



MODELAGEM ESTATÍSTICA DA PRODUÇÃO ENERGÉTICA EM USINAS DE BIOMASSA NO BRASIL

Statistical modeling of energy production in biomass power plants in Brazil

Modelado estadístico de la producción de energía en plantas de biomasa en Brasil

Henrique Costa Gomes¹, Mario Vinicio Garcia^{2*}, Ana Paula Gatto da Conceição³, & Rita de Cássia Moreschi Dória⁴

^{1 2 3 4} Universidade Estadual de Maringá

¹henriquecostagomes2000@gmail.com ^{2*}mariovinigarcia@gmail.com ³anapgc16@gmail.com ⁴ritadoria14@gmail.com

ARTIGO INFO.

Recebido: 08.10.2025

Aprovado: 18.11.2025

Disponibilizado: 12.06.2026

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; Energia termelétrica; RStudio; estatística aplicada; cadeia energética.

KEYWORDS: Biomass; thermoelectric energy; RStudio; applied statistics; energy chain.

PALABRAS CLAVE: Biomasa; energía termoeléctrica; RStudio; estadística aplicada; cadena energética.

*Autor Correspondente: Garcia, M. V.

RESUMO

Este estudo analisou a potência instalada de usinas de biomassa no Brasil através de uma abordagem metodológica estruturada. Inicialmente, os dados foram pré-processados, com padronização de nomenclaturas, tratamento de valores faltantes e criação de variáveis temporais. Realizou-se uma análise descritiva para caracterizar a distribuição da potência por tipo e subtipo de biomassa, complementada por visualizações gráficas como linhas do tempo evolutivas, *boxplots* sazonais e gráficos de participação relativa. Aplicou-se análise de correlação para examinar a relação entre o número de usinas e a potência total instalada. Testes estatísticos incluíram ANOVA unidirecional para verificar diferenças significativas entre subtipos, seguida de teste post-hoc de Tukey HSD para comparações pareadas e cálculo do tamanho de efeito η^2 para avaliar a relevância prática das diferenças. Os resultados revelaram padrões distintos de capacidade instalada entre biomassas, com destaque para o bagaço de cana-de-açúcar, além de evidenciarem desafios como sazonalidade e inconsistências terminológicas. A abordagem integrada permitiu caracterizar o cenário bioenergético nacional, fornecendo subsídios para políticas setoriais e futuras pesquisas sobre otimização da matriz renovável brasileira.

ABSTRACT

This study analyzed the installed capacity of biomass power plants in Brazil through a structured methodological approach. Initially, the data were preprocessed, including standardization of nomenclature, treatment of missing values, and creation of temporal variables. A descriptive analysis was carried out to characterize the distribution of

capacity by biomass type and subtype, complemented by graphical visualizations such as evolutionary timelines, seasonal *boxplots*, and relative participation charts. Correlation analysis was applied to examine the relationship between the number of plants and the total installed capacity. Statistical tests included one-way ANOVA to verify significant differences among subtypes, followed by Tukey's HSD post-hoc test for pairwise comparisons and calculation of the effect size (η^2) to assess the practical relevance of the differences. The results revealed distinct patterns of installed capacity among biomass types, with sugarcane bagasse standing out, and also highlighted challenges such as seasonality and terminological inconsistencies. The integrated approach allowed the characterization of the national bioenergy landscape, providing insights for sectoral policies and future research on optimizing Brazil's renewable energy matrix.

RESUMEN

Este estudio analizó la potencia instalada de las plantas de biomasa en Brasil mediante un enfoque metodológico estructurado. Inicialmente, los datos fueron preprocesados, con la estandarización de nomenclaturas, el tratamiento de valores faltantes y la creación de variables temporales. Se realizó un análisis descriptivo para caracterizar la distribución de la potencia por tipo y subtipo de biomasa, complementado con visualizaciones gráficas como líneas de tiempo evolutivas, *boxplots* estacionales y gráficos de participación relativa. Se aplicó un análisis de correlación para examinar la relación entre el número de plantas y la potencia total instalada. Las pruebas estadísticas incluyeron un ANOVA unidireccional para verificar diferencias significativas entre subtipos, seguido de la prueba post-hoc de Tukey HSD para comparaciones por pares y el cálculo del tamaño del efecto (η^2) para evaluar la relevancia práctica de las diferencias. Los resultados revelaron patrones distintos de capacidad instalada entre los tipos de biomasa, destacándose el bagazo de caña de azúcar, además de evidenciar desafíos como la estacionalidad y las inconsistencias terminológicas. El enfoque integrado permitió caracterizar el panorama bioenergético nacional, aportando elementos para las políticas sectoriales y futuras investigaciones sobre la optimización de la matriz energética renovable brasileña.

INTRODUÇÃO

O cenário energético global passa por uma profunda transformação impulsionada pela necessidade de mitigar os impactos das mudanças climáticas e de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Nesse contexto, as fontes renováveis de energia vêm adquirindo papel estratégico para garantir segurança energética, sustentabilidade ambiental e competitividade

econômica. A transição para uma economia de baixo carbono é um dos pilares das políticas energéticas internacionais e nacionais, alinhando-se aos compromissos assumidos no Acordo de Paris e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) (Azevedo, Leite & Andrade, 2019; Silva & Silva 2025).

Entre as fontes renováveis disponíveis, a biomassa ocupa posição de destaque por combinar o potencial de reaproveitamento de resíduos orgânicos com a capacidade de gerar energia de forma contínua e descentralizada (Liu et al., 2022). No caso brasileiro, a biomassa tem relevância histórica, associada principalmente ao setor sucroenergético e à indústria madeireira, e representa uma das bases do modelo de bioenergia consolidado no país (Brasil, 2023). Além de reduzir emissões de gases de efeito estufa, a biomassa contribui para o desenvolvimento regional, a geração de empregos e a valorização de cadeias produtivas agrícolas e florestais (Naqvi et al., 2023).

A diversidade de subtipos de biomassa, como o bagaço de cana-de-açúcar, os resíduos florestais, o biogás e os subprodutos industriais, confere ao setor uma ampla capacidade de adaptação a contextos produtivos distintos. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), a biomassa responde por parcela relevante da geração termelétrica nacional, com destaque para regiões de forte atividade agroindustrial. Entretanto, a expansão dessa fonte depende do aprimoramento de sua eficiência operacional e da análise detalhada de variáveis como potência instalada, produtividade e sazonalidade, ainda pouco exploradas de forma integrada na literatura técnico-científica (Fujino & Hashimoto, 2023; Olorunnisola, Richards & Omoniyi, 2021).

Apesar da abundância de dados disponíveis em bases públicas, como as da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), observa-se carência de estudos que empreguem abordagens estatísticas robustas para compreender a evolução temporal, as diferenças regionais e as inter-relações entre os diversos tipos de biomassa utilizados na geração de energia (Alruqi et al., 2024). A aplicação de métodos quantitativos pode revelar padrões ocultos e contribuir para a formulação de políticas energéticas mais precisas, além de subsidiar investimentos e otimizar a gestão de usinas termelétricas de base biomássica (Soni & Kalbande, 2024).

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise estatística abrangente da geração de energia proveniente de usinas de biomassa no Brasil, com foco na identificação de padrões associados à potência instalada, à produtividade média e às relações existentes entre o número de usinas e a capacidade total de geração. Busca-se, especificamente, responder às seguintes questões de pesquisa: (i) quais subtipos de biomassa apresentam maior produtividade média no contexto da matriz energética nacional; (ii) de que forma a participação desses subtipos evoluiu ao longo do período analisado; e (iii) se existem diferenças estatisticamente significativas na potência instalada entre os diferentes subtipos de usinas. Para atingir esses objetivos, foram empregadas técnicas de estatística descritiva e inferencial, incluindo visualizações gráficas, boxplots, análise de variância (ANOVA), testes post-hoc e análise de correlação, aplicadas a dados provenientes de bases públicas sobre usinas termelétricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Dessa forma, o estudo pretende oferecer uma caracterização quantitativa e sistematizada da contribuição das diferentes biomassas para a matriz elétrica brasileira, evidenciando padrões estruturais, disparidades de escala produtiva e tendências de participação energética. Ao final,

busca-se contribuir para o debate sobre o papel estratégico da bioenergia no país, destacando seu potencial na diversificação da matriz energética, na promoção da geração distribuída e no fortalecimento de estratégias voltadas ao desenvolvimento sustentável e à transição energética.

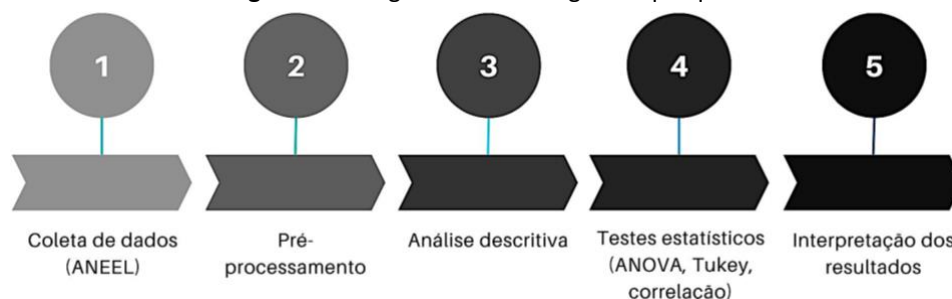
METODOLOGIA

TIPO DE PESQUISA

A pesquisa caracteriza-se como um estudo de abordagem quantitativa, de natureza descritiva e exploratória, direcionado à compreensão dos padrões estatísticos e das relações existentes entre variáveis associadas à geração de energia por biomassa no Brasil (Borychenko et al., 2024). De acordo com Gil (2017), a abordagem quantitativa possibilita a mensuração objetiva dos fenômenos, a aplicação de técnicas estatísticas e o estabelecimento de relações entre variáveis, favorecendo a generalização dos resultados e a ampliação da confiabilidade das inferências produzidas.

O caráter descritivo do estudo manifesta-se na sistematização e caracterização do comportamento da potência instalada, dos níveis de produtividade das usinas de biomassa e das diferenças observadas entre seus distintos subtipos, permitindo uma análise comparativa estruturada e oferecendo uma visão panorâmica do setor. Tal delineamento contribui para o entendimento da configuração atual da matriz bioenergética nacional e de suas dinâmicas estruturais (Lewski, Abdelouahed & Taouk, 2024). Ademais, conforme defendido por Leiva-Candia et al. (2022), pesquisas de caráter exploratório desempenham papel essencial na identificação de lacunas teóricas, na ampliação do conhecimento sobre o fenômeno investigado e na formulação de hipóteses para estudos posteriores (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma metodológico da pesquisa



Fonte: Autores, 2025.

Nesse sentido, combina-se ferramentas de estatística descritiva e inferencial, utilizando procedimentos analíticos que possibilitam a organização, síntese dos dados e verificação de relações estatisticamente significativas entre variáveis investigadas. Aplicou-se análises de variância (ANOVA) objetivando identificar diferenças significativas entre grupos de usinas de biomassa, seguidas por testes Post-hoc de Tukey para comparação múltipla entre médias, garantindo maior precisão na identificação dos pares com diferenças estatisticamente relevantes. Complementarmente, utilizaram-se medidas de tamanho de efeito (η^2), permitindo avaliar a magnitude prática das diferenças encontradas, para além da significância estatística. Ademais, realizou-se análises de correlação para examinar o grau e a direção das associações entre o número de unidades geradoras e a potência total instalada, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas estruturais do setor bioenergético.

FONTE DE DADOS

Foram obtidos a partir de arquivos públicos da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), disponíveis na plataforma de dados abertos do governo federal. Para a presente pesquisa, foi

construída uma base de dados com registros compreendendo o período de 2000 a 2023, contemplando informações mensais referentes à potência instalada (kW) e à quantidade de usinas, classificadas por tipo e subtipo de biomassa. O tratamento prévio dos dados envolveu etapas de padronização de nomenclaturas, eliminação de duplicidades e tratamento de valores ausentes, garantindo coerência e integridade nas análises subsequentes.

FERRAMENTAS UTILIZADAS

Realizou-se a análise estatística através da linguagem de programação R, empregando pacotes especializados, (*tidyverse*, *ggplot2*, *lubridate*, *kableExtra*, *readxl* e *effectsize*), possibilitando o tratamento e organização dos dados, até a criação de visualizações e testes inferenciais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta um resumo estatístico da potência média, mediana e do quantitativo de usinas por tipo e subtipo de fonte energética, oferecendo uma visão comparativa da capacidade instalada das diferentes matrizes energéticas no Brasil. Observa-se uma estrutura heterogênea, que abrange desde grandes termelétricas movidas a gás natural e biomassa até unidades de menor porte, como aquelas baseadas em biogás, resíduos urbanos e biocombustíveis líquidos. A consolidação estatística permite identificar padrões relevantes, como predominância das usinas movidas a bagaço de cana-de-açúcar em termos de quantidade, enquanto gás natural se realça por maior potência média instalada, evidenciando diferentes estratégias operacionais e papéis sistêmicos dentro da matriz elétrica nacional.

Tabela 1. Perfil estatístico das usinas por fonte e subtipo energético

Tipo de usina	Subtipo de usina	Média de potência	Mediana de potência	Total de usinas
Agroindustriais	Bagaço de cana de açúcar	10,826,590	11,305,120	21,585
Agroindustriais	Casca de arroz	47,574	45,333	649
Agroindustriais	Capim elefante	38,683	31,700	123
Agroindustriais	Biogás	27,766	28,844	365
Biocombustíveis líquidos	Etanol	320	320	36
Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	7,500	4,350	148
Carvão mineral	Carvão mineral	3,120,000	3,250,000	687
Carvão mineral	Gás de alto forno - CM	310,000	330,000	491
Carvão mineral	Calor de processo - CM	25,000	25,000	75
Floresta	Licor negro	2,406,497	2,530,719	979
Floresta	Resíduos florestais	496,875	427,697	3,083
Floresta	Lenha	108,388	104,575	288
Floresta	Gás de alto forno - biomassa	106,642	124,265	482
Floresta	Carvão vegetal	39,496	38,197	348
Floresta	Biogás	5,000	5,000	16
Gás natural	Calor de processo --GN	350,000	500,000	160
Gás natural	Gás natural	14,217,000	14,000,000	8,266
Outros fósseis	Calor de processo - OF	220,000	200,000	259
Petróleo	Óleo diesel	4,275,000	4,300,000	102,493
Petróleo	Óleo combustível	3,500,000	3,300,000	2,791
Petróleo	Outros energéticos de petróleo	900,000	900,000	726
Petróleo	Gás de refinaria	350,000	330,000	363
Petróleo	Gás de alto forno - PE	1,200	1,200	31
Resíduos sólidos urbanos	Biogás	150,000	150,000	890
Resíduos sólidos urbanos	Resíduos sólidos urbanos - RU	17,816	24,351	130
Resíduos sólidos urbanos	Carvão - RU	6,829	8,250	85
Resíduos animais	Biogás	4,500	4,000	635

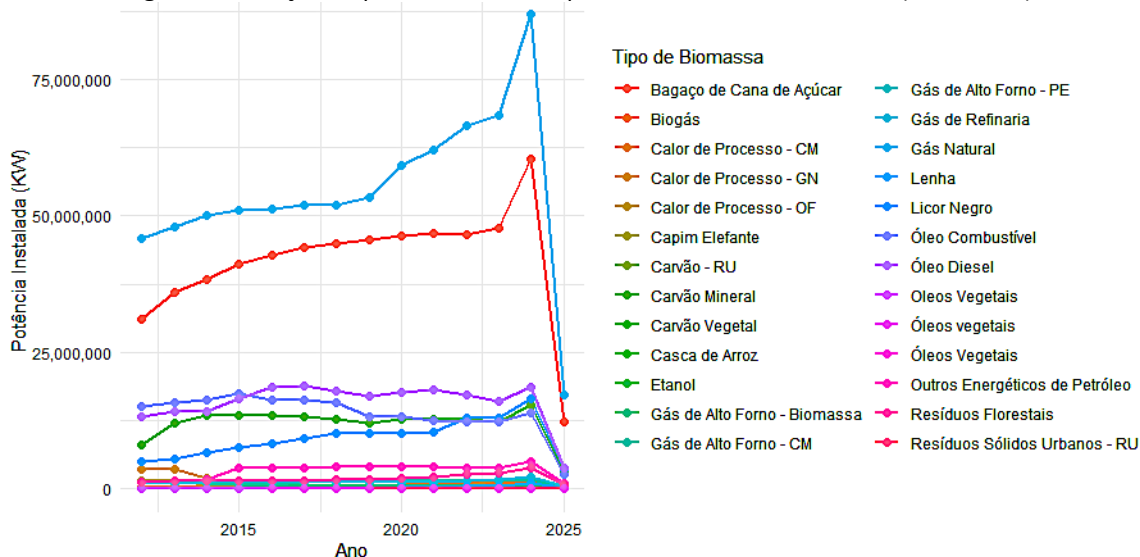
Fonte: Autores, 2025.

Os dados expõem que as usinas a gás natural exibem a maior potência média (14,2 MW), associada a um número expressivo de unidades (8.266), indicando elevada capacidade de geração por empreendimento e forte inserção na matriz térmica nacional. Em seguida, as usinas agroindustriais movidas a bagaço de cana-de-açúcar sobressaem-se pelo elevado número de unidades (21.585), refletindo a relevância do setor sucroenergético e a integração entre produção industrial e cogeração de energia. Por sua vez, as termelétricas movidas a óleo diesel e óleo combustível apresentam representatividade significativa em termos absolutos, porém com potências médias inferiores ao gás natural, aludindo sua utilização complementar, sobretudo em sistemas isolados, regiões remotas ou fonte de respaldo operacional.

No caso das fontes florestais e do carvão mineral, verifica-se uma distribuição intermediária tanto em potência quanto em número de unidades, desempenhando papel específico em determinados polos industriais. Já as fontes baseadas em resíduos sólidos urbanos (biogás e resíduos urbanos - RU), resíduos animais e biocombustíveis líquidos (etanol e óleos vegetais) apresentam potências médias substancialmente menores, característica típica de sistemas descentralizados, projetos de menor escala ou iniciativas vinculadas à gestão de resíduos e sustentabilidade ambiental. De modo semelhante, usinas movidas a casca de arroz, capim-elefante e carvão vegetal apresentam baixa potência média e forte concentração regional, reforçando seu caráter de nicho produtivo.

Em termos gerais, os resultados evidenciam a diversidade estrutural da matriz energética brasileira, marcada pela coexistência de grandes usinas térmicas de base fóssil, empreendimentos agroindustriais de cogeração e unidades renováveis de menor porte. Observa-se a predominância de fontes térmicas flexíveis, como gás natural e biomassa, na sustentação da capacidade instalada, ao passo que fontes alternativas renováveis, como biogás e resíduos, embora ainda apresentem menor escala média, revelam potencial estratégico para expansão, especialmente no contexto de transição energética e descentralização da geração. Assim, a Figura 2 apresenta um panorama dinâmico da evolução da capacidade instalada (kW) proveniente de diferentes fontes biomássicas e térmicas no Brasil, ao longo do período analisado. O gráfico evidenciando a trajetória temporal das principais fontes, permitindo observar tendências de crescimento, estabilidade ou retração na potência instalada entre aproximadamente 2013 e 2025.

Figura 2. Evolução da potência instalada por fonte Biomássica no Brasil (2013-2025)



Fonte: Autores, 2025. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

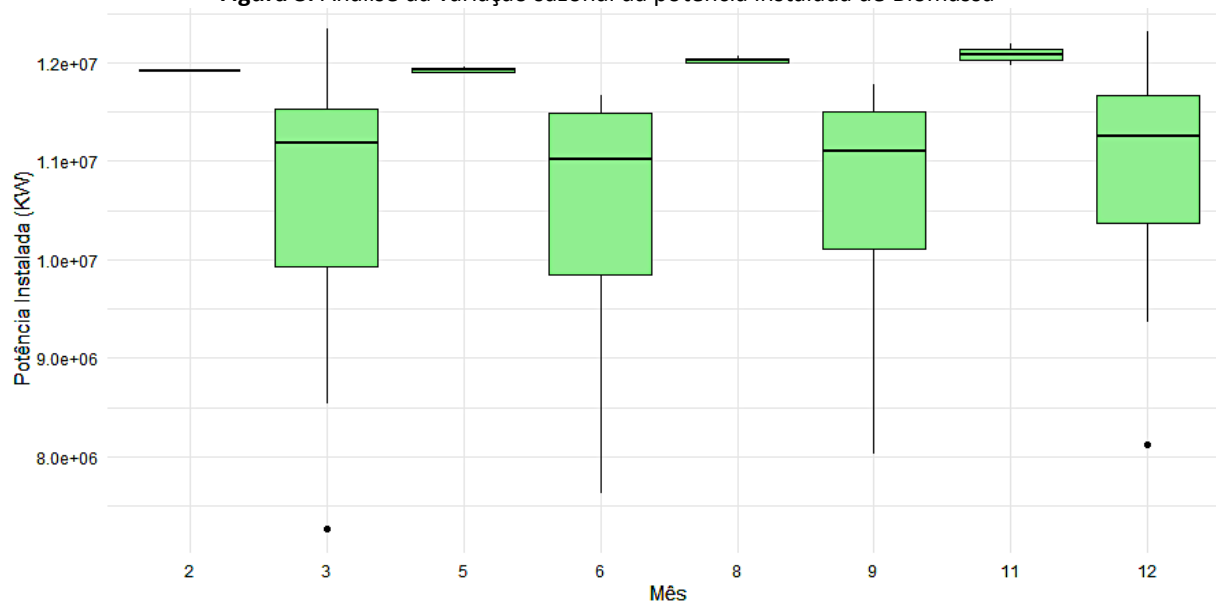
Observa-se a predominância do bagaço de cana-de-açúcar, cuja curva apresenta crescimento consistente ao longo dos anos, atingindo patamares superiores a 60 milhões de kW antes de uma queda acentuada no último período apresentado. Esse comportamento reforça o papel central do setor sucroenergético na matriz renovável brasileira. De forma ainda mais expressiva, o gás natural apresenta os maiores valores absolutos de potência instalada, ultrapassando 80 milhões de kW no pico da série, o que evidencia a forte dependência de fontes térmicas fósseis para garantia de segurança energética e estabilidade do sistema.

Fontes como licor negro e resíduos florestais demonstram crescimento moderado e relativamente estável, indicando integração entre cadeias produtivas industriais, especialmente do setor de papel e celulose e a geração de energia. Já o biogás, os resíduos sólidos urbanos (RU) e os resíduos animais apresentam potências significativamente menores, embora com tendência de expansão gradual, sinalizando potencial de fortalecimento no contexto da economia circular e da descentralização da geração.

Também se evidencia a presença de categorias, como calor de processo (GN, CM e OF) e gás de alto-forno, que refletem a cogeração e aproveitamento energético em ambientes industriais, realçando a vantagem da eficiência energética nos processos produtivos. Todavia, a repetição de nomenclaturas semelhantes (como variações de “óleos vegetais”) e a inclusão de fontes não biomássicas na mesma visualização sugerem a necessidade de padronização classificatória, a fim de evitar sobreposições conceituais e inconsistências analíticas.

A queda abrupta observada no último ano da série para diversas fontes pode indicar atualização incompleta dos dados, alteração metodológica ou ainda recorte temporal parcial, exigindo cautela na interpretação dos resultados. Para maior robustez analítica, recomenda-se o cruzamento com séries históricas consolidadas e com as diretrizes da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), responsável pelo planejamento energético nacional, possibilitando avaliar a aderência às metas de expansão renovável e identificar oportunidades estratégicas para ampliação de fontes sustentáveis na matriz elétrica brasileira (Figura 3).

Figura 3. Análise da variação sazonal da potência instalada de Biomassa



Fonte: Autores, 2025.

Evidencia-se o comportamento sazonal da potência instalada ao longo dos meses do ano, demonstrando variações associadas ao ciclo produtivo da biomassa agrícola. Observa-se que a potência atinge seu pico em fevereiro (1.2e+07 KW), período tradicionalmente vinculado ao

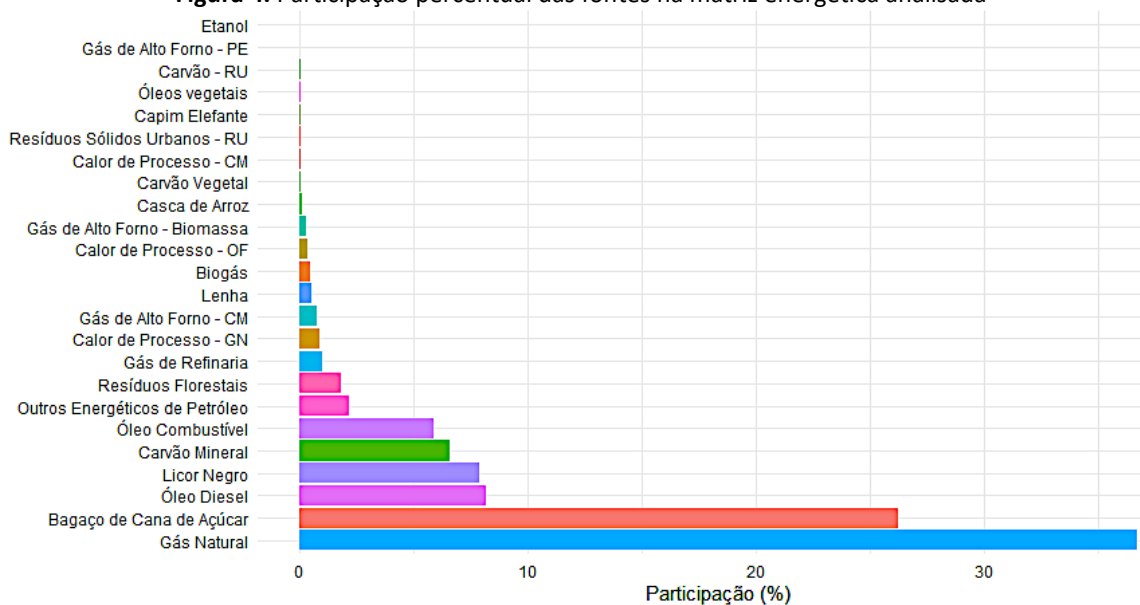
auge da moagem da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras. A partir desse ponto, verifica-se tendência de redução gradual, alcançando valores próximos a $9.0e+06$ KW em junho, o que coincide com a fase final da safra em diversas localidades.

Esse padrão sazonal confirma a forte dependência da geração bioenergética em relação ao calendário agrícola do setor sucroenergético, caracterizando a biomassa como uma fonte renovável com variabilidade intrínseca. A dispersão observada no *boxplot*, com presença de valores extremos (outliers) em determinados meses, sugere variações regionais ou operacionais entre usinas, possivelmente relacionadas a diferenças climáticas, capacidade de estocagem de bagaço ou estratégias de despacho energético.

Os resultados reforçam a necessidade de políticas e estratégias voltadas ao armazenamento energético, à cogeração eficiente e à complementaridade com outras fontes renováveis como solar e eólica a fim de mitigar os efeitos da entressafra e assegurar maior estabilidade e previsibilidade no fornecimento de energia ao sistema elétrico nacional. Sendo que a composição percentual das diferentes fontes na matriz energética nacional apresentada na Figura 3, evidencia a relevância relativa de cada tipo no cenário atual.

Também, observa-se clara predominância do bagaço de cana-de-açúcar e do gás natural, que ocupam as maiores participações percentuais no conjunto analisado. Em seguida, aparecem fontes como óleo diesel, licor negro, carvão mineral e óleo combustível, com participações intermediárias, enquanto tipologias como biogás, resíduos sólidos urbanos, resíduos florestais, etanol e calor de processo industrial compõem faixas menores de contribuição individual (Figura 4).

Figura 4. Participação percentual das fontes na matriz energética analisada



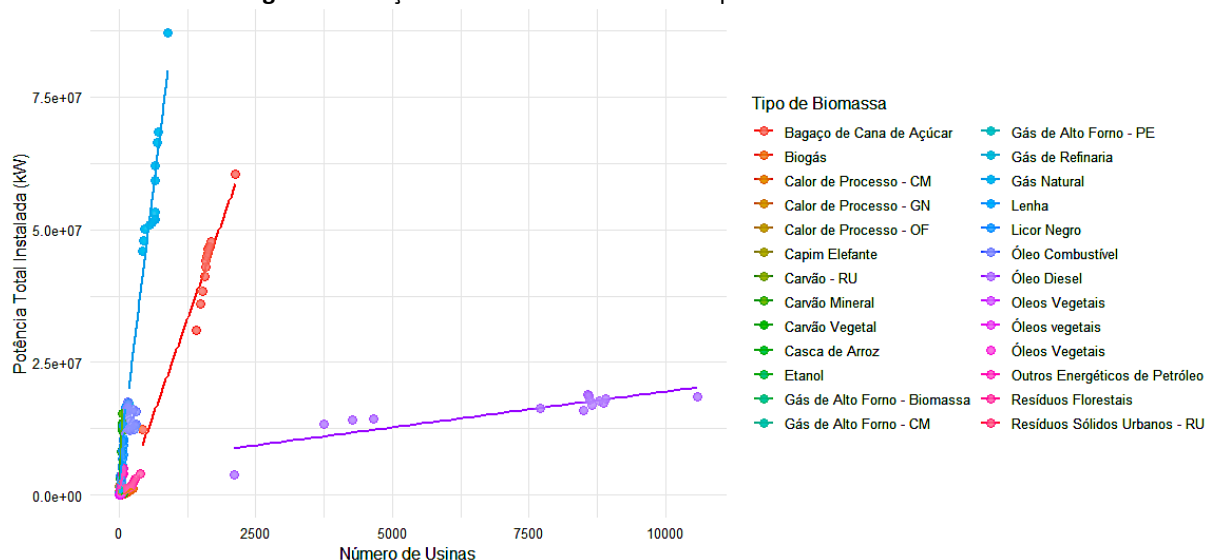
Fonte: Autores, 2025.

A análise revela uma matriz diversificada, porém ainda concentrada em poucas fontes principais. O bagaço de cana-de-açúcar consolida-se como o principal vetor da bioenergia nacional, refletindo a robustez e a integração do setor sucroenergético à geração elétrica. Por outro lado, destaca-se a elevada participação do gás natural, que, embora não se configure como biomassa, figura entre as maiores parcelas do gráfico, indicando que a visualização contempla fontes térmicas de forma agregada. Tal aspecto reforça a necessidade de maior rigor classificatório na distinção entre fontes renováveis e fósseis, especialmente em análises comparativas voltadas à sustentabilidade energética.

As demais biomassas, apesar de apresentarem percentuais individuais reduzidos, representam coletivamente um potencial estratégico para a diversificação da matriz. O biogás proveniente de resíduos urbanos, agroindustriais e animais e os resíduos florestais despontam como alternativas promissoras no contexto da economia circular e da geração distribuída. Ademais, a presença de múltiplas categorias relacionadas ao “calor de processo” evidencia o aproveitamento energético de subprodutos industriais, reforçando a importância da eficiência energética e da cogeração como instrumentos para otimização do uso de recursos e redução de impactos ambientais. Assim, a distribuição apresentada na Figura 4 aponta para uma matriz com base consolidada na biomassa sucroenergética, mas com espaço relevante para expansão de fontes renováveis complementares, sobretudo mediante políticas públicas de incentivo, inovação tecnológica e aprimoramento regulatório.

A relação entre o número de usinas e a potência total instalada para as diferentes fontes, (Figura 5), permite assim analisar a correlação entre escala produtiva e capacidade de geração no contexto da matriz energética brasileira. Observa-se uma associação positiva entre a quantidade de unidades e a potência acumulada, ainda que com diferentes inclinações entre as fontes, indicando distintos níveis de eficiência média por empreendimento.

Figura 5. Relação entre número de usinas e potência total instalada



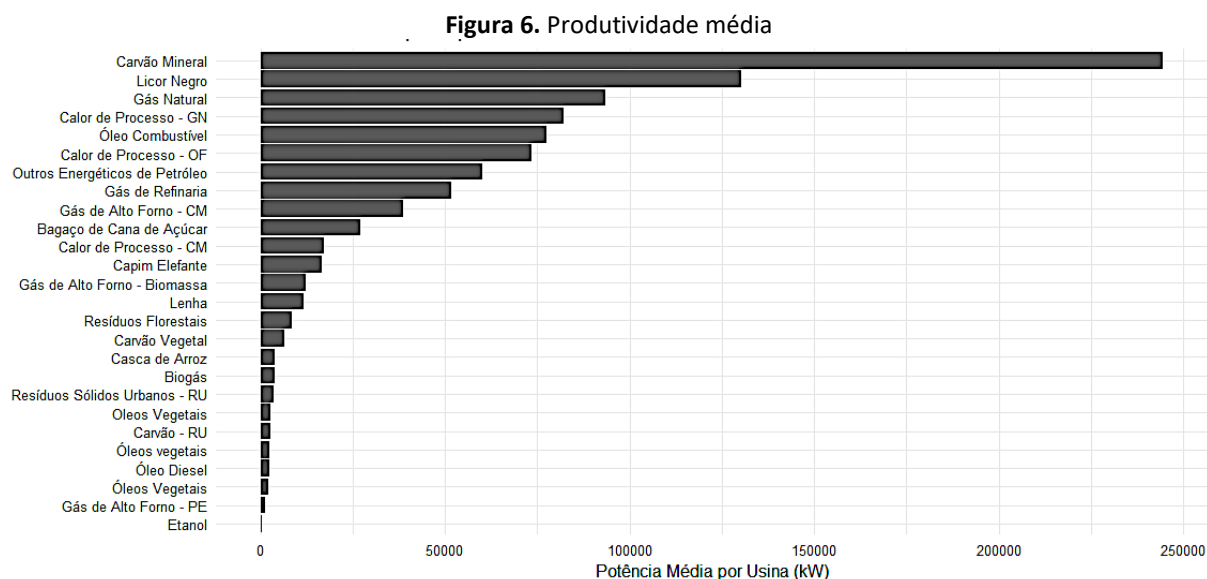
Fonte: Autores, 2025.

Os dados evidenciam três faixas predominantes de potência total instalada aproximadamente $2.5e+07$ KW, $5.0e+07$ KW e $7.5e+07$ KW distribuídas em um intervalo que varia de cerca de 2.500 a 10.000 usinas. Essa configuração demonstra que determinadas fontes conseguem atingir elevados níveis de potência com menor número relativo de unidades, enquanto outras dependem de maior quantidade de usinas para alcançar volumes expressivos de geração.

Destaca-se que fontes como o gás natural apresentam elevada potência total mesmo com número moderado de usinas, indicando maior capacidade média instalada por unidade. Por outro lado, o bagaço de cana-de-açúcar revela grande quantidade de empreendimentos associada a potência acumulada significativa, refletindo a forte capilaridade do setor sucroenergético. Já fontes de menor porte, como biogás, resíduos urbanos e algumas biomassas agroindustriais, concentram-se em faixas inferiores de potência, caracterizando modelos descentralizados e de menor escala.

A análise da matriz energética evidencia a presença de dois modelos distintos de geração no contexto brasileiro: (1) fontes como bagaço de cana-de-açúcar e licor negro, caracterizadas por elevada potência média concentrada em um número relativamente pequeno de usinas, configurando um modelo industrial de grande escala; e (2) fontes como biogás e resíduos sólidos urbanos, que apresentam maior número de empreendimentos com menor capacidade instalada, representando um padrão mais associado à geração distribuída. Observa-se ainda a presença de termos repetidos ou com variações de nomenclatura (por exemplo, “Óleos Vegetais”), o que indica possíveis inconsistências na classificação das fontes energéticas no banco de dados. Adicionalmente, a inclusão de fontes não renováveis, como gás natural e óleo diesel, sugere necessidade de maior refinamento nos critérios de categorização utilizados.

Esse padrão reforça a importância de políticas públicas diferenciadas para cada tipo de biomassa. Fontes de caráter industrial demandam incentivos voltados à eficiência tecnológica e otimização de processos, enquanto fontes descentralizadas requerem políticas que estimulem capilaridade territorial, integração local e aproveitamento de resíduos. Paralelamente, a padronização e organização dos dados energéticos mostram-se fundamentais para aprimorar o planejamento do setor. A diversidade observada demonstra o potencial do Brasil para integrar diferentes soluções bioenergéticas, desde sistemas de grande escala até iniciativas distribuídas, desde que sejam superados desafios relacionados à organização dos dados, classificação das fontes e escala produtiva (Figura 6).



Fonte: Autores, 2025.

Revela-se disparidades significativas na potência média instalada entre os diferentes tipos de biomassa e fontes energéticas analisadas. Entre as maiores médias de potência por usina destacam-se Licor Negro e Carvão Mineral, seguidos por Gás Natural (embora presente no conjunto de dados, não se enquadra tecnicamente como biomassa). Essas fontes apresentam valores que podem se aproximar de 250.000 kW, refletindo estruturas industriais de grande porte e maior concentração de capacidade instalada. Em um nível intermediário encontram-se fontes como Bagaço de Cana-de-Açúcar e Óleo Combustível, que também apresentam relevância na geração energética nacional. Por outro lado, fontes como Casca de Arroz, Óleos Vegetais (considerando as variações de nomenclatura identificadas na base de dados) e Etanol apresentam as menores médias de potência instalada, geralmente inferiores a 50.000 kW. Esse comportamento indica que tais fontes tendem a estar associadas a usinas de menor

escala ou sistemas produtivos mais distribuídos. A heterogeneidade observada reforça a diversidade estrutural do setor bioenergético brasileiro, no qual estão empreendimentos industriais de grande capacidade, com sistemas menores e descentralizados.

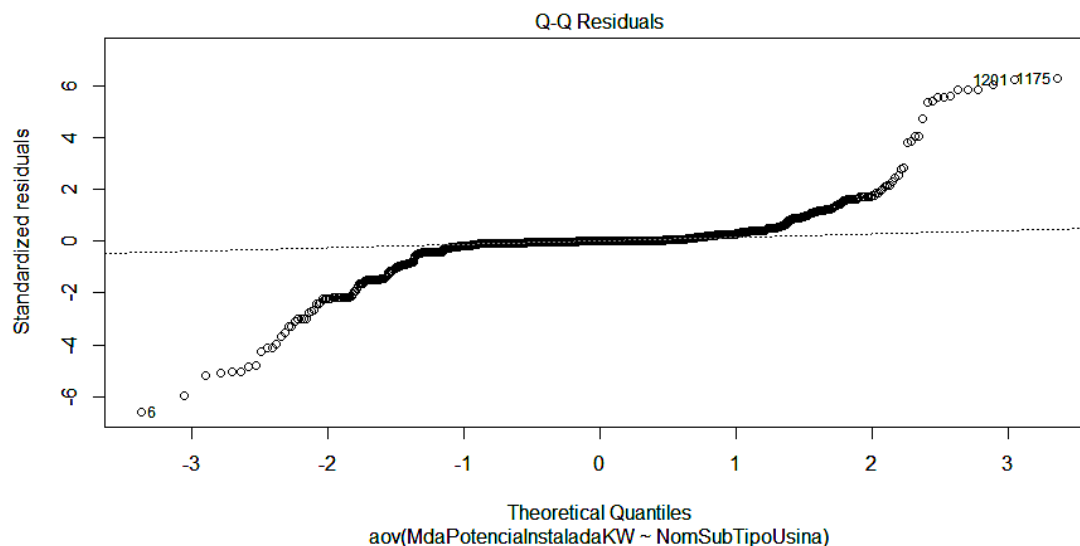
A Análise de Variância (ANOVA) demonstrou de forma sólida que existem diferenças estatisticamente significativas na potência instalada entre diversos subtipos de usinas analisadas. O valor elevado da estatística F (2148), com um p-value inferior a 0,001, admite que “NomSubTipoUsina” exerce influência decisiva sobre a capacidade de geração energética. Em termos estatísticos, a probabilidade de que as diferenças observadas ocorram por acaso é praticamente nula, conferindo elevada confiabilidade aos resultados obtidos.

A análise também revela que a variabilidade entre os diferentes tipos de usinas ($1.589\text{e}+16$) é aproximadamente 42 vezes maior do que a variabilidade residual ($3.804\text{e}+14$), indicando que o fator “subtipo de usina” explica a maior parte das diferenças na potência instalada. Essa discrepância torna-se ainda mais evidente quando se comparam as médias quadráticas: enquanto a média entre grupos atinge $6.358\text{e}+14$, a média residual é de apenas $2.960\text{e}+11$. Esses resultados corroboram as observações iniciais apresentadas na Figura 5, evidenciando que fontes como bagaço de cana-de-açúcar e licor negro apresentam perfis de capacidade significativamente distintos em relação a outras biomassas.

Os resultados possuem implicações relevantes para o planejamento energético nacional. A comprovação estatística de que cada tipo de biomassa possui características próprias de geração justifica a formulação de políticas públicas diferenciadas, além de incentivos específicos voltados ao desenvolvimento tecnológico, à eficiência energética e à expansão sustentável dessas fontes. Os dados também reforçam que a escolha da biomassa constitui um fator estratégico nos projetos de geração de energia, pois influencia diretamente a capacidade instalada, os custos operacionais e a eficiência global do sistema energético.

Assim, informações importantes sobre a adequação do modelo ANOVA aos dados foram avaliados (Figura 7). Na região central da distribuição (entre -1 e 1 desvios padrão), pontos seguem de maneira rel. próxima a linha teórica de normalidade, indicando que grande parte das observações apresenta comportamento consistente com os pressupostos do modelo. Esse padrão sugere que o modelo estatístico consegue representar adequadamente a tendência central da distribuição dos dados, validando parcialmente a aplicação da análise de variância.

Figura 7. Gráfico Q-Q Plot apresentando análise de resíduos, referente aos resíduos padronizados do modelo



Entretanto, nas extremidades da distribuição (acima de 2 e abaixo de -2 desvios padrão), observam-se desvios mais pronunciados em relação à normalidade, com resíduos padronizados alcançando valores entre 4 e 6. Esses pontos extremos podem estar associados a outliers, possivelmente correspondentes a usinas com características muito específicas, como empreendimentos de grande porte com capacidade excepcionalmente elevada ou micro-usinas com potência reduzida. A presença desses valores extremos merece atenção adicional, pois pode refletir tanto casos reais de heterogeneidade estrutural no setor energético quanto eventuais inconsistências ou erros de registro na base de dados.

Assim, embora o modelo ANOVA apresente resultados estatisticamente robustos, a identificação desses desvios nas caudas da distribuição sugere a importância de análises complementares, como a verificação de outliers, a possível transformação de variáveis ou a aplicação de métodos estatísticos mais robustos, de modo a aprimorar a interpretação dos resultados e garantir maior precisão nas conclusões relacionadas ao desempenho energético das diferentes fontes de biomassa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises realizadas ao longo deste estudo permitiram identificar padrões estruturais relevantes na geração de energia por biomassa no Brasil, evidenciando características que contribuem para uma compreensão mais aprofundada do papel dessas fontes na matriz energética nacional. Os resultados indicam a forte predominância do bagaço de cana-de-açúcar, tanto em termos de número de usinas quanto de capacidade de geração, confirmando a centralidade do setor sucroenergético na produção de bioeletricidade no país. Paralelamente, fontes como o licor negro, associadas à indústria de papel e celulose, demonstram elevada produtividade média por unidade geradora, refletindo modelos industriais altamente integrados e eficientes. A aplicação da análise de variância (ANOVA) confirmou, com elevado grau de robustez estatística, que existem diferenças altamente significativas entre os subtipos de usinas analisados ($F = 2148$; $p < 0,001$), indicando que a variável “NomSubTipoUsina” exerce influência determinante na variação da potência instalada e explica parcela substancial da variabilidade observada (Soma dos Quadrados entre grupos = $1.589e+16$).

Apesar dos resultados expressivos, a análise também evidenciou desafios relevantes relacionados à qualidade e à organização dos dados disponíveis. O exame dos resíduos do modelo revelou desvios de normalidade nas extremidades da distribuição, com valores extremos que podem indicar tanto a existência de usinas com características muito específicas como empreendimentos de grande escala ou unidades de pequena capacidade quanto possíveis inconsistências nos registros. Além disso, foram identificadas limitações associadas à padronização das classificações energéticas, como a presença de nomenclaturas redundantes (por exemplo, múltiplas entradas para “Óleos Vegetais”) e a inclusão de fontes não renováveis, como gás natural e óleo diesel, em conjuntos de dados originalmente destinados à análise de biomassa. Esses aspectos revelam fragilidades na estruturação dos bancos de dados energéticos e reforçam a necessidade de maior rigor metodológico na sistematização e categorização das informações.

Outro aspecto relevante identificado refere-se à sazonalidade da geração bioenergética, particularmente no caso do bagaço de cana-de-açúcar, cuja disponibilidade está diretamente associada ao ciclo agrícola da cultura. Essa característica evidencia a dependência de determinados períodos de produção e ressalta a importância de estratégias complementares voltadas ao armazenamento de biomassa, à otimização logística e à integração com outras fontes renováveis, de modo a reduzir vulnerabilidades operacionais e aumentar a estabilidade do sistema elétrico.

Diante dessas evidências, algumas direções se mostram promissoras para o avanço das pesquisas e para o aprimoramento do planejamento energético. Em primeiro lugar, recomenda-se o desenvolvimento de protocolos mais rigorosos de padronização e classificação de dados, capazes de garantir consistência terminológica e metodológica nos bancos de dados do setor elétrico. Em segundo lugar, sugere-se a ampliação das análises estatísticas por meio da aplicação de testes post-hoc, como o método de Tukey HSD, possibilitando identificar de forma mais precisa quais pares de subtipos apresentam diferenças estatisticamente significativas. Também se mostra relevante o avanço em modelagens multivariadas, incorporando variáveis adicionais como localização geográfica, porte das usinas, disponibilidade regional de biomassa e características tecnológicas de forma a aprofundar a compreensão das dinâmicas estruturais da geração bioenergética.

Adicionalmente, recomenda-se o fortalecimento de pesquisas tecnológicas voltadas à mitigação da sazonalidade da biomassa, incluindo soluções relacionadas ao armazenamento energético, à diversificação de matérias-primas e à integração com sistemas híbridos de geração. Do ponto de vista institucional, a formulação de políticas públicas específicas para cada tipologia de biomassa pode contribuir para maximizar o aproveitamento energético dessas fontes, considerando suas particularidades técnicas, econômicas e ambientais.

Em síntese, os resultados obtidos demonstram que o Brasil possui uma das matrizes de bioenergia mais diversificadas e promissoras do mundo, ainda que parte desse potencial permaneça subexplorado. A superação dos desafios relacionados à qualidade da informação, à padronização dos dados e ao desenvolvimento tecnológico será fundamental para ampliar a eficiência e a competitividade do setor. Nesse contexto, a integração estratégica entre diferentes fontes de biomassa, aliada a avanços em planejamento energético e inovação tecnológica, poderá consolidar o país como referência internacional em bioenergia sustentável, contribuindo de forma decisiva para a transição energética e para a construção de um modelo de desenvolvimento mais resiliente e ambientalmente responsável.

REFERÊNCIAS

Alruqi, M., Sharma, P., Algburi, S., Khan, MA, Alsubih, M., & Islam, S. (2024). Transformação de energia de biomassa: aproveitando o poder da IA explicável para desbloquear o potencial de dados de análise final. *Tecnologia e Inovação Ambiental*, 35, 103652. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103652>

Azevedo, A. A. de, Leite, C. M. de O., & Andrade, L. A. de. (2019). Análise da eficiência energética dos estados brasileiros com a utilização do método análise envoltória de dados. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 5(3), 196-213. Recuperado de https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/V05N03_10

BNDES & CGEE. (2008). Bioeletricidade: Energia da biomassa na matriz elétrica. Rio de Janeiro: BNDES.

Brasil. Ministério de Minas e Energia. (2023). Balanço energético nacional 2023. Brasília: MME/EPE. Recuperado de <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional>

[abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional](https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional)

Borychenko, O., Cherniavskyi, A., Pobigaylo, V., Savchenko, V., & Lyudmyla, M. (2024). Avaliação do impacto de tecnologias inovadoras no desenvolvimento sustentável de sistemas energéticos: uma análise comparativa de indicadores técnicos e ambientais. *Revista Gestão & Tecnologia*, 24 (Especial), 257-286. <https://doi.org/10.20397/2177-6652/2024.v24iSpecial.2836>

Demirbas, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357-1378.

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2022). Plano decenal de expansão de energia 2032. Brasília: EPE. Recuperado de <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia>

Fujino, M. & Hashimoto, M. (2023). Economic and environmental analysis of woody biomass power generation using forest residues and

demolition debris in japan without assuming carbon neutrality. *Forests*, 14(1), 148.

<https://doi.org/10.3390/f14010148>

Gil, A. C. (2017). Métodos e técnicas de pesquisa social (6ª ed.). São Paulo: *Atlas*.

Macedo, I. C., Seabra, J. E. A., & Silva, J. E. A. R. (2008). Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, 32(7), 582-595.

Leiva-Candia, DE, García, IL, Lopez, I., Serrano-Herrador, JA, & Dorado, MP (2022). Estatística descritiva e inferencial como ferramenta comparativa de emissões de escapamento entre diferentes condições de operação do motor e combustíveis. Aplicação ao biodiesel altamente oxidado misturado com álcoois primários. *Combustível*, 324, 124453. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124453>

Liu, Z., Saydaliev, HB, Lan, J., Ali, S., & Anser, MK (2022). Avaliação da eficácia da energia de biomassa na mitigação de emissões de CO₂: Evidências dos 10 principais países consumidores de energia de biomassa. *Energia Renovável*, 191, 842-851. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.053>

Loweski Feliz, M., Abdelouahed, L., & Taouk, B. (2024). Estudo comparativo e descritivo de simulações de gaseificação de biomassa utilizando Aspen Plus. *Energias*, 17 (17), 4443. <https://doi.org/10.3390/en17174443>

Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). New York: Wiley.

Naqvi, S. A. A., Hussain, M., Hussain, B., Shah, S. A. R., Nazir, J., & Usman, M. (2023). Sustentabilidade ambiental e consumo de energia de biomassa sob a ótica da poluição. Hipótese de Haven e curva de Kuznets ambiental-energia renovável. *Energia Renovável*, 212, 621-631. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.127>

Olorunnisola, A. O., Richards, A., & Omoniyi, T. E. (2021). A review on the renewable energy from agricultural and forest residues in Nigeria. *International Journal for Research and Technology*, 3(1), 4-11.

Silva, C. G. da. & Silva, W. W. A. G. (2025). O crescimento das energias renováveis no Brasil aos olhares globais: uma revisão sistemática sobre tendências, desafios e oportunidades. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 11(3), 23-33. <https://doi.org/10.47456/bjpe.v11i3.48352>

Soni, K. & Kalbande, S. (2024). Extração de óleo essencial de capim-limão por meio de métodos de hidrodestilação utilizando energia solar e de biomassa. *International Journal of Ambient Energy*, 45(1), 2285-842. <https://doi.org/10.1080/01430750.2023.228542>

Wickham, H. (2016). *Ggplot2: elegant graphics for data analysis* (2nd ed.). New York: *Springer*.

Wickham, H. & Grolemond, G. (2016). *R for data science*. Sebastopol, CA: *O'Reilly Media*.