

Projeto de Graduação



Julho de 2025

# **Análise de Dados da Matriz Elétrica Brasileira**

Bruno Luiz Olímpio Alves Correia

# **Análise de Dados da Matriz Elétrica Brasileira**

**Aluno: Bruno Luiz Olímpio Alves Correia**

**Orientador: André Milhorce de Castro**

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

## **Agradecimentos**

Agradeço a minha família pelo suporte que recebi durante a minha trajetória acadêmica, que me motivou a chegar até a conclusão.

Agradeço também ao meu orientador, André, pelo suporte, paciência e conselhos dados.

## Resumo

A crescente penetração de fontes de energia renovável variável (ERV), notadamente a solar e a eólica, tem impulsionado investimentos globais como parte da transição energética voltada à redução de impactos ambientais.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise estatística da matriz elétrica brasileira, com base em dados públicos, a fim de caracterizar o comportamento e a sazonalidade das ERVs no contexto nacional.

**Palavras-chave:** Análise de dados, energia renovável, geração eólica, geração solar fotovoltaica, matriz elétrica brasileira, sazonalidade.

## Data Analysis of the Brazilian Electricity Matrix

### Abstract

The increasing integration of variable renewable energy sources (VREs), notably solar and wind power, has driven global investments as part of the energy transition aimed at reducing environmental impacts. This study seeks to conduct a statistical analysis of the Brazilian electricity matrix, based on publicly available data, in order to characterize the behavior and seasonality of VREs within the national context.

"The increasing integration of variable renewable energy sources (VREs), particularly solar and wind, has been driving global investment as part of the energy transition aimed at reducing environmental impacts. This study seeks to perform a statistical analysis of the Brazilian electricity matrix using publicly available data, with the goal of characterizing the behavior and seasonality of VREs within the national context."

**Keywords:** Brazilian electricity matrix, data analysis, renewable energy, wind power, seasonality, solar photovoltaic power.

## Sumário

1.Introdução.....	1
1.1 Estrutura do Texto .....	1
2. Matriz Elétrica Brasileira .....	2
3. Eólicas .....	8
3.1 Região Nordeste.....	11
3.2 Região Sul.....	19
3.3 Cortes de Geração Eólica .....	20
3.4 Considerações Finais .....	20
4. Geração Solar no Brasil .....	21
4.1 Três Estados com Maior Geração Centralizada .....	24
4.2 Corte de Geração Solar .....	26
4.3 Considerações Finais .....	27
5.Conclusões .....	28
6.Bibliografia .....	29

## 1. Introdução

Em tempos de fenômenos climáticos severos cada vez mais frequentes, como ondas de calor, inundações, secas prolongadas, incêndios florestais, ciclones e furacões, a transição energética desempenha um papel crucial no combate às mudanças climáticas. O objetivo principal é fortalecer iniciativas que reduzam significativamente as emissões de gases de efeito estufa (GEE), os quais são os principais responsáveis pelo aquecimento global.

Tornou-se fundamental investir em tecnologias que contribuam na descarbonização, substituindo fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, por fontes renováveis, como solar, eólica e hidrelétrica.

As fontes de energia renovável variável (ERV) têm seu crescimento diretamente ligado ao combate às mudanças climáticas. Desde o final do século XX, as discussões sobre esse tema vêm se intensificando a partir de determinadas iniciativas: criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) em 1988 [1, 2] e o Protocolo de Kyoto em 1997 [3]. Nesse acordo internacional, foram criadas metas com o objetivo de reduzir as emissões de GEE, a fim de buscar o desaceleramento do aquecimento global.

Desde o começo do século XXI, há uma constante promoção dos investimentos nas fontes renováveis. A ERV lidera esse crescimento, impulsionado, adicionalmente, pela redução dos custos de investimentos e operações. Entre 2010 e 2023, o custo médio de energia eólica em terra (*onshore*) reduziu 70%, enquanto os custos de painéis solares tiveram uma redução de até 93% [4].

Por conta desses fatores, as fontes renováveis passaram a compor a maior parcela de energia nova instalada no âmbito mundial. Entre 2003 e 2007, fontes renováveis e nucleares foram responsáveis por 23,5% do acréscimo de capacidade instalada, enquanto em 2024, esse valor passou a ser de 81,1%, o equivalente a 75% apenas de renováveis.

Este trabalho tem como objetivo elaborar um estudo sobre a geração de energia elétrica proveniente de fontes de energia renováveis, especificamente eólica e solar, no Brasil. A análise será fundamentada nos conceitos de estatística, que visa utilizar dados variáveis e limitados para tomadas de decisões [5], utilizando dados históricos, a fim de analisar o crescimento do setor. Serão avaliadas, também, as características da geração renovável, abrangendo fator de capacidade, comportamento dos ventos, sazonalidade e diferenças por região.

Para a presente análise foi utilizado, principalmente, o portal de dados abertos do Operador Nacional do Sistema (ONS) [6] que possui diversas categorias de dados históricos do setor elétrico brasileiro. Essa fonte de dados caracteriza-se por sua abrangência, possuindo dados horários de todo o Sistema Interligado Nacional.

Por se tratar de tecnologias recentes e ativamente em crescimento, sobretudo no contexto do sistema energético brasileiro, é fundamental reconhecer os padrões de comportamento dessas fontes, cuja previsibilidade ainda apresenta incertezas. Compreender esses padrões pode auxiliar na resolução de desafios que o futuro reserva para a geração de energias renováveis no país.

### 1.1 Estrutura do Texto

No Capítulo 2: "Matriz Elétrica Brasileira", será descrita a composição das fontes elétricas do Brasil. Apresenta-se sua evolução recente e sua perspectiva para o futuro próximo, com ênfase no crescimento de fontes renováveis.

No Capítulo 3: "Geração Eólica no Brasil", será feita uma análise mais detalhada dos últimos 5 anos das fontes eólicas do Sistema Interligado Nacional. Serão utilizados os dados abertos do ONS para elaborar uma análise estatística dessas fontes. Os temas abordados incluem: fator de capacidade, sazonalidade, localização dos geradores e corte de geração.

No Capítulo 4: "Geração Solar no Brasil", também envolverá a análise de dados do ONS, porém entrando em detalhes sobre geração solar. Os temas abordados incluem: fator de capacidade, diversificação, geração distribuída e corte de geração.

No Capítulo 5: "Conclusão", será feito uma breve recapitulação dos temas tratados no trabalho.

## 2. Matriz Elétrica Brasileira

O Brasil é um país de dimensões continentais, o que nos propicia a utilização de diversas fontes renováveis. Historicamente, o Brasil sempre utilizou muito o seu potencial hídrico, começando em 1883 com a criação de uma usina em Minas Gerais para abastecer uma mina de carvão, apenas um ano após a criação da primeira usina hidrelétrica do mundo [7].

Ao longo do século XX, o Brasil investiu consideravelmente na construção de usinas hidráulicas, tendo um grande pioneirismo na área, com a construção de usinas que até hoje estão entre as maiores do mundo. Apesar disso, mais recentemente, o Brasil reduziu notavelmente a instalação de novas usinas hidráulicas, devido ao seu alto custo inicial e o impacto socioambiental proveniente de grandes áreas alagadas.

A matriz elétrica brasileira, historicamente e até os dias de hoje, é considerada limpa, principalmente em comparação aos outros países, incluindo aqueles mais desenvolvidos do que o Brasil. Apesar de sempre impulsionada pelas hidrelétricas, que ainda compõem a maior parte da geração, recentemente novas fontes renováveis vêm ganhando espaço.

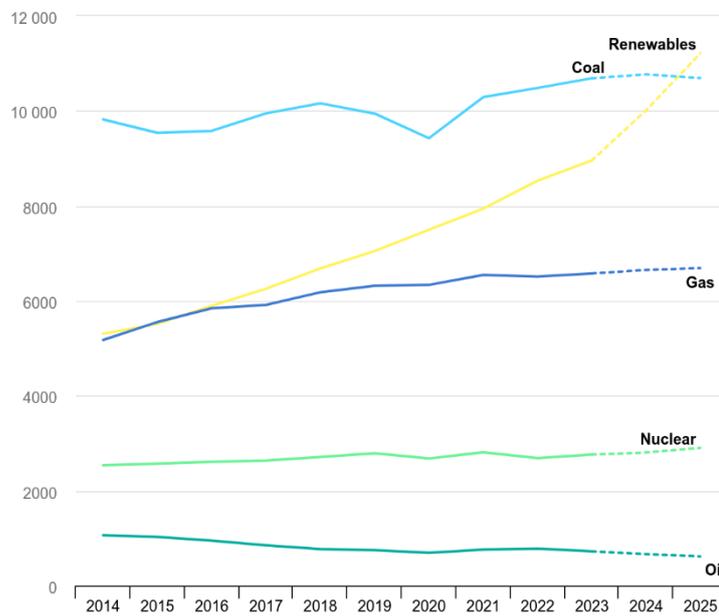


Figura 1: Geração elétrica global por tipo de fonte [8].

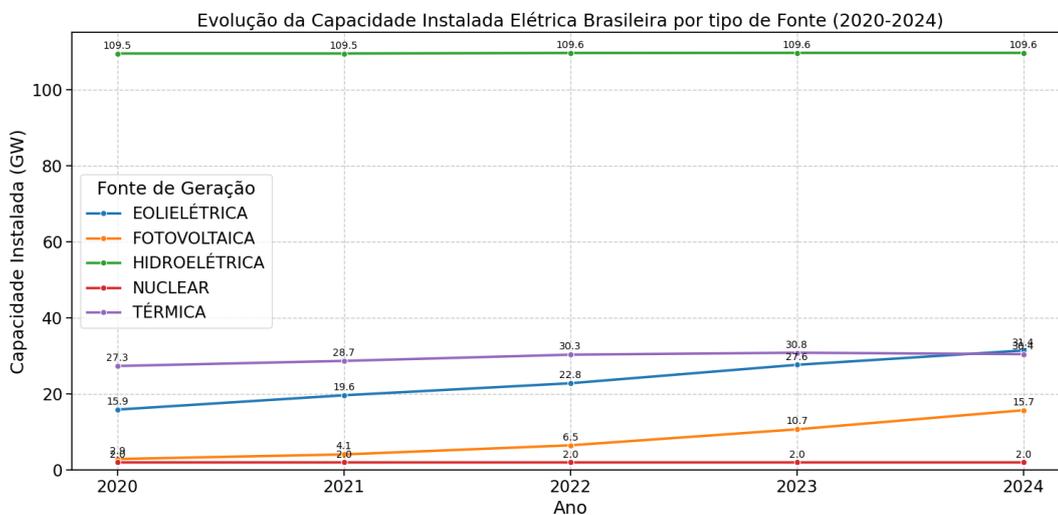


Figura 2: Crescimento da capacidade instalada por tipo de usinas no Brasil (não inclui geração distribuída) (2020-2024).

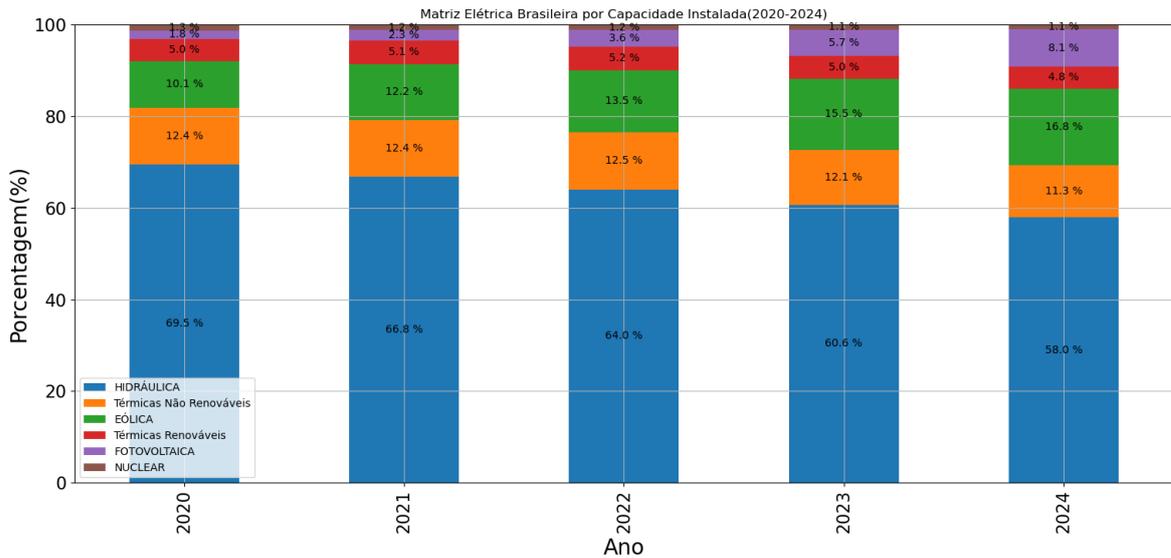


Figura 3: Participação de cada fonte na capacidade instalada por tipo de usina do Brasil (não inclui geração distribuída) (2020-2024).

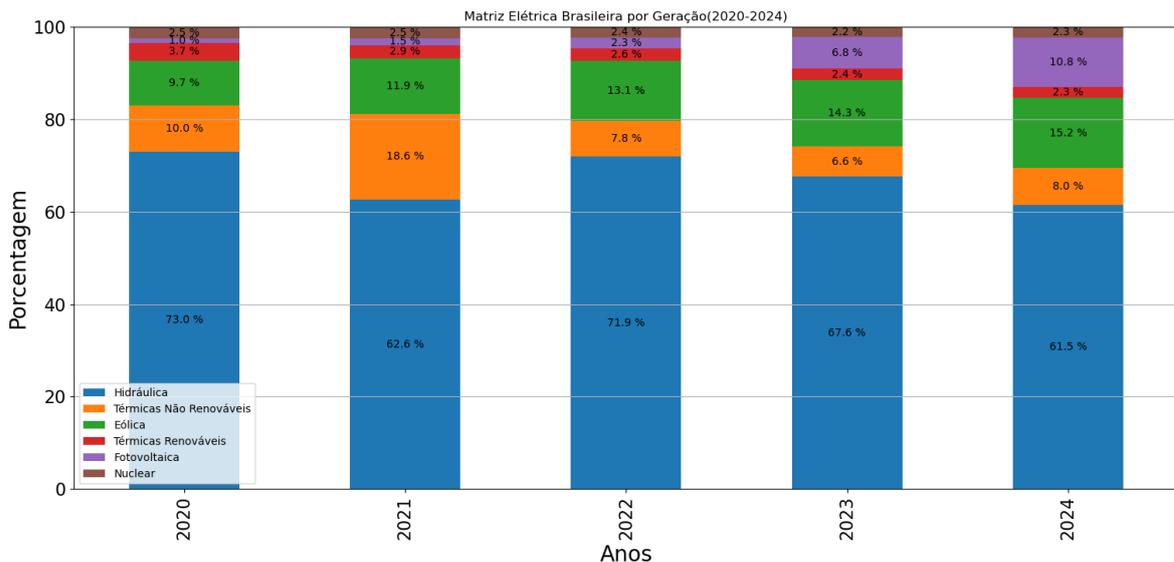


Figura 4: Participação de cada fonte na geração elétrica anual do Brasil (inclui geração distribuída a partir de 2023) (2020-2024).

A Figura 1 representa a matriz elétrica mundial, sendo que somente cerca de 30% da energia gerada é renovável, mesmo após um crescimento recente, enquanto no Brasil, em 2024, quase 90% da geração foi renovável.

As Figuras 2, 3 e 4 ilustram a evolução das fontes de energia elétrica brasileira nos últimos cinco anos. As fontes hidrelétricas permaneceram no mesmo valor de capacidade instalada, enquanto fontes eólicas e solares tiveram um crescimento considerável. A capacidade das eólicas dobraram, enquanto fotovoltaicas, apesar de terem uma participação menor que a eólica, têm crescimento de quatro vezes a capacidade instalada em um período de cinco anos. Os valores de geração fotovoltaica de energia elétrica já representam 10% da geração total. Nota-se que este valor é impulsionado também pelo valor da mini e micro geração distribuída (MMGD), que são pequenos geradores de até 3 MW de potência (até 5 MW em casos específicos) conectados à rede de distribuição pelo próprio consumidor [9].

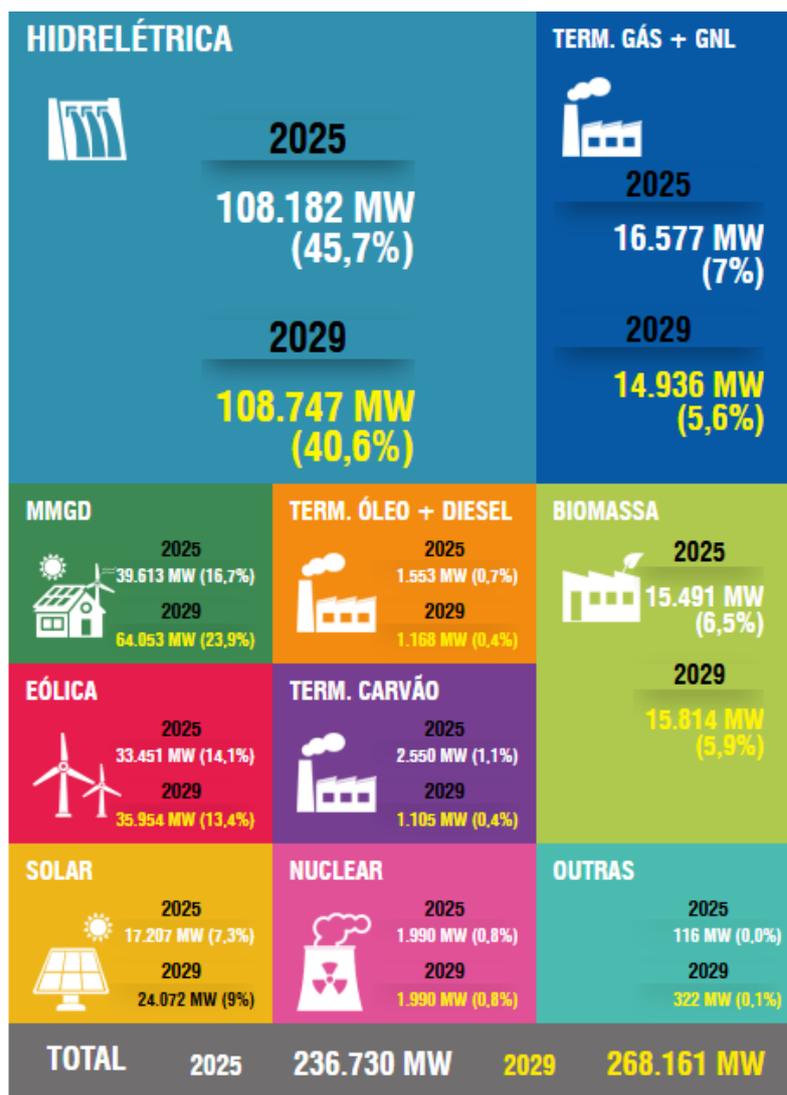


Figura 5: Evolução da Capacidade Instalada do SIN (2025-2029). Fonte: ONS [10].

A perspectiva para o futuro próximo do Sistema Interligado Nacional (SIN) é um crescimento muito significativo das fontes solares, com uma grande expansão de usinas e um crescimento ainda notável da geração distribuída. A geração eólica continua em evolução, mas em um ritmo menos acelerado do que dos últimos anos, perdendo a preferência em relação às fontes solares, que possuem custos mais competitivos. Nenhuma outra fonte apresenta um crescimento significativo, e todas as fontes não solares perdem sua contribuição proporcional.

Em 2029, prevê-se que quase metade da capacidade instalada será composta por fontes eólicas e solares, o que torna ainda mais importante a compreensão do comportamento delas. Além disso, dentro dessa parcela, quase um quarto da capacidade instalada do Brasil será de geração distribuída.

Por um lado, as MMGDs apresentam algumas vantagens significativas: todo o investimento para a implantação e a manutenção dessas fontes é feito diretamente pelo consumidor, aumentando a capacidade de geração do Brasil sem a necessidade de investimentos pelo poder público. Ademais, a MMGD está conectada diretamente nos locais de carga, o que reduz a necessidade de ampliação do sistema de transmissão para o transporte dessa energia. Isso promoveu diversas políticas de incentivo à geração distribuída, como a redução de encargos.

Por outro lado, os subsídios fornecidos podem indiretamente aumentar a cobrança de outros usuários ou diminuir a arrecadação das distribuidoras. Existem, também, preocupações sistêmicas técnicas: esses pequenos geradores não fazem parte do controle central do ONS, não são despachados e sempre estarão gerando, independentemente do seu impacto para o sistema. As pequenas centrais dentro dos grandes centros urbanos geram diversos desafios para as distribuidoras. Em geral, contratos de geração são realizados com anos de antecedência, porém com os consumidores gerando para reduzir o seu consumo

e até injetando energia na rede, muitas distribuidoras se encontram sobrecontratadas [11], gerando penalidades para as mesmas e aumento da tarifa. Além disso, a qualidade da energia fornecida pelas distribuidoras também é afetada. Novas centrais dentro das malhas geram um impacto no controle da tensão e no fator de potência, além de afetarem o dimensionamento da rede para cada região.

Em nível de sistema de transmissão, as usinas eólicas e solares vêm enfrentando um problema que está cada vez mais relevante: o corte de geração (também conhecido como *curtailment*) por imposição técnica feita pelo ONS. As duas causas principais são: a causa energética e a causa de confiabilidade do sistema.

Uma usina é limitada por motivos energéticos quando o fornecimento de energia está ultrapassando a demanda do momento. Esse fenômeno ocorre porque usinas eólicas e, principalmente, usinas solares coincidem seus picos de geração entre si, e não necessariamente esse pico de geração coincide com o pico da demanda.

Quanto ao motivo de confiabilidade, a geração é considerada alta demais para ser escoada pela rede de transmissão. Isso ocorre devido à expansão de transmissão não acompanhar a rápida expansão das fontes renováveis. Além disso, sobretudo no caso das fontes eólicas, as centrais costumam se localizar em poucas áreas específicas onde o potencial de geração é elevado. Somente alguns estados têm geração eólica significativa, e dentro desses estados as usinas eólicas se localizam em algumas poucas regiões.

Um problema indireto para a rede de transmissão é o fator de capacidade baixo de algumas renováveis. Para atender integralmente a esses geradores, é necessário dimensionar as linhas considerando a máxima geração que será alcançada, mesmo que a média de geração durante a maior parte do ano seja muito menor do que esse valor.

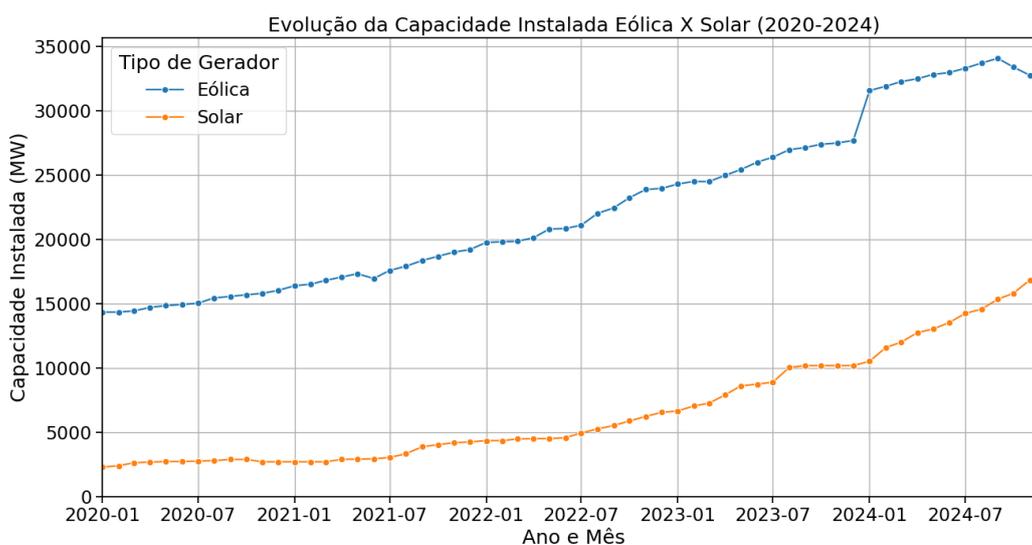


Figura 6: Crescimento da capacidade instalada de ERVs 2020-2024.

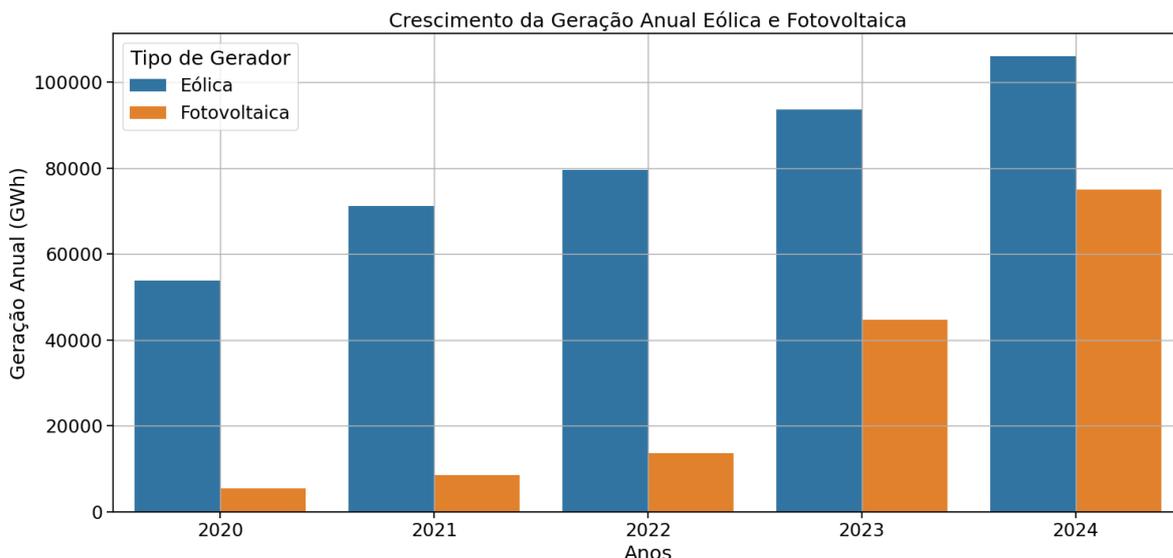


Figura 7: Crescimento da geração solar e eólica 2020-2024.

A Figura 6 e 7 retratam o crescimento ano a ano da geração eólica e fotovoltaica. Em 2020 foi gerado 54 TWh de energia por fontes eólicas, enquanto fontes solares geraram apenas 5 TWh. Ao longo dos últimos cinco anos o crescimento de ambas as fontes foi muito expressivo: em 2024, foi gerado 106 TWh de energia eólica, enquanto a solar foi responsável por 75 TWh, representando um crescimento de 96% da geração eólica e de 1280% da geração solar. Cada vez mais, a geração solar se aproxima ao patamar da geração eólica, impulsionada também pela geração distribuída, que não é representada na capacidade instalada e começa a ser contabilizada nos valores de geração somente em abril de 2023.

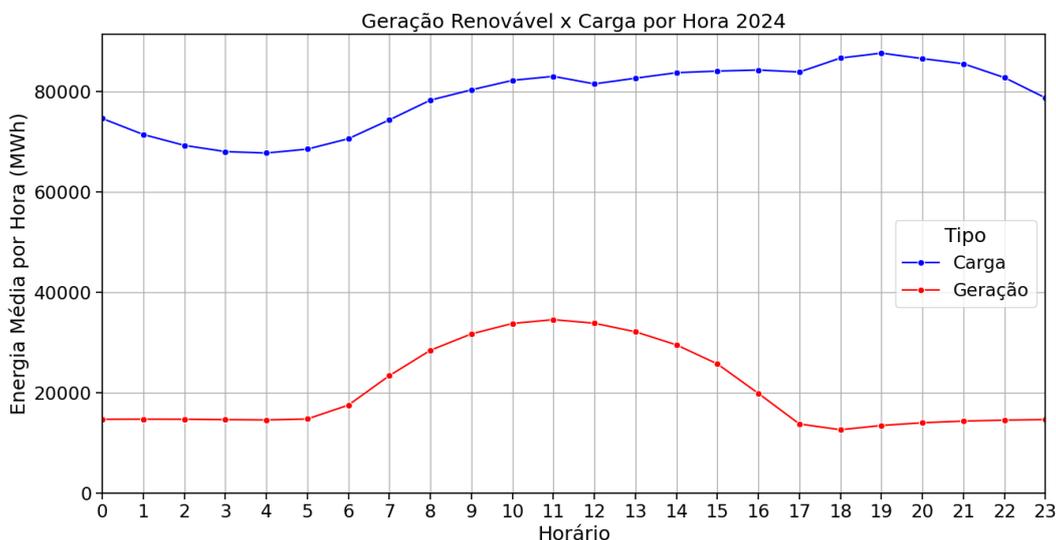


Figura 8: Geração Solar e Eólica X Carga Média por hora em 2024.

A Figura 8 contrasta a geração média por hora de fontes eólicas e fotovoltaicas com o consumo médio por hora ao longo de 2024. Pode-se notar que a geração já supre uma parcela significativa da carga elétrica brasileira, porém seu horário de pico de geração não coincide com o horário de pico do consumo, tendo uma participação menor nos horários de maior demanda. O gráfico ilustra patamares médios diários de geração. Há, porém, variação devido ao recurso energético que dificulta o planejamento da operação.

O Brasil possui uma vantagem para o aproveitamento de fontes renováveis variáveis, devido a sua grande capacidade de armazenamento, por meio de hidrelétricas com reservatório. Essa característica permite que o SIN opere com maior flexibilidade. Assim, a intermitência das renováveis é compensada pela capacidade de armazenamento, permitindo que em momentos de baixa geração variável seja utilizada a energia dos reservatórios.

Complementarmente, as fontes renováveis ajudam a manter o armazenamento dos reservatórios mais elevados. Os momentos que apresentam uma geração renovável elevada permitem que haja um aumento da energia armazenada. Essa interação evitaria casos como o de 2014, em que o baixo volume de chuvas aproximou o país a uma crise elétrica, tornando necessário um elevado despacho de termelétricas [12].

Outro fator importante a se considerar é o impacto causado à confiabilidade do sistema pelas fontes renováveis variáveis. Ao contrário dos geradores síncronos, essas novas fontes não possuem a inércia para respostas a variações de frequência e tensão no sistema, tornando-se necessário o controle de reativos. Essa demanda pode ser notada no leilão de transmissão de 2025, cujo edital determina a implantação de sete novos compensadores síncronos para o escoamento de fontes renováveis [13].

Para entender o comportamento dessas fontes e os desafios ao planejamento da operação, é imprescindível um aprofundamento maior em cada uma delas, considerando suas características individuais.

## 3. Eólicas

A geração de energia elétrica eólica consiste em transformar a energia do vento em eletricidade. Esse processo começa pelas pás dos aerogeradores, que tem o objetivo de captar a força dos ventos. Elas estão ligadas diretamente ao rotor, que gira junto com as pás, e que por sua vez está conectado à caixa multiplicadora, que amplifica a velocidade de rotação. Essa rotação mais rápida permite uma melhor eficiência do gerador, que transforma a energia mecânica da rotação em energia elétrica, utilizando do princípio de indução eletromagnética.

A energia elétrica eólica é uma das maiores fontes de energia elétrica do Brasil, ficando atrás somente da hidráulica, representando 14,4% da capacidade instalada e 95,8 TWh gerados no ano de 2023 [14]. É também a fonte que mais cresceu nesse ano, com 9,3 GW instalados, equivalente a 51,73% do total [15].

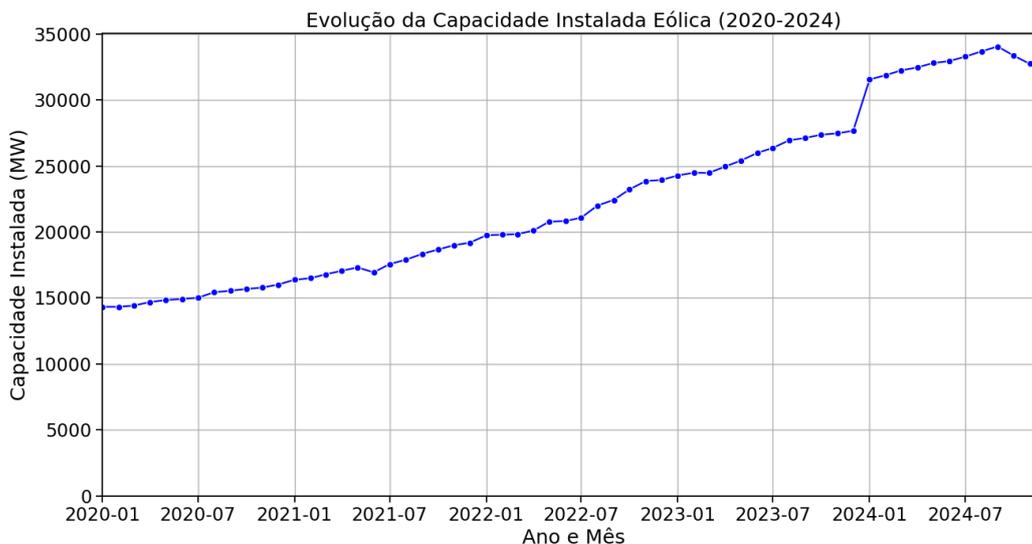


Figura 9: Evolução da capacidade instalada de fontes eólicas.

A capacidade instalada de usinas eólicas apresenta um crescimento constante. Em janeiro de 2020, possuía o valor de 14,3 GW, enquanto em dezembro de 2024, havia subido para 32,4 GW, mais do que o dobro do seu valor.

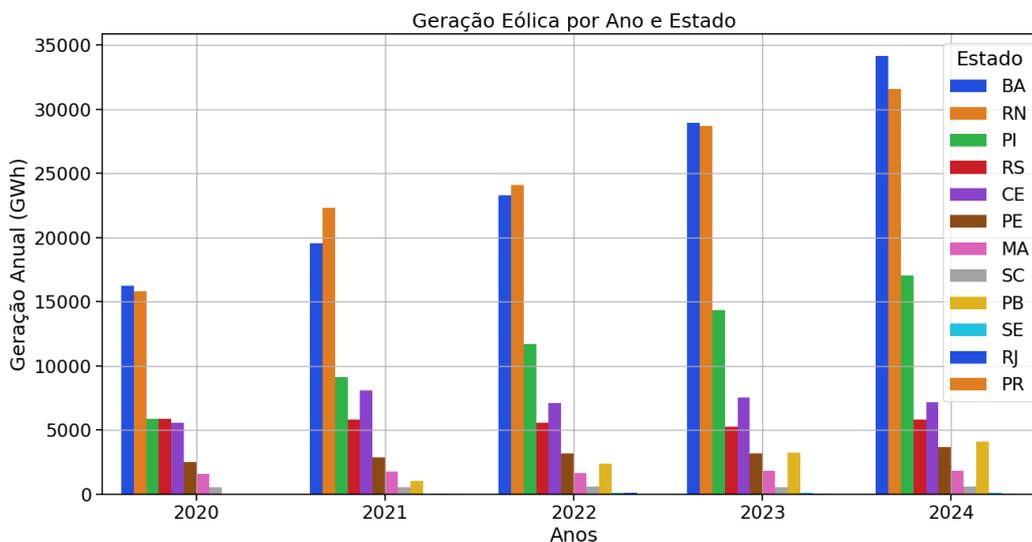


Figura 10: Crescimento da geração eólica por estado da federação.

A geração eólica tende a se concentrar majoritariamente nos estados da região Nordeste do Brasil. Dos cinco estados com maior geração, somente o quinto se localiza em outra região, o Rio Grande do Sul, o qual apresenta uma geração bem abaixo dos outros estados. Em 2024, Bahia e Rio Grande do Norte geraram 62% dos 106 TWh de energia elétrica eólica do Brasil, enquanto em 2019 os mesmos estados foram responsáveis por 59% dos 54 GWh gerados. Esses estados, não só compõem a maior parte dessa geração, como também continuam crescendo mais do que os outros locais.



Figura 11: Distribuição das usinas eólicas. Fonte: SIGA ANEEL [16].



Figura 12: Distribuição das Usinas eólicas. Fonte: SIGA ANEEL [16].

As usinas eólicas encontram-se localizadas em sua grande maioria dentro do Nordeste, com poucas plantas em outras regiões. Mesmo dentro da região Nordeste, é possível notar que existe uma concentração específica, a qual se apresenta principalmente no litoral do Ceará e Rio Grande do Norte. É notável uma faixa do interior do Rio Grande do Norte e uma outra extensa no interior da região, desde o sul da Bahia e estendendo-se até o Piauí, com diversos pequenos agrupamentos.

Essa concentração faz com que seja necessária a instalação de diversas linhas de transmissão para o escoamento dessa energia, como as linhas da Interligação Sudeste/Nordeste. No entanto, mesmo com os investimentos recentes, ainda existem momentos em que não é possível a escoação total dessa energia.

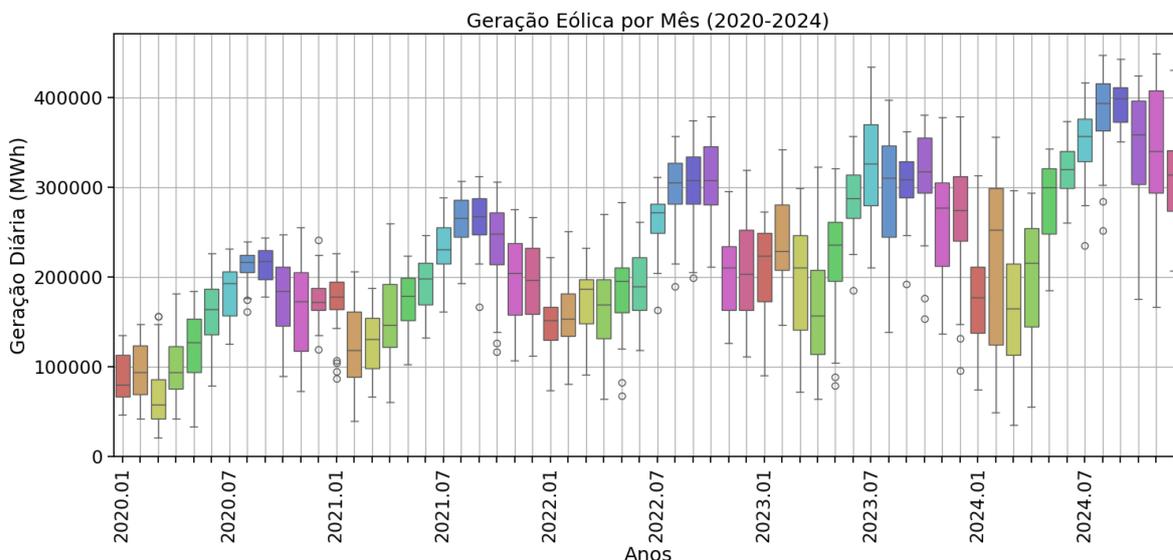


Figura 13: Boxplot geração eólica por mês.

Na Figura 13, pode-se acompanhar tanto o crescimento da geração eólica ao longo de cinco anos, como também o comportamento sazonal. Entretanto, com esse gráfico não se pode elaborar uma análise concreta da sazonalidade, pois considera a entrada de novas instalações.

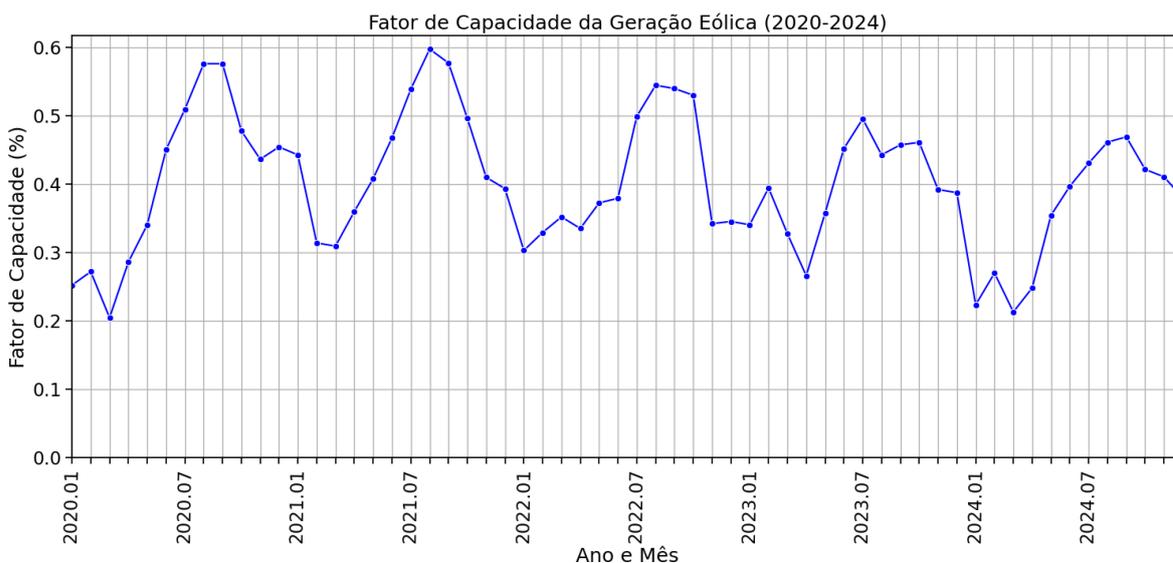


Figura 14: Fator de capacidade por mês da geração eólica.

O fator de capacidade é uma medida que determina a eficiência da geração. Ele é calculado dividindo-se a energia gerada em um determinado período pela energia máxima que poderia ter sido gerada nesse mesmo período. Portanto, essa medida nos permite comparar momentos com capacidades instaladas distintas.

Na Figura 14, pode-se perceber uma sazonalidade bem evidente. No entanto, esse gráfico agrega todas as regiões do Brasil, o que não permite uma análise mais aprofundada da sazonalidade local, sendo necessária uma análise mais específica por regiões. Serão analisados os subsistemas Nordeste e Sul, os quais são os únicos subsistemas com uma quantidade relevante de eólicas. Além deles, o subsistema Norte possui uma única usina eólica e que geograficamente se encontra no Maranhão, um estado da região Nordeste.

### 3.1 Região Nordeste

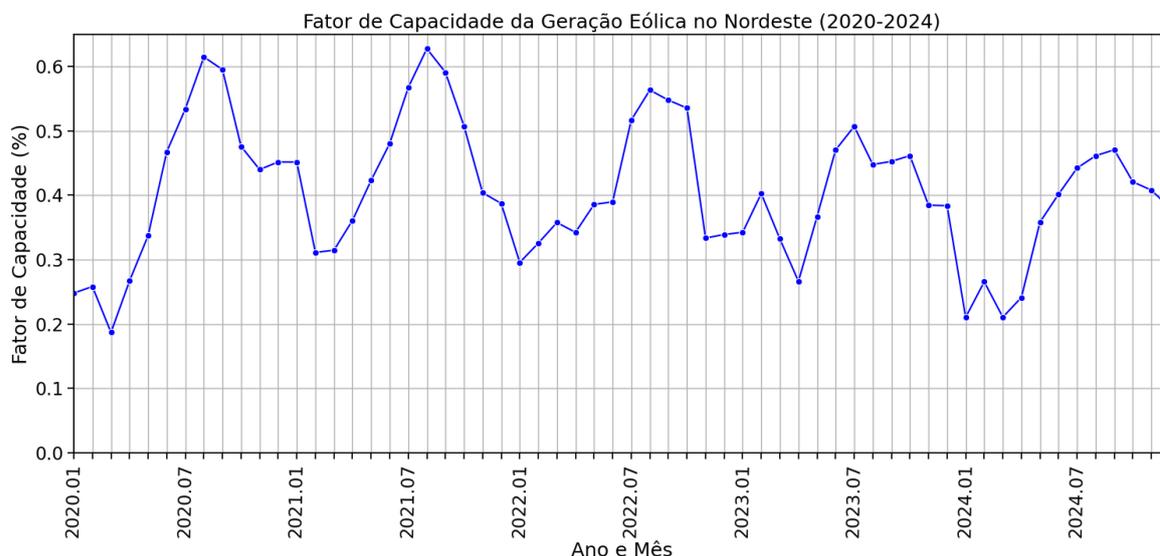


Figura 15: Fator de capacidade por mês da geração eólica na região Nordeste.

A Figura 15 ilustra a evolução do fator de capacidade na região Nordeste. O gráfico se assemelha bastante com o do Brasil como um todo, pois esta região é responsável pela grande maioria da geração eólica do Brasil. Pode-se perceber um comportamento que se repete: uma queda da geração no começo do ano e um pico no 3º trimestre nos cinco anos retratados. Contudo, nota-se que houve uma redução da geração nos anos de 2023 e 2024, evidenciando que não só existe uma característica de sazonalidade ao longo do ano, mas também uma variação de um ano para o outro devido a características climáticas.

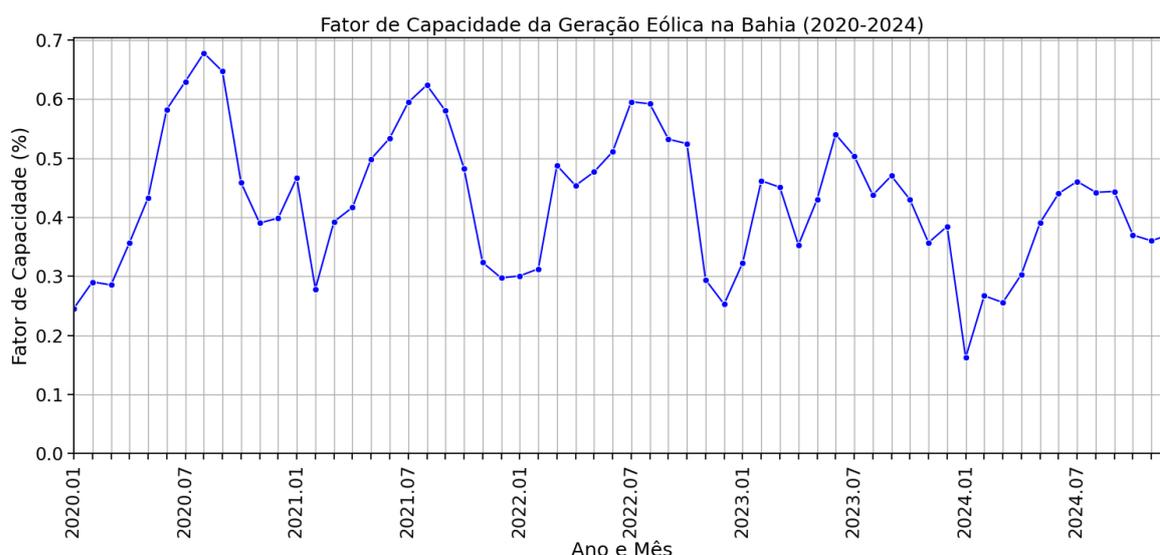


Figura 16: Fator de capacidade por mês da geração eólica na Bahia.

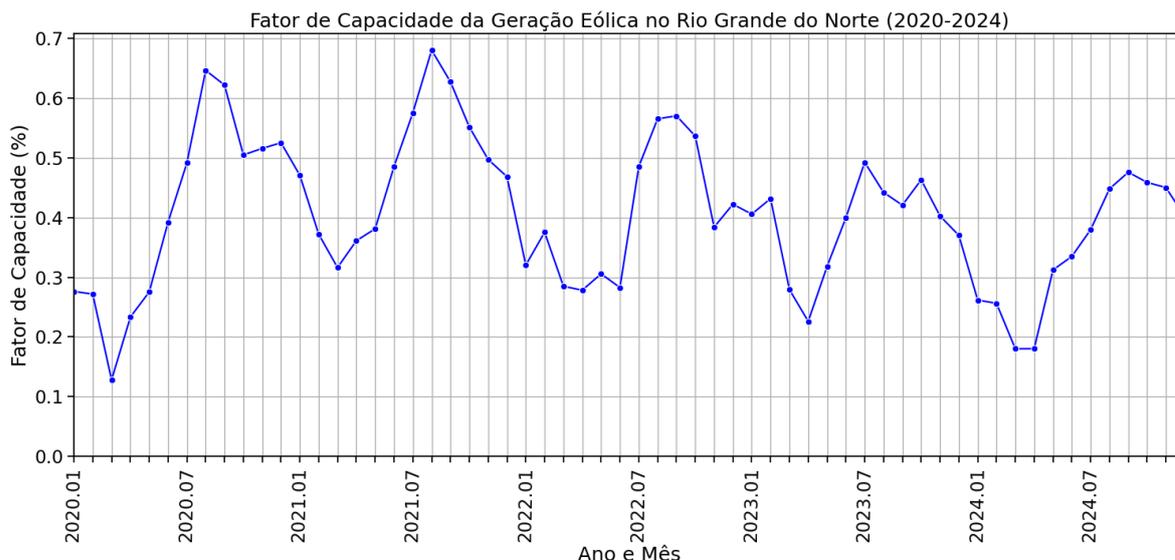


Figura 17: Fator de capacidade por mês da geração eólica no Rio Grande do Norte.

Considerando os dois estados de maior geração do Nordeste, Bahia e Rio Grande do Norte, observa-se comportamento semelhantes, com pequenas mudanças dos meses de maior e menor fator de capacidade. De qualquer forma, nota-se queda no começo do ano e uma ascensão no segundo semestre.

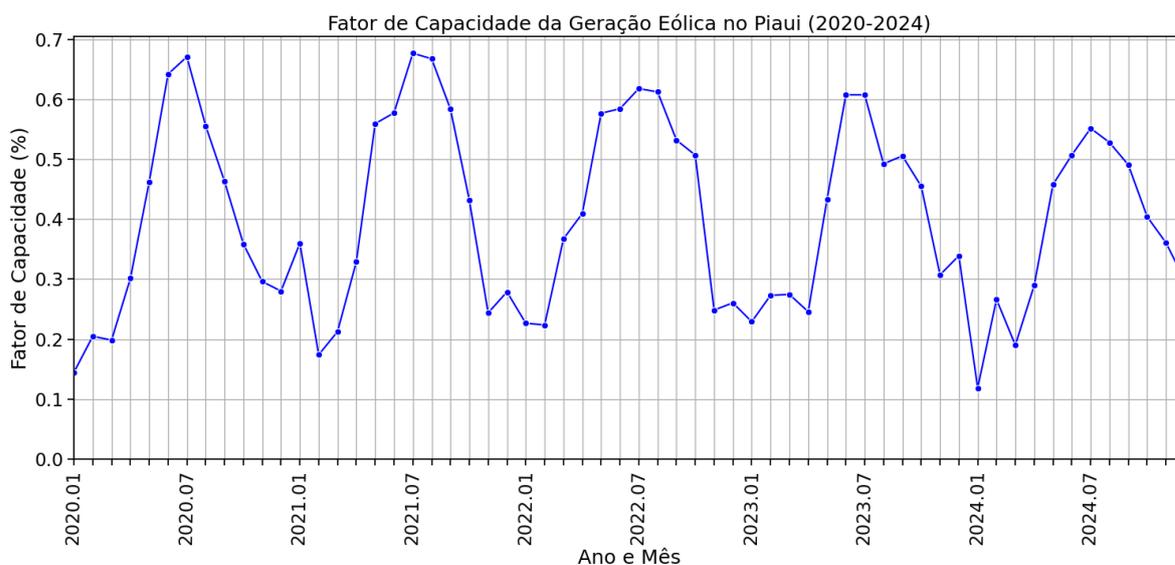


Figura 18: Fator de capacidade por mês da geração eólica no Piauí.

O Piauí é o terceiro estado com a maior geração eólica. Quando comparado aos outros estados que analisamos, ele alcança valores mais altos nos meses de pico e valores mais baixos nos meses de menor geração.

Ao comparar os três estados, percebe-se que o comportamento da geração ser mais baixa durante os primeiros meses do ano e mais alta no terceiro trimestre coincide para todos eles, mesmo que apresente uma pequena defasagem. Isso é uma desvantagem das usinas eólicas serem localizadas, em sua maioria, em somente uma região do Brasil. Dependendo da época do ano, a energia eólica pode ter uma geração muito elevada, a ponto de não ser escoável pela transmissão, enquanto em outros meses, a sua contribuição é menos significativa.

	Nordeste	BA	PI	RN
Média	0,4054	0,4270	0,4045	0,4013
Variância	0,0114	0,0133	0,0152	0,0244

Tabela 1: Média e variância do fator de capacidade dos estados do Nordeste.

	BA	RN	PI
BA	1	0,642936	0,876624
RN	0,642936	1	0,532414
PI	0,876624	0,532414	1

Tabela 2: Correlação entre fator de capacidade dos estados do Nordeste.

A variância é uma medida que indica o quanto valores individuais se afastam da média de um conjunto de dados. Variância mais alta significa que os dados variam muito, e variância mais próxima de zero significa que os valores individuais tendem a ficar mais perto da média [5].

Analisando a média do fator de capacidade dos estados, na Tabela 1, observam-se valores muito próximos, por volta de 40%. Porém, na grandeza variância, a Bahia destaca-se com o menor valor, e Rio Grande do Norte com o maior valor. Isso indica que o Rio Grande do Norte possui uma dispersão maior dos valores de fator de capacidade.

Pode-se notar que a variância do Nordeste como um todo é mais baixa do que a de cada estado. Isso ocorre porque existe uma geração proveniente de locais diferentes, logo, há uma diversificação da matriz.

A Tabela 2 apresenta as correlações entre a geração de cada estado. Correlação é um coeficiente que representa a relação linear entre duas variáveis. A correlação varia de -1 a 1: valores próximos a um significam que quando uma das variáveis aumenta, a outra também aumenta; da mesma forma, quando uma diminui, a outra também diminui [5].

Nota-se uma correlação elevada entre os estados do Nordeste, em especial entre Bahia e Piauí. Essa correlação elevada pode ser justificada por serem afetados pelos fatores climáticos similares. A Figura 12 mostra que existem um número significativo de usinas no norte da Bahia e no sul do Piauí, na divisa entre os dois estados, o que explica o valor alto desse coeficiente. A correlação alta é prejudicial para a matriz elétrica, pois significa que, estatisticamente, quando a geração de um dos estados diminuir, a dos outros também diminuirá.



Figura 19: Média da geração a cada hora no Nordeste em 2024.

Além da variação de geração ao longo dos meses, também existe uma oscilação ao longo do dia, de hora em hora para cada região. Na Figura 19, apresentam-se os valores de geração média por hora para 2024, porém os outros anos apresentam um comportamento bem similar. Nota-se que a geração costuma diminuir no começo da manhã, com o menor valor médio às 13h. Depois, volta a crescer até o começo da noite, tendo valores mais elevados durante a noite e a madrugada. Um ponto interessante é que esse valor de menor geração quase coincide com o pico da geração solar, que será avaliado mais a frente. Por um lado, parte do pico da geração eólica coincide com o horário de pico de consumo no começo da noite, porém outra parte é gerada durante a madrugada, no qual o consumo é o mais baixo do dia.

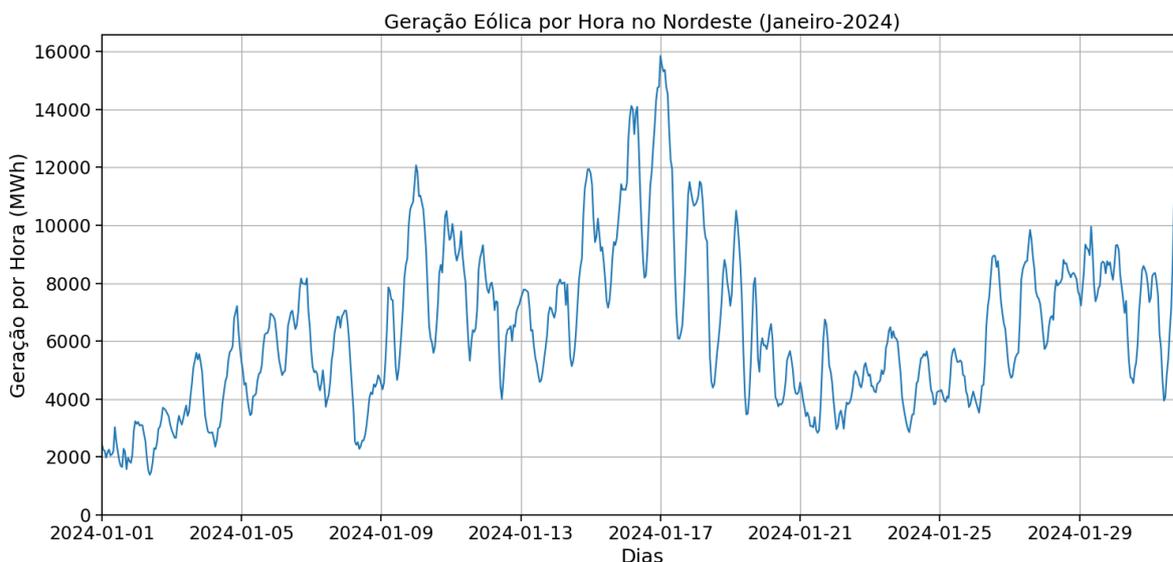


Figura 20: Geração eólica por hora em janeiro de 2024.

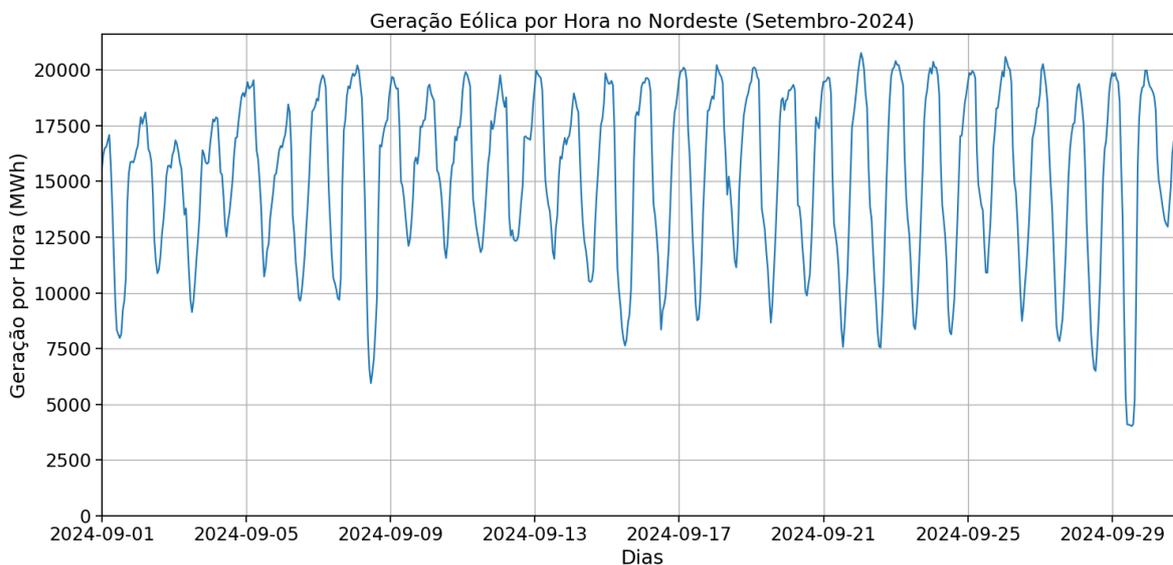


Figura 21: Geração eólica por hora em setembro de 2024.

A Figuras 20 e 21 apresentam, respectivamente, os meses de menor e maior geração eólica do ano de 2024. Nota-se uma grande queda da geração nas horas da tarde, em ambos os meses, tanto em dias de geração mais alta ou mais baixa. Outro fator relevante é que existe uma grande variação da quantidade gerada de um dia pro outro. Por exemplo, existe a ocorrência de pico horário de 8 GWh, em um dia, e 15 GWh no dia seguinte, o que pode gerar uma grande incerteza para a programação da geração.



Figura 22: Geração eólica média por hora em fevereiro de 2024.

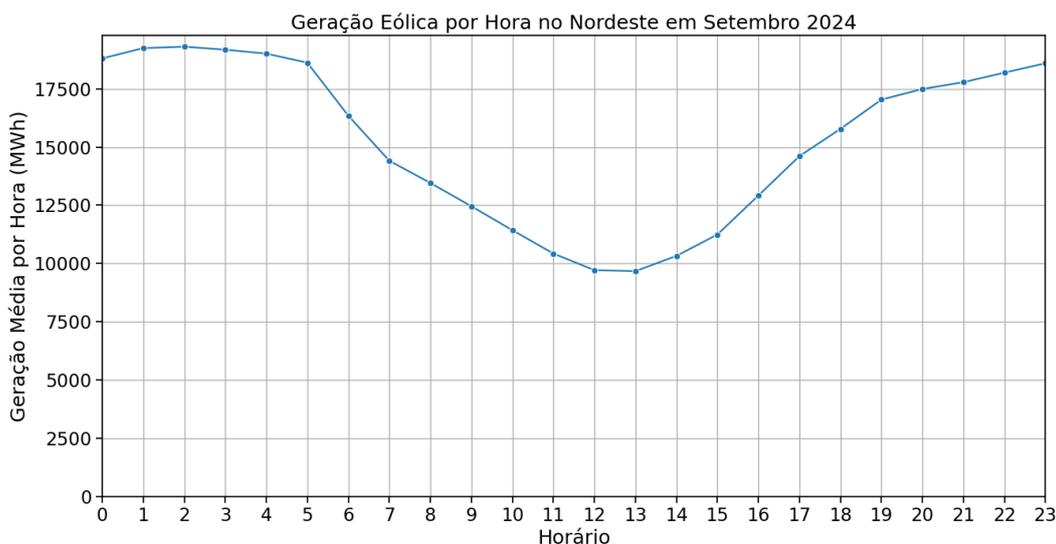


Figura 23: Geração eólica média por hora em setembro de 2024.

As Figura 22 e 23 ilustram a geração média horária para os meses de fevereiro (maior geração) e setembro (menor geração) de 2024. Agora, é possível identificar com mais clareza que o comportamento de geração mais baixa ao longo do dia e mais alta na noite e madrugada permanece. Porém, em setembro, existe um aumento de 80% entre o ponto de menor geração para o ponto de maior. Em fevereiro, observa-se uma queda de geração durante o dia, mas ela é bem menos acentuada, com uma diferença máxima de apenas 40%.

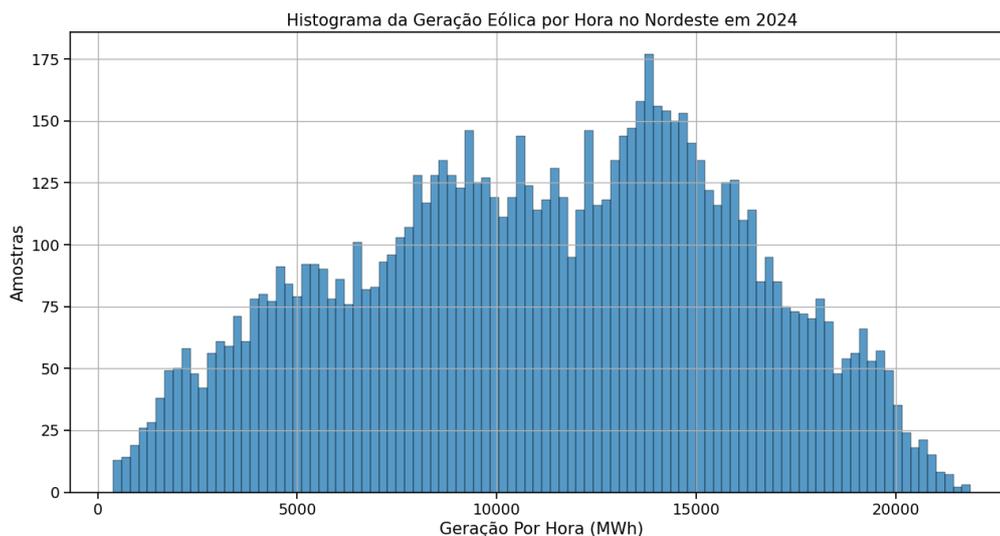


Figura 24: Histograma da geração eólica do Nordeste ao longo de 2024.

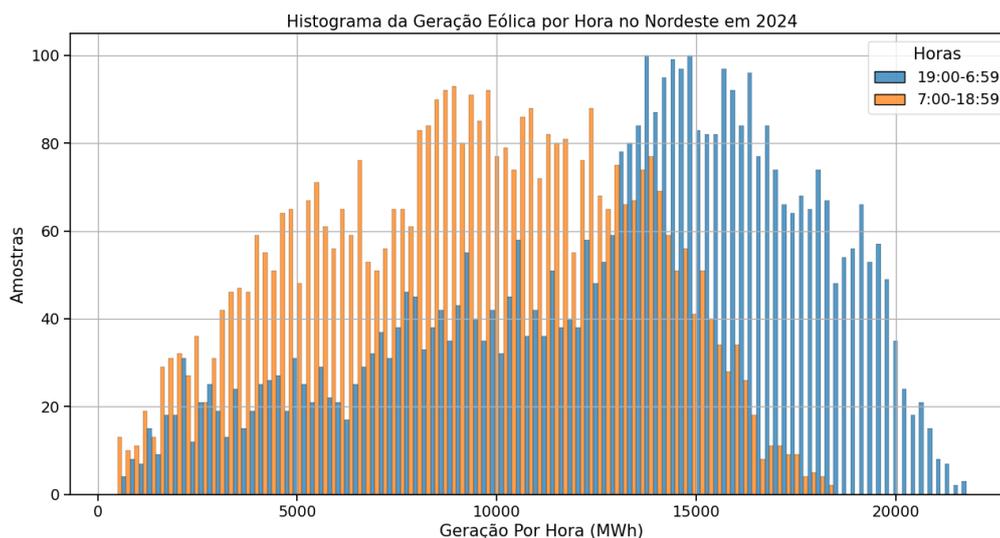


Figura 25: Histograma da geração eólica do Nordeste ao longo de 2024, separando horários das 7h às 18h e 19h às 6h.

O histograma nos permite visualizar a frequência de cada valor de geração. Na Figura 24, sem discriminação de horários, observa-se característica bimodal, que sugere a existência de dois grupos de dados. Para testar essa hipótese, os dados foram separados pela metade: agrupam-se as 12 horas com maior e menor média de geração, em dois grupos. O resultado são dois histogramas mais bem definidos, conforme Figura 25.

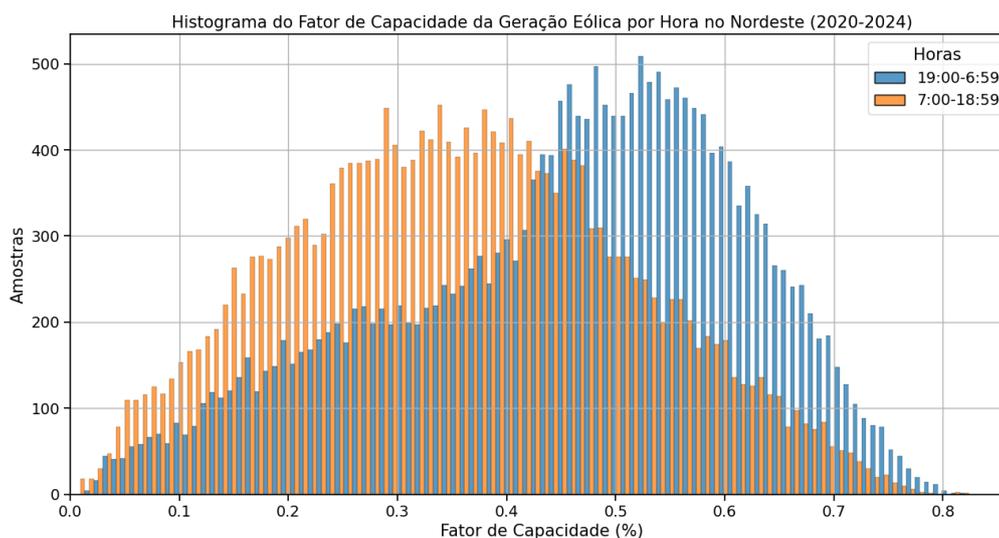


Figura 26: Histograma da Geração Eólica do Nordeste de 2020 a 2024, separando horários das 7h às 18h e 19h às 6h.

A Figura 26 apresenta o histograma de fator de capacidade, por hora, com os dados de 2020 a 2024. Novamente, o agrupamento em duas faixas horárias é realizado, permitindo notar os dois histogramas ainda mais bem definidos.

Na Figura 27, os dados foram separados pelos 12 meses do ano. Nota-se que nos meses de maior geração existe uma diferença maior entre o fator de capacidade de cada horário. Nos meses em que a geração é mais baixa, existe uma diferença menor entre os valores da noite e do dia, e eles são mais próximos nos meses de menor geração.

Em meses como setembro, outubro e novembro, os gráficos se distanciam, com uma diferença significativa de média entre os dois gráficos. A maior parte do acréscimo de geração nesses meses ocorre de noite e madrugada.

Realizando o teste de normalidade, nenhum desses conjuntos de dados pode ser aproximado por uma distribuição normal. Para comparar os dados pode ser utilizado o teste U de Mann-Whitney, que permite comparar dois conjuntos de dados diferentes, determinando se um dos grupos tende a ter valores maiores do que o outro [17]. Após a utilização desse teste, chega-se a conclusão de que para todos os meses o horário 19h às 6h59 tende a ter valores maiores do que o horário das 7h às 18h59.

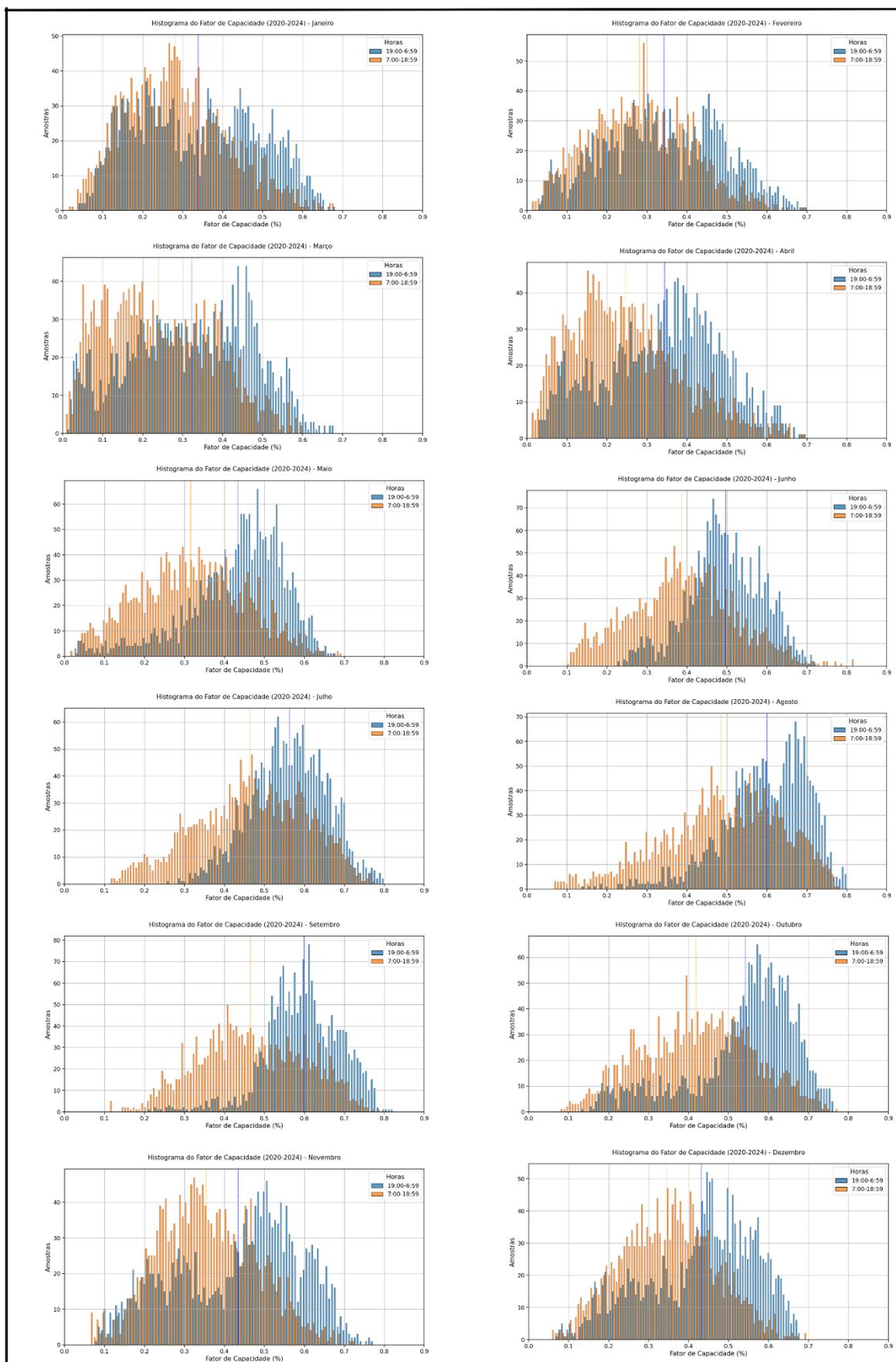


Figura 27: Histograma da geração eólica do Nordeste de 2020 a 2024, separando horários das 7h às 18h59 e 19h às 6h59 para cada mês.

### 3.2 Região Sul

Outras regiões brasileiras possuem uma capacidade de geração eólica muito mais baixa do que a da região Nordeste, existindo apenas uma geração em quantidade relevante na região Sul.

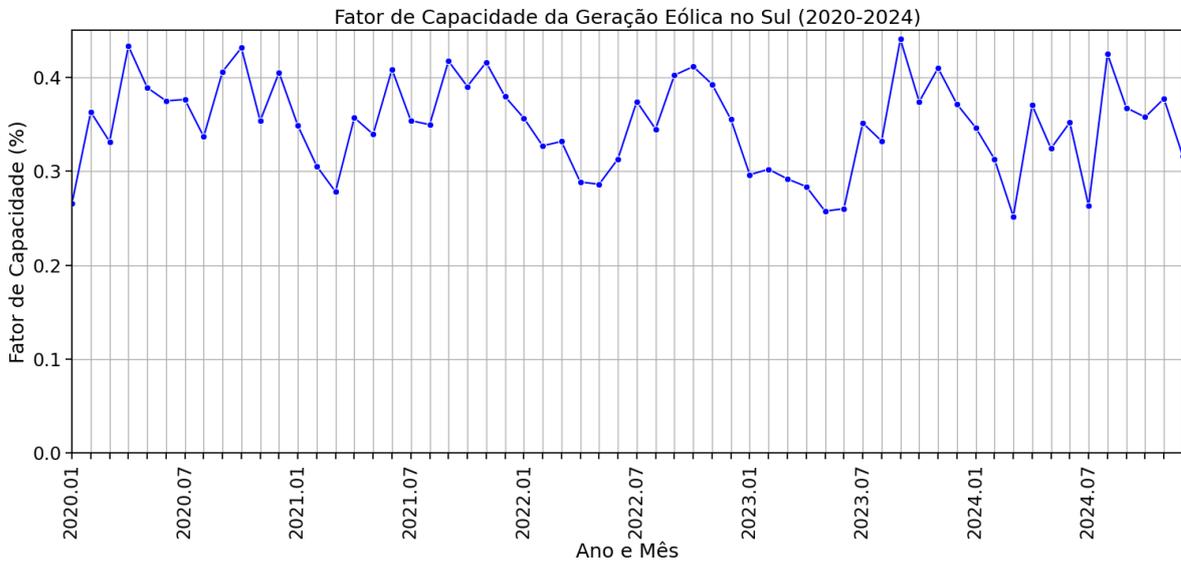


Figura 28: Fator de capacidade por mês da geração eólica na região Sul (2020-2024).

A região Sul possui uma média de fator de capacidade eólico de 35,05% e uma variância de 0,0024, o quais podem ser visualizados na Figura 28. Isso significa que um gerador na região Sul é cerca de 13% menos eficiente do que um gerador do Nordeste. O Sul, porém, possui uma vantagem em relação ao Nordeste com um valor de variância 80% menor, o que quer dizer que a geração é bem mais constante durante o ano todo e, portanto, mais previsível.

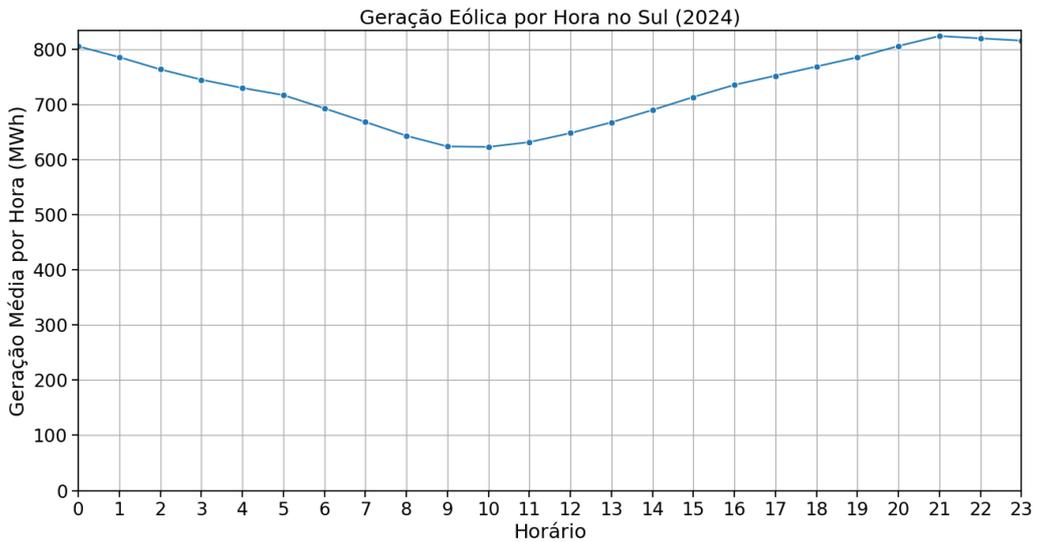


Figura 29: Geração média eólica por hora na região Sul.

Além da geração mensal variar menos, a geração diária também é mais constante. Existe uma pequena queda durante o começo da manhã, porém com valores não tão distantes dos valores de pico.

Para a rentabilidade de uma usina, o que importa mais é a geração bruta, isto é, a média gerada. Mesmo que os ventos do Sul tenham um comportamento menos variado, pelo seu valor tender a ser mais baixo, os investimentos e, conseqüentemente, a capacidade instalada também são mais baixos. Os valores de geração alcançados têm uma relevância muito menor para o sistema elétrico. Enquanto a região Nordeste produz em média 270 GWh de energia eólica por dia, a região Sul produz em média 17,5 GWh.

### 3.3 Cortes de Geração Eólica

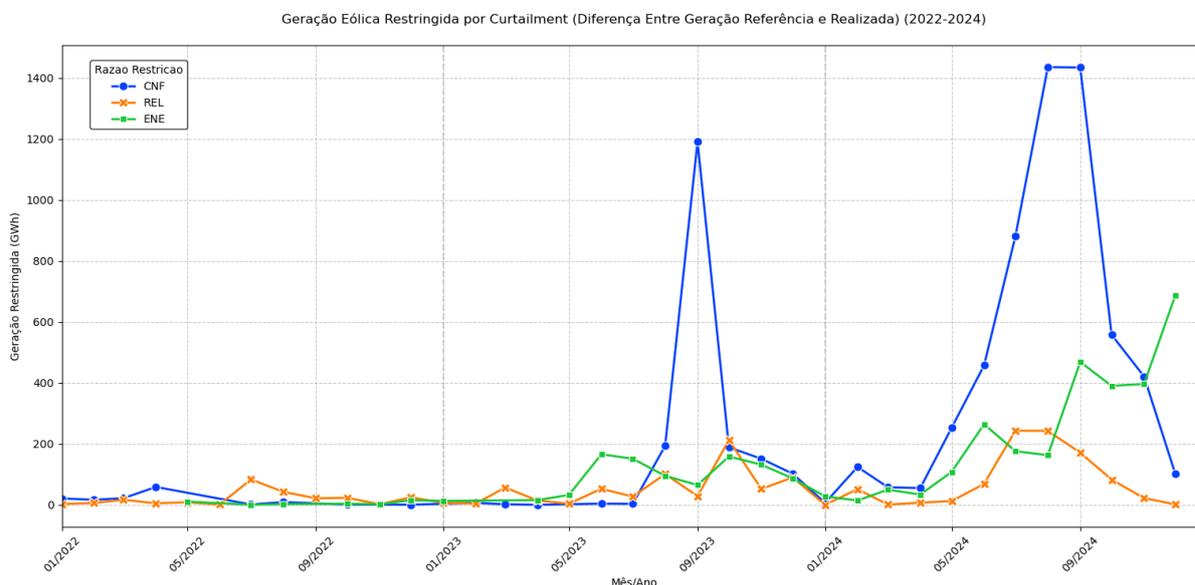


Figura 30: Curtailment de eólicas (2022-2024).

O corte de geração (*curtailment*) de eólicas teve um enorme crescimento no ano de 2024, com 5,8 TWh de geração limitada por motivos de confiabilidade e 2,8 TWh de geração limitada por causas energéticas e 0,9 TWh por razão de indisponibilidade externa, totalizando 9,5 TWh restritos, o que representa 9% da geração total do ano de 106 TWh.

Nota-se que o motivo de confiabilidade começou a ser muito utilizado a partir de agosto de 2023. Uma possível explicação pode estar associada ao apagão que ocorreu nesse mês, em que foram detectados problemas nos modelos matemáticos fornecidos ao ONS pelos agentes geradores, com o controle de suporte dinâmico de potência reativa performando abaixo do esperado [18]. Após esse ocorrido, as restrições aumentaram muito, com o objetivo de garantir a confiabilidade do sistema, em especial nos meses de maior geração eólica no Nordeste.

### 3.4 Considerações Finais

A geração eólica no Brasil tem um papel muito importante para a matriz elétrica e teve um crescimento significativo nos últimos anos. A análise de sua variabilidade e sazonalidade possui uma grande importância para a criação de estratégias que garantam a estabilidade do sistema.

Seu comportamento de maior geração durante a noite é benéfico para o sistema, pela presença de fontes de complementares como a solar, que será abordado no próximo capítulo.

### 4. Geração Solar no Brasil

Energia solar é um termo que designa a energia elétrica, gerada diretamente pelo sol, seja por luz ou calor. No contexto de eletricidade, existem duas formas de aproveitar essa energia: com geradores heliotérmicos, que utilizam o calor do sol de forma concentrada para gerar energia, e com os geradores fotovoltaicos, que utilizam semicondutores para converter a luz do sol em eletricidade.

As heliotérmicas são muito pouco utilizadas no Brasil, somente em contextos de pesquisa, e não possuem uma geração significativa, devido ao custo elevado da sua implantação comparado a outras fontes renováveis.

As fontes fotovoltaicas são as que mais crescem no país, seja pela instalação de grandes usinas ou de pequenas centrais geradoras, impulsionadas pela constante redução de preço da tecnologia, incentivos do governo e pela possibilidade de ser instaladas em pequena escala pelo próprio consumidor. A geração solar fotovoltaica é utilizada como sinônimo de energia solar no Brasil.

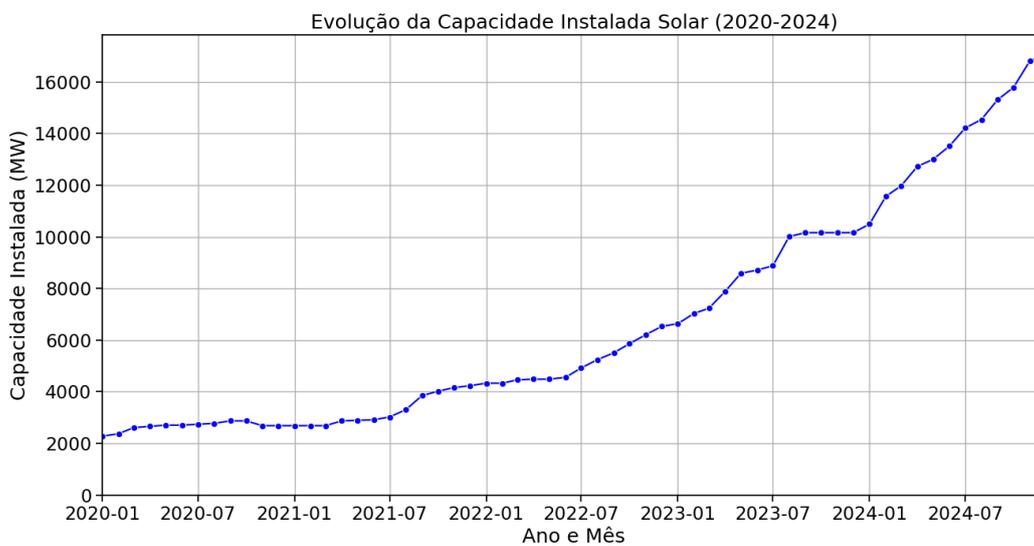


Figura 31: Crescimento da capacidade instalada fotovoltaica por estado (não inclui MMGD).

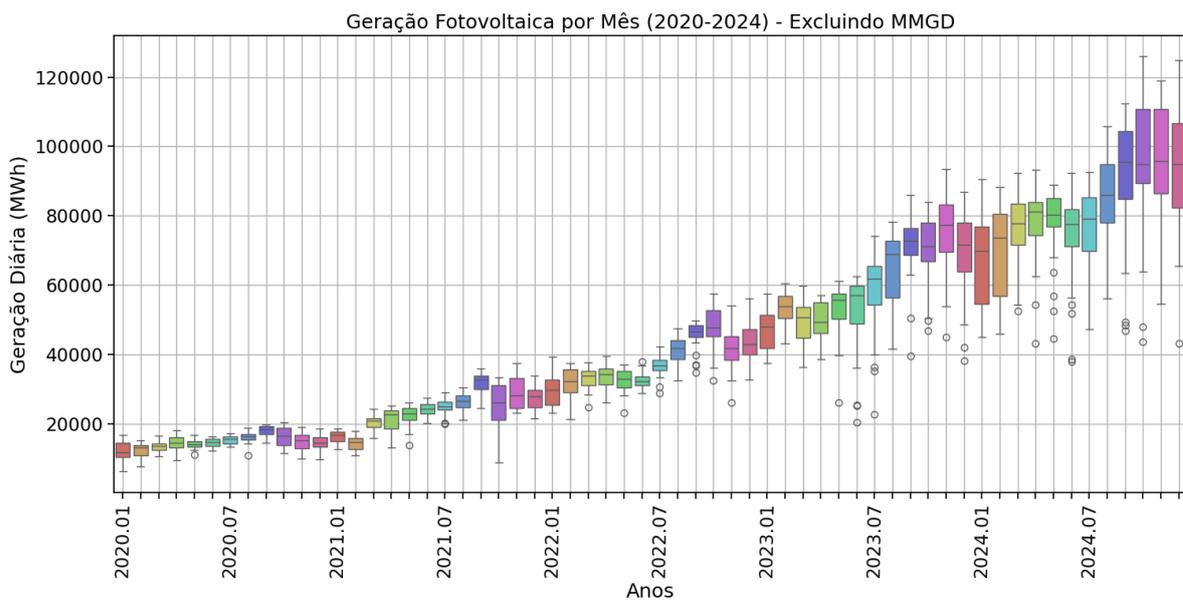


Figura 32: Crescimento da geração fotovoltaica diária (não inclui MMGD).

A capacidade instalada de usinas solares convencionais cresceu exponencialmente nos últimos anos. No começo de 2020, a capacidade instalada era de 2000 MW e, ao final de 2024, já havia ultrapassado 17000 MW. Os valores citados não consideram a geração distribuída, da qual não é possível mensurar um valor exato de capacidade instalada pela natureza descentralizada. Os dados do ONS possuem a geração estimada das MMGDs, porém só foram inseridos na base de dados em abril de 2023. Portanto, não existe um histórico expressivo para comparações, sendo somente possível trabalhar com 2024 como um ano completo.

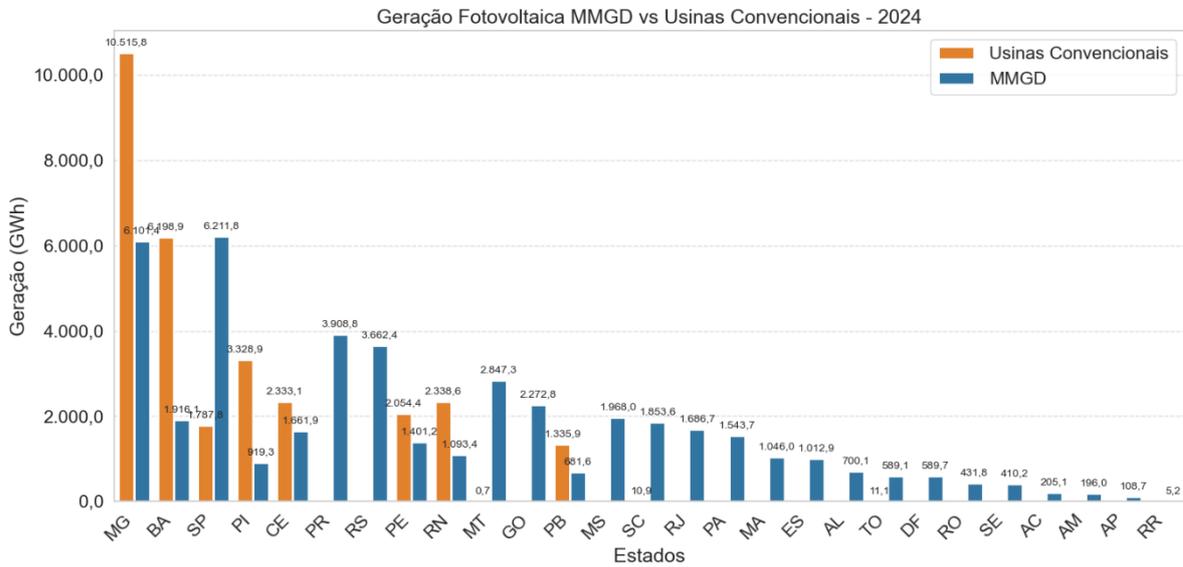


Figura 33: Geração fotovoltaica em 2024 por estado.

Para usinas convencionais, a geração solar também é concentrada em poucos estados, com Minas Gerais e Bahia liderando por uma grande margem. Porém, a geração distribuída possui presença em todos os estados e já apresenta valores muito significativos. Enquanto usinas convencionais geraram 29,9 GWh, a geração distribuída gerou 45 GWh, 60% do total de geração fotovoltaica.

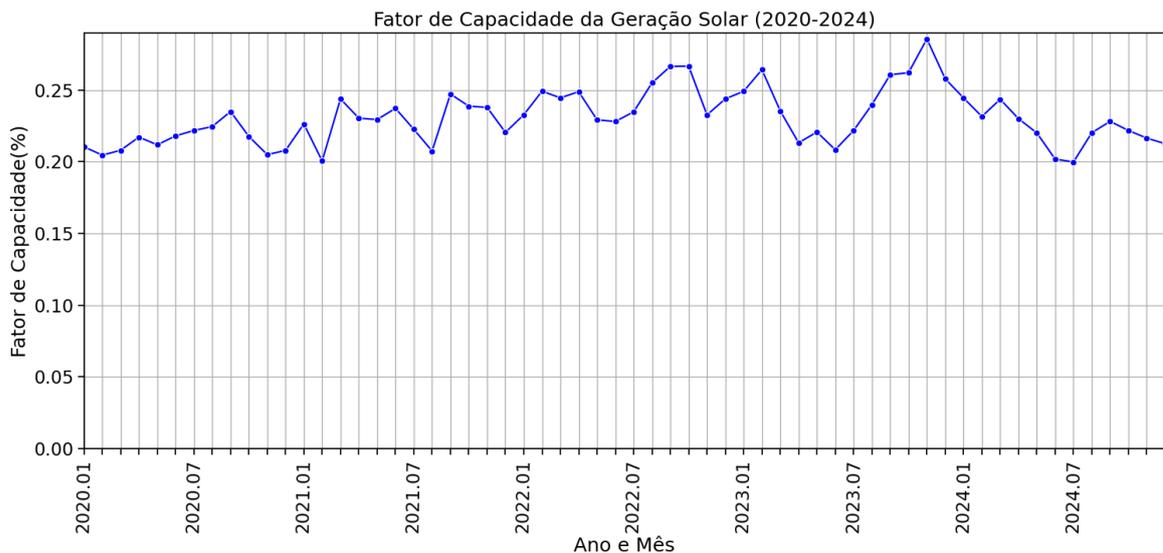


Figura 34: Fator de capacidade da geração fotovoltaica por mês.

Os valores de fator de capacidade das usinas fotovoltaicas são consideravelmente mais baixos do que os de usinas eólicas, pois elas só conseguem gerar durante o dia. Esse fator de capacidade médio baixo é uma desvantagem, pois é necessário dimensionar linhas de transmissão para escoar a energia de pico. A energia efetivamente gerada, todavia, é mais baixa, visto que a média do fator de capacidade foi de 23,1% nos últimos 5 anos.

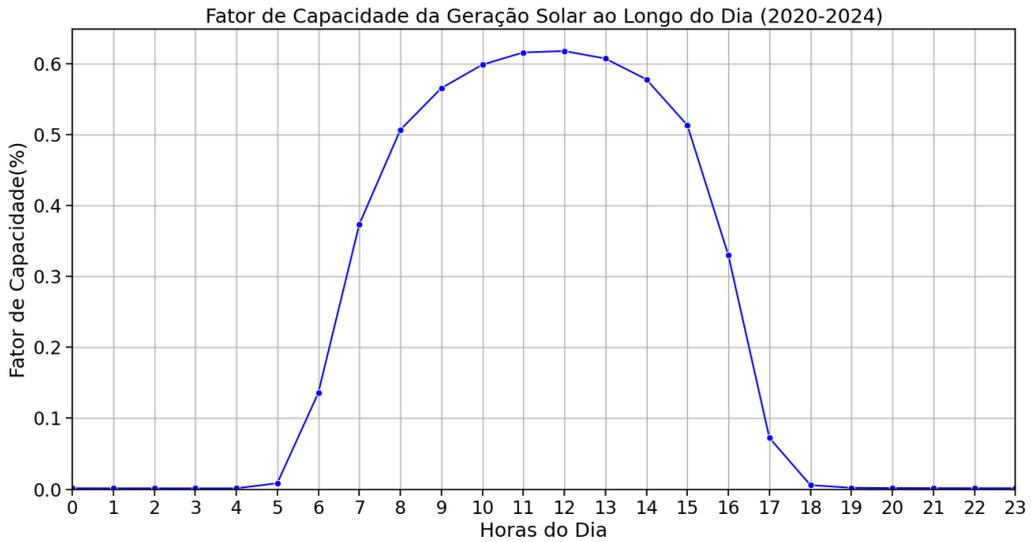


Figura 35: Fator de capacidade da geração fotovoltaica média por hora.

O comportamento da geração fotovoltaica ao longo do dia é intuitivo: por volta das 5h, começa a gerar, e interrompe por volta das 18h, com um fator de capacidade bem alto ao longo da manhã e tarde. Esse comportamento torna necessária a complementação com outras fontes e com a capacidade de armazenamento de energia, seja por baterias ou reservatórios de hidrelétricas, para que possa se aproveitar ao máximo essa geração.

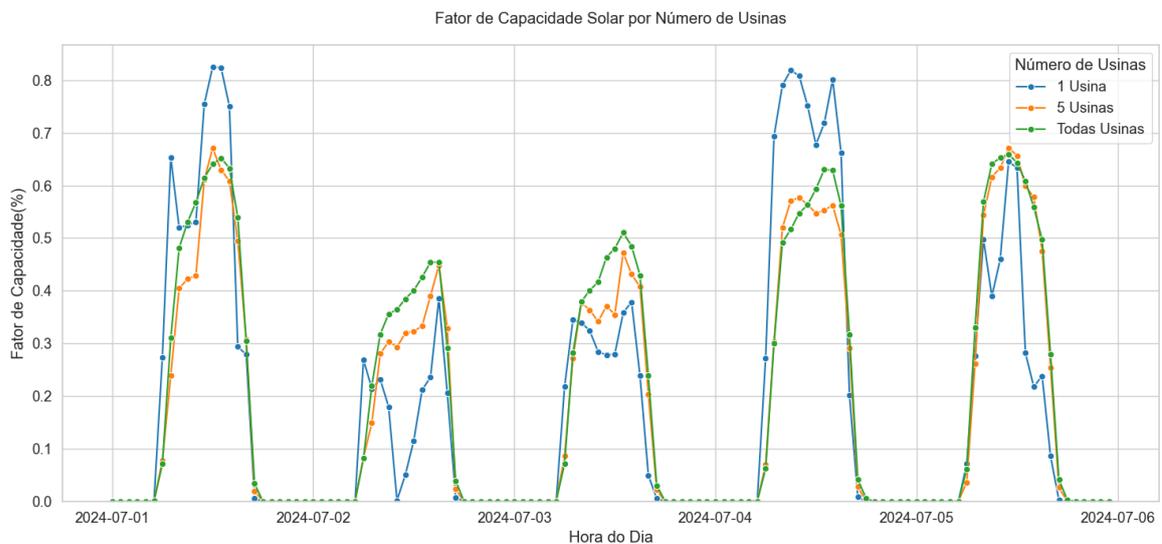


Figura 36: Fator de capacidade solar por número de usinas.

Na Figura 36, existem três curvas: uma representa o fator de capacidade de uma única usina ao longo do dia, a segunda curva agrega o fator de capacidade de 5 usinas diferentes, e a última curva representa o fator de capacidade de todas as usinas do SIN. A ideia deste gráfico é demonstrar como uma usina solar pode ter uma variação muito elevada ao longo do dia, sendo afetada por fatores climáticos. Porém, ao se considerar as usinas espalhadas pelo Brasil, encontra-se um comportamento notadamente mais estável. Alguns dias tem menor geração que outros, porém a curva varia pouco de uma hora para outra.

A Figura 36 leva em consideração as usinas convencionais, que estão limitadas ao Nordeste e parte do Sudeste. Não é possível adicionar ao cálculo o fator de capacidade da geração distribuída, porém ao utilizar a geração bruta, pode-se incluir os valores de geração distribuída.

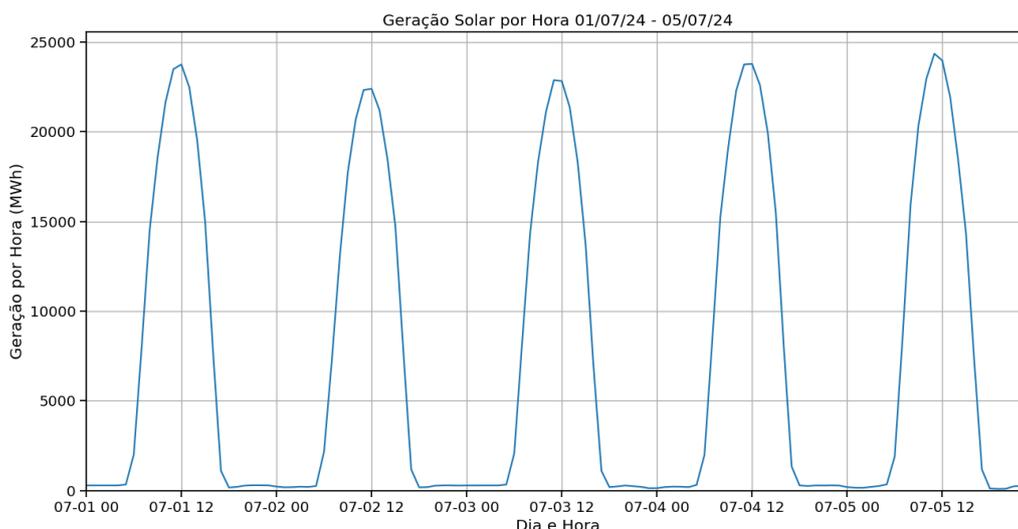


Figura 37: Geração solar hora a hora 01/07/24-05/07/24.

Na Figura 37, pode-se observar que ao adicionar o grande número de pequenas geradoras, muito mais distribuídas geograficamente, o comportamento para os mesmos momentos se torna ainda mais regular. O comportamento de cada dia é muito similar ao do próximo, além disso, os valores de pico da geração de cada dia apresentaram uma semelhança significativa nesse gráfico.

#### 4.1 Três Estados com Maior Geração Centralizada

Na Figura 33, três estados destacam-se com os maiores valores de geração centralizada: Minas Gerais, Bahia e Piauí. É importante entender o motivo do grande investimento nesses estados e o comportamento da energia solar neles.

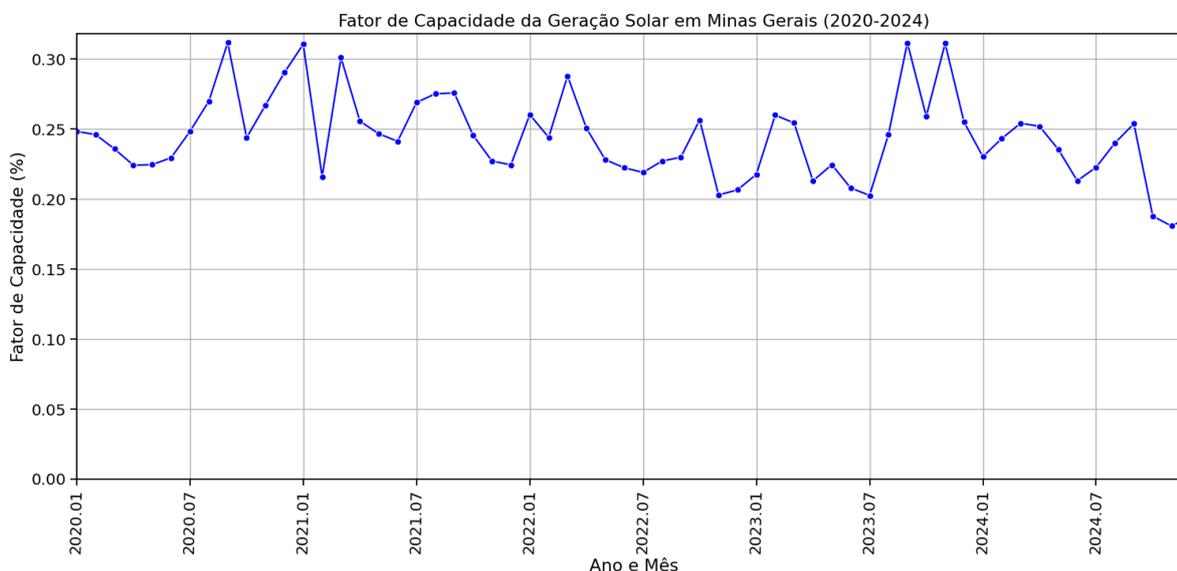


Figura 38: Fator de capacidade mensal em Minas Gerais.

Em Minas Gerais, pela Figura 38, é difícil perceber algum comportamento cíclico entre os 5 anos representados. Não parece existir um padrão de meses com uma geração maior ou menor. Ademais, o fator de capacidade mensal não varia muito ao longo dos anos.

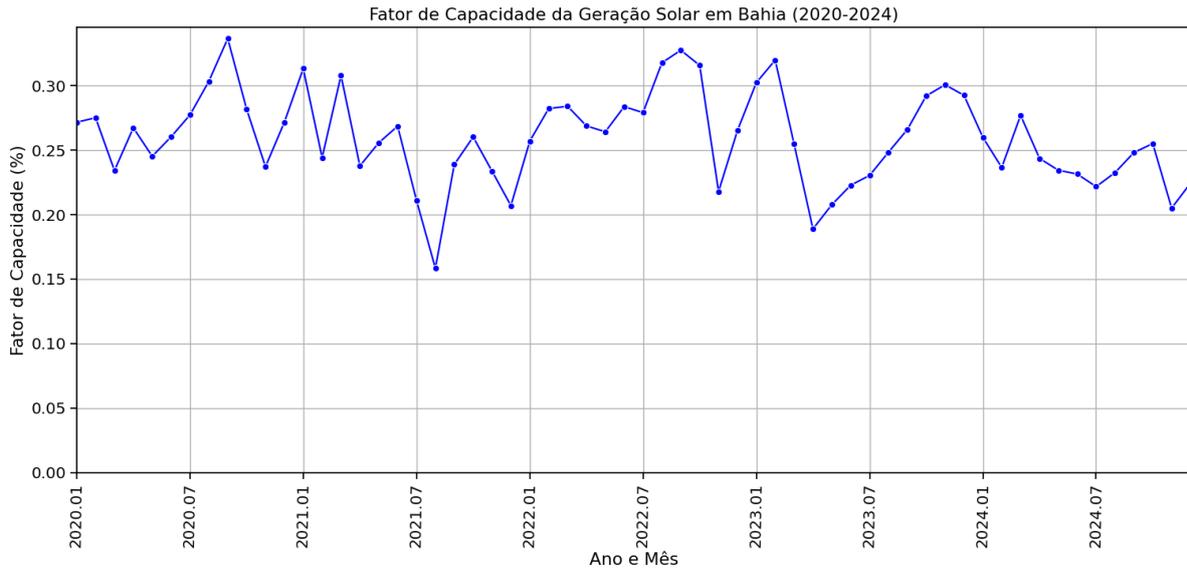


Figura 39: Fator de capacidade mensal na Bahia.

Em comparação a Minas Gerais, pode-se notar que a Bahia, pela Figura 39, apresenta uma variação maior de valores, porém uma média semelhante de fator de capacidade. Assim como em Minas Gerais, não parece existir nenhuma relação entre meses específicos do ano e a geração solar.

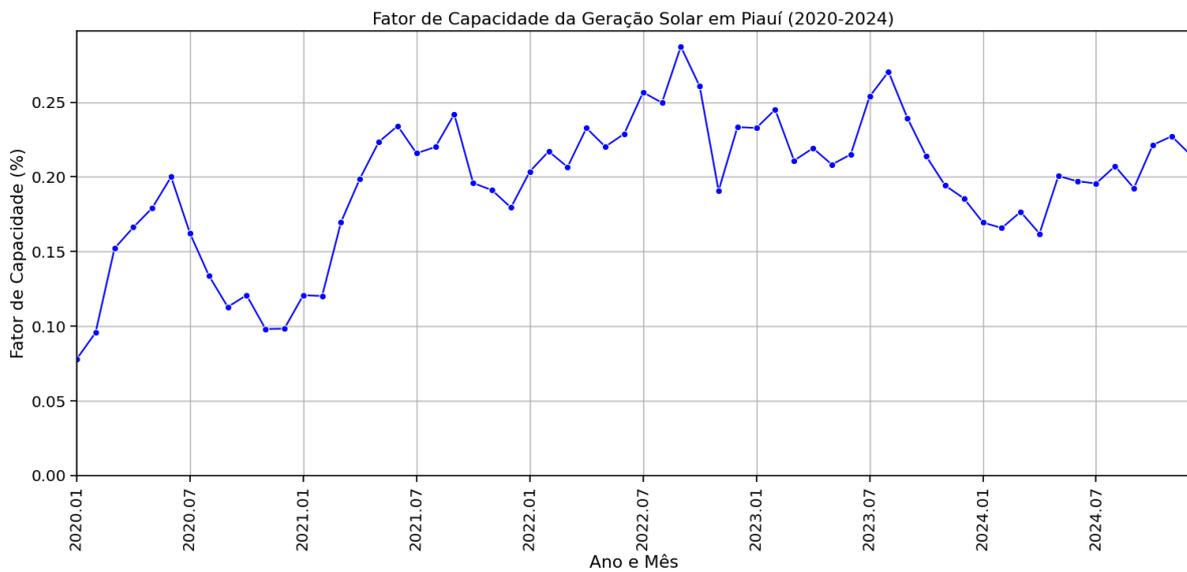


Figura 40: Fator de capacidade mensal no Piauí.

Na Figura 40, identifica-se um comportamento diferente do Piauí em relação aos outros estados. Em 2020, houve períodos de fator de capacidade muito mais baixo do que dos outros anos. Além disso, mesmo nos outros anos o estado do Piauí apresenta valores mais baixos de fator de capacidade do que os outros dois estados.

	MG	BA	PI
Média	0,2439	0,2592	0,1952
Variância	0,0009	0,0013	0,0022

Tabela 3: Média e variância do fator de capacidade.

	MG	BA	PI
MG	1	0,4180	-0,2968
BA	0,4180	1	-0,0566
PI	-0,2968	-0,0566	1

Tabela 4: Correlação do fator de capacidade.

Minas Gerais e Bahia possuem valores próximos de média do fator de capacidade, com Bahia tendo resultados marginalmente melhores. Comparando as variâncias, também se tem valores próximos, entretanto, os valores de Minas Gerais têm menor dispersão. Ao analisar os valores de Piauí, pode-se perceber que não só apresenta uma média de geração bem mais inferior, como também seus valores variam mais do que os dois outros estados.

A Tabela 4 apresenta os valores de correlação entre cada um dos Estados. Observa-se que a correlação é significativamente menor para a geração solar, comparada à geração eólica. Minas Gerais e Bahia possuem uma correlação fraca. Piauí, por sua vez, em comparação a esses dois estados, apresenta uma correlação desprezível.

Essa baixa correlação entre esses estados é benéfica para o sistema, pois representa uma maior robustez a condições negativas à geração solar. Fatores que causam a baixa geração de um estado, estatisticamente, não afetam os outros.

## 4.2 Corte de Geração Solar

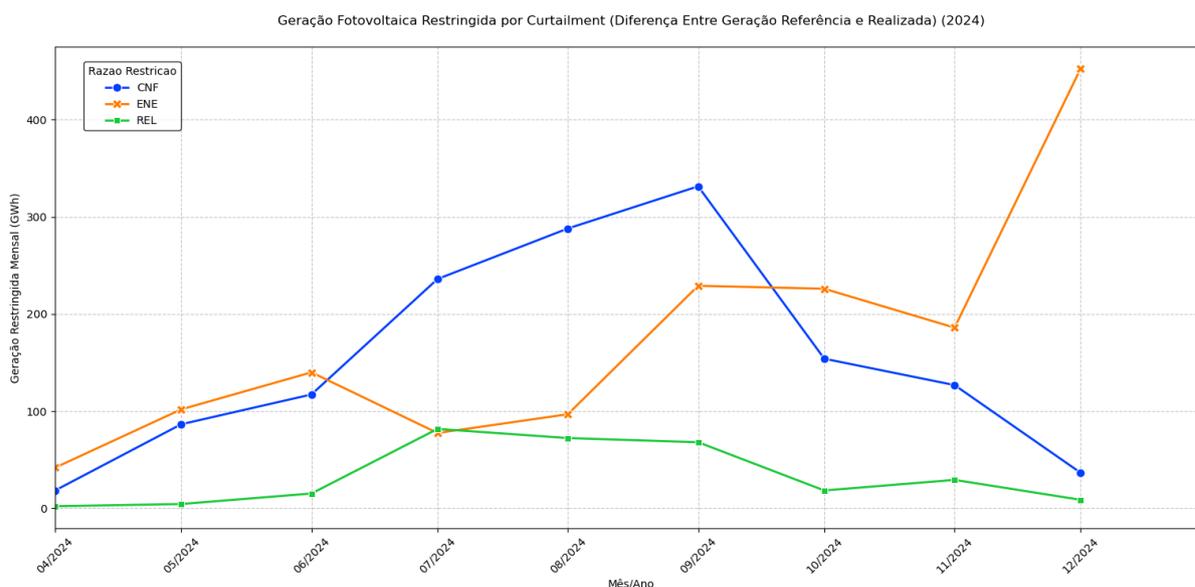


Figura 41: Curtailment usinas fotovoltaicas.

Os dados disponibilizados pelo ONS referentes ao *curtailment* de usinas fotovoltaicas só tem registros a partir de abril de 2024. Nesses nove meses houve 1,4 TWh de restrição por confiabilidade, 1,6 TWh por motivos energéticos e 300 GWh por razão de indisponibilidade externa, totalizando 3,3 TWh, que é equivalente a 11% da geração fotovoltaica de usinas convencionais no ano de 2024.

Assim como para as eólicas, pode-se notar um grande problema da geração estar crescendo rápido demais para ser acompanhada pela infraestrutura de transmissão e pelo consumo, o qual tem aumentado o corte de carga.

### 4.3 Considerações Finais

Neste capítulo, foi abordado o crescimento da geração solar no Brasil, contemplando a geração centralizada e distribuída, que cresceu consideravelmente nos últimos anos e tem a tendência de expandir mais. Esse aumento de geração solar traz consigo preocupações sistêmicas. Por mais que sejam tecnologias vantajosas em relação ao custo, exigem que sejam feitos investimentos no sistema para escoar essa energia. O armazenamento, como por baterias, também vai se tornar importante para absorver a geração excedente.

Quanto ao comportamento da geração solar, foi demonstrado como a geração solar mantém características previsíveis ao longo do dia, todavia, sua variação em um horizonte de tempo maior e mais incerta. Além disso, pode-se ver como a energia solar está bem distribuída pelo Brasil, permitindo com que ela seja mais robusta a condições adversas regionais.

## 5. Conclusões

As fontes de energia renovável variável têm composto uma parcela cada vez maior da matriz elétrica brasileira e mundial. O objetivo desse trabalho foi elaborar um estudo referente a esse crescimento e analisar a sazonalidade dessas fontes e como elas interagem entre si.

Para ter um planejamento estratégico de expansão e operação do sistema elétrico brasileiro, torna-se fundamental estudar essas variações de geração intrínsecas às renováveis variáveis. Entendendo o comportamento no passado, pode-se estimar o futuro. Com o passar do tempo, a base de dados disponíveis expandirá progressivamente, permitindo análises mais abrangentes e aprofundadas.

O Brasil tem um potencial enorme para instalação desses geradores. Essas fontes são essenciais para a sustentabilidade do setor elétrico, contribuindo para a transição energética e a redução de gases do efeito estufa. Além desses fatores, também são tecnologias com custos notavelmente mais baixos e, portanto, com melhor retorno ao investimento.

A energia eólica e solar são desafiadoras para a utilização correta. Serão necessários mais estudos para garantir que o sistema elétrico brasileiro consiga suportá-las de maneira eficiente. Esse crescimento é algo inevitável e positivo, não só para o Brasil como para o meio ambiente, por garantir uma matriz elétrica limpa.

## 6. Bibliografia

- [1] UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY, Proteção do clima global para as gerações presentes e futuras da humanidade (A/RES/43/53), Nova York, 1988. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/02/UNGA43-53.pdf> (Acessado em 02 de julho 2025)
- [2] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME; WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, Memorando de entendimento entre o PNUMA e a OMM sobre o IPCC, Genebra, 1989, Disponível em: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/06/MOU\\_between\\_UNEP\\_and\\_WMO\\_on\\_IPCC-1989.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/06/MOU_between_UNEP_and_WMO_on_IPCC-1989.pdf) (Acessado em 02 de julho 2025)
- [3] UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Kyoto, 1997, Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf> (Acessado em 02 de julho 2025)
- [4] IRENA, Renewable power generation costs in 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- [5] R. L. Ott e M. T. Longnecker, *An Introduction to Statistical Methods & Data Analysis*, 7th ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2016, p. 2.
- [6] ONS, Plataforma Dados Aberto, Disponível em: <https://dados.ons.org.br/> (Acessado em 17 de março de 2025)
- [7] N. C. C. D. OLIVEIRA, A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. *Varia História*, v. 34, n. 65, p. 315–346, maio, 2018.
- [8] IEA. Global electricity generation by source, 2014-2025. Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electricity-generation-by-source-2014-2025>, Licence: CC BY 4.0 (Acessado em 23 de maio de 2025)
- [9] ANEEL, Micro e Minigeração Distribuída, Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/geracao-distribuida> (Acessado em 24 de maio de 2025)
- [10] EPE, Sistema em Números, Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros> (Acessado em 10 de maio de 2025)
- [11] Canal Energia, Sobrecontratação das distribuidoras e de 107,7 % em-2022 aponta CCEE, Disponível em: <https://www.canalenergia.com.br/noticias/53212163/sobrecontratacao-das-distribuidoras-e-de-1077-em-2022-aponta-ccce> (Acessado em 3 de maio de 2025)
- [12] J. Galvão e C. Bermann, "Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas", *Estud. av.*, vol. 29, no. 84, pp. 43–68, May, 2015, doi: 10.1590/S0103-40142015000200004.
- [13] ANEEL, Proposta de edital do leilão de transmissão de 2025 entra em consulta pública, Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/proposta-de-edital-do-leilao-de-transmissao-de-2025-entra-em-consulta-publica> (Acessado em 31 de maio de 2025)
- [14] EPE, Balanço Energético Nacional 2024, Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024> (Acessado em 14 de abril de 2025)
- [15] ABEEólica, Boletim da Geração Eólica 2023, Disponível em <https://abeeolica.org.br/energia-eolica/dados-abeeolica/> (Acessado em 3 de maio de 2025)
- [16] ANEEL, SIGA - Sistema de Informações de Geração da ANEEL, Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/geracao> (Acessado em 14 de maio de 2025)



[17] H. B. Mann e D. R. Whitney, "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other," Ann. Math. Statist, 18 (1) 50 - 60, March, 1947, <https://doi.org/10.1214/aoms/1177730491>

[18] ONS, Análise da Perturbação do dia 15/08/2023 às 8h30min Relatório de análise de perturbação – RAP, Disponível em:  
[https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RAP%202023.08.15%2008h30min%20vers%C3%A3o%20final%20com%20anexos%20de%20diverg%C3%Aancia\\_Final.pdf](https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RAP%202023.08.15%2008h30min%20vers%C3%A3o%20final%20com%20anexos%20de%20diverg%C3%Aancia_Final.pdf) (Acessado em 15 de maio de 2025)