

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ERIKA FERREIRA RIOS

**APLICAÇÃO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA E ECONÔMICA NA
EVOLUÇÃO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL COM BASE NO BALANÇO
ENERGÉTICO NACIONAL 2025**

JOÃO MONLEVADE

ERIKA FERREIRA RIOS

**APLICAÇÃO DE ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA E ECONÔMICA NA
EVOLUÇÃO DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL COM BASE NO BALANÇO
ENERGÉTICO NACIONAL 2025**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Produção do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientação: Profº. Rafael Lucas Machado Pinto

JOÃO MONLEVADE

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R586a Rios, Erika Ferreira.

Aplicação de análise estatística multivariada e econômica na evolução da energia eólica no Brasil com base no balanço energético nacional 2025. [manuscrito] / Erika Ferreira Rios. - 2026.
56 f.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Lucas Machado Pinto.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Análise multivariada. 2. Energia eólica. 3. Energia - Consumo. 4. Energia - Fontes alternativas. 5. Recursos energéticos - Balanço. 6. Transição energética. I. Pinto, Rafael Lucas Machado. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.311:519.23

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6/2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Erika Ferreira Rios

Aplicação de Análise Estatística Multivariada e Econômica na Evolução da Energia Eólica no Brasil com Base no Balanço Energético Nacional 2025.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal

de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Aprovada em 11 de fevereiro de 2026.

Membros da banca

Dr. Rafael Lucas Machado Pinto - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Dra. Luciana Paula Reis - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr. Sérgio Evangelista Silva - Universidade Federal de Ouro Preto

Rafael Lucas Machado Pinto, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Lucas Machado Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/02/2026, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1062896** e o código CRC **FADDFD0C**.

RESUMO

A transição energética brasileira tem impulsionado a ampliação da participação de fontes renováveis na matriz elétrica, com destaque para a energia eólica. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o crescimento da produção e do consumo de energia elétrica de origem eólica no Brasil, no período de 2000 a 2024, identificando os principais fatores técnicos, econômicos, ambientais e estruturais associados à sua expansão. A pesquisa adota uma abordagem quantitativa, fundamentada na aplicação de ferramentas de análise estatística multivariada e análise econômica, com base em dados do Balanço Energético Nacional (BEN) 2025 e da plataforma do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). A metodologia compreende a organização e o tratamento de séries históricas, a realização de análise estatística descritiva, análise de correlação multivariada, Análise de Componentes Principais (ACP) e regressão exploratória com componentes principais. Deste modo, os resultados da análise de correlação indicaram forte associação positiva entre a produção de energia eólica e variáveis relacionadas à expansão da demanda elétrica e ao crescimento econômico, bem como correlação negativa com indicadores de dependência externa de energia, sugerindo contribuição da fonte eólica para o fortalecimento da segurança energética nacional. De maneira semelhante, a ACP permitiu a síntese das variáveis explicativas em dois fatores principais, responsáveis por mais de 90% da variância total, interpretados como um fator de crescimento estrutural do sistema elétrico e um fator econômico-financeiro e de dependência externa. Logo, a regressão exploratória confirmou a relevância estatística desses fatores na explicação do crescimento da energia eólica no período analisado. Conclui-se que a expansão da energia eólica no Brasil está fortemente associada à dinâmica estrutural do sistema elétrico e às condições econômicas, reforçando o papel dessa fonte como alternativa estratégica para a diversificação da matriz elétrica e para a transição energética. O estudo contribui para o avanço do conhecimento aplicado à Engenharia de Produção ao demonstrar a utilidade de métodos estatísticos multivariados na análise de sistemas energéticos complexos.

Palavras Chave: Energia eólica; Matriz elétrica; Análise estatística multivariada; Balanço Energético Nacional; Transição energética.

ABSTRACT

The Brazilian energy transition has driven the expansion of renewable sources in the electricity matrix, with particular emphasis on wind power. In this context, this study aims to analyze the evolution of wind electricity production and consumption in Brazil between 2000 and 2024, identifying the main technical, economic, environmental, and structural factors associated with its expansion. A quantitative approach is adopted, based on the application of multivariate statistical analysis and economic analysis, using data from the National Energy Balance (BEN) 2025 and the Greenhouse Gas Emissions and Removals Estimation System (SEEG). The methodology includes the organization and treatment of historical time series, descriptive statistical analysis, multivariate correlation analysis, Principal Component Analysis (PCA), and exploratory regression with principal components. The correlation analysis results indicate strong positive associations between wind energy production and variables related to electricity demand expansion and economic growth, as well as negative correlations with indicators of external energy dependence, suggesting that wind power contributes to strengthening national energy security. The PCA reduced the set of explanatory variables to two main components, accounting for more than 90% of total variance, interpreted as a structural growth factor of the electricity system and an economic-financial and external dependence factor. The exploratory regression confirmed the statistical relevance of these factors in explaining the evolution of wind energy over the analyzed period. The results indicate that the expansion of wind energy in Brazil is closely linked to the structural dynamics of the electricity system and macroeconomic conditions, reinforcing the role of wind power as a strategic alternative for diversifying the electricity matrix and supporting the energy transition. This study contributes to the field of Production Engineering by demonstrating the applicability of multivariate statistical methods to the analysis of complex energy systems.

Keywords: Wind energy; Electricity matrix; Multivariate statistical analysis; National Energy Balance; Energy transition.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação das fontes renováveis na matriz energética e elétrica brasileira (2024)	2
Figura 2 - Componentes de um aerogerador	10
Figura 3 - Fluxograma da Implantação de uma Usina Eólica no Brasil.....	11
Figura 4 - Arranjo típico dos parques eólicos.....	15
Figura 5 - Etapas metodológicas da pesquisa.....	22
Figura 6 - Fluxograma metodológico do estudo.....	29
Figura 7 - Expansão da produção de energia eólica no Brasil (2000–2024).....	33
Figura 8 - Expansão da oferta interna de energia eólica no Brasil (2000–2024)	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Interpretação dos valores de coeficiente de correlação.....	17
Tabela 2 - Variáveis dependentes (Y) do estudo.....	24
Tabela 3 - Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo A: Mercado e demanda elétrica	25
Tabela 4 - Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo B: Atividade econômica e demográfica	26
Tabela 5 - Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo C: Ambiental	26
Tabela 6 - Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo D: Estrutura energética e dependência externa.	27
Tabela 7 - Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo E: Econômico-financeiro (preços e câmbio).....	28
Tabela 8 - Correlação entre a produção de energia eólica e variáveis explicativas (2000–2024)	35
Tabela 9 - Variância explicada pelos componentes principais selecionados	37
Tabela 10 - Cargas fatoriais das variáveis nos componentes principais selecionados	38
Tabela 11 - Contribuição das variáveis explicativas nos componentes principais (ACP)	39
Tabela 12 - Indicadores globais do modelo de regressão exploratória (PCR)	41
Tabela 13 - Valores críticos da distribuição F ($F(2,22)$)	41
Tabela 14 - Coeficientes estimados e significância.....	42

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização do setor energético brasileiro	1
1.2. Justificativa e relevância do estudo	4
1.3. Formulação do projeto e objetivos	6
1.3.1 Formulação do problema	6
1.3.2 Objetivo geral	6
1.3.3 Objetivos específicos.....	6
1.4. Estrutura do trabalho	7
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
2.1. Matriz Energética Brasileira.....	7
2.2. Energia Eólica no Contexto Nacional	9
2.2.1 Indicadores econômico-institucionais para avaliação de inovações verdes no setor energético.....	11
2.2.2 Avanços da energia eólica	12
2.3. Aerogeradores e Cadeia Produtiva	14
2.4. Sustentabilidade e Políticas Públicas.....	16
2.5. Análise de Correlação.....	16
2.5.1 Análise de Componentes Principais (ACP).....	18
2.5.2 Regressão com Componentes Principais (PCR).....	20
3. METODOLOGIA.....	21
3.1. Etapas da pesquisa	21
3.2. Seleção das variáveis e fundamentação analítica	23
3.3. Determinação do modelo estatístico.....	29
3.4. Aplicação da análise estatística multivariada por meio de programação em Python....	30
3.5. Delimitação do estudo	31
4. ANÁLISE E RESULTADOS.....	32
4.1. Análise de correlação multivariada	33
4.2. Resultados da ACP	36
4.3. Regressão exploratória com Componentes Principais	39
5. DISCUSSÕES E CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

O setor energético desempenha papel estratégico no desenvolvimento econômico e social de um país, sendo fundamental para o funcionamento das atividades produtivas, para o bem-estar da população e para a competitividade das economias modernas. No contexto contemporâneo, esse setor tem sido diretamente impactado pelos desafios associados à transição energética, à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa e à busca por maior segurança no suprimento de energia (EPE; MME, 2025; BEN, 2025).

No Brasil, a discussão sobre a matriz energética assume relevância particular em razão de suas características singulares, como a elevada participação histórica de fontes renováveis, especialmente no setor elétrico. Apesar desse diferencial, o sistema energético brasileiro enfrenta desafios relacionados à variabilidade climática, à expansão da demanda por eletricidade e à dependência de fontes fósseis em determinados segmentos, o que reforça a necessidade de diversificação da matriz elétrica e de fortalecimento de fontes renováveis não convencionais (EPE; MME, 2025).

Nesse cenário, a energia eólica destaca-se como uma das principais alternativas para a ampliação da oferta de eletricidade de baixo impacto ambiental, apresentando crescimento expressivo nas últimas décadas e consolidando-se como um dos vetores da transição energética no país. Tendo assim, a expansão dessa fonte que resulta da combinação de condições naturais favoráveis, avanços tecnológicos, políticas públicas de incentivo e maior competitividade econômica, o que torna sua análise relevante tanto do ponto de vista técnico quanto econômico (ABEEólica, 2023; GWEC, 2024).

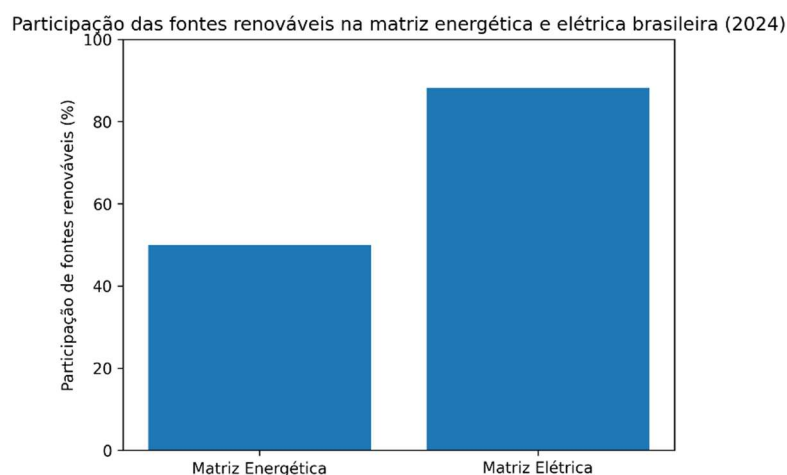
Entretanto, a dinâmica de crescimento da energia eólica ocorre de forma integrada a múltiplos fatores estruturais, econômicos e ambientais, que interagem simultaneamente ao longo do tempo. Dessa forma, compreender a evolução da produção e do consumo de energia elétrica de origem eólica exige abordagens analíticas capazes de capturar essas inter-relações de maneira sistemática. Nesse contexto, o presente trabalho insere-se na análise do setor elétrico brasileiro, com foco na evolução da energia eólica, conforme detalhado a seguir na contextualização do setor energético nacional (Hair et al., 2019; Jolliffe; Cadima, 2016).

1.1. Contextualização do setor energético brasileiro

O setor energético brasileiro apresenta uma matriz diversificada, com participação significativa de fontes renováveis e não renováveis, refletindo tanto a dinâmica de oferta interna quanto as condições estruturais de um país com grande potencial para energias limpas (EPE; MME, 2025). A produção de energia elétrica refere-se à quantidade total de eletricidade gerada pelas usinas do sistema elétrico nacional, enquanto a oferta interna de energia é um conceito contábil do Balanço Energético Nacional que expressa a energia efetivamente disponível para consumo no país. A diferença entre essas variáveis decorre da consideração de perdas técnicas, autoconsumo do setor elétrico, intercâmbios internacionais e ajustes metodológicos, não devendo ser interpretada, isoladamente, como exportação de energia.

Logo, em dados apresentados pelo Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (2025) a participação de fontes renováveis na oferta interna de energia no Brasil atingiu 50,0% em 2024, representando o maior patamar histórico desde o início da série, enquanto a média mundial permanece em níveis significativamente mais baixos (EPE; MME, 2025). A Figura 1 apresenta a participação das fontes renováveis na matriz energética e na matriz elétrica brasileira em 2024, evidenciando o elevado grau de renovabilidade do sistema elétrico nacional quando comparado à matriz energética como um todo.

Figura 1: Participação das fontes renováveis na matriz energética e elétrica brasileira (2024)



Fonte: Elaborado pela autora com base em dados do Balanço Energético Nacional (BEN 2025).

Já no contexto da matriz elétrica, as fontes renováveis foram responsáveis por 88,2% da geração de eletricidade no mesmo ano, reforçando o papel dominante das fontes limpas no sistema elétrico nacional. Entretanto, a dependência histórica da hidroeletricidade expõe o país

a riscos em períodos de escassez hídrica, evidenciando a necessidade de diversificação da matriz elétrica e de maior investimento em alternativas renováveis, como a energia eólica e a solar (BEN, 2025).

Deste modo, o setor energético brasileiro passou por transformações significativas nos últimos anos, acompanhando tanto as pressões por sustentabilidade quanto a necessidade de atender à crescente demanda elétrica. A análise dos dados recentes do Balanço Energético Nacional (2025) evidencia essa dinâmica. Entre 2022 e 2024, as fontes renováveis cresceram de 143,5 para 160,5 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep), representando uma expansão de aproximadamente 11,8%. A unidade tonelada equivalente de petróleo é utilizada para padronizar diferentes formas de energia em uma única métrica comparável, representando a quantidade de energia liberada pela queima de uma tonelada de petróleo bruto (BEN, 2021; ANP, 2025). Dessa forma, o uso do tep permite a análise integrada e comparativa da produção e do consumo energético entre diferentes fontes.

No mesmo período, as fontes não renováveis evoluíram de 211,1 milhões para 235,6 milhões tep, mas sofreram uma leve retração para 235,0 milhões em 2024, indicando tendência de estabilização após forte avanço (EPE, 2025). Esse comportamento pode ser entendido por meio de duas questões fundamentais: a matriz brasileira ainda apresenta predominância de fontes fósseis, que se mantêm em patamar superior a 230 milhões de tep; por outro lado, a ampliação das fontes renováveis mostra um crescimento constante, reduzindo parcialmente o distanciamento entre as duas curvas no ano mais recente. Assim, a evolução recente do setor energético brasileiro reforça a relevância de investigar de forma detalhada a contribuição das fontes renováveis na matriz nacional, em especial da energia eólica, que tem se consolidado como um vetor estratégico da transição energética. Logo, com o crescimento contínuo da geração eólica ocorrendo em um contexto de relativa estabilização das fontes não renováveis, evidenciando mudanças estruturais no sistema energético e elétrico brasileiro e ampliando o papel da eólica na diversificação da oferta, na redução da dependência externa e no atendimento à expansão da demanda por eletricidade (EPE; MME, 2025; GWEC, 2024; IEA, 2023).

Dentro do contexto das análises sobre fontes renováveis e não renováveis, é importante diferenciar os conceitos de matriz energética e matriz elétrica. A matriz energética abrange o conjunto de todas as fontes utilizadas para suprir a demanda total de energia de um país, incluindo usos como transportes, indústria e consumo residencial. Já a matriz elétrica refere-se exclusivamente às fontes destinadas à geração de eletricidade. No Brasil, essa distinção é

particularmente relevante, pois a matriz elétrica apresenta grau de renovabilidade significativamente superior ao da matriz energética, em função da predominância histórica da geração hidrelétrica e do avanço recente das fontes eólica e solar, o que justifica o foco deste estudo no setor elétrico (EPE; MME, 2025).

A energia eólica, em especial, consolidou-se como uma das fontes de maior expansão no Brasil nas últimas décadas (Santos, 2022; De lima et al., 2018; Sampaio, Batista, 2021). O país ocupa posição de destaque no cenário internacional, sendo o sexto maior em capacidade instalada *onshore*, com mais de 23 GW em operação até 2023 (ABEEólica, 2023). Essa evolução é resultado tanto de condições territoriais favoráveis quanto de políticas públicas de incentivo, como o PROINFA e os leilões de energia. Assim, a análise do crescimento da energia eólica é de grande relevância acadêmica e prática, pois envolve aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais que impactam diretamente a competitividade e a sustentabilidade do setor energético brasileiro.

De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (2025), entre os anos de 2022 e 2024, a energia eólica apresentou crescimento expressivo no Brasil. Nesse período, a produção passou de 81.631,57 GWh para 107.654 GWh, representando um aumento acumulado de aproximadamente 32%. Em 2023, o crescimento anual foi de 17,4%, enquanto em 2024 o incremento foi de 12,4%, o que demonstra a continuidade da expansão da fonte no país. Ressalta-se que toda a energia produzida foi efetivamente consumida, reforçando o papel estratégico da energia eólica para a segurança elétrica e para a diversificação da matriz.

Para mais, a dinâmica do setor elétrico brasileiro, especialmente no contexto da expansão das fontes renováveis, caracteriza-se pela interação simultânea de múltiplas variáveis de natureza técnica, econômica, ambiental e estrutural, como crescimento da demanda elétrica, condições macroeconômicas, estrutura da oferta, emissões associadas ao setor de energia e aspectos institucionais. Sendo ainda, variáveis que apresentam relações interdependentes e comportamento conjunto ao longo do tempo, o que limita análises baseadas em abordagens unidimensionais ou isoladas. Nesse contexto, a utilização de técnicas de estatística multivariada mostra-se adequada para capturar de forma integrada essas interações, permitindo uma compreensão mais robusta dos fatores associados à evolução da energia eólica no sistema elétrico brasileiro (Hair et al., 2019; Jolliffe; Cadima, 2016; EPE; MME, 2025).

1.2. Justificativa e relevância do estudo

Apesar do crescimento expressivo da energia eólica no Brasil nas últimas duas décadas, sua participação na matriz elétrica ainda é limitada quando comparada ao elevado potencial técnico disponível no país. Estudos mostram que o território brasileiro possui potencial eólico superior a 500 GW (Observatório de Energia Eólica, 2019), considerando apenas empreendimentos *onshore*, enquanto a capacidade instalada efetivamente em operação em 2024 situa-se em torno de 30 GW, o que representa menos de 7% do potencial estimado (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2025). Essa diferença evidencia a existência de uma lacuna relevante entre o potencial disponível e a efetiva utilização dessa fonte renovável.

Ainda, com a persistente consideração de fontes fósseis no setor de transportes e a crescente vulnerabilidade do sistema hidrelétrico frente a eventos climáticos extremos (BEN, 2025), como crises hídricas recorrentes, reforçam a necessidade de ampliar a participação de fontes renováveis não convencionais na matriz elétrica brasileira. Nesse contexto, a energia eólica destaca-se como alternativa estratégica para diversificação da matriz, reduzindo riscos operacionais e o fortalecimento da segurança energética nacional.

A realização deste estudo justifica-se, ainda, pela necessidade de atualização e aprofundamento das análises previamente desenvolvidas, incorporando os dados mais recentes do Balanço Energético Nacional (2025). A pesquisa dá continuidade a um projeto de Iniciação Científica, fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), desenvolvido no Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto (ICEA-UFOP), pela autora do presente trabalho. Nesse projeto inicial, foi analisada a aplicação de ferramentas de análise estatística multivariada e análise econômica no setor de produção e consumo energético nacional, considerando dados disponíveis até o período de 2022–2023. Assim, o presente estudo amplia o escopo temporal da análise e aprofunda a investigação, permitindo avaliar o crescimento recente do setor energético e, em especial, da energia eólica, à luz de informações atualizadas e de uma abordagem metodológica consolidada. A partir dessa atualização, torna-se possível identificar avanços técnicos e econômicos, analisar entraves institucionais e ambientais que ainda limitam a expansão da fonte e comparar a viabilidade da energia eólica em relação a alternativas de geração elétrica.

Logo, a relevância do estudo está em sua contribuição para o debate sobre a transição energética brasileira, ao empregar ferramentas de análise estatística multivariada para investigar, de forma integrada, os fatores econômicos, energéticos e ambientais associados à expansão da energia eólica. Os resultados obtidos podem fornecer subsídios técnicos tanto para

a formulação de políticas públicas quanto para a tomada de decisão no âmbito empresarial, contribuindo para estratégias que promovam sustentabilidade, redução de emissões de gases de efeito estufa e maior segurança energética.

1.3. Formulação do projeto e objetivos

1.3.1 Formulação do problema

Considerando os avanços recentes do setor elétrico brasileiro e a disponibilização de dados atualizados no Balanço Energético Nacional 2025, torna-se necessário aprofundar a compreensão sobre a trajetória de expansão da energia eólica no Brasil e sobre os fatores associados à sua consolidação na matriz elétrica nacional. A literatura e os dados empíricos indicam que a expansão dessa fonte ocorre de forma integrada a variáveis econômicas, estruturais e ambientais, cujas inter-relações demandam abordagens analíticas capazes de capturar múltiplas dimensões simultaneamente.

Nesse contexto, a presente pesquisa busca responder à seguinte questão:

Quais fatores econômicos, estruturais e ambientais estão associados à expansão da produção e do consumo de energia elétrica de origem eólica no Brasil, entre 2000 e 2024, no contexto da matriz elétrica nacional?

1.3.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é identificar e analisar os fatores econômicos, estruturais e ambientais associados à expansão da produção de energia elétrica de origem eólica no Brasil, no período de 2000 a 2024, com base nos dados do Balanço Energético Nacional 2025, por meio da aplicação de ferramentas de análise estatística multivariada e análise econômica, no contexto da matriz elétrica nacional.

1.3.3 Objetivos específicos

De forma a atender ao objetivo geral proposto e responder à questão de pesquisa formulada, o presente estudo estabelece os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o crescimento temporal da produção, do consumo e da participação da energia eólica na matriz elétrica brasileira no período de 2000 a 2024;
- Investigar as associações estatísticas entre a produção de energia elétrica eólica e variáveis relacionadas à demanda elétrica, atividade econômica, estrutura energética e aspectos ambientais, por meio da análise de correlação multivariada;
- Identificar e sintetizar fatores latentes associados à expansão da energia eólica no Brasil, mediante a aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP);

- Avaliar a influência dos fatores identificados sobre a produção de energia elétrica de origem eólica, por meio de regressão exploratória com componentes principais;
- Discutir os resultados obtidos à luz da literatura sobre transição energética, diversificação da matriz elétrica e sustentabilidade.

1.4. Estrutura do trabalho

Este estudo analisa a expansão da energia elétrica de origem eólica no Brasil a partir de uma abordagem quantitativa, com base nos dados mais recentes do Balanço Energético Nacional 2025, abrangendo o período de 2000 a 2024. A investigação parte do entendimento de que o crescimento da energia eólica no país está inserido em um contexto complexo, no qual interagem fatores econômicos, estruturais, institucionais e ambientais, exigindo métodos analíticos capazes de captar essas inter-relações de forma integrada.

Nesse sentido, o trabalho concentra-se especificamente na produção e no consumo de energia elétrica, por se tratar do segmento mais diretamente relacionado à expansão das fontes renováveis e às estratégias de transição energética no Brasil. Embora o setor energético nacional envolva diferentes formas de produção e uso da energia, o recorte adotado permite uma análise mais consistente da dinâmica da energia eólica no âmbito do sistema elétrico, sem desconsiderar variáveis econômicas, sociais e estruturais que atuam como fatores explicativos ao longo do período analisado.

A abordagem metodológica fundamenta-se no uso de ferramentas de análise estatística multivariada associadas à análise econômica, que possibilitam a avaliação simultânea de múltiplas variáveis e a identificação de padrões, correlações e relações de dependência entre os determinantes da expansão da energia eólica. Essa escolha metodológica está alinhada à necessidade de compreender o fenômeno de forma sistêmica, considerando a natureza interdependente dos elementos que compõem o setor elétrico brasileiro.

Dessa forma, o trabalho está estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo corresponde à introdução, na qual são apresentados a contextualização do setor energético brasileiro, o tema da pesquisa, o problema investigado, os objetivos e o escopo do estudo. O segundo capítulo apresenta o referencial teórico, abordando a matriz energética brasileira, a energia eólica, sua cadeia produtiva, políticas públicas associadas, aspectos de sustentabilidade e discussões relacionadas à transição energética. Logo, o terceiro capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados, incluindo a caracterização da pesquisa, as fontes de dados, o tratamento das variáveis e as técnicas de análise estatística aplicadas. O quarto capítulo é dedicado à apresentação e análise dos resultados obtidos, discutindo os principais achados à luz do referencial teórico. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões do estudo, sintetizando os resultados, discutindo limitações e apontando direções para pesquisas futuras.

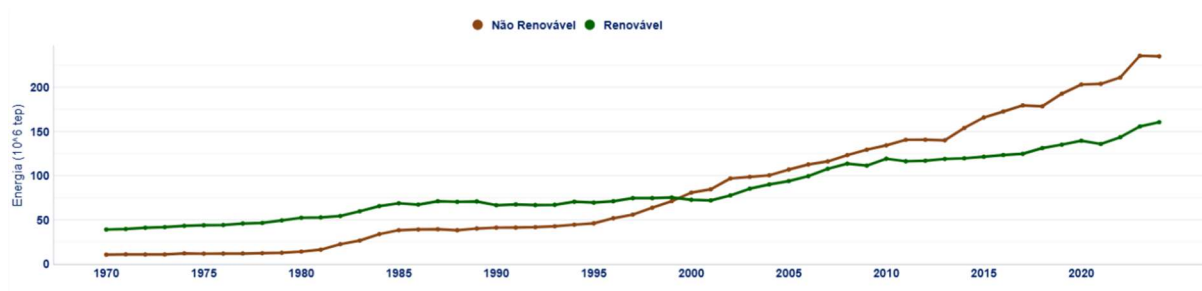
2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Matriz Energética Brasileira

O Brasil apresenta uma matriz energética singular em comparação ao cenário mundial. Enquanto globalmente predomina a utilização de fontes não renováveis como carvão mineral, petróleo e gás natural, o Brasil se destaca pela elevada participação de fontes renováveis, representando aproximadamente 47% da oferta interna em 2022, contra apenas 15% na média mundial (EPE, 2023).

Logo, a matriz elétrica brasileira é ainda mais limpa, reflexo da predominância histórica da energia hidráulica. Contudo, crises hídricas e limitações socioambientais vêm abrindo espaço para o avanço de alternativas renováveis, como a eólica e a solar (BEN, 2025).

Gráfico 1: Produção de energia no Brasil por fonte renovável e não renovável



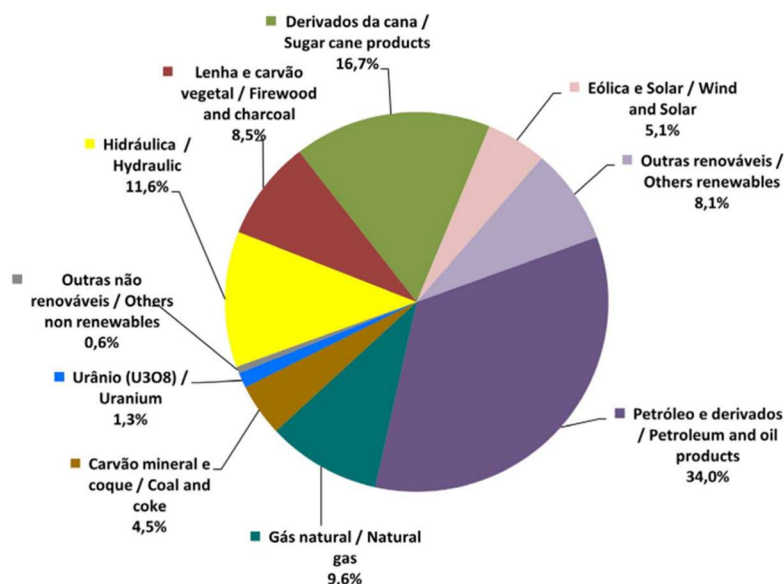
Fonte: BEN (2025).

O crescimento da matriz energética brasileira entre 1970 e 2024 evidencia mudanças significativas no perfil de produção de energia (gráfico 1). Historicamente, até o final da década de 1990, as fontes renováveis — principalmente hidráulicas, biomassa e derivados de cana — predominavam na matriz. A partir dos anos 2000, entretanto, observou-se crescimento acelerado das fontes não renováveis, como petróleo e gás natural, especialmente impulsionado pelo aumento da frota automotiva e expansão do setor industrial (BEN, 2025).

Esse movimento está associado ao aumento do consumo de derivados de petróleo e gás natural, impulsionado pela expansão da frota automotiva, do setor industrial e pela crescente demanda energética nacional. Apesar disso, de acordo com o Ministério de Minas e Energia (2025) as fontes renováveis mantiveram trajetória de crescimento contínuo. Em 2023, pela primeira vez desde 1988, elas ultrapassaram as não renováveis e atingiram 51% da matriz energética nacional, com destaque para o avanço das energias eólica, variação positiva de 17%, e solar com variação positiva de 68%.

No gráfico 2, a distribuição da oferta interna de energia no Brasil, evidencia que, apesar da expressiva participação de fontes renováveis, a matriz energética nacional ainda é fortemente influenciada por combustíveis fósseis, sobretudo derivados de petróleo e gás natural. Nesse contexto, a participação conjunta da energia eólica e solar, que representa 5,1% da oferta interna, pode parecer modesta quando comparada às fontes tradicionais. No entanto, esse percentual deve ser interpretado à luz de sua rápida trajetória de expansão e de seu papel estratégico na transição energética brasileira.

Gráfico 2: Oferta interna de energia no Brasil



Fonte: adaptado de BEN (2025)

Ainda, diferentemente das fontes renováveis convencionais, como a hidráulica e a biomassa, cuja expansão encontra limitações ambientais, territoriais e operacionais, a energia eólica apresenta maior potencial de crescimento incremental, especialmente em regiões com elevada disponibilidade de recursos naturais, como o Nordeste brasileiro. Além disso, a redução dos custos de implantação e operação dos parques eólicos, associada ao avanço tecnológico e à consolidação da cadeia produtiva, tem ampliado sua competitividade frente às fontes fósseis e a alternativas renováveis (Irena, 2024).

Assim, embora ainda represente uma fração relativamente pequena da oferta interna total de energia, a energia eólica desponta como um dos principais vetores de transformação da matriz energética brasileira. Sua crescente participação reflete não apenas mudanças tecnológicas, mas também a influência de fatores econômicos, institucionais e ambientais, que justificam a necessidade de análises específicas sobre seu crescimento e seus determinantes (Silva; Correa; Monnerat, 2025). Nesse sentido, o aprofundamento conceitual sobre a energia eólica torna-se fundamental para compreender seu papel atual e potencial no sistema energético nacional.

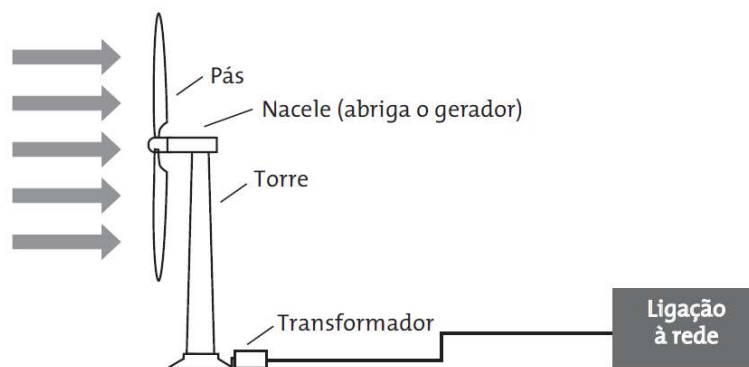
2.2. Energia Eólica no Contexto Nacional

De acordo com a ANEEL (2019) a energia eólica é o resultado da conversão da energia cinética dos ventos em eletricidade por meio de aerogeradores. Os aerogeradores, são popularmente conhecidos como turbinas eólicas, sendo formado de maneira simplificada, por uma torre, um conjunto de pás ligadas a um rotor e a nacele, que funciona como uma “caixa” no topo e abriga os principais equipamentos, como o gerador elétrico, o multiplicador de

velocidade (quando existe), sensores de direção e intensidade do vento, além dos mecanismos que permitem girar a nacele para aproveitar melhor a corrente de ar.

Segundo Lage e Processi (2013), o princípio de funcionamento desses equipamentos é transformar a energia do vento em energia elétrica. Quando o vento passa pelas pás, ele movimenta o rotor, que transmite esse movimento a um sistema de engrenagens e eixos, acionando o gerador e produzindo eletricidade (figura 2).

Figura 2: Componentes de um aerogerador.



Fonte: adaptado de Lage e Processi (2013)

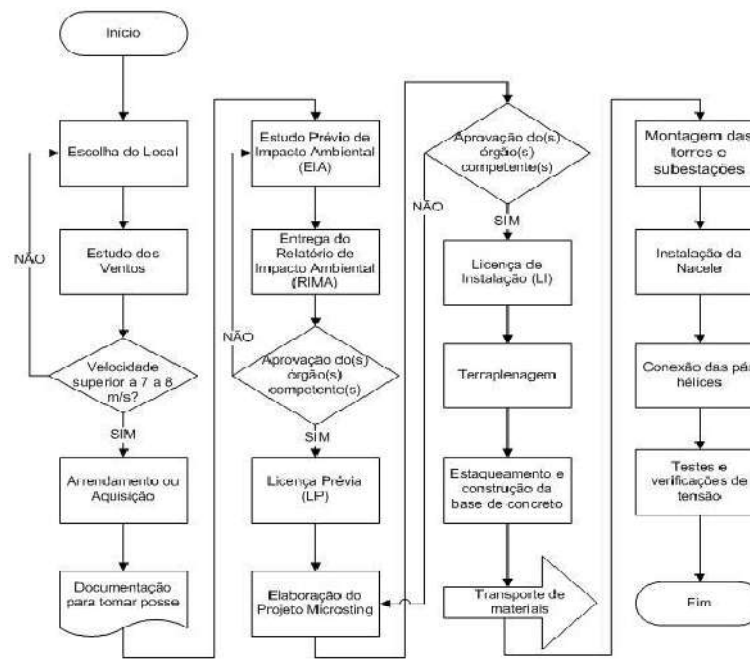
Por ser uma energia sustentável, limpa e inesgotável, a energia eólica está cada vez sendo mais usada no mundo (Santos; 2022; Neoenergia; 2021; Cintra, Machado; 2019). Considerando o contexto brasileiro, suas primeiras instalações são recentes, com significância a partir dos anos 2000, possuindo grande potencial de expansão, tanto em capacidade instalada, quanto com novos parques eólicos (Santos; 2022).

Seu uso comercial expandiu-se no Brasil a partir dos anos 2000, que segundo o CRESESB e o CEPEL (2001), o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro constitui um marco para o mapeamento da capacidade de geração de energia eólica no país, além de evidenciar a relevância das regiões Nordeste e Sul para a expansão dessa fonte renovável. Além disso, expandiu-se também, por programas governamentais de incentivo, como o PROINFA. Fernando de Noronha foi o primeiro local brasileiro a entrar em operação um aerogerador, no ano de 1992 (ABEEólica; 2023), porém com a falta de incentivo e imbróglis com os custos operacionais, durante os dez anos subsequentes, as instalações não sofreram avanços tão significativos pelo país.

Desde então, o país tem se consolidado como uma das potências mundiais no setor. Em 2023, ocupava a sexta posição no ranking global de capacidade instalada onshore, totalizando mais de 23 GW, distribuídos em 869 parques eólicos e mais de 2.700 aerogeradores (ABEEólica, 2023).

O fluxograma, representado pela Figura 3, apresenta as etapas que ocorrem para a implantação de um parque eólico no Brasil, como todo o processo necessário para a implantação de um parque eólico, desde os estudos iniciais até a fase final de geração e comercialização da energia.

Figura 3 - Fluxograma da Implantação de uma Usina Eólica no Brasil



Fonte: adaptado de Da silva et al. (2015, p. 11)

Esse percurso começa com a análise das condições de vento nos locais mais adequados, seguida pela negociação ou aquisição do terreno e pela realização dos estudos ambientais exigidos para a obtenção das licenças. Depois, entram as etapas de preparo da área, como terraplanagem, estaqueamento e construção das bases de concreto. Na sequência, ocorrem o transporte dos equipamentos, a montagem das torres e subestações, a instalação das nacelas, a fixação das pás e, por fim, os testes e verificações de tensão que garantem o funcionamento do sistema.

2.2.1 Indicadores econômico-institucionais para avaliação de inovações verdes no setor energético

A avaliação do desempenho econômico de inovações verdes requer a consideração simultânea de múltiplos fatores que extrapolam a análise puramente técnica da geração de energia. Nesse contexto, Silva, Correa e Monnerat (2025), classificam indicadores em categorias que abrangem fatores internos e externos às organizações, incluindo aspectos de curto e longo prazo. Entre os indicadores econômicos e de mercado, destacam-se variáveis como taxas de juros, inflação, taxas de desconto, preços de insumos, preços de produtos substitutos, demanda total de energia e competitividade do mercado. Esses fatores influenciam diretamente a viabilidade econômica e a atratividade dos investimentos em fontes renováveis, como a energia eólica. A literatura atual explora essas dimensões de forma integrada, apontando para a necessidade de políticas públicas e inovação como fatores-chave para o avanço dessas fontes renováveis dentro dos sistemas energéticos (Kumar, 2023).

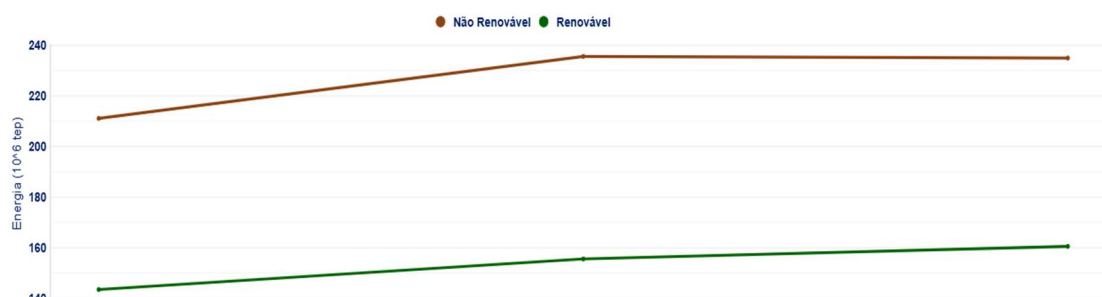
No setor energético, especialmente no contexto da transição para fontes renováveis, a interação entre fatores econômicos, institucionais e técnicos configura um sistema complexo, no qual os efeitos sobre a produção e o consumo de energia elétrica não podem ser analisados de forma isolada. Dessa forma, a estrutura proposta por Silva, Correa e Monnerat (2025) fornece base conceitual consistente para a seleção de variáveis explicativas em modelos estatísticos multivariados, permitindo investigar de maneira integrada os determinantes da expansão da energia eólica no Brasil.

2.2.2 Avanços da energia eólica

A análise do crescimento recente da matriz energética brasileira permite compreender o contexto no qual a energia eólica vem se consolidando como uma das principais fontes renováveis modernas do país. Nos últimos anos, especialmente a partir da década de 2010, observa-se uma intensificação das políticas de incentivo às energias limpas, associada à redução de custos tecnológicos e à necessidade de mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Nesse cenário, a comparação entre a trajetória das fontes renováveis e não renováveis torna-se fundamental para avaliar a dinâmica da transição energética e o espaço ocupado pela energia eólica nesse processo.

Com o intuito de evidenciar o crescimento mais recente do setor energético após o período analisado na pesquisa inicial, o gráfico 3 concentra-se no intervalo de 2022 a 2024, permitindo verificar se as tendências observadas anteriormente se mantiveram no período subsequente, apresentando, nesse primeiro momento, o crescimento agregado das fontes renováveis e não renováveis, de modo a contextualizar o comportamento geral da matriz energética nacional e o avanço relativo das fontes limpas no período mais recente. Embora a energia eólica não seja apresentada de forma isolada nesse gráfico, sua dinâmica encontra-se inserida no conjunto das fontes renováveis, cujo crescimento contínuo reforça o papel estratégico dessa fonte na matriz energética brasileira.

Gráfico 3: Crescimento recente (2022–2024) do consumo/produção de energia renovável e não renovável no Brasil



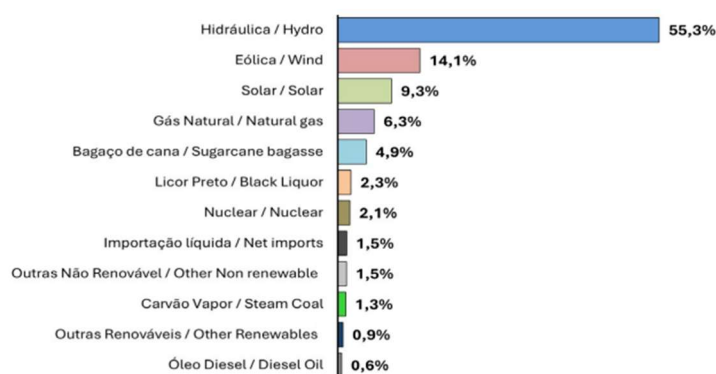
Fonte: adaptado de BEN Interativo (2025).

De acordo com o Gráfico 3, observa-se que, no período de 2022 a 2024, as fontes renováveis apresentaram crescimento contínuo, passando de 143,5 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) em 2022 para 160,5 milhões de tep em 2024. No mesmo

intervalo, as fontes não renováveis registraram aumento entre 2022 e 2023, de 211,1 milhões para 235,6 milhões de tep, seguido de leve retração em 2024, quando atingiram 235,0 milhões de tep.

A diferença entre fontes não renováveis e renováveis ampliou-se de 67,6 milhões de tep em 2022 para aproximadamente 80,0 milhões de tep em 2023, indicando maior crescimento relativo das fontes fósseis naquele ano. Contudo, em 2024, esse diferencial foi reduzido para cerca de 74,5 milhões de tep, refletindo uma desaceleração das fontes não renováveis e a manutenção do crescimento das renováveis, assim sugerindo um comportamento de um cenário recente de expansão sustentada das fontes renováveis apesar da desaceleração. Nesse contexto de crescimento das fontes renováveis, a energia eólica assume papel de destaque, uma vez que apresenta elevada taxa de expansão, baixo nível de emissões e crescente competitividade econômica no sistema elétrico brasileiro. Assim, compreender a evolução da energia eólica de forma isolada e os fatores de influência, torna-se essencial para avaliar sua contribuição efetiva para a transição energética nacional.

Gráfico 4: Oferta interna de energia elétrica por fonte



Fonte: adaptado de BEN (2025).

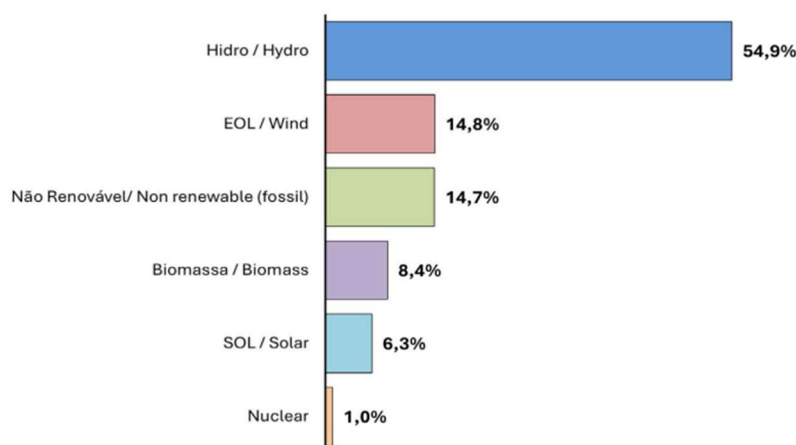
O Gráfico 4, que apresenta a oferta interna de energia elétrica por fonte, está evidenciando a predominância histórica da energia hidráulica, responsável por 55,3% da oferta, confirmando o papel central dessa fonte na matriz elétrica brasileira. Entretanto, observa-se que a energia eólica já ocupa a segunda posição, com 14,1% da oferta interna de eletricidade, superando fontes tradicionais como gás natural (6,3%), biomassa (4,9%) e energia nuclear (2,1%).

A expressiva participação da energia eólica na oferta elétrica reflete sua rápida expansão nas últimas décadas, impulsionada por condições naturais favoráveis, sobretudo no Nordeste, além de avanços tecnológicos e mecanismos de incentivo à geração renovável. Em conjunto com a energia solar, que representa 9,3%, a eólica contribui de forma significativa para a diversificação da matriz elétrica e para a redução da dependência de fontes fósseis, como o óleo diesel e o carvão mineral, cuja participação se mostra residual na oferta interna de eletricidade.

Logo, a relevância da energia eólica torna-se ainda mais evidente ao se analisar a participação das fontes na capacidade instalada de geração elétrica, conforme apresentado no gráfico subsequente (gráfico 5). Observa-se que a energia hidráulica permanece como a

principal fonte instalada, com 54,9%, enquanto a energia eólica ocupa a segunda posição, com 14,8% da capacidade instalada, praticamente empatada com o conjunto das fontes não renováveis fósseis (14,7%).

Gráfico 5: Participação das fontes na capacidade instalada brasileira



Fonte: adaptado de BEN (2025).

Esse resultado é particularmente relevante, pois indica que a energia eólica já possui capacidade instalada equivalente à de todas as fontes fósseis somadas no sistema elétrico brasileiro. Tal configuração evidencia uma mudança estrutural no perfil de expansão da geração elétrica, na qual a eólica se consolida como a principal alternativa renovável moderna à geração hidráulica, contribuindo para a segurança energética e para a mitigação dos riscos associados à variabilidade hidrológica.

Assim, a posição de destaque da energia eólica tanto na oferta interna de eletricidade quanto na capacidade instalada evidencia que sua expansão não é apenas conjuntural, mas estrutural no sistema elétrico brasileiro. Esse avanço resulta da interação de múltiplos fatores, incluindo condições de mercado, crescimento da demanda elétrica, desempenho econômico, pressões ambientais e aspectos institucionais e financeiros. Diante desse contexto, torna-se fundamental identificar e analisar, os fatores que influenciam o crescimento da energia eólica no Brasil.

2.3. Aerogeradores e Cadeia Produtiva

Os aerogeradores são compostos por torre, rotor, pás e sistemas de conversão eletromecânica que permitem transformar a energia cinética em energia elétrica. No Brasil, a expansão do setor eólico promoveu o desenvolvimento de uma cadeia produtiva robusta, responsável por gerar milhares de empregos diretos e indiretos.

Essa cadeia envolve desde a fabricação nacional de componentes até atividades logísticas, de manutenção e de inovação tecnológica, fortalecendo indústrias como a metalurgia e a eletroeletrônica (Moura et al., 2018; Neoenergia, 2021).

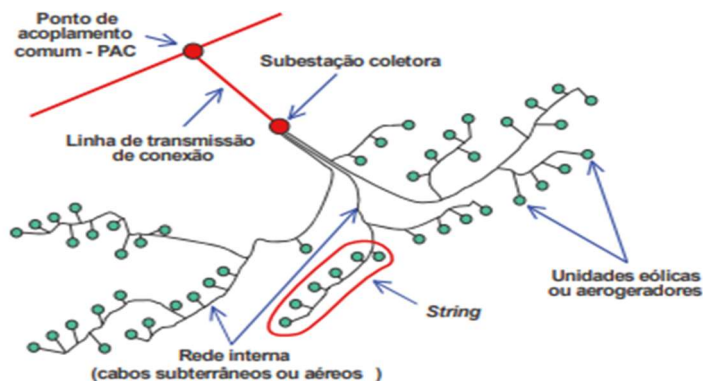
De acordo com a Neoenergia (2021), maior grupo privado do setor elétrico brasileiro em número de clientes, as fases de funcionamento de um aerogerador podem ser definidas em seis etapas:

- Primeira: A velocidade dos ventos movimenta as pás do aerogerador por meio de energia cinética;
- Segunda: As pás estão conectadas ao rotor, que é movimentado e um eixo é acionado na nacele;
- Terceira: uma energia mecânica é produzida e passa pelas caixas de engrenagens, propiciando a produção de energia elétrica;
- Quarta: A energia chega até o gerador, a transformando em eletricidade;
- Quinta: A eletricidade que foi produzida pelo gerador será enviada até o transformador. Logo, o transformador envia essa energia pela linha de transmissão até que chegue a uma subestação, fazendo com que o parque eólico seja conectado ao sistema elétrico;
- Sexta: O parque eólico que já está conectado ao sistema elétrico após alcançar as etapas anteriores, transmite a energia elétrica produzida até seus consumidores.

Assim, os parques eólicos apresentam uma configuração física e elétrica característica, organizada de modo a otimizar tanto a captação do recurso eólico quanto a eficiência da transmissão da energia gerada.

Conforme ilustrado na Figura 4, os aerogeradores são distribuídos espacialmente em grupos interligados, denominados *strings*, nos quais cada unidade converte a energia cinética do vento em energia elétrica. Essas *strings* são conectadas por meio de uma rede interna de cabos, que pode ser aérea ou subterrânea, responsável por coletar a energia gerada individualmente pelos aerogeradores e conduzi-la até a subestação coletora do parque.

Figura 4: Arranjo típico dos parques eólicos



Fonte: adaptado de Moura et al. (2018)

Logo, a subestação coletora desempenha papel fundamental na infraestrutura do empreendimento, pois é nela que ocorre a consolidação da energia proveniente das diferentes strings, bem como a adequação dos níveis de tensão para possibilitar a conexão com o sistema elétrico externo. A partir dessa subestação, a energia é transmitida por meio de uma linha de transmissão de conexão até o Ponto de Acoplamento Comum (PAC), que representa a interface entre o parque eólico e o sistema elétrico de distribuição ou transmissão existente na região.

2.4. Sustentabilidade e Políticas Públicas

Embora o setor hidrelétrico possua grande potencial no Brasil, ele pode enfrentar limitações, especialmente em períodos de seca, gerando preocupações quanto ao abastecimento energético. Por isso, os estudos sobre fontes renováveis não hidráulicas são essenciais (Moura et al., 2018), destacando a importância do crescimento da energia eólica para a economia e a geração de energia limpa no país.

Segundo De lima et al. (2018), “as políticas públicas de energia eólica devem contemplar os processos de educação ambiental, estratégias e promoção da energia eólica, financiamento e desenvolvimento de ferramentas de monitoramento e avaliação das próprias políticas em questão”, evidenciando seu valor econômico e ambiental.

Assim, a produção de energia eólica é limpa e seus impactos ambientais são mínimos. Visualmente, a percepção de poluição é subjetiva, e em relação ao ruído, os limites legais são respeitados (De azevedo et al., 2017). Embora a fauna e a flora possam ser afetadas pelas instalações, diversos procedimentos são adotados para mitigar e reverter esses impactos. Logo, se conecta também aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no que se refere ao ODS 7, que retrata sobre energia limpa e acessível e ODS 13, evidenciando ações contra a mudança climática (Uniandrade, 2023).

Logo, além de não emitir poluentes durante a operação, a energia eólica contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis. A formulação de políticas públicas e programas governamentais, como os leilões de energia elétrica, foi fundamental para viabilizar o investimento privado e garantir previsibilidade ao setor.

Em relação aos custos, a energia eólica apresenta custos cada vez mais competitivos, já sendo considerada uma das fontes mais baratas de geração elétrica em diversos leilões recentes. Do ponto de vista social, gera empregos de qualidade e renda em regiões onde os parques são instalados, sobretudo no Nordeste brasileiro. Em termos ambientais, embora apresente impactos relacionados ao uso do solo e à fauna, estes são significativamente menores em comparação a fontes não renováveis, como petróleo e carvão, e mitigáveis com estudos de licenciamento e compensações ambientais (De azevedo et al., 2017).

2.5. Análise de Correlação

A análise de correlação trata do relacionamento entre duas variáveis, assim, para compreender o conceito de correlação é fundamental conhecer os indicadores de variabilidade

compartilhada entre elas. A análise de correlação permite avaliar o grau de relacionamento linear entre duas variáveis, que segundo Triola (1999), considerando duas variáveis, o coeficiente de correlação linear amostral (r) mede a intensidade do relacionamento linear entre os pares de dados x e y em uma amostra. De maneira semelhante, Larson e Farber (2010) afirmam que o coeficiente de correlação não apenas identifica o tipo de correlação, mas também a sua força, sendo possível calculá-lo pela Equação 1.

$$r = \frac{n \cdot \sum(x \cdot y) - (\sum x) \cdot (\sum y)}{\sqrt{n \cdot (\sum x^2) - (\sum x)^2} \cdot \sqrt{n \cdot (\sum y^2) - (\sum y)^2}} \quad (1)$$

Segundo Montgomery (2019) o coeficiente de correlação linear amostral r apresenta valores entre -1 e +1, sendo que valores próximos de -1 e +1 demonstram maior correlação e valores próximos de zero caracterizam-se pela ausência de correlação entre as duas variáveis x e y analisadas.

A Tabela 1 demonstra uma forma de interpretação de uma correlação dado o seu valor numérico para valores positivos. Valores positivos de correlação indicam uma correlação direta; já os negativos, uma correlação inversa. Assim, a análise de correlação é uma ferramenta estatística utilizada para avaliar o grau de associação entre variáveis quantitativas. No contexto de estudos energéticos, essa técnica permite identificar relações entre indicadores como produção de energia, consumo, custos e variáveis econômicas. Logo, para esse estudo, a análise de correlação multivariada amplia essa abordagem ao considerar simultaneamente múltiplas variáveis, possibilitando uma compreensão mais abrangente das interações existentes em sistemas complexos, como o setor elétrico.

Essa técnica é particularmente relevante para estudos que envolvem fatores técnicos, econômicos e institucionais interdependentes, permitindo identificar padrões e relações que não seriam observados por meio de análises bivariadas isoladas (Handam & Al Smadi, 2022; Durante et al., 2022).

Tabela 1: Interpretação dos valores de coeficiente de correlação.

Valor de r (+ ou -)	Interpretação
0,00 a 0,19	Correlação bem fraca
0,20 a 0,39	Correlação fraca
0,40 a 0,69	Correlação moderada
0,70 a 0,89	Correlação forte
0,90 a 1,00	Correlação muito forte

Fonte: adaptado de Larson e Farber (2010).

Essa análise é frequentemente representada por meio de matrizes de correlação, nas quais cada elemento expressa o grau de associação entre pares de variáveis dentro de um conjunto

maior. Isto posto, a aplicação dessas técnicas estatísticas tem sido amplamente viabilizada pelo uso de linguagens de programação e ambientes computacionais, como *Python* e R, que permitem o tratamento eficiente de grandes volumes de dados, a automatização dos cálculos estatísticos e a visualização gráfica dos resultados. Fazendo assim, do uso de códigos de programação que possibilitam maior reprodutibilidade das análises, além de facilitar a aplicação de métodos multivariados em bases de dados complexas, como aquelas provenientes do Balanço Energético Nacional. Assim, a integração entre estatística multivariada e programação computacional tem se consolidado como uma abordagem essencial para pesquisas contemporâneas na área de energia.

2.5.1 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística multivariada amplamente utilizada para a redução de dimensionalidade de conjuntos de dados compostos por múltiplas variáveis correlacionadas. Seu principal objetivo consiste em transformar um conjunto original de variáveis, possivelmente correlacionadas entre si, em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, denominadas componentes principais, que preservam a maior parte da variabilidade presente nos dados originais (Jolliffe; Cadima, 2016).

Do ponto de vista matemático, a ACP baseia-se na decomposição espectral da matriz de correlação ou de covariância das variáveis originais. Em aplicações que envolvem variáveis medidas em diferentes escalas e unidades — como energia elétrica, indicadores econômicos e variáveis ambientais — é recomendada a utilização da matriz de correlação, precedida pela padronização das variáveis. Essa padronização é geralmente realizada por meio da transformação *z-score*, de modo que cada variável passe a apresentar média zero e desvio padrão unitário, evitando que variáveis de maior magnitude dominem a estrutura de variância do conjunto de dados.

A decomposição espectral da matriz de correlação resulta em um conjunto de autovalores e autovetores. Os autovalores representam a quantidade de variância explicada por cada componente principal, enquanto os autovetores definem as direções dos componentes no espaço das variáveis originais. Assim, cada componente principal é construído como uma combinação linear das variáveis padronizadas, cujos coeficientes correspondem aos elementos do autovetor associado.

A importância relativa de cada componente principal é avaliada pela proporção da variância total explicada, calculada como a razão entre o autovalor do componente e a soma dos autovalores de todos os componentes. A partir dessa métrica, torna-se possível estabelecer critérios para a retenção dos componentes, sendo comum a seleção daqueles que, conjuntamente, expliquem entre 70% e 80% da variância total, garantindo uma representação sintética e informativa do conjunto original de dados.

Além disso, os coeficientes associados às variáveis em cada componente — conhecidos como *loadings* — permitem interpretar o significado econômico, energético ou ambiental dos componentes principais. Variáveis com maiores valores absolutos de *loadings* exercem maior

influência na composição do componente, possibilitando a identificação de fatores latentes que representam dimensões estruturais subjacentes ao fenômeno analisado, como crescimento econômico, expansão da demanda energética ou alterações na matriz elétrica.

No contexto de estudos sobre o setor energético, a ACP tem se mostrado particularmente útil para lidar com a multicolinearidade entre variáveis explicativas, problema recorrente em análises que envolvem indicadores econômicos, energéticos e ambientais. Ao sintetizar informações redundantes em um número reduzido de componentes independentes, a técnica contribui para análises mais robustas e interpretáveis, além de servir como base para modelos subsequentes, como a regressão com componentes principais, frequentemente empregada para investigar relações entre fatores latentes e variáveis de desempenho energético.

Dessa forma, a ACP constitui uma ferramenta fundamental em análises estatísticas multivariadas aplicadas ao setor energético, permitindo compreender sistemas complexos de maneira integrada, reduzir a dimensionalidade dos dados e apoiar a interpretação dos padrões estruturais associados ao aumento de fontes renováveis, como a energia eólica.

Assim, dentro do estudo a Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada às variáveis explicativas X com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados e sintetizar fatores latentes associados ao crescimento da energia eólica no sistema elétrico brasileiro. Inicialmente, as variáveis foram padronizadas por meio da transformação *z-score*, de forma que cada variável X_j fosse convertida em (equação 2):

$$Z_j = \frac{x_j - \bar{x}_j}{s_j}; \quad (2)$$

em que $\bar{x}_j$ é a média e s_j é o desvio padrão da variável X_j .

A padronização é necessária porque as variáveis analisadas apresentam escalas e unidades distintas (GWh, tep, US\$, Mt, R\$/MWh e R\$/US\$), e, sem esse procedimento, variáveis com maior magnitude tenderiam a dominar a estrutura de variância. Com as variáveis padronizadas, a ACP foi conduzida a partir da matriz de correlação R (equivalente à matriz de covariância das variáveis padronizadas). A decomposição espectral dessa matriz é dada por (equação 3):

$$R = \nu \Lambda \nu^T \quad (3)$$

em que:

- Λ é a matriz diagonal dos autovalores $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$, que representam a variância explicada por cada componente;
- V é a matriz dos autovetores associados (direções dos componentes no espaço das variáveis).

Cada componente principal PC_k é definido como uma combinação linear das variáveis padronizadas (equação 4):

$$PC_k = v_{1k}Z_1 + v_{2k}Z_2 + \dots + v_{pk}Z_p \quad (4)$$

onde v_{jk} são os coeficientes do autovetor (pesos) que definem a contribuição de cada variável Z_j no componente PC_k . Esses coeficientes são comumente interpretados por meio dos *loadings* (cargas), que indicam quais variáveis têm maior influência na composição do componente.

A porcentagem de variância explicada por cada componente principal é calculada por (equação 5):

$$\%Var(PC_k) = \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \times 100 \quad (5)$$

e a variância acumulada até o componente m é dada por (equação 6):

$$\%Var_{acum}(m) = \sum_{k=1}^m \%Var(PC_k) \quad (6)$$

2.5.2 Regressão com Componentes Principais (PCR)

A Regressão com Componentes Principais (Principal Component Regression – PCR) consiste em uma técnica estatística que combina a Análise de Componentes Principais (ACP) com a regressão linear, sendo especialmente indicada em contextos nos quais o conjunto de variáveis explicativas apresenta alta correlação entre si ou problemas de multicolinearidade. Nessas situações, a aplicação direta da regressão linear múltipla pode gerar estimativas instáveis dos coeficientes, dificultando a interpretação dos resultados e comprometendo a robustez do modelo (Jolliffe; Cadima, 2016).

O procedimento da PCR ocorre em duas etapas principais. Inicialmente, aplica-se a ACP ao conjunto de variáveis explicativas, transformando-as em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, denominadas componentes principais, que são combinações lineares das variáveis originais e ordenadas de acordo com a variância explicada. Em seguida, um subconjunto desses componentes — geralmente aqueles que explicam a maior parcela da variância total dos dados — é utilizado como variável explicativa em um modelo de regressão linear (Massy, 1965; Jolliffe, 2002).

Logo, ao substituir as variáveis originais pelos componentes principais, a PCR reduz a dimensionalidade do modelo e mitiga os efeitos da multicolinearidade, permitindo estimativas mais estáveis e maior capacidade explicativa. Embora os componentes principais não sejam definidos diretamente em função da variável dependente, sua utilização se justifica pela capacidade de sintetizar estruturas latentes do conjunto de dados, preservando a maior parte da informação contida nas variáveis originais (Wold; Sjöström; Eriksson, 2001).

No contexto de estudos aplicados ao setor energético, a PCR tem sido amplamente empregada para analisar sistemas complexos caracterizados pela interação simultânea de fatores econômicos, ambientais, estruturais e institucionais. Essa abordagem é particularmente adequada quando se busca compreender o comportamento de variáveis como produção e consumo de energia, que são influenciadas por múltiplos determinantes inter-relacionados ao longo do tempo (Jolliffe; Cadima, 2016).

Dessa forma, a Regressão com Componentes Principais constitui uma ferramenta metodológica robusta para investigar a relação entre a geração de energia elétrica de origem eólica e seus fatores explicativos, permitindo integrar informações de diferentes naturezas em um único modelo analítico. Sua aplicação contribui para a obtenção de resultados estatisticamente consistentes e para uma interpretação mais estruturada dos condicionantes da expansão da energia eólica no sistema elétrico brasileiro.

3. METODOLOGIA

O projeto adota uma abordagem de pesquisa quantitativa, baseada na análise de dados secundários provenientes de bases oficiais. A revisão da literatura não constitui o método principal de coleta de dados, sendo utilizada como suporte teórico e conceitual do estudo, com a finalidade de contextualizar o setor elétrico, fundamentar as escolhas metodológicas e auxiliar na interpretação e discussão dos resultados obtidos. Nesse sentido, foram considerados estudos recentes relacionados à produção de energia eólica, à matriz elétrica e à aplicação de ferramentas de análise estatística multivariada, de modo a assegurar consistência teórica e alinhamento com a literatura especializada.

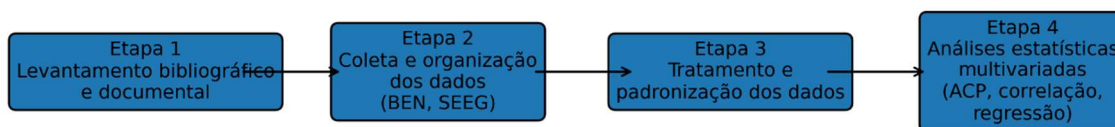
Para tanto, a coleta de dados será realizada a partir de fontes oficiais, em especial o Balanço Energético Nacional 2025, complementado por relatórios institucionais da EPE, ABEEólica e SEEG, além de artigos e publicações científicas.

A análise estatística multivariada será utilizada para examinar simultaneamente as relações entre variáveis técnicas, econômicas e institucionais associadas à produção e ao consumo de energia elétrica produzida por meio de fontes eólicas. A aplicação da análise de correlação multivariada permitirá identificar padrões de associação entre essas variáveis, fornecendo suporte quantitativo para a interpretação dos fatores que influenciam a expansão da energia eólica no Brasil.

3.1. Etapas da pesquisa

O desenvolvimento desta pesquisa foi estruturado em quatro etapas principais, com o objetivo de garantir coerência metodológica e adequada fundamentação analítica. Com o objetivo de sintetizar o procedimento metodológico adotado, a Figura 5 apresenta, de forma esquemática, as etapas de desenvolvimento da pesquisa, desde a fundamentação teórica até a análise estatística e interpretação dos resultados.

Figura 5: Etapas metodológicas da pesquisa



Fonte: Elaboração da autora (2026)

Conforme a Figura 5, o desenvolvimento da pesquisa foi estruturado em quatro etapas sequenciais e interdependentes. Inicialmente, a primeira etapa consistiu no levantamento bibliográfico e documental, contemplando estudos acadêmicos, relatórios institucionais e documentos oficiais relacionados à matriz energética brasileira, com ênfase na produção de energia elétrica e na expansão da energia eólica. Essa etapa teve como finalidade contextualizar o tema, identificar abordagens metodológicas adotadas na literatura e fundamentar teoricamente a escolha das variáveis e dos métodos de análise utilizados no estudo.

A segunda etapa correspondeu à coleta, organização e sistematização dos dados secundários, provenientes do Balanço Energético Nacional (BEN), do BEN Interativo e da plataforma do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas, estruturadas por séries históricas anuais no período de 2000 a 2024, possibilitando a consolidação das variáveis relacionadas à produção e ao consumo de energia elétrica eólica, bem como dos indicadores econômicos, ambientais e estruturais associados ao setor energético.

Já na terceira etapa, realizou-se o tratamento preliminar dos dados, incluindo análise estatística descritiva e padronização das variáveis, com o objetivo de garantir a comparabilidade entre indicadores de diferentes escalas e unidades de medida. Essa etapa permitiu uma visão inicial da expansão da energia eólica na matriz elétrica brasileira e subsidiou a definição das estratégias de análise estatística multivariada.

Por fim, a quarta etapa compreendeu a análise e interpretação dos resultados, relacionando os achados estatísticos à literatura especializada e ao contexto das políticas públicas e do planejamento energético nacional. Essa etapa teve como propósito identificar avanços, limitações e perspectivas da energia eólica no Brasil, destacando os fatores econômicos, ambientais e estruturais que influenciam sua expansão no sistema elétrico.

As etapas de organização, tratamento e análise dos dados foram realizadas com o apoio do software Microsoft Excel, utilizado para a estruturação inicial das bases de dados, e da linguagem de programação *Python*, empregada na execução das análises estatísticas. O uso do *Python* possibilitou a realização das análises de correlação multivariada, da Análise de Componentes Principais e da regressão exploratória, bem como a elaboração de gráficos e tabelas analíticas. Assim, trazendo uma abordagem que assegura maior reprodutibilidade, transparência metodológica e precisão nos cálculos estatísticos, alinhando-se às práticas contemporâneas de pesquisa quantitativa aplicada ao setor energético.

3.2 Seleção das variáveis e fundamentação analítica

A seleção das variáveis analisadas neste estudo foi fundamentada na estrutura conceitual proposta por Silva, Correa e Monnerat (2025), que identificam fatores econômicos, de mercado e institucionais como determinantes relevantes para o desempenho de inovações verdes no setor energético. A partir dessa base teórica, foram definidas variáveis capazes de representar tais fatores no contexto da produção e do consumo de energia elétrica eólica no Brasil.

Dentro da fundamentação teórica, as variáveis independentes foram selecionadas de modo a capturar os principais fatores apontados pela literatura, sendo organizadas em três grupos:

- Fatores econômicos e de mercado: representados por indicadores macroeconômicos como Produto Interno Bruto, consumo total de eletricidade, consumo industrial e residencial, além de variáveis relacionadas à demanda energética, que refletem o nível de atividade econômica e a necessidade de expansão da oferta elétrica.
- Fatores institucionais e regulatórios: considerados por meio de indicadores associados ao setor energético, como políticas públicas de incentivo às fontes renováveis, estrutura regulatória do setor elétrico e mecanismos de apoio à produção de energia limpa.
- Fatores ambientais: representados por variáveis como emissões de dióxido de carbono e indicadores de uso do solo, que permitem avaliar a relação entre a expansão da energia eólica e os objetivos de redução de impactos ambientais associados à transição energética.

Com base nessa estrutura conceitual, as variáveis foram operacionalizadas de forma mais detalhada, de modo a capturar empiricamente a complexidade do sistema elétrico brasileiro e permitir a aplicação das técnicas de análise estatística multivariada. Assim, os fatores apontados pela literatura foram desagregados em cinco grupos analíticos, que representam diferentes dimensões econômicas, estruturais e ambientais associadas à expansão da energia eólica no país.

A variável dependente principal do estudo corresponde à geração de energia elétrica de origem eólica, expressa em unidades de energia elétrica, conforme os dados disponibilizados pelo Balanço Energético Nacional para o período de 2000 a 2024. Essa variável representa o desempenho do setor eólico no sistema elétrico nacional e foi utilizada como variável resposta nas análises estatísticas multivariadas.

Em relação ao consumo de energia elétrica de origem eólica, foi considerado como uma variável complementar de análise, permitindo contextualizar a dinâmica de utilização da energia gerada e sua inserção no sistema elétrico, além de subsidiar a interpretação dos resultados obtidos.

As variáveis independentes foram selecionadas de modo a representar os principais fatores associados à expansão da energia eólica, conforme apontado pela literatura, sendo organizadas nos seguintes cinco grupos analíticos:

- Fatores de mercado e demanda elétrica, representados por indicadores como consumo total de eletricidade e consumo nos setores industrial e residencial, que refletem a dinâmica da demanda e a necessidade de expansão da oferta elétrica;
- Atividade econômica e demográfica, contemplando variáveis como Produto Interno Bruto e população residente, associadas ao nível de atividade econômica e ao crescimento estrutural da demanda energética;
- Aspectos ambientais, representados por variáveis relacionadas às emissões de dióxido de carbono, que permitem avaliar a interação entre a expansão da energia eólica e os objetivos de mitigação dos impactos ambientais;
- Estrutura energética e dependência externa, incluindo indicadores de importação de eletricidade e dependência energética, que refletem a segurança do suprimento e a inserção da energia eólica na matriz elétrica nacional;
- Fatores econômico-financeiros, representados por variáveis como preços médios da eletricidade e taxa de câmbio, que influenciam os custos de produção, os investimentos no setor elétrico e a viabilidade econômica das fontes renováveis.

Essa organização analítica permite avaliar, de forma integrada, como os diferentes fatores econômicos, estruturais, ambientais e financeiros se relacionam com o crescimento da energia eólica no Brasil, preservando a coerência com a literatura sobre inovação verde e ampliando sua aplicação ao contexto empírico do setor elétrico nacional.

As variáveis analisadas neste estudo foram organizadas em variáveis dependentes (Y) e variáveis explicativas (X). As variáveis dependentes representam o desempenho da energia eólica no sistema elétrico brasileiro, considerando a geração de energia elétrica de origem eólica e sua participação relativa na geração e no consumo total de eletricidade (tabela 2).

Tabela 2: Variáveis dependentes (Y) do estudo

Código	Variável (Y)	Unidade	Fonte	Observação
Y1	Geração de energia elétrica de origem eólica	GWh	BEN / BEN Interativo	Principal variável-alvo do estudo
Y2	Consumo de energia elétrica de origem eólica	GWh	BEN / BEN Interativo	Se coincidir com a produção, pode-se manter apenas Y1
Y3	Participação da energia eólica na geração elétrica total	%	BEN	Utilizada para normalização do crescimento (controle de escala)
Y4	Participação da energia eólica no consumo total de eletricidade	%	BEN	Variável complementar

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

As variáveis dependentes apresentadas na Tabela 2 representam diferentes dimensões do desempenho da energia eólica no sistema elétrico brasileiro. A variável principal corresponde à geração de energia elétrica de origem eólica, utilizada como variável-alvo nas análises estatísticas multivariadas, por refletir diretamente a expansão do setor eólico no país.

Já em relação ao consumo de energia elétrica de origem eólica, é considerado de forma complementar, permitindo contextualizar a utilização da energia gerada e sua inserção na demanda do sistema elétrico.

Adicionalmente, as variáveis expressas em termos percentuais — participação da energia eólica na geração elétrica total e no consumo total de eletricidade — são empregadas como indicadores de normalização e controle de escala, possibilitando avaliar a expansão relativa da fonte eólica em comparação ao crescimento do sistema elétrico como um todo. Dessa forma, o conjunto de variáveis dependentes permite uma análise mais abrangente do desempenho da energia eólica, combinando medidas absolutas e relativas.

Já relacionado as variáveis explicativas foram agrupadas em fatores de mercado e demanda elétrica, atividade econômica e demográfica, aspectos ambientais, estrutura energética e dependência externa, além de fatores econômico-financeiros, apresentadas pelas tabelas de 3 a 7.

As Tabelas de 3 a 7 contém as variáveis independentes analisadas neste estudo, que foram organizadas em cinco grupos analíticos, de acordo com sua natureza e função explicativa no desempenho da energia eólica no sistema elétrico brasileiro.

O Grupo A (Tabela 3), denominado mercado e demanda elétrica, contempla variáveis relacionadas à escala e ao perfil de consumo do sistema elétrico, incluindo a oferta interna de energia elétrica, o consumo total de eletricidade e o consumo de eletricidade nos setores residencial e industrial, representando a pressão de demanda e a necessidade de expansão da oferta de eletricidade ao longo do período analisado.

Tabela 3: Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo A: Mercado e demanda elétrica

Grupo A - Mercado e demanda elétrica				
Código	Variável (X)	Unidade	Fonte	Observação
X1	Oferta interna de energia elétrica	GWh	BEN / BEN Interativo	Representa a escala do sistema elétrico
X2	Consumo total de eletricidade	mil tep	BEN / BEN Interativo	Proxy de demanda energética nacional
X3	Consumo de eletricidade – setor residencial	mil tep	BEN / BEN Interativo	Reflete perfil de consumo das famílias
X4	Consumo de eletricidade – setor industrial	mil tep	BEN / BEN Interativo	Relacionado à atividade econômica e industrial

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A oferta interna de energia elétrica representa a dimensão estrutural do sistema elétrico, expressando sua capacidade de atendimento à demanda nacional. O consumo total de eletricidade é utilizado como proxy da demanda energética agregada, enquanto os consumos nos setores residencial e industrial permitem captar diferenças no perfil de utilização da eletricidade, associadas, respectivamente, ao crescimento populacional, ao padrão de consumo das famílias e à atividade econômica e produtiva.

O Grupo B (Tabela 4), referente à atividade econômica e demográfica, é composto pelo Produto Interno Bruto e pela população residente. Sendo assim, indicadores que capturam o nível de atividade econômica e o crescimento populacional, além de fatores estruturais que influenciam diretamente o consumo de eletricidade e os investimentos em infraestrutura energética.

Tabela 4: Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo B: Atividade econômica e demográfica

Grupo B - Atividade econômica e demográfica				
Código	Variável (X)	Unidade	Fonte	Observação
X5	Produto Interno Bruto (PIB)	10 ⁹ US\$ PPC (2010)	BEN / Banco Mundial	Indicador de atividade econômica
X6	População residente	10 ⁶ habitantes	BEN / IBGE	Indicador estrutural de demanda elétrica

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

O Produto Interno Bruto (PIB) é utilizado como indicador do dinamismo econômico, refletindo a expansão da produção, do consumo e da atividade industrial, fatores que tendem a ampliar a necessidade de oferta de eletricidade. A população residente, por sua vez, representa um indicador estrutural de longo prazo da demanda elétrica, associada ao crescimento urbano, ao padrão de consumo das famílias e à ampliação dos serviços públicos.

Do mesmo modo, o Grupo C (Tabela 5) correspondente aos fatores ambientais, incluindo as emissões totais de dióxido de carbono e as emissões de dióxido de carbono do setor de energia, permitindo que seja contextualizada a expansão da energia eólica no âmbito das políticas de mitigação das mudanças climáticas e da transição para fontes de menor impacto ambiental.

Tabela 5: Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo C: Ambiental

Grupo C – Ambiental				
Código	Variável (X)	Unidade	Fonte	Observação
X7	Emissões totais de CO ₂	Mt	SEEG	Representa pressão ambiental geral
X8	Emissões de CO ₂ do setor de energia	Mt	SEEG	Relacionada diretamente ao sistema energético

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

As emissões totais de CO₂ representam a pressão ambiental agregada decorrente das atividades econômicas e energéticas, refletindo o nível global de emissões associado ao modelo de desenvolvimento adotado. Já as emissões de CO₂ do setor de energia constituem um indicador diretamente relacionado à estrutura e à composição da matriz energética, sendo particularmente relevantes para avaliar os efeitos da substituição gradual de fontes fósseis por fontes renováveis.

Já o Grupo D, denominado estrutura energética e dependência externa, abrange variáveis associadas à segurança energética e à composição da matriz, como a oferta interna de energia eólica, a capacidade de geração eólica instalada (centrais elétricas totais), a dependência externa de energia, a importação de eletricidade e o consumo final energético. Sendo um conjunto de variáveis que possibilita avaliar como a expansão da energia eólica se relaciona com a redução da dependência externa e com o fortalecimento da oferta interna de energia.

A oferta interna de energia eólica constitui um indicador estrutural do desenvolvimento da fonte no país, refletindo sua disponibilidade efetiva no atendimento à demanda nacional. As centrais elétricas totais de geração eólica, que englobam a geração do setor público e a autoprodução, são utilizadas como proxy da capacidade instalada e da infraestrutura de geração associada à fonte eólica.

Dessa forma, as variáveis do Grupo D (Tabela 6) possibilitam investigar se o crescimento da energia eólica contribui para a redução da dependência energética externa e para o aumento da segurança e da autonomia do sistema elétrico nacional.

Tabela 6: Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo D: Estrutura energética e dependência externa

Grupo D - Estrutura energética e dependência externa				
Código	Variável (X)	Unidade	Fonte	Observação
X9	Oferta interna de energia eólica	10 ⁶ tep	BEN / BEN Interativo	Indicador estrutural da fonte eólica
X10	Centrais elétricas totais de geração eólica (setor público + autoprodução)	10 ³ tep	BEN / BEN Interativo	Proxy de capacidade e infraestrutura instalada
X11	Dependência externa de energia	10 ³ tep	BEN / BEN Interativo	Relacionada à segurança energética
X12	Importação de eletricidade	10 ³ tep	BEN / BEN Interativo	Complementa a análise de dependência externa
X13	Consumo final energético	10 ³ tep	BEN / BEN Interativo	Representa a demanda total do sistema energético

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Por fim, o Grupo E (Tabela 7), referente aos fatores econômico-financeiros, compreendendo os preços médios correntes da eletricidade nos setores industrial e residencial, bem como a taxa de câmbio média anual, com variáveis que influenciam os custos de produção, a competitividade econômica da energia eólica e os investimentos no setor, especialmente considerando a presença de componentes importados na cadeia produtiva eólica.

Os preços médios correntes da eletricidade nos setores industrial e residencial refletem, respectivamente, os custos enfrentados pelas atividades produtivas e pelos consumidores finais, sendo relevantes para avaliar a competitividade da energia eólica em relação a outras fontes de geração. Assim, esses indicadores também permitem analisar como variações tarifárias podem afetar a demanda por eletricidade e a atratividade econômica de investimentos em fontes renováveis. Já a taxa de câmbio média anual é incluída como variável explicativa por sua influência direta sobre os custos de equipamentos e componentes importados utilizados na cadeia produtiva da energia eólica, como aerogeradores, pás e sistemas eletrônicos. Assim, as variáveis do Grupo E possibilitam examinar de que forma fatores econômico-financeiros e macroeconômicos condicionam a expansão da energia eólica no Brasil, complementando a análise dos aspectos estruturais, ambientais e de demanda do sistema elétrico.

Tabela 7: Variáveis explicativas (X) do estudo – Grupo E: Econômico-financeiro (preços e câmbio)

Grupo E - Econômico-financeiro (preços e câmbio)				
Código	Variável (X)	Unidade	Fonte	Observação
X14	Preço médio corrente da eletricidade – setor industrial	R\$/MWh	BEN / BEN Interativo	Relacionado à competitividade industrial
X15	Preço médio corrente da eletricidade – setor residencial	R\$/MWh	BEN / BEN Interativo	Relacionado ao custo para o consumidor
X16	Taxa de câmbio – dólar (venda média anual)	R\$/US\$	BEN / Banco Central	Influencia custos de equipamentos importados

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Logo, as informações relativas à produção, ao consumo e à estrutura do setor elétrico foram obtidas a partir do Balanço Energético Nacional (BEN) e do BEN Interativo, enquanto os dados de emissões de dióxido de carbono foram extraídos da plataforma do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG). A organização das variáveis nesses grupos analíticos permite a aplicação de técnicas de análise estatística multivariada, possibilitando investigar, de forma integrada, a relação entre o crescimento da energia eólica e os fatores econômicos, ambientais, estruturais e financeiros associados ao setor elétrico brasileiro.

3.3 Determinação do modelo estatístico

O modelo estatístico adotado neste estudo baseia-se em uma abordagem multivariada composta por análise de correlação, análise de componentes principais e regressão com componentes principais. A variável dependente considerada é a geração de eletricidade eólica, expressa em GWh, enquanto as variáveis explicativas abrangem indicadores de demanda elétrica, atividade econômica, fatores ambientais, estrutura energética e aspectos econômico-financeiros, organizados conforme grupos analíticos previamente definidos. Assim, inicialmente, será realizada análise estatística descritiva das variáveis, seguida da padronização das variáveis explicativas por meio da transformação z-score, de modo a garantir comparabilidade entre indicadores de diferentes escalas. Em seguida, será construída uma matriz de correlação para identificar associações preliminares entre a geração eólica e os fatores explicativos, bem como verificar a presença de multicolinearidade.

Por sequência, será aplicada a análise de componentes principais às variáveis explicativas, com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados e sintetizar fatores representativos das condições econômicas, ambientais e estruturais do setor elétrico. Assim, serão retidos os componentes que expliquem, conjuntamente, acima de 70% e 80% da variância total. Deste modo, sendo possível estimar um modelo de regressão com componentes principais, no qual a geração de eletricidade eólica será explicada pelos componentes principais selecionados. Todas as etapas de tratamento, análise e visualização dos dados serão realizadas por meio de programação *Python*, com apoio de bibliotecas estatísticas e de análise de dados, utilizadas para a implementação das técnicas multivariadas e para a automatização dos procedimentos analíticos, assegurando reprodutibilidade e transparência metodológica.

A Figura 6 apresenta o fluxograma metodológico adotado neste estudo, no qual são sintetizadas as etapas de coleta, tratamento e análise dos dados, bem como os métodos estatísticos empregados.

Figura 6: Fluxograma metodológico do estudo



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

O fluxo metodológico foi estruturado de forma sequencial (figura 6), permitindo a aplicação integrada de técnicas de análise estatística multivariada para investigar os fatores associados à expansão da geração de energia eólica no sistema elétrico brasileiro.

3.4 Aplicação da análise estatística multivariada por meio de programação em Python

A aplicação das técnicas de análise estatística multivariada foi realizada com o apoio de ferramentas computacionais, de modo a garantir precisão, reprodutibilidade e transparência metodológica ao tratamento dos dados. Inicialmente, os dados secundários provenientes do Balanço Energético Nacional (BEN), do BEN Interativo e da plataforma SEEG foram organizados e conferidos em planilhas eletrônicas por meio do software Microsoft Excel, utilizado para verificação de consistência, padronização preliminar de formatos e consolidação das séries históricas anuais no período de 2000 a 2024.

Após essa etapa inicial, as análises estatísticas foram conduzidas utilizando a linguagem de programação *Python*, amplamente empregada em estudos quantitativos aplicados à área de energia e economia, em função de sua capacidade de processamento eficiente de grandes volumes de dados e de sua ampla disponibilidade de bibliotecas estatísticas. Os dados foram importados e manipulados com o auxílio da biblioteca *pandas*, responsável pela estruturação das bases de dados em formato tabular, tratamento de valores ausentes e organização das variáveis explicativas e dependentes. Já a biblioteca *NumPy* foi utilizada para operações matemáticas e matriciais, essenciais às etapas de padronização e decomposição estatística.

A análise de correlação multivariada foi realizada a partir da construção de matrizes de correlação de *Pearson*, utilizando funções estatísticas das bibliotecas *pandas* e *SciPy*, permitindo avaliar o grau e o sentido das associações lineares entre a variável dependente — geração de energia elétrica de origem eólica — e o conjunto de variáveis explicativas. Essa etapa teve caráter exploratório, sendo fundamental para a identificação de padrões preliminares e para a verificação da presença de multicolinearidade entre as variáveis.

Na sequência, a Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada às variáveis explicativas previamente padronizadas por meio da transformação *z-score*, garantindo comparabilidade entre indicadores com diferentes escalas e unidades de medida. A ACP foi implementada utilizando a biblioteca *scikit-learn*, que possibilitou a extração dos autovalores, autovetores e da variância explicada por cada componente principal. Com base nesses resultados, foram selecionados os componentes que, conjuntamente, explicaram acima de 70% e 80% da variância total, conforme definido no modelo estatístico do estudo.

A padronização estatística por meio da transformação *z-score*, procedimento amplamente adotado em análises multivariadas quando os dados apresentam diferentes escalas e unidades de medida, consistiu em subtrair de cada observação a média da respectiva variável e dividir o resultado pelo seu desvio padrão, conforme a expressão (equação 7):

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

Em que x_i representa o valor original da variável, μ sua média e σ o desvio padrão. Como resultado, todas as variáveis passam a apresentar média igual a zero e desvio padrão igual a um, permitindo comparabilidade direta entre indicadores heterogêneos. A padronização foi realizada utilizando rotinas automatizadas da biblioteca *scikit-learn*, especificamente o método *StandardScaler*, que aplica a transformação *z-score* de forma consistente a todo o conjunto de dados.

Por fim, os componentes principais selecionados foram empregados na estimação de modelos de Regressão com Componentes Principais (PCR), também implementados em ambiente *Python*, com apoio das bibliotecas *scikit-learn* e *statsmodels*. Essa etapa permitiu avaliar a influência conjunta dos fatores latentes identificados pela ACP sobre a geração de energia elétrica de origem eólica, reduzindo os efeitos da multicolinearidade e proporcionando estimativas mais estáveis dos coeficientes do modelo.

Além do mais, a programação foi utilizada para a geração de gráficos, tabelas analíticas e visualizações estatísticas, por meio das bibliotecas *Matplotlib* e *Seaborn*, facilitando a interpretação dos resultados e a comunicação dos achados empíricos. Dessa forma, o uso integrado de programação computacional e estatística multivariada assegura maior rigor analítico, reprodutibilidade dos procedimentos e alinhamento com as novas práticas de pesquisa quantitativa aplicada ao setor energético e às inovações verdes.

3.5 Delimitação do estudo

O presente estudo delimita-se à matriz elétrica brasileira, com foco exclusivo na energia eólica, considerando o período compreendido entre 2000 e 2024. O recorte temporal adotado permite analisar a trajetória de expansão da energia eólica desde sua fase inicial de inserção no sistema elétrico nacional até sua consolidação como uma das principais fontes renováveis modernas do país.

No âmbito temático, a análise concentra-se na produção e no consumo de energia elétrica, não abrangendo de forma aprofundada outras etapas da cadeia elétrica, como transmissão e distribuição. Da mesma forma, embora a matriz energética nacional inclua diversas fontes renováveis e não renováveis, o estudo restringe-se à energia eólica, adotada como objeto central de investigação em função de sua relevância crescente na matriz elétrica e de seu potencial estratégico para a transição energética.

Logo, as dimensões analisadas contemplam fatores econômicos, ambientais, estruturais e de mercado, operacionalizados por meio de variáveis selecionadas a partir do Balanço Energético Nacional e da plataforma SEEG. Já os aspectos institucionais e regulatórios são considerados de forma indireta, por meio de indicadores econômicos e estruturais, não sendo realizada análise jurídica ou normativa aprofundada.

Deste modo, é possível assegurar coerência entre os objetivos da pesquisa, o conjunto de dados disponível e os métodos estatísticos multivariados adotados, permitindo uma análise

consistente e focada sobre os fatores associados ao crescimento da energia eólica no sistema elétrico brasileiro.

4. ANÁLISE E RESULTADOS

Os resultados foram obtidos a partir da análise estatística dos dados referentes ao setor elétrico brasileiro no período de 2000 a 2024, com foco na energia eólica. Inicialmente, são apresentados os resultados da análise estatística descritiva, com o objetivo de caracterizar o comportamento das principais variáveis ao longo do período analisado. Em seguida, são discutidas as tendências temporais da produção e da oferta interna de energia eólica, preparando-se para as análises multivariadas subsequentes.

A base de dados consolidada utilizada neste estudo contempla variáveis relacionadas à produção e ao consumo de energia elétrica de origem eólica, bem como indicadores econômicos, ambientais e estruturais selecionados, abrangendo o período de 2000 a 2024. A organização dessas informações em formato tabular permitiu uma visão integrada do comportamento das variáveis ao longo do tempo, constituindo a base empírica para as análises estatísticas subsequentes.

A partir dessa base de dados consolidada, torna-se possível realizar uma análise inicial do comportamento das variáveis ao longo do período considerado.

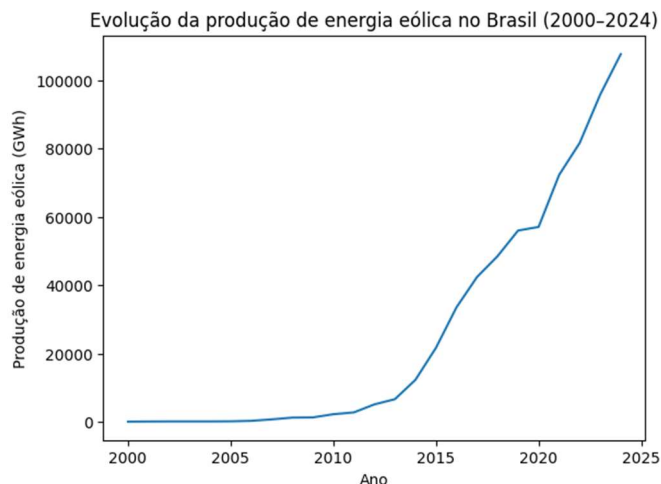
Assim, com a análise estatística descritiva, é possível evidenciar a trajetória de expansão da energia eólica no Brasil ao longo do período analisado, sendo a produção de energia eólica expressa em GWh, que apresenta crescimento acentuado a partir da década de 2010, refletindo a intensificação dos investimentos e a ampliação da capacidade instalada. A oferta interna de energia eólica, medida em toneladas equivalentes de petróleo, acompanha essa tendência, indicando maior participação da fonte na matriz elétrica nacional.

Do mesmo modo, já relacionado às variáveis explicativas, observa-se crescimento consistente do consumo total de eletricidade, do Produto Interno Bruto e da população residente, fatores que contribuem para a expansão da demanda energética. As emissões de dióxido de carbono, tanto totais quanto do setor de energia, apresentam variações ao longo do período, refletindo mudanças na composição da matriz e no perfil de consumo energético. Já as variáveis econômico-financeiras, como os preços médios da eletricidade e a taxa de câmbio, evidenciam maior volatilidade, especialmente nos anos mais recentes, indicando influência de fatores macroeconômicos sobre o setor elétrico, como períodos de desaceleração econômica, crises fiscais, variações inflacionárias, mudanças nas taxas de juros e choques externos que impactam o custo da energia, os investimentos no setor elétrico e o comportamento da demanda.

A Figura 7 apresenta o crescimento da produção de energia eólica no Brasil entre 2000 e 2024. Observa-se que, nos primeiros anos da série histórica, a geração eólica apresentava valores pouco representativos, refletindo o estágio inicial de inserção dessa fonte no sistema elétrico nacional. A partir da década de 2010, verifica-se um crescimento acelerado da

produção, intensificado especialmente após 2013, período associado à ampliação dos investimentos, à realização de leilões de energia e ao avanço tecnológico do setor.

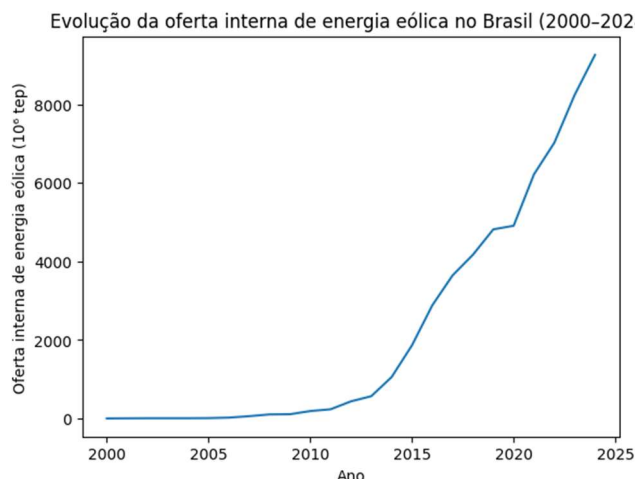
Figura 7: Expansão da produção de energia eólica no Brasil (2000–2024)



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

De maneira semelhante, ocorre o crescimento da oferta interna de energia eólica no Brasil (figura 8), evidenciado o comportamento semelhante para a oferta interna de energia eólica, expressa em toneladas equivalentes de petróleo, indicando que o crescimento da geração eólica se traduz em maior participação dessa fonte na matriz energética nacional, com um resultado que confirma a consolidação da energia eólica como uma das principais fontes renováveis modernas do país.

Figura 8: Expansão da oferta interna de energia eólica no Brasil (2000–2024)



Fonte: Elaborado pela autora (2026)

4.1 Análise de correlação multivariada

Com o objetivo de identificar associações preliminares entre a geração de energia elétrica de origem eólica e os fatores explicativos selecionados, foi realizada uma análise de correlação multivariada, utilizando o coeficiente de correlação linear de *Pearson*. Esse coeficiente mensura o grau e o sentido da associação linear entre pares de variáveis quantitativas, assumindo valores no intervalo de -1 a $+1$, em que valores positivos indicam associação direta, valores negativos indicam associação inversa e valores próximos de zero sugerem ausência de relação linear significativa.

A análise de correlação foi conduzida por meio de programação computacional em linguagem *Python*, a partir da construção de uma matriz de correlação multivariada baseada nas séries históricas anuais do período de 2000 a 2024. Inicialmente, as variáveis foram organizadas em estrutura matricial e submetidas à padronização estatística (transformação *z-score*), de modo a eliminar distorções decorrentes de diferentes escalas e unidades de medida. Essa etapa assegura que as correlações estimadas reflitam relações estruturais entre as variáveis, e não efeitos de magnitude absoluta.

Os coeficientes de correlação de *Pearson* foram calculados de forma automatizada utilizando rotinas estatísticas implementadas em bibliotecas especializadas, permitindo o processamento sistemático de todo o conjunto de variáveis explicativas e dependentes. O uso da programação possibilitou não apenas a automatização dos cálculos, mas também a reprodutibilidade integral dos resultados, garantindo que os coeficientes obtidos possam ser replicados a partir da mesma base de dados e dos mesmos procedimentos analíticos.

A matriz de correlação resultante foi utilizada como instrumento exploratório para identificar padrões de associação, relações de dependência e possíveis indícios de multicolinearidade entre as variáveis explicativas, etapa fundamental para subsidiar a aplicação subsequente da Análise de Componentes Principais. Para fins de clareza analítica e interpretação dos resultados, foram destacados e discutidos apenas os coeficientes de correlação de maior magnitude, considerados estatisticamente mais relevantes para a compreensão da dinâmica da energia eólica no sistema elétrico brasileiro, conforme apresentados na Tabela 8.

Ressalta-se que a análise de correlação não implica causalidade, sendo utilizada nesta etapa como uma ferramenta exploratória destinada a mapear relações lineares entre variáveis e orientar a modelagem multivariada subsequente. Ainda assim, os resultados obtidos fornecem evidências empíricas importantes sobre como fatores econômicos, ambientais, estruturais e de demanda elétrica se associam ao acréscimo da geração de energia eólica ao longo do período analisado.

Os resultados evidenciam forte associação positiva entre a produção de energia eólica e variáveis diretamente relacionadas à própria fonte, como a oferta interna de energia eólica, o consumo total de energia eólica e a capacidade eólica instalada, todas com coeficientes próximos de 1 (Tabela 8). Esses resultados eram esperados, uma vez que tais indicadores refletem dimensões estruturais do próprio processo de expansão da geração eólica no sistema elétrico brasileiro.

Tabela 8: Correlação entre a produção de energia eólica e variáveis explicativas (2000–2024)

Variável explicativa	Coefficiente de correlação (r)
Oferta interna de energia eólica	1,00
Consumo total de energia eólica	1,00
Capacidade eólica instalada	1,00
Taxa de câmbio (R\$/US\$)	0,92
Consumo de eletricidade – residencial	0,90
População residente	0,83
Oferta interna de energia elétrica	0,83
Consumo total de eletricidade	0,72
PIB	0,70
Consumo de eletricidade – industrial	0,65
Emissões de CO ₂ – setor energia	0,55
Importação de eletricidade	–0,91
Dependência externa de energia	–0,92

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Observam-se também correlações positivas elevadas entre a produção de energia eólica e variáveis associadas à expansão da demanda elétrica e ao crescimento demográfico, como o consumo de eletricidade no setor residencial, a população residente e a oferta interna de energia elétrica. Tais resultados sugerem que o crescimento da geração eólica acompanha a expansão estrutural do sistema elétrico, refletindo o aumento da demanda por energia elétrica em um contexto de crescimento populacional e ampliação do consumo final.

No âmbito econômico, a produção de energia eólica apresenta correlação positiva com o Produto Interno Bruto, indicando associação entre a expansão da atividade econômica e o aumento da geração eólica, ainda que com menor intensidade quando comparada às variáveis diretamente energéticas. O comportamento desse indicador reforça a interpretação de que a energia eólica se insere como parte integrante do processo de crescimento econômico e de expansão da infraestrutura energética nacional.

No que se refere aos aspectos ambientais, observa-se uma correlação positiva moderada entre a produção de energia elétrica de origem eólica e as emissões de dióxido de carbono do setor de energia. O resultado obtido não indica que a expansão da energia eólica seja responsável pelo aumento das emissões, mas reflete o crescimento simultâneo do sistema energético como um todo ao longo do período analisado.

Ainda, na literatura aponta que, em contextos de expansão da demanda energética, a ampliação das fontes renováveis ocorre paralelamente à manutenção do uso de fontes fósseis, especialmente em setores como transporte e usos térmicos, bem como na geração complementar necessária para garantir a segurança do sistema elétrico. Ademais, embora a energia eólica contribua para a redução da intensidade de emissões, as emissões absolutas podem permanecer em trajetória de crescimento quando o aumento da demanda total de energia supera os ganhos proporcionados pela substituição de fontes mais intensivas em carbono (IEA, 2023; EPE; MME, 2025).

Destaca-se, por outro lado, a presença de correlações negativas expressivas entre a produção de energia eólica e os indicadores de importação de eletricidade e dependência externa de energia, com coeficientes próximos de -1 . São resultados que sugerem que a expansão da geração eólica está associada à redução da dependência energética externa, contribuindo para o fortalecimento da oferta interna de eletricidade e para o aumento da segurança energética do país.

Em suma, é importante ressaltar que a análise de correlação não implica causalidade, sendo utilizada nesta etapa como um instrumento exploratório para identificação de padrões de associação entre as variáveis. Ainda assim, a presença de correlações elevadas entre diversas variáveis explicativas indica potencial de multicolinearidade, característica comum em estudos energéticos com séries históricas agregadas. O resultado encontrado justifica a aplicação da Análise de Componentes Principais, com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados e sintetizar os principais fatores associados ao crescimento da energia eólica no Brasil.

4.2 Resultados da ACP

A Análise de Componentes Principais foi aplicada ao conjunto de variáveis explicativas previamente padronizadas por meio da transformação *z-score*, com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e sintetizar as principais estruturas de variabilidade associadas à expansão da geração de energia elétrica de origem eólica no Brasil. A ACP foi implementada em ambiente de programação *Python*, a partir da decomposição da matriz de correlação das variáveis padronizadas, resultando na obtenção dos autovalores, da variância explicada por cada componente e dos pesos (cargas fatoriais) associados às variáveis originais.

Ainda, a Análise de Componentes Principais foi aplicada conjuntamente ao conjunto completo de variáveis explicativas (X) definidas na metodologia, englobando todos os grupos analíticos A a E, que representam fatores de mercado e demanda elétrica, atividade econômica e demográfica, aspectos ambientais, estrutura energética e dependência externa, e fatores econômico-financeiros. Assim, optou-se pela aplicação da ACP de forma integrada, e não por grupos isolados, com o objetivo de capturar as inter-relações existentes entre as diferentes dimensões do sistema elétrico brasileiro, permitindo a identificação de fatores latentes que sintetizam a dinâmica conjunta dos determinantes associados à expansão da energia eólica. Sendo uma abordagem que é adequada ao uso em sistemas complexos, nos quais variáveis econômicas, energéticas e ambientais apresentam comportamento interdependente ao longo do tempo.

Os autovalores retornados pelo algoritmo de ACP representam a variância capturada por cada componente principal. A partir desses autovalores, foi calculada a variância explicada individual, obtida pela razão entre o autovalor do componente e a soma total dos autovalores, bem como a variância explicada acumulada, que expressa a proporção total da variabilidade do conjunto de dados retida pelos componentes selecionados.

Os resultados indicam que o primeiro componente principal (PC1) apresentou autovalor elevado, sendo responsável por 70,40% da variância total do conjunto de variáveis explicativas.

O segundo componente principal (PC2) explicou 21,88% da variância, totalizando 92,27% de variância explicada acumulada quando considerados conjuntamente. O resultado obtido evidencia elevada capacidade de síntese do modelo, uma vez que mais de 90% da informação contida nas variáveis originais é representada por apenas dois componentes principais, atendendo aos critérios definidos para a aplicação da regressão com componentes principais. A Tabela 9 apresenta os valores dos autovalores, da variância explicada individual e da variância explicada acumulada para os dois componentes selecionados.

Tabela 9: Variância explicada pelos componentes principais selecionados

Componente	Autovalor (λ)	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
PC1	12,4661	70,4	70,4
PC2	3,8739	21,88	92,27

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A interpretação dos componentes principais foi realizada a partir da análise das cargas fatoriais (*loadings*), que correspondem às correlações entre as variáveis originais e os componentes principais. Essas cargas são obtidas a partir dos pesos dos componentes retornados pelo algoritmo de ACP, multiplicados pela raiz quadrada dos respectivos autovalores, permitindo avaliar a contribuição relativa de cada variável na composição de cada componente.

A análise das cargas fatoriais indica que o PC1 é fortemente influenciado por variáveis associadas à escala e à estrutura do sistema elétrico e econômico, destacando-se a oferta interna de eletricidade, o consumo total e setorial de eletricidade, o Produto Interno Bruto e a população residente. As elevadas cargas positivas dessas variáveis em PC1 indicam que esse componente sintetiza um fator estrutural de expansão econômica e energética, refletindo o crescimento simultâneo da demanda elétrica, da atividade econômica e da capacidade de geração do sistema elétrico brasileiro ao longo do período analisado.

Por sua vez, o PC2 apresenta maiores cargas fatoriais associadas a variáveis de natureza econômico-financeira e ambiental, como os preços médios da eletricidade, a taxa de câmbio e as emissões de dióxido de carbono. Esse componente captura dimensões complementares à expansão estrutural representada por PC1, refletindo condições macroeconômicas, variações de custos e pressões ambientais que influenciam o desempenho e a viabilidade econômica da geração de energia elétrica, incluindo a fonte eólica.

A Tabela 10 apresenta as cargas fatoriais das variáveis originais nos componentes PC1 e PC2, permitindo identificar as variáveis de maior contribuição em cada componente e subsidiando sua interpretação econômica e energética. Dessa forma, os resultados da ACP evidenciam que o crescimento da geração de energia elétrica de origem eólica no Brasil está associada, predominantemente, a um fator estrutural de crescimento econômico e expansão da demanda elétrica, sintetizado pelo PC1. Esse fator é caracterizado por elevadas cargas fatoriais em variáveis como consumo total de eletricidade, consumo residencial e industrial, Produto Interno Bruto, população residente, oferta interna de energia elétrica e indicadores estruturais

da própria energia eólica, refletindo a integração da expansão eólica à dinâmica de crescimento do sistema elétrico nacional.

Tabela 10: Cargas fatoriais das variáveis nos componentes principais selecionados

Variável	PC1	PC2
Oferta interna energia eólica (10^6 tep)	0,889	-0,473
Consumo total energia eólica (GWh)	0,889	-0,473
Centrais elétricas eólicas totais (10^3 tep)	0,889	-0,473
Oferta interna energia elétrica (GWh)	1,013	0,081
Dependência externa energia (10^3 tep)	-0,81	0,474
Importação eletricidade (10^3 tep)	-0,782	0,556
PIB (10^9 USD PPC 2010)	0,973	0,274
População (10^6 hab)	1,006	0,024
Emissão CO2 total (Mt)	-0,37	-0,799
Emissão CO2 setor energia (Mt)	0,867	0,376
Consumo eletricidade total (mil tep)	0,955	0,162
Consumo eletricidade residencial (mil tep)	1,007	-0,077
Consumo eletricidade industrial (mil tep)	0,916	0,271
Consumo final energético (10^3 tep)	0,865	0,41
Preço médio eletricidade industrial (MWh)	0,805	0,604
Preço médio eletricidade residencial (MWh)	0,494	0,849
Cambio médio (USD BRL)	0,743	-0,67

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Do mesmo modo, o segundo componente principal (PC2) representa um fator econômico-financeiro, ambiental e de dependência externa, associado principalmente aos preços médios da eletricidade, à taxa de câmbio, às importações de eletricidade, à dependência externa de energia e às emissões de dióxido de carbono. Logo, o componente reflete as condições macroeconômicas, os custos energéticos e as pressões ambientais que influenciam a inserção e a competitividade da energia eólica no contexto do sistema elétrico brasileiro.

Para fins de interpretação, as contribuições das variáveis em cada componente foram classificadas de acordo com o valor absoluto das cargas fatoriais, adotando-se os seguintes critérios: alta contribuição para valores absolutos iguais ou superiores a 0,60; contribuição moderada para valores entre 0,40 e 0,59; e baixa contribuição para valores inferiores a 0,40. Adicionalmente, o sinal das cargas fatoriais (positivo ou negativo) foi considerado para indicar o sentido da relação entre cada variável e o respectivo componente principal (Tabela 11).

Observa-se que o PC1 concentra predominantemente variáveis associadas à escala do sistema elétrico, crescimento econômico e expansão da demanda, caracterizando um fator estrutural de crescimento energético. Em contraste, o PC2 é majoritariamente composto por variáveis de natureza econômico-financeira e de dependência externa, como preços da eletricidade, taxa de câmbio e importações, representando um fator associado às condições de custo, segurança energética e exposição macroeconômica. Essa distinção reforça a

interpretação dos componentes como dimensões complementares que influenciam o crescimento da geração de energia elétrica de origem eólica no Brasil.

Tabela 11: Contribuição das variáveis explicativas nos componentes principais (ACP)

Variável explicativa	PC1	PC2	Interpretação predominante
Oferta interna de energia elétrica	Alta (+)	Baixa	Escala e expansão do sistema elétrico
Consumo total de eletricidade	Alta (+)	Baixa	Crescimento da demanda elétrica
Consumo de eletricidade – residencial	Alta (+)	Moderada (+)	Perfil de consumo das famílias
Consumo de eletricidade – industrial	Alta (+)	Moderada (+)	Atividade produtiva e industrial
Produto Interno Bruto (PIB)	Alta (+)	Baixa	Crescimento econômico
População residente	Alta (+)	Baixa	Crescimento estrutural da demanda
Consumo final energético	Alta (+)	Baixa	Intensidade energética do sistema
Emissões de CO ₂ – setor de energia	Moderada (+)	Baixa	Atividade energética associada
Emissões totais de CO ₂	Moderada (+)	Moderada (+)	Pressão ambiental sistêmica
Importação de eletricidade	Baixa	Alta (–)	Dependência externa de energia
Dependência externa de energia	Baixa	Alta (–)	Segurança energética
Preço médio da eletricidade – industrial	Baixa	Alta (+)	Custo de energia para a produção
Preço médio da eletricidade – residencial	Baixa	Alta (+)	Custo para o consumidor
Taxa de câmbio (R\$/US\$)	Baixa	Alta (+)	Exposição cambial do setor

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A identificação e a interpretação dos componentes principais permitiram sintetizar, os principais fatores associados à expansão da energia eólica no Brasil. A separação entre um componente estrutural de crescimento econômico e expansão da demanda elétrica (PC1) e um componente relacionado às condições econômico-financeiras, à segurança energética e à dependência externa (PC2) evidencia a natureza multifatorial do processo de consolidação da energia eólica no sistema elétrico nacional.

Nesse contexto, a utilização dos componentes principais como variáveis explicativas em um modelo de regressão permite mitigar problemas de multicolinearidade observados entre as variáveis originais, ao mesmo tempo em que preserva a maior parte da variabilidade do conjunto de dados. Assim, os resultados da ACP fornecem a base estatística necessária para a estimação do modelo de Regressão com Componentes Principais, no qual se busca avaliar de forma integrada a influência desses fatores sobre a geração de energia elétrica de origem eólica.

4.3 Regressão exploratória com Componentes Principais

Embora o estudo tenha considerado diferentes indicadores associados à evolução da energia elétrica de origem eólica — incluindo geração, consumo e participação na matriz elétrica —, a regressão exploratória com componentes principais foi conduzida exclusivamente tendo como variável dependente a produção de energia elétrica de origem eólica, por se tratar do indicador que melhor representa a expansão física e estrutural da fonte no sistema elétrico brasileiro. As demais variáveis dependentes apresentadas na Tabela 2 foram utilizadas como indicadores complementares de evolução, sendo analisadas por meio de estatísticas descritivas

e análise de correlação, com o objetivo de contextualizar o crescimento da energia eólica e sua inserção na matriz elétrica, mas não constituíram variáveis resposta em modelos de regressão independentes.

Assim, com o objetivo de aprofundar a análise sobre os fatores associados ao crescimento da energia eólica no sistema elétrico brasileiro, foi estimado um modelo de Regressão com Componentes Principais (*Principal Component Regression – PCR*), utilizando como variável dependente a produção de energia elétrica eólica, expressa em GWh, e como variáveis explicativas os dois primeiros componentes principais obtidos na Análise de Componentes Principais.

O modelo estimado pode ser representado da seguinte forma (equação 8):

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 PC1_t + \beta_2 PC2_t + \varepsilon_t \quad (8)$$

Em que Y_t corresponde à produção de energia elétrica de origem eólica no ano t ; $PC1_t$ representa o componente associado à escala do sistema elétrico e ao crescimento estrutural da demanda e da atividade econômica; $PC2_t$ corresponde ao componente relacionado às condições econômico-financeiras e à dependência externa do setor energético; β_0 é o intercepto do modelo; β_1 e β_2 são os coeficientes associados aos respectivos componentes principais; e ε_t representa o termo de erro aleatório, que capta fatores não observados pelo modelo.

A estimação do modelo de Regressão com Componentes Principais foi realizada a partir dos escores dos componentes PC1 e PC2, obtidos na ACP, os quais foram utilizados como variáveis explicativas no modelo de regressão linear. A utilização dos componentes principais como regressores permite contornar o problema de multicolinearidade identificado entre as variáveis originais, assegurando maior estabilidade na estimação dos coeficientes e consistência estatística dos resultados.

A regressão foi estimada por meio do método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), implementado em ambiente de programação *Python*, utilizando as bibliotecas estatísticas para modelagem econométrica. O procedimento computacional envolveu a construção da matriz de dados contendo a variável dependente — produção de energia elétrica de origem eólica — e os escores dos componentes principais selecionados, seguido da estimação dos coeficientes, dos erros-padrão, das estatísticas t e dos níveis de significância associados.

A Tabela 12 apresenta os principais indicadores globais de ajuste e significância estatística do modelo de Regressão com Componentes Principais (PCR), incluindo o coeficiente de determinação, a estatística F e o respectivo p -valor. Esses indicadores permitem avaliar o desempenho global do modelo, sua capacidade explicativa e a adequação da especificação adotada para analisar a relação entre a produção de energia elétrica de origem eólica e os fatores latentes identificados na ACP.

Os indicadores globais apresentados (Tabela 12) evidenciam o bom desempenho estatístico do modelo de Regressão com Componentes Principais. O coeficiente de

determinação ($R^2 = 0,974$) indica que aproximadamente 97,4% da variação observada na produção de energia elétrica de origem eólica, no período analisado, é explicada conjuntamente pelos componentes principais incluídos no modelo. Do mesmo modo, o R^2 ajustado (0,972) confirma a robustez do ajuste ao considerar o número de regressores utilizados, sugerindo que a elevada capacidade explicativa não acontece apenas com o acréscimo de variáveis, mas da relevância estatística dos fatores sintetizados.

Tabela 12: Indicadores globais do modelo de regressão exploratória (PCR)

Indicador	Valor	Interpretação
Nº de observações (N)	25	Período de 2000 a 2024
R^2	0,974	Elevado poder explicativo do modelo
R^2 ajustado	0,972	Ajuste consistente considerando o nº de regressores
Estatística F	417,59	Modelo globalmente significativo
p-valor (F)	$3,18 \times 10^{-18}$	Rejeita a hipótese nula de coeficientes nulos
Método de estimação	OLS com PCs (PCR)	Regressão com fatores latentes (Componentes Principais)
Variáveis explicativas	PC1 e PC2	Componentes principais extraídos da ACP

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

A significância global do modelo de regressão foi avaliada por meio da estatística F, cujo valor calculado foi comparado à distribuição F de Fisher–Snedecor, considerando os graus de liberdade associados ao modelo estimado. O teste F verifica a hipótese nula de que todos os coeficientes das variáveis explicativas são simultaneamente iguais a zero, contra a hipótese alternativa de que pelo menos um coeficiente é estatisticamente diferente de zero.

No presente estudo, o teste F foi conduzido com dois graus de liberdade no numerador, correspondentes ao número de componentes principais utilizados como variáveis explicativas (PC1 e PC2), e vinte e dois graus de liberdade no denominador, associados ao número de observações efetivas ($N = 25$), descontados os parâmetros estimados no modelo. Assim, a estatística F segue uma distribuição F(2,22).

A Tabela 13 apresenta os valores críticos da distribuição F para diferentes níveis de significância. Observa-se que o valor da estatística F obtido no modelo ($F = 417,59$) é substancialmente superior aos valores críticos tabelados, inclusive ao nível de significância de 1%. Dessa forma, rejeita-se a hipótese nula mesmo sob critérios estatísticos rigorosos, confirmando que o modelo é globalmente significativo.

Tabela 13: Valores críticos da distribuição F (F(2,22))

Nível de significância (α)	Valor crítico F
10%	2,56
5%	3,44
1%	5,72

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Adicionalmente, essa conclusão é corroborada pelo p-valor associado à estatística F ($p < 0,001$), que é inferior aos níveis usuais de significância adotados na literatura empírica (1%,

5% e 10%). Assim, ao nível de significância de 1% ($\alpha = 0,01$), rejeita-se de forma robusta a hipótese nula, concluindo-se que o modelo é globalmente significativo e que os componentes principais exercem influência estatisticamente relevante sobre a produção de energia elétrica de origem eólica no período analisado.

Por fim, o elevado valor da estatística F pode ser compreendido também como consequência direta da combinação entre alto poder explicativo (R^2 elevado) e a utilização de componentes principais ortogonais como regressoras, o que reduz problemas de multicolinearidade e contribui para a diminuição da variância residual. Dessa forma, os resultados globais reforçam a adequação do modelo PCR como abordagem estatística para avaliar a evolução da energia eólica no sistema elétrico brasileiro.

Logo, a Tabela 14 apresenta os coeficientes estimados do modelo de Regressão com Componentes Principais (PCR), bem como seus respectivos níveis de significância estatística. Os coeficientes permitem avaliar o sentido e a intensidade da influência dos fatores latentes identificados na Análise de Componentes Principais sobre a produção de energia elétrica de origem eólica no Brasil.

Tabela 14: Coeficientes estimados e significância

Variável	Coeficiente estimado	p-valor	Interpretação
Constante	25.950,18	< 0,001	Nível médio da produção eólica não explicado pelos fatores latentes
PC1	8.458,04	< 0,001	Influência positiva do fator estrutural de crescimento econômico e expansão da demanda elétrica
PC2	-8.068,19	< 0,001	Influência negativa do fator econômico-financeiro e de dependência externa

Fonte: Elaborado pela autora (2026)

Os resultados (Tabela 14) indicam que ambos os componentes principais exercem influência estatisticamente significativa sobre a produção de energia elétrica de origem eólica, ao nível de significância de 1%. O PC1 apresentou coeficiente positivo e elevado, indicando que o fator associado à escala do sistema elétrico, ao crescimento da demanda e à expansão da atividade econômica contribui de forma significativa para o aumento da produção eólica no Brasil. Assim, o resultado sugere que a expansão da energia eólica ocorre de maneira alinhada ao crescimento estrutural do sistema elétrico nacional, acompanhando o aumento do consumo de eletricidade, da atividade econômica e da população.

Por outro lado, o PC2 apresentou coeficiente negativo e estatisticamente significativo, indicando que fatores relacionados às condições econômico-financeiras, aos preços da eletricidade, à taxa de câmbio e à dependência externa de energia exercem influência restritiva sobre a produção eólica. O sinal negativo do coeficiente sugere que elevações nos custos da energia, maior exposição cambial e maior dependência de importações tendem a dificultar a expansão da geração eólica, refletindo a sensibilidade do setor às condições macroeconômicas e financeiras.

Em conjunto, os resultados reforçam a interpretação de que o crescimento da energia eólica no Brasil é condicionada simultaneamente por fatores estruturais de crescimento do sistema elétrico e por restrições econômicas e institucionais, evidenciando a importância de políticas públicas e estratégias de planejamento energético que promovam estabilidade regulatória, redução de custos e segurança energética para viabilizar a expansão sustentável dessa fonte.

Embora os resultados da regressão apresentem elevada significância estatística e forte poder explicativo, destaca-se que a análise possui caráter exploratório, uma vez que se baseia em séries temporais agregadas e não permite estabelecer relações causais diretas. Ainda assim, os resultados fornecem evidências empíricas consistentes sobre a associação entre o crescimento da energia eólica e os fatores estruturais, econômicos e financeiros do setor elétrico brasileiro, contribuindo para a compreensão do papel dessa fonte na transição energética nacional.

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo analisar o crescimento da energia eólica no sistema elétrico brasileiro, no período de 2000 a 2024, identificando os principais fatores econômicos, energéticos, ambientais e estruturais associados à sua expansão. Para isso, foi adotada uma abordagem quantitativa baseada em técnicas de análise estatística multivariada, combinando análise de correlação, Análise de Componentes Principais (ACP) e regressão exploratória com componentes principais, a partir de dados do Balanço Energético Nacional e da plataforma SIEG.

Os resultados obtidos evidenciam que a expansão da energia eólica no Brasil está fortemente associada ao crescimento estrutural do sistema elétrico, representado pela ampliação da demanda por eletricidade, pelo crescimento econômico e populacional e pela expansão da oferta interna de energia. Esse achado confirma que a energia eólica não se desenvolve de forma isolada, mas integrada à dinâmica geral de crescimento do setor elétrico nacional, atuando como uma alternativa estratégica para atender à crescente demanda por energia elétrica.

A análise de correlação multivariada indicou associações significativas entre a produção de energia eólica e variáveis relacionadas ao consumo de eletricidade, à atividade econômica e à redução da dependência externa de energia, sugerindo que o avanço da geração eólica contribui para o fortalecimento da segurança energética do país. As correlações negativas observadas com indicadores de importação de eletricidade e dependência externa reforçam o papel da energia eólica como instrumento de redução da vulnerabilidade do sistema elétrico brasileiro a choques externos.

Já na aplicação da Análise de Componentes Principais, foi permitido sintetizar um conjunto amplo de variáveis explicativas em dois fatores latentes principais, responsáveis por mais de 90% da variância total dos dados. O primeiro componente foi interpretado como um fator de escala e crescimento estrutural do sistema elétrico, enquanto o segundo componente representou um fator econômico-financeiro e de dependência externa, associado a preços de

energia, taxa de câmbio e importações. Essa redução de dimensionalidade mostrou-se fundamental para lidar com a multicolinearidade inerente aos dados energéticos e para viabilizar análises econométricas mais robustas.

A regressão exploratória com componentes principais apresentou elevado poder explicativo, indicando que os fatores identificados pela ACP são estatisticamente relevantes para explicar a expansão da produção de energia eólica no Brasil. Os resultados reforçam que tanto o crescimento estrutural do sistema elétrico quanto as condições econômico-financeiras exercem influência significativa sobre a expansão da energia eólica, evidenciando a importância de políticas públicas que promovam estabilidade macroeconômica, previsibilidade regulatória e incentivos ao investimento em fontes renováveis.

Do ponto de vista da Engenharia de Produção, o estudo contribui ao demonstrar como ferramentas de análise estatística multivariada podem ser aplicadas de forma integrada para apoiar a análise de sistemas complexos, analisando as produções relacionadas ao setor elétrico nacional. Atribuída a utilização de programação computacional associada a métodos estatísticos avançados mostrou-se eficaz para tratar grandes volumes de dados, identificando padrões relevantes e subsidiando a tomada de decisão baseada em evidências.

Como limitações do estudo, destaca-se o caráter agregativo das séries temporais utilizadas, o que restringe a análise a uma visão macro do setor elétrico brasileiro e impede a captura de heterogeneidades regionais ou tecnológicas. Além disso, a abordagem metodológica adotada não permite o estabelecimento de relações causais diretas, limitando-se à identificação de associações estatísticas entre as variáveis analisadas.

Adicionalmente, o trabalho não contemplou uma análise comparativa detalhada dos custos de produção da energia eólica em relação a outras fontes de geração de eletricidade, como hidrelétrica, térmica ou solar. Embora essa comparação seja relevante para uma avaliação econômica mais abrangente da competitividade da energia eólica no contexto da matriz elétrica nacional, sua ausência decorre do foco analítico do estudo nos fatores estruturais e sistêmicos associados à expansão da fonte, bem como da limitação de dados homogêneos e comparáveis ao longo de todo o período analisado.

De forma objetiva, este estudo contribui ao integrar dados energéticos, econômicos e ambientais em uma abordagem estatística multivariada aplicada à análise da expansão da energia eólica no Brasil. A utilização combinada da Análise de Componentes Principais e da regressão por componentes principais permitiu identificar fatores latentes associados ao crescimento da geração eólica, oferecendo uma leitura sintética e consistente da dinâmica do setor elétrico brasileiro. Os resultados obtidos ampliam a compreensão dos determinantes estruturais e econômico-financeiros da expansão da energia eólica e fornecem subsídios técnicos para análises de planejamento energético e formulação de políticas públicas voltadas à transição energética.

Por fim, como contribuições de estudos futuros, recomenda-se o aprofundamento da análise econométrica, com a aplicação de modelos dinâmicos, testes de causalidade e a incorporação de dados mais desagregados, como informações regionais ou por tipo de

empreendimento eólico. Sendo extensões podem ampliar a compreensão dos determinantes da expansão da energia eólica e contribuir para o aprimoramento das políticas de transição energética no Brasil.

REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Energia eólica: fonte de energia renovável. Bibliografia Temática CEDOC, v. 1, n. 4, out. 2019.

ANP – Tonelada Equivalente de Petróleo (TEP). Glossário da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: gov.br/anp. Acesso em 05 jan.2025.

Balanco Energético Nacional (BEN), 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>, acesso em 22 de abril de 2025.

BEN – Nota Técnica EPE DEA 005/2021. Sobre o BEN – Manual de Unidades e Conversões. Ministério de Minas e Energia, EPE, 2021. Acesso em: 20 nov.2025.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2025 (ano base 2024). Publicado em 29 mai. 2025. Disponível em: Acesso em: 18 ago. 2025.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA – CRESESB; CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2025

CINTRA, João Leonardo; MACHADO, Thiago Campos. **Elaboração de uma atividade didática para compreensão do funcionamento de aerogeradores.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. DOI: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8203>>. Acesso em: 10 abr. 2025.

DA SILVA, L. C. et al. **Implantação de parques eólicos no Brasil.** In: XXXV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2015, Ceará. Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção. Disponível em: <https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_206_222_27524.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2025.

DE AZEVEDO, João Paulo Minardi; DO NASCIMENTO, Raphael Santos; SCHRAM, Igor Bertolino. **Energia eólica e os impactos ambientais: um estudo de revisão**. Revista Uningá, v. 51, n. 1, 2017.

DE LIMA, Elaine Carvalho; SANTOS, Isabela Amâncio; MOIZINHO, Luzélia Calegari Santos. **ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: OPORTUNIDADES E LIMITAÇÕES PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**. Revista Estudo & Debate, v. 25, n. 1, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.22410/issn.1983-036X.v25i1a2018.1641>

DOS SANTOS, Paola Ribas Gonçalves et al. **Fontes Renováveis e não renováveis geradoras de energia elétrica no Brasil**. 2015. Acesso em: 14 jul.2025.

DURANTE, Fabrizio; GIANFREDA, Angelica; RAVAZZOLO, Francesco; ROSSINI, Luca. A Multivariate Dependence Analysis for Electricity Prices, Demand and Renewable Energy Sources. arXiv e-print, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). BEN Interativo [ferramenta interativa]. 2025. Disponível em: <<https://dashboard.epe.gov.br/apps/ben/>>. Acesso em: 18 ago. 2025.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Documento eletrônico. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica#:~:text=A%20matriz%20el%C3%A9trica%20brasileira%20%C3%A9,em%20sua%20maior%20parte%2C%20renov%C3%A1vel>. Acesso: 07 de maio de 2025.

ENERGIA EÓLICA: os bons ventos do Brasil. ABEEólica, 2023. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 06 jun. 2023.

ENERGIA EÓLICA: os bons ventos do Brasil. ABEEólica, 2025. Disponível em: <<https://abeeolica.org.br/>>. Acesso em: 06 mai. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2025: ano base 2024. Brasília: MME/EPE, 2025. Disponível em:<https://www.gov.br/mme/pt/br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025/relatorio-sintese/Sintese_BEN2025>. Acesso em: 24 jan. 2026.

GWEC – GLOBAL WIND ENERGY COUNCIL. Global Wind Report 2024. Brussels: GWEC, 2024. Disponível em: <<https://gwec.net/global-wind-report-2024/>>. Acesso em: 24 jan. 2026.

HAIR, Joseph F.; BLACK, William C.; BABIN, Barry J.; ANDERSON, Rolph E. Multivariate data analysis. 8. ed. Andover: Cengage Learning, 2019.

HANDAM, Ahmed; AL SMADI, Takialddin. Multivariate analysis of efficiency of energy complexes based on renewable energy sources in the system power supply of autonomous consumers. International Journal of Advanced and Applied Sciences, v. 9, n. 5, p. 109–118, 2022.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Renewables 2023: analysis and forecast to 2028. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/renewables-2023>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

IRENA – INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Renewable Power Generation Costs in 2023. Abu Dhabi: IRENA, 2024.

JOLLIFFE, I. T. Principal Component Analysis. 2. ed. New York: Springer, 2002.

JOLLIFFE, Ian T.; CADIMA, Jorge. Principal component analysis: a review and recent developments. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 374, n. 2065, p. 20150202, 2016. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.

KUMAR, S. A review of literature on the integration of green energy: recent advancements and the role of circular economy. Energy Reports, 2023.

Larson, R., Farber, B. Estatística Aplicada. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

LUCENA JÚNIOR, Nestor Dantas de. Contribuições ao estudo de análises de informações dos balanços energéticos estaduais e o balanço nacional. 2018. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/26266>. Acesso em: 18 ago. 2025.

MASSY, W. F. Principal component regression in exploratory statistical research. Journal of the American Statistical Association, Washington, v. 60, n. 309, p. 234–256, 1965.

MOURA, L. P. et al. **Estrutura física de parques eólicos e os princípios de funcionamento das topologias de geração.** Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/333152039_ESTRUTURA_FISICA_DE_PARQUES_EOLICOS_E_OS_PRINCIPIOS_DE_FUNCIONAMENTO_DAS_TOPOLOGIAS_DE_GERACAO GÁS, v. 14, p. 53, 2018. Acesso em: 18 abr. 2025.

Neoenergia, 2021. **VOCÊ SABE COMO FUNCIONA UM AEROGERADOR?.**

Disponível em: <[https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-](https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx#:~:text=Um%20aerogerador%20(turbina%20e%C3%B3lica%20ou,convertendo%20Da%20em%20energia%20el%C3%A9trica.>)

[ambiente/Paginas/como-funciona-um](https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx#:~:text=Um%20aerogerador%20(turbina%20e%C3%B3lica%20ou,convertendo%20Da%20em%20energia%20el%C3%A9trica.>)

[aerogerador.aspx#:~:text=Um%20aerogerador%20\(turbina%20e%C3%B3lica%20ou,convertendo%20Da%20em%20energia%20el%C3%A9trica.>](https://www.neoenergia.com/pt-br/te-interessa/meio-ambiente/Paginas/como-funciona-um-aerogerador.aspx#:~:text=Um%20aerogerador%20(turbina%20e%C3%B3lica%20ou,convertendo%20Da%20em%20energia%20el%C3%A9trica.>). Acesso em: 20 abr. 2025.

OLLIFFE, Ian T.; CADIMA, Jorge. **Principal component analysis: a review and recent developments.** Philosophical Transactions of the Royal Society A, v. 374, n. 2065, p. 1–16, 2016.

Processi, L. D., Lage, E. S. (2013). **Panorama do setor de energia eólica.** Disponível em:

https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2926/1/RB%2039%20Panorama%20do%20setor%20de%20energia%20e%C3%B3lica_P.pdf. Acesso em: 17 de jul. de 2025

SAMPAIO, Keila Regina Alves; BATISTA, Valmir. **O atual cenário da produção de energia eólica no Brasil: Uma revisão de literatura.** Research, Society and Development, v. 10, n. 1, p. e57710112107-e57710112107, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.12107>>.

SANTOS, Marcos Vinicius Zambrano. **POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO.** Biblioteca de Monografias, v. 1, n. 001, 2022.

SENA, Luiz Felipe Costa Dantas de. **Desenvolvimento de ferramenta computacional para análise de dados do Balanço Energético Nacional.** 2024. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/570e2c1e-6515-45d4-829a-80e0b723fff1/full>. Acesso em: 18 ago. 2025.

SILVA, Sérgio Evangelista; CORREA, Savio Figueira; MONNERAT, Cecília Silva.

Economic performance assessment of green innovation: a systematic literature review.

Environmental and Sustainability Indicators, p. 100804, 2025.

Triola, M. F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos Científicos, 1999.

Uniandrade, 2023. **ONU: os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<https://uniandrade.br/blog/onu-os-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/>>. Acesso em: 02 jun. 2025.

WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. **PLS-regression: a basic tool of chemometrics**. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, Amsterdam, v. 58, n. 2, p. 109–130, 2001.