da ANEEL n. 21: Arranjos Técnicos e Comerciais para a Inserção de Sistemas**. Brasília, 2024c. 55 p., il. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/242638>. Acesso em: 3 nov. 2024.

BANDEIRA, Henrique Ruschel. **Pirólise de Biomassas dos Principais Resíduos da Agricultura do Rio Grande do Sul: Uma Revisão da Literatura**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/255834>. Acesso em: 25 jun. 2024.

BARUM, Amilcar Oliveira. Aspectos socioeconômicos da utilização intensiva de biomassa na geração de energia. **Sociedade em Debate**, v. 5, n. 3, p. 91-100, 2012. Disponível em: <https://revistas.ucpel.edu.br/rsd/article/view/614>. Acesso em: 25 jun. 2024.

BASTOS, Maria Clotilde Pires; FERREIRA, Daniela Vitor. **Metodologia científica**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016. 224 p. ISBN 978-85-8482-437-3. Disponível em: <http://www.adm.ufrpe.br/sites/ww4.deinfo.ufrpe.br/files/Maria%20Clotilde%20Pires%20Bastos%20-%20Metodologia%20Cienti%CC%81fica.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2024.

BORGES, Fernando Leandro; CEOLIN, Lilian Varini; POLLNOW, William; HAAG, Rafael. **Energia eólica no Estado do Rio Grande do Sul: uma década em busca da sustentabilidade energética**. In: **SEMINÁRIO INTERNACIONAL SOBRE DESENVOLVIMENTO REGIONAL**, 11., 2023, Santa Cruz do Sul. *Anais [...]* Santa Cruz do Sul: Universidade de Santa Cruz do Sul, 2023. Disponível em: <https://www2.faccat.br/portal/sites/default/files/Energia%20E%20C%3%B3lica%20no%20Estado%20do%20Rio%20Grande%20do%20Sul%20uma%20d%C3%A9cada%20em%20busca%20da%20sustentabilidade%20energ%C3%A9tica.pdf>. Acesso em: 08 dez. 2024.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Assessoria Especial De Comunicação Social. **Transição energética: a mudança de energia que o planeta precisa**. Gov, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/transicao-energetica-a-mudanca-de-energia-que-o-planeta-precisa>. Acesso em: 10 dez. 2023.

BRONDANI, Giovana. **Metodologia para dimensionamento de sistemas comerciais de armazenamento de energia elétrica para oferta de flexibilidade**. 2023. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal

de Santa Maria, Santa Maria, 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/30929/DIS_PPGE_2023_BRONDANI_GIOVANA.pdf?sequence=1. Acesso em: 25 jun. 2024.

COALIZÃO ENERGIA LIMPA. **Regressão Energética**. Junho de 2024. Disponível em: <https://coalizaoenergiatilimpa.org/regressao-energetica-como-a-expansao-do-gas-fossil-a-transicao-energetica/>. Acesso em: 9 dez. 2024.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO (CRM). **Minas**. 2020. Disponível em: <https://www.crm.rs.gov.br/minas>. Acesso em: 13 jan. 2024.

CORREIA DA SILVA, Larissa; SILVA SANTOS, Rafaela da; CARULLA DE MENEZES, Mateus Bailon; SANTOS, Fernando de Almeida. **CRESCIMENTO DA GERAÇÃO DISTRIBUIDA NO BRASIL E CORRELAÇÃO ENTRE OS ESTADOS**. Revista Metropolitana de Sustentabilidade (ISSN 2318-3233), São Paulo, v. 10, n. 3, p. 143–158, 2020. Disponível em: <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/2373>. Acesso em: 26 jan. 2025.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS (DIEESE). **Estudos e Pesquisas nº 101: Os Trabalhadores em extração e Beneficiamento de Carvão Mineral em Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. São Paulo: DIEESE, 24 jan. 2022. Disponível em: <https://www.dieese.org.br/estudosepesquisas/2022/estPesq101Carvao.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: séries históricas completas**. Rio de Janeiro: EPE, 2024a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas>. Acesso em: 20 nov. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2024: Ano base 2023 (Relatório final)**. Rio de Janeiro: EPE, 2024b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional – BEN 2021 (Relatório Síntese)**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 5 mar. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Considerações sobre a participação do gás natural na matriz energética no longo prazo**. Brasília: MME/EPE, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/estudos-do-pne-2050/02-relatorios-epe/08-consideracoes-sobre-a-participacao-do-gas-natural-na-matriz-energetica-no-longo-prazo.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Sistemas de armazenamento em baterias: aplicações e questões relevantes para o planejamento**. Nota Técnica EPE-

DEE-NT-098/2019. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-441/EPE-DEE-NT-098_2019_Baterias%20no%20planejamento.pdf. Acesso em: 8 jan. 2025.

ENERGY INSTITUTE. **Statistical Review of World Energy**. v. 73, n. ISSN 2976-7857 ISBN 978 1 78725 4, p. 76, 2024.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. v. 7, p. 175. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/150/o/Anexo_C1_como_elaborar_projeto_de_pesquisa_-_antonio_carlos_gil.pdf. Acesso em: 20 dez. 2023.

GOMES, Aramis Pereira; FERREIRA, José Alcides F Fonseca; ALBUQUERQUE, Luiz Fernando de; SÜFFERT, Telmo. **Carvão fóssil**. Estudos Avançados, v. 12, n. 33, p. 89–106, ago. 1998. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/PwbGZGfvtBqkZnFsQfLFyBr/>. Acesso em: 7 jan. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40141998000200006>.

HAAG, Rafael; SOARES, Raiana Schirmer; TOMASZEWSKI, Geórgia Andrade; BRAZIL, Claudinéia; GASPARIN, Fabiano Perin; SILVA, Augusto Blauth da. **Atlas Solar do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UERGS, 2018. 79 p. ISBN 978-85-60231-42-3. Disponível em: <https://atlassolarrs.com/atlas-solar-ebook>. Acesso em: 12 set. 2025.

HENDRYX, Michael; ZULLIG, Keith. J.; LUO, Juhua. **Impacts of Coal Use on Health**. Annual Review of Public Health, Palo Alto, v. 41, p. 397-415, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-040119-094104>. Acesso em: 20 jan. 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Candiota III e Pampa Sul são as usinas termelétricas que mais emitiram gases de efeito estufa por eletricidade gerada em 2020, mostra estudo inédito do IEMA**. 2022. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/candiota-iii-e-pampa-sul-sao-as-usinas-termeletricas-que-mais-emitiram-gases-de-efeito-estufa-por-eletricidade-gerada-em-2020-mostra-estudo-inedito-do-iema-20220630>. Acesso em: 20 out. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Os desafios do mercado de gás natural no Brasil como potencial indutor da transição energética**. *Revista Tempo do Mundo*, v. 32, p. 45-68, 2023. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/13401/5/Tempo_Mundo_32_artigo3_os_desafos_do_mercado_de_gas.pdf. Acesso em: 25 jun. 2024.

KONRAD, Odorico; GUERINI FILHO, Marildo; LUMI, Marluce; HASAN, Camila. **Atlas das biomassas do Rio Grande do Sul para produção de biogás e biometano**. Lajeado: Ed. da Univates, 2016. 226 p. ISBN 978-85-8167-166-6. ISBN (e-book) 978-85-8167-167-3. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/atlas-de-energias-renovaveis>. Acesso em: 3 ago. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World Energy Outlook 2020**. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>. Acesso em: 20 fev. 2024.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach**. Paris: IEA, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach**. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9a698da4-4002-4e53-8ef3-631d8971bf84/NetZeroRoadmap_AGlobalPathwaytoKeepthe1.5CGoalinReach-2023Update.pdf. Acesso em: 09 jan. 2024.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2014: mitigation of climate change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf#page=7. Acesso em: 01 dez. 2024.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Annex I: Glossary** [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: **Global warming of 1.5°C**: Cambridge: Cambridge University Press, 2018. p. 541-562. doi: 10.1017/9781009157940.008.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). 2023. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Genebra, Suíça, p. 184. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_FullVolume.pdf. Acesso em: 20 dez. 2023.

KLEIN, Jefferson. **CRM estende contrato de carvão para Candiota 3 até 28 de fevereiro**. Jornal do Comércio, Porto Alegre, 06 jan. 2025. Disponível em: <https://www.jornaldocomercio.com/economia/2025/01/1186171-crm-estende-contrato-de-carvao-para-candiota-3-ate-28-de-fevereiro.html>. Acesso em: 10 jan. 2025.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003. p. 311. Disponível em: https://docente.ifrn.edu.br/olivianeta/disciplinas/copy_of_historia-i/historia-ii/china-e-india. Acesso em: 5 jan. 2024.

LAUTALA, Pasi; HILDERMEIER, Julia; QUAN, Cai; HUEBSCH, Nicholas; SWANK, Kyle. **Securing the feedstock procurement for bioenergy products: a literature review on the biomass transportation and logistics**. Journal of Cleaner Production, v. 200, p. 205-219, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618322303>. Acesso em: 8 jan. 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.241.

LEWENKOPF, Marcio Araújo. **O papel do gás natural na transição energética: Um foco no caso Brasileiro**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/21442/1/MALewenkopf.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2024.

LIBAULT, André. **Os Quatro Níveis da Pesquisa em Geografia**. In: *Métodos em Questão*. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1971. v. 1, p. 23. Disponível em: <https://toaz.info/doc-view-2>. Acesso em: 5 jan. 2024.

MÜLLER, Andersen Barreto. **Simulação de Sistema Fotovoltaico com Armazenamento de Energia através de Hidrogênio utilizando o HOMER Energy**. 2024. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/274527/001200276.pdf?sequence=1>. Acesso em: 8 set. 2024.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Análise das Emissões de Gases de Efeito Estufa e Suas Implicações para as Metas Climáticas do Brasil: 1970-2021**. Brasília, 2023. p. 45. Disponível em: <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/03/SEEG-10-anos-v4.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2023.

OBSERVATÓRIO DO CLIMA. Plataforma SEEG [on-line]. [Brasil]: Observatório do Clima, 2024. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/>. Acesso em: 25 jun. 2024.

ODENWELLER, Adrian; UECKERDT, Falko. **The green hydrogen ambition and implementation gap**. 2024. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2406.07210>. Acesso em: 8 jan. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015.

PIRAN, Fábio M.; SILVA, André L. da. **Análise dos efeitos proporcionados pela transformação de uma rede convencional em Smart Grid: estudo de caso em uma concessionária de energia do Rio Grande do Sul**. Latin American Journal of Business Management, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 83-94, jul./dez. 2020. ISSN 2178-4833. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347510603_ANALISE_DOS_EFEITOS_PROPORCIONADOS_PELA_TRANSFORMACAO_DE_UMA_REDE_CONVENCIONAL_EM_SMART_GRID_ESTUDO_DE_CASO_EM_UMA_CONCESSIONARIA_DE_ENERGIA_DO_RIO_GRANDE_DO_SUL. Acesso em: 1 dez. 2024.

RIO GRANDE DO SUL (RS). **Atlas Eólico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria de Desenvolvimento e Promoção do Investimento; Agência Gaúcha de Desenvolvimento e Promoção do Investimento, 2014. 116 p. ISBN 978-85-67342-01-6. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1ooYIZnRao89SE7Agz6NVR3JkJmrzRgp2/view>. Acesso em: 12 out. 2024.

RIO GRANDE DO SUL (RS). **Lei Nº 15047 DE 29/11/2017**. 2017. Cria a Política Estadual do Carvão Mineral. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=353023>. Acesso em: 11 nov. 2024.

RIO GRANDE DO SUL (RS). Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Departamento de Planejamento Governamental. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 6. ed. Porto Alegre: Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, Departamento de Planejamento Governamental, 2021. 203 p.: il. ISBN 978-

65-87878-01-0. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/inicial>. Acesso em: 25 jun. 2024.

RIO GRANDE DO SUL (RS). **RS registra redução nas emissões de gases de efeito estufa em 2020**. 2022. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/rs-registra-reducao-nas-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-em-2020#:~:text=Agropecu%C3%A1ria%20reduz%20emiss%C3%B5es%20de%20GEEs%20no%20RS&text=No%20ranking%20dos%20estados%20brasileiros,at%C3%A9%20o%20ano%20de%202030>. Acesso em: 25 jun. 2024.

RIO GRANDE DO SUL (RS). Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura. **Transição Energética Justa**. Porto Alegre: SEMA, 2024a. Disponível em: <https://www.proclima2050.rs.gov.br/transicao-energetica-justa>. Acesso em: 25 jun. 2024.

RIO GRANDE DO SUL (RS). **Governo assina contrato do Plano de Transição Energética Justa e memorandos de entendimento para hidrogênio verde**. Portal do Governo do Estado do Rio Grande do Sul, [Porto Alegre.], 2024b. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/governo-assina-contrato-do-plano-de-transicao-energetica-justa-e-memorandos-de-entendimento-para-hidrogenio-verde>. Acesso em: 25 jun. 2024.

RIO GRANDE DO SUL (RS). **Estudo do DEE-SPGG analisa aspectos do refino de petróleo no Rio Grande do Sul**. Departamento de Economia e Estatística, 2024c. Disponível em: <https://www.dee.rs.gov.br/estudo-do-dee-spgg-analisa-aspectos-do-refino-de-petroleo-no-rio-grande-do-sul>. Acesso em: 25 jun. 2024.

RIO GRANDE DO SUL (RS). **Governo abre edital para projetos de biogás e assina acordos para produção de energia renovável e hidrogênio verde**. Portal do Governo do Estado do Rio Grande do Sul, [Porto Alegre], 2024d. Disponível em: <https://www.estado.rs.gov.br/governo-abre-edital-para-projetos-de-biogas-e-assina-acordos-para-producao-de-energia-renovavel-e-hidrogenio-verde>. Acesso em: 25 jun. 2024.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (SEMA). **Atlas de Energias Renováveis**. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2021. Disponível em <https://www.sema.rs.gov.br/atlas-de-energias-renovaveis> . Acesso em: 25 jun. 2024.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (SEMA). **Boletim Energético do Rio Grande do Sul**. n. 9. Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/202412/09082557-boletim-energetico-nov-2024.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2024.

SILVA, Giovanni Pascini P.; MORAIS, Douglas. **Integração de Sistemas de Armazenamento de Energia em Redes Elétricas: Desafios e Oportunidades**. Revista FT, v. 28, n. 138, 2024. Disponível em: <https://revistافت.com.br/integracao-de-sistemas-de-armazenamento-de-energia-em-redes-eletricas-desafios-e-oportunidades/>. Acesso em: 8 jan. 2025. DOI: 10.69849/revistافت/ra10202409302245.

da SILVA, Michele Maria; OLIVEIRA, Guilherme Saramago de; OLIVEIRA DA SILVA, Glênio. **A Pesquisa Bibliográfica nos Estudos Científicos de Natureza Qualitativa**. *Revista Prisma*, Rio de Janeiro, v. 2, n. 1, p. 91–109, 27 dez. 2021. Disponível em: <https://revistaprisma.emnuvens.com.br/prisma/article/view/45/37>. Acesso em: 10 jan. 2024.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change**. Bonn: UNFCCC, 1997. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2024.