ATIVIDADE INDUSTRIAL E CONSUMO ENERGÉTICO: EVIDÊNCIAS SOBRE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

CAMILLI MARQUES LUIZ[1]
CARLOS ROBERTO SOUZA CARMO[2]

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a correlação entre as emissões de gases de efeito estufa (GEE), a produção e venda de produtos e/ou serviços industriais e o respectivo consumo energético, no Brasil ao longo dos últimos anos. Para tanto, as observações referentes às variáveis de pesquisa foram submetidas ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov e à análise por meio do coeficiente de correlação de Spearman, ambos aplicados a uma amostra composta por 18 observações anuais das seguintes variáveis: emissões de GEE do segmento referente aos processos industriais e uso de produtos (IPPU), medidas em gigagramas (Gg) de CO_2e-GWP-AR5; produção e vendas industriais, medidas em mil reais (R$1.000); e, consumo energético industrial total, medido em 1000 (10^3) toneladas equivalentes de petróleo (tep). Os resultados indicaram uma expressiva presença de fontes de combustíveis baseadas em recursos não renováveis na matriz energética industrial, como o óleo diesel, que contribuem significativamente para as emissões de GEE. No entanto, observou-se também uma possível tendência de substituição gradual desse tipo de combustível por fontes energéticas baseadas em recursos renováveis, como a eletricidade, que geram menores impactos ambientais. A pesquisa também evidenciou a convergência entre a teoria e o comportamento dos dados empíricos, reforçando que a transição energética no setor industrial brasileiro está em curso, todavia, de forma lenta. Esses achados contribuem para o debate acerca dos temas relacionados ao desenvolvimento sustentável, às políticas energéticas e à utilização estratégias industriais mais limpas, com potencial para impactar positivamente o meio ambiente e a economia brasileira.

Palavras-chave: efeito estufa; energia; vendas; emissões; métodos quantitativos aplicados.

[1] Graduada em Ciências Contábeis pela Faculdade de Ciências Contábeis da Universidade Federal de Uberlândia (FACIC-UFU). e-mail: cahluis16@gmail.com. Orcid: https://orcid.org/0009-0009-7338-087X.

[2] Doutor em Agronomia com ênfase em Energia na Agricultura pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) e mestre em Ciências Contábeis pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP). Professor da Faculdade de Ciências Contábeis da Universidade Federal de Uberlândia (FACIC-UFU). e-mail: carlosjj2004@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3806-9228.

INDUSTRIAL ACTIVITY AND ENERGY CONSUMPTION: EVIDENCE ON GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE BRAZILIAN MANUFACTURING SECTOR

ABSTRACT

This study aimed to assess the correlation between greenhouse gas (GHG) emissions, industrial production and sales of goods and/or services, and the corresponding energy consumption in Brazil over recent years. To this end, observations for the research variables were subjected to the Kolmogorov–Smirnov normality test and analyzed using Spearman's correlation coefficient. Both procedures were applied to a sample of 18 annual observations of the following variables: GHG emissions from the segment related to industrial processes and product use (IPPU), measured in gigagrams (Gg) of CO_2e-GWP-AR5; industrial production and sales, measured in thousand Brazilian reais (R$1,000); and total industrial energy consumption, measured in 1,000 (10^3) tons of oil equivalent (toe). The results indicated a significant presence of fuel sources based on non-renewable resources in the industrial energy matrix, such as diesel oil, which substantially contribute to GHG emissions. However, the findings also suggest a potential trend toward the gradual replacement of such fuels with energy sources derived from renewable resources, such as electricity, which generate lower environmental impacts. The study further demonstrated convergence between theoretical expectations and empirical data behavior, reinforcing that the energy transition in the Brazilian industrial sector is underway, albeit slowly. These findings contribute to the broader debate on sustainable development, energy policy, and the adoption of cleaner industrial strategies, with the potential to positively influence both the environment and the Brazilian economy.

Keywords: *greenhouse effect; energy; sales; emissions; applied quantitative methods.*

1 Introdução

O efeito estufa é um fenômeno natural decorrente da presença de determinados gases na atmosfera que retêm parte da radiação solar, contribuindo para o aumento da temperatura média da superfície terrestre (Bhatti *et al*., 2024; Santos; Pontes, 2022). Esses gases dificultam a liberação do calor acumulado de volta ao espaço, intensificando o aquecimento da Terra e, consequentemente, promovendo o aquecimento global (Agache *et al*., 2022).

Dentre os gases responsáveis pelo efeito estufa, o dióxido de carbono (CO_2) é o mais abundante na atmosfera, principalmente em razão das atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis, a industrialização, a geração de energia e as práticas agropecuárias (Vega *et al*., 2024). Esse acúmulo de gases é um dos principais fatores associados à intensificação de eventos climáticos extremos, os quais têm provocado perdas humanas, além de significativos prejuízos materiais e financeiros (Luiz; Carmo, 2025).

A indústria contribui, de forma direta e indireta, com aproximadamente 37% das emissões globais de gases de efeito estufa (Worrel *et al*., 2008), doravante denominados apenas de GEE. Essa contribuição está relacionada, principalmente, ao uso de combustíveis fósseis na geração de energia e aos processos industriais, como a fabricação de produtos químicos e as fundições de metais, que também liberam significativas quantidades desses gases (Worrel *et al*., 2008).

Diante dos desafios contemporâneos impostos pelas mudanças climáticas, torna-se relevante compreender como o comportamento das vendas de produtos e/ou serviços industriais e o respectivo consumo energético se relacionam com o comportamento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil. Para isso foram pesquisadas informações em fontes secundárias de dados, a fim de compor a amostra desta pesquisa, e ainda, buscou-se avaliar a existência, ou não, de relacionamentos entre o comportamento das emissões de GEE e das vendas dos produtos e/ou serviços industriais, bem como, o respectivo consumo energético industrial, no contexto brasileiro ao longo dos últimos anos.

As emissões de GEE têm provocado impactos expressivos no meio ambiente, intensificando a ocorrência de eventos climáticos extremos, como secas prolongadas, enchentes, ondas de calor e perda de biodiversidade. Essas transformações climáticas representam um desafio global sem precedentes, afetando de forma crescente o equilíbrio dos ecossistemas e as condições de vida humana e econômica, inclusive no Brasil. Nesse contexto, cresce a urgência por estudos que investiguem os fatores que impulsionam tais emissões, como é o caso do consumo energético no setor industrial.

Além disso, o cenário internacional reflete uma crescente preocupação com os efeitos das emissões dos GEE sobre o clima, o que se traduz em acordos multilaterais, como o Acordo de Paris, que estabelecem metas de redução e controle. Por ser um setor intensivo em energia, especialmente de fontes fósseis, a indústria assume papel central nesse debate. Compreender como suas atividades se correlacionam com as emissões pode auxiliar na formulação de estratégias mais eficazes de mitigação dos efeitos das emissões dos GEE, tanto no âmbito nacional quanto global, contribuindo para um desenvolvimento econômico ambientalmente responsável.

Espera-se que os resultados desta pesquisa contribuam para o avanço das discussões sobre sustentabilidade e transição energética, oferecendo evidências empíricas relevantes para a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à mitigação das mudanças climáticas. Para a sociedade brasileira e global, os achados científicos desta investigação podem reforçar a importância de práticas industriais ambientalmente responsáveis, alinhadas aos compromissos mundiais. Especificamente para a indústria brasileira, este estudo pode subsidiar decisões que equilibrem desempenho econômico e eficiência energética. Em relação ao meio ambiente, espera-se que os resultados deste estudo possam orientar ações mais eficazes de redução das emissões de GEE, promovendo um desenvolvimento menos poluente e mais sustentável.

2 Referencial Teórico

O efeito estufa é um evento natural e essencial para a vida na Terra. Ele é responsável por aquecer a superfície terrestre por meio da retenção de calor do sol. O bloqueio de calor que impede que a temperatura atmosférica se reduza, provocando o aquecimento atmosférico, é causado pela concentração excessiva de gases emitidos pelas ações antrópicas, dentre eles, os principais são o dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e ozônio, sendo o gás carbônico o mais abundante (Chen; Fu; Chang, 2021).

Esse fenômeno ocorre pois os gases acumulados na atmosfera terrestre, em especial os causadores do efeito estufa, são formados por moléculas que possuem a capacidade de reter a radiação solar, sendo que o potencial de reflexão desses gases é diferente, levando em consideração seu tempo na atmosfera e a própria capacidade de retenção (Lima; Hamzagic, 2022). As emissões dos GEE são agravadas pelas ações antrópicas, uma vez que tais emissões ocorrem em atividades como queimadas, desmatamento, agropecuária, uso de combustíveis fósseis e atividades industriais (Chen; Fu; Chang, 2021). Como essas ações são recorrentes e aumentam cada vez mais com o desenvolvimento econômico desde o período pré-industrial, a quantidade de GEE na atmosfera continua se elevando, aumentando a temperatura da Terra, o que tem causado o chamado aquecimento global (Henderson; Sen, 2021).

O aquecimento global é o aumento anormal da temperatura da Terra (Santos; Pontes, 2022), ele é responsável pelo aumento do nível do mar, eventos climáticos extremos, derretimento das calotas polares e impactos na biodiversidade (Chen; Fu; Chang, 2021). Visto que tais acontecimentos impactam nas atividades humanas e até mesmo na sua sobrevivência, algumas nações começaram a questionar e a buscar soluções para mitigar os efeitos causados pelas emissões dos GEE (Oliveira; Stakoviaki Júnior, 2024).

Diante dos eventos desencadeados por essa mudança climática, em 2015 foi firmado o Acordo de Paris, acordo esse assinado por 196 países estabelecendo a meta de manter o aumento do aquecimento global em 2°C em relação aos níveis pré-industriais e limitar esse aumento a 1,5ºC em comparação aos níveis pré-industriais

(Oliveira; Stakoviaki Júnior, 2024). Dessa forma, várias ações foram implementadas para que essa redução fosse possível, como o aumento de investimento em energias menos poluentes, redução das usinas de carvão e do uso de combustíveis fósseis, entre outras (Ali *et al.*, 2023).

No Brasil, a despeito da existência de leis voltadas à redução das emissões dos GEE, como as leis 12.187/2009 e 12.114/2009, foram criadas algumas legislações buscando atender o que foi acordado em Paris no ano de 2015, assim como o decreto 9.578/2018 e o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (Santos; Pontes, 2022). O objetivo dessas leis e do Plano é orientar a redução e a gestão das mudanças climáticas geradas pelo efeito estufa e o aquecimento global, trazendo medidas como reflorestamento, conservação e manejo do solo, além do comércio de créditos de carbono (Oliveira; Stakoviaki Júnior, 2024).

Em relação específica às atividades industriais, foi observado que desde seu incremento no século XVIII, período no qual houve a mudança da sociedade agrária para a sociedade industrial, ocorreu o aumento das alterações climáticas e emissões de GEE por conta do uso intensivo de energia e a queima de combustíveis fósseis (Zheng *et al.*, 2021). E, em conjunto com a industrialização, deu-se o processo de urbanização e desenvolvimento econômico, a partir dos quais as pessoas se mudaram do campo para a cidade em busca de trabalho, e esse deslocamento gerou uma elevação na demanda por recursos energéticos e, consequentemente, emissões de GEE (Su *et al.*, 2022; Liao *et al.*, 2023).

A industrialização foi um marco importante na história ao permitir que o desenvolvimento econômico crescesse de maneira mais acelerada devido a produção em maiores quantidades e em menor tempo, porém, as atividades industriais são responsáveis por grande parte das emissões de GEE que causam as alterações climáticas e ambientais (Waheed; Sarwar; Wei, 2019; Liao *et al.*, 2023). Essas mudanças climáticas geram desafios para a sociedade e a economia, pois são causadoras de eventos climáticos extremos como secas e inundações (Santos; Pontes, 2022), entre outros; além de afetar a produção de alimentos e causar extinção de espécies (Lima; Hamzagic, 2022), assim como outras consequências possíveis.

Devido a esses desafios sociais e econômicos, as nações começaram a explorar novas perspectivas de pesquisas voltadas para reduzir o impacto causado pelas ações antropocêntricas no meio ambiente. Há uma grande quantidade de pesquisas voltadas para o campo energético, nas quais são estudados os efeitos da transição da energia de combustível fóssil para a renovável, e ainda, investigações sobre o planejamento da produção com eficiência energética (Biel; Glock, 2016; Khan *et al.*, 2022; Liao *et al.*, 2023). Foi observado nesses estudos que: utilizar energias renováveis é uma boa alternativa para reduzir as emissões de gás carbônico; a inovação verde contribui para mitigar a dependência de recursos naturais e aumenta a sustentabilidade ambiental; a energia renovável pode ser considerada um investimento, pois suas tecnologias podem ser usadas por muitos anos com pouca manutenção, a exemplo das placas de energia solar; a utilização dessa energia limpa reduz os custos de importação de petróleo para geração de energia, assim como diminui a dependência de importação de energia de outros países (Khan *et al.*, 2022; Liao *et al.*, 2023; Bogdanov *et al.*, 2021; Ram *et al.*, 2022; Potrc *et al.*, 2021).

Em relação à produção com eficiência energética, foi verificado que ela auxilia na redução de emissões de gases de efeito estufa e utiliza a energia com mais consciência, o que também impacta no desempenho financeiro (Biel; Glock, 2016; Li *et al.*, 2021). Outrossim, há estudos voltados para os incentivos a transição energética, nos quais foi apurado que os incentivos econômicos por si só não são fatores determinantes para impulsionar a mudança da matriz energética, mas que os fatores sociais, econômicos, ambientais e governamentais, em conjunto, são os encorajadores dessa transição para energias renováveis, sendo que os incentivos fiscais e financeiros são os mais atrativos por serem redutores dos custos; assim sendo, as nações precisam adotar políticas regulatórias e fiscais buscando incentivar a utilização de energias renováveis (D'Adamo *et al.*, 2023; Boluk; Kaplan, 2021; Vakulchuk; Overland; Suryadi, 2022; Su *et al.*, 2022).

A industrialização foi um fator determinante para o crescimento econômico e social, porém, ocorreu também o aumento nas emissões de GEE, uma vez que nas atividades fabris há um grande consumo de energia e de combustíveis fósseis, além da alteração dos sistemas naturais para geração de novos produtos (Zheng *et al.*,

2021). E, devido a densidade populacional, também houve aumento nas emissões de carbono por conta de transportes e do uso de energia nas residências (Liao *et al.*, 2023). Desse modo, pôde-se observar uma relação direta entre crescimento econômico e emissões de gás carbônico, dado que a urbanização e a industrialização são fatores que contribuem para a expansão econômica e são os principais causadores do aumento do aquecimento global (Liao *et al.*, 2023).

O crescimento econômico, causado pela industrialização e urbanização, mas não só por isso, leva ao aumento das emissões de GEE, uma vez que a energia é um dos principais fatores que impulsionam esse crescimento. Quanto maior o desenvolvimento econômico, maior o consumo de energia para as diversas atividades humanas, logo, ao usar energias não renováveis, gera-se o aumento nas emissões de GEE, por outro lado, o uso de energias renováveis auxilia na redução das emissões, mesmo que amplamente utilizada para industrialização, urbanização e agricultura (Waheed; Sarwar; Wei, 2019).

As atividades industriais que requerem calor de alta temperatura, como indústria de cerâmica, aço, vidro e cimento, utilizam principalmente combustíveis fósseis com alto valor calorífico, dessa forma, são processos intensivos na liberação de GEE (Gerres *et al.*, 2019; Li; Tao, 2017; Ram *et al.*, 2022). As indústrias siderúrgicas também são grandes emissoras de GEE por conta do uso de combustíveis fósseis, as emissões são causadas principalmente pelos resíduos dos fornos, pois eles liberam hidrogênio, monóxido de carbono e metano, sendo que se fossem usadas outras fontes, como a eletricidade, haveria uma redução das emissões (Kleinekorte *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022; Ali *et al.*, 2023). Além dos GEE liberados diretamente na atividade industrial, ocorre também a liberação dos gases no tratamento da água utilizada na produção, pois, juntamente com o consumo de energia que é necessário nesse momento, há também emissão de gás carbônico e metano nos processos de tratamento dessa água (Yapicioglu; Demir, 2021).

De uma maneira geral, o consumo energético é um dos mais relevantes produtores de GEE na atualidade, isso ocorre, pois, os países ainda dependem de combustíveis fósseis para a geração de energia e as fontes não renováveis são as mais poluidoras (Ribeiro *et al.*, 2023). Se, por um lado, a energia ajuda a impulsionar

o crescimento econômico, por outro, degrada o meio ambiente; logo, são necessárias ações para mitigar as emissões de GEE (Waheed; Sarwar; Wei, 2019), e, assim, gerar crescimento econômico de maneira sustentável.

3 Metodologia de Pesquisa

Para avaliar como as vendas dos produtos e/ou serviços industriais e o respectivo consumo energético industrial se relacionam com as emissões de gases do efeito estufa (GEE) ocorridos no Brasil, inicialmente, foram levantadas informações sobre os totais anuais das emissões CO_2, em gigagramas (*Gg*), referentes aos "processos industriais e uso de produtos" (IPPU) divulgados pelo Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE) do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação brasileiro (Brasil, 2025), com base na métrica do Potencial de Aquecimento Global ou *Global Warming Potential* (GWP) do Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), portanto CO_2-GWP-AR5.

Na sequência, foram pesquisadas as informações referentes aos totais das vendas dos produtos e/ou serviços industriais, em Mil Reais ou R$1.000,00, no Brasil como um todo (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2024a; 2024b), e ainda, o respectivo consumo energético industrial, medido em 1000 (10^3) toneladas equivalentes de petróleo (tep), portanto medidas em 10^3 tep, tanto em termos totais quanto detalhadamente por tipo de fonte energética (Empresa de Pesquisa Energética, 2025).

Os totais referentes às emissões anuais de GEE, em CO_2-GWP-AR5 (medidas em *Gg*) referentes aos IPPU foram obtidos com base nas informações disponibilizadas pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, de acordo com o Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE) (Brasil, 2025). Os totais referentes às vendas dos produtos e/ou serviços industriais (medidos em Mil Reais ou R$1.000,00) foram levantados a partir de consultas realizadas no Sistema de Recuperação Automática (SIDRA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024a; 2024b). E ainda, o consumo energético industrial (medido em 10^3 tep), em termos totais e o respectivo detalhamento por tipo de fonte energética, foram levantados mediante

consultas às séries históricas e matrizes do Balanço Energético Nacional (BEN), disponibilizado para consulta pela Empresa de Pesquisa Energética brasileira (2025).

Uma vez que as informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024a; 2024b) compreendem o período que vai do ano 2005 até 2022, as informações da Empresa de Pesquisa Energética (2024) compreendem os anos de 1970 até 2024, e ainda, as informações disponibilizadas no SIRENE referentes aos totais de CO_2-GWP-AR5 (em *Gg*) dos IPPU contemplam o período que vai de 1990 até 2022, a amostra desta pesquisa contou com as informações anuais que vão de 2005 até 2022. Portanto, um total de 18 observações anuais para todas as variáveis analisadas nesta investigação científica.

Em relação ao processo de análise de dados, inicialmente, foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov para verificação da presença de distribuição normal em cada uma das séries de dados integrantes da amostra desta pesquisa. Porém, as séries referentes ao total das emissões de GEE (CO_2-GWP-AR5), e ainda, as séries de dados representativas do consumo energético industrial a partir de carvão metalúrgico, lenha, óleo diesel, carvão vegetal e alcatrão não apresentaram distribuição normal (Gaussiana), para um nível de significância de 0,05. Por isso, não foi possível utilizar o coeficiente correlação de Pearson, que possui natureza paramétrica, aplicando-se a análise de correlação baseada no coeficiente de Spearman (coeficiente *rô*), que é de natureza não-paramétrica.

O coeficiente de correlação de Spearman (coeficiente *rô*) avalia a força do relacionamento entre o comportamento de duas variáveis (duas a duas, ou ainda, de forma bivariada), independentemente das hipóteses requeridas para testes paramétricos, dentre elas a necessidade de distribuição normal para as séries de dados analisados (Field, 2009). Sendo que, independentemente da natureza do teste adotado (paramétrico ou não), ao avaliar o grau de associação entre o comportamento de duas variáveis, quaisquer que sejam as respectivas unidades de medida, o coeficiente de correlação assume valores entre -1 (um negativo) e +1 (um positivo), ou seja: quanto mais próximo de +1, maior a correlação direta entre as variáveis analisadas; quanto mais próximo de -1, maior a correlação inversa entre as variáveis

analisadas; e, quanto mais próximo de 0 (zero) observa-se a ausência de correlação (Sousa, 2019).

Dessa maneira, levando-se em conta o seu objeto de estudo, sua amostra de dados e a respectiva metodologia de análise, esta investigação pode ser considerada uma pesquisa científica de natureza empírica apoiada em métodos quantitativos aplicados.

4 Análise dos Dados, Apresentação e Discussão dos Resultados

Desde a Revolução Industrial no século XVIII, a intensificação das atividades industriais tem sido um dos principais vetores de crescimento econômico e urbanização. Por demandar elevado consumo de energia, esse processo contribuiu significativamente para o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e para as alterações climáticas, tanto pela expansão da produção fabril quanto pela crescente demanda urbana por recursos energéticos (Zheng *et al*., 2021; Su *et al*., 2022; Liao *et al*., 2023).

Ao avaliar como o comportamento das vendas dos produtos e/ou serviços industriais, e ainda, o comportamento do respectivo consumo energético industrial se relacionam com as emissões de gases do efeito estufa ocorridas no Brasil, esta investigação identificou a evolução longitudinal (abrangendo o período de 2005 a 2022) das variáveis relacionadas às emissões do setor IPPU em CO_2, às vendas de produtos e/ou serviços industriais e ao consumo energético, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das variáveis de pesquisa ao longo do período analisado

Ano	Emissões IPPU em CO_2e-GWP-AR5 (Gg)	Vendas dos produtos e/ou serviços industriais (Mil Reais)	Consumo energético industrial total (10^3 tep)
2005	83.335,25	1.206.407.543,00	72.492,99
2006	83.913,52	1.309.102.498,00	75.712,83
2007	88.978,07	1.443.658.835,00	80.727,14
2008	87.279,43	1.685.881.702,00	81.184,13
2009	77.407,32	1.568.824.576,00	75.814,21
2010	87.352,54	1.855.499.306,00	85.252,85
2011	94.142,94	2.109.781.307,00	88.224,74
2012	95.463,75	2.276.837.339,00	88.238,05
2013	97.041,69	2.486.630.285,00	87.989,74
2014	94.724,93	2.590.773.318,00	86.985,62
2015	95.669,85	2.548.936.587,00	84.368,55
2016	93.931,08	2.539.811.947,00	83.456,87
2017	97.958,32	2.760.553.564,00	85.018,00
2018	99.421,57	3.197.289.469,00	81.243,27
2019	95.394,23	3.347.514.644,00	79.136,51
2020	96.991,57	3.639.635.737,00	82.181,99
2021	105.846,41	5.237.652.681,00	85.618,26
2022	102.316,64	6.107.077.389,00	87.186,24

Fonte: elaborado pelos autores, com base nos dados pesquisa.

Observa-se que, desde 2005, as três variáveis analisadas apresentaram tendência de crescimento mais acentuado. As emissões aumentaram aproximadamente 23% (≈22,78%) em relação ao primeiro ano do período analisado, enquanto as vendas de produtos e/ou serviços industriais registraram um aumento em torno de 506% (≈506,22%). Já o consumo energético apresentou crescimento de cerca de 20% no mesmo intervalo (≈20,27%).

Embora as três variáveis apresentem tendências de crescimento, observa-se que esse crescimento não ocorre de forma proporcional entre elas. Esse descompasso indica que, mesmo com o aumento nas vendas — o que, em princípio, demandaria maior consumo de energia —, as emissões de carbono não cresceram na mesma intensidade. Tal fenômeno pode ser explicado pela mudança na matriz energética do setor industrial. Isso se deve ao fato de que algumas fontes de energia são menos poluentes e, em certos casos, podem até contribuir para a redução das emissões de carbono (Waheed; Sarwar; Wei, 2019).

Para verificar se os dados apresentados na Tabela 1 seguem uma distribuição normal, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov. O teste indicou que a variável

"emissões", neste estudo avaliada pela Emissões IPPU em CO_2e-GWP-AR5 (Gg), não apresenta distribuição normal; por esse motivo, a análise de correlação foi realizada por meio do coeficiente *rô* de Spearman, um teste não paramétrico.

Tabela 2 – Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para verificação da presença de distribuição normal[(a)]

Variáveis	Estatística K-S	P-valores
Emissões IPPU em CO_2e-GWP-AR5 (Gg)	0,209	0,04
Vendas dos produtos e/ou serviços industriais (Mil Reais)	0,192	0,08
Consumo energético industrial total (10³ tep)	0,129	0,20
Gás natural (10³ tep) [(b)]	0,136	0,20
Carvão vapor (10³ tep) [(b)]	0,197	0,06
Carvão metalúrgico (10³ tep) [(b)]	0,488	0,00
Lenha (10³ tep) [(b)]	0,271	0,00
Produtos da cana (10³ tep) [(b)]	0,156	0,20
Outras fontes primárias (10³ tep) [(b)]	0,100	0,20
Biodiesel (10³ tep) [(b)]	0,094	0,20
Óleo diesel (10³ tep) [(b)]	0,215	0,03
Óleo combustível (10³ tep) [(b)]	0,133	0,20
GLP (10³ tep) [(b)]	0,191	0,08
Querosene (10³ tep) [(b)]	0,199	0,06
Gás de cidade e de coqueria (10³ tep) [(b)]	0,160	0,20
Coque de carvão mineral (10³ tep) [(b)]	0,181	0,12
Eletricidade (10³ tep) [(b)]	0,147	0,20
Carvão vegetal (10³ tep) [(b)]	0,274	0,00
Outras secundárias de petróleo (10³ tep) [(b)]	0,142	0,20
Alcatrão (10³ tep) [(b)]	0,252	0,00

(a) Nível de significância de 0,05.
(b) Consumo energético industrial por tipo de fonte.

Fonte: elaborado pelos autores, com base nos dados pesquisa.

Embora a avaliação dos valores totais das variáveis indique que apenas a variável "emissões" não apresenta distribuição normal, ao examinar o consumo energético industrial por tipo de fonte energética, observou-se que algumas delas também não apresentavam distribuição normal, com destaque para o carvão metalúrgico, a lenha, o óleo diesel, o carvão vegetal e o alcatrão. Esse resultado reforça a inadequação do uso de testes paramétricos na presente investigação.

O coeficiente de correlação *rô* de Spearman é utilizado para analisar a associação entre variáveis não paramétricas, considerando pares de variáveis. Assim, na interpretação da matriz de correlação, deve-se observar a relação entre a variável

disposta na coluna e aquela posicionada na linha. A análise de correlação, obtida por meio da aplicação do *rô* coeficiente de Spearman, encontra-se disposta na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise de correlação pelo coeficiente *rô* de Spearman

Variáveis		Emissões IPPU em CO_2e- GWP-AR5 (Gg)	Vendas dos produtos e/ou serviços industriais (Mil Reais)	Consumo energético industrial total (10^3 tep)
Emissões IPPU = CO_2e GWP AR5 (Gg)	Coeficiente	**1,00**	0,876**	0,573*
	Significância		0,00	0,01
Vendas dos produtos e/ou serviços industriais (Mil Reais)	Coeficiente	0,876**	**1,00**	0,42
	Significância	0,00		0,08
Consumo energético industrial total (10^3 tep)	Coeficiente	0,573*	0,42	**1,00**
	Significância	0,01	0,08	
Gás natural (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,45	0,25	0,843**
	Significância	0,06	0,32	0,00
Carvão vapor (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,686**	0,577*	0,682**
	Significância	0,00	0,01	0,00
Carvão metalúrgico (10^3 tep) (a)	Coeficiente	-0,27	-0,35	-0,08
	Significância	0,28	0,16	0,75
Lenha (10^3 tep)	Coeficiente	0,763**	0,752**	0,746**
	Significância	0,00	0,00	0,00
Produtos da cana (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,11	0,08	,548*
	Significância	0,67	0,75	0,02
Outras fontes primárias (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,856**	0,981**	0,39
	Significância	0,00	0,00	0,11
Biodiesel (10^3 tep)	Coeficiente	0,872**	0,992**	0,40
	Significância	0,00	0,00	0,10
Óleo diesel (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,738**	0,715**	0,777**
	Significância	0,00	0,00	0,00
Óleo combustível (10^3 tep) (a)	Coeficiente	-0,818**	-0,946**	-0,29
	Significância	0,00	0,00	0,24
Glp (10^3 tep)	Coeficiente	0,775**	0,814**	0,579*
	Significância	0,00	0,00	0,01
Querosene (10^3 tep) (a)	Coeficiente	-0,761**	-0,895**	-0,25
	Significância	0,00	0,00	0,32
Gás de cidade e de coqueria (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,577*	0,43	0,787**
	Significância	0,01	0,07	0,00
Coque de carvão mineral (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,662**	0,46	0,796**
	Significância	0,00	0,06	0,00
Eletricidade (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,761**	0,637**	0,905**
	Significância	0,00	0,00	0,00
Carvão vegetal (10^3 tep) (a)	Coeficiente	-0,31	-0,45	-0,15
	Significância	0,21	0,06	0,55
Outras secundárias de petróleo (10^3 tep) (a)	Coeficiente	-0,11	-0,24	,560*
	Significância	0,66	0,34	0,02
Alcatrão (10^3 tep) (a)	Coeficiente	0,492*	0,38	0,810**
	Significância	0,04	0,12	0,00

Legenda:

** A correlação é significativa no nível 0,01 (2 extremidades).
* A correlação é significativa no nível 0,05 (2 extremidades).
(a) Consumo energético industrial por tipo de fonte.

Fonte: elaborado pelos autores, com base nos dados pesquisa.

Conforme apresentado na Tabela 3, a correlação entre as Emissões IPPU, medidas em CO_2e-GWP-AR5 (Gg), e as vendas de produtos e/ou serviços industriais foi significativa, com coeficiente próximo de 1. Esse resultado pode ser atribuído à elevada demanda da atividade industrial por energia, parte da qual é proveniente de fontes não renováveis e com elevado potencial poluente (Liao *et al*., 2023). Dessa forma, o aumento nas vendas de produtos e/ou serviços industriais tende a ser acompanhado por um crescimento nas emissões de GEE.

A correlação entre o consumo energético industrial total e as emissões de gases de efeito estufa foi significativa ao nível de 0,05. Tal relação pode ser explicada pelo fato de que, embora o consumo de energia esteja associado à atividade industrial, parte das fontes energéticas utilizadas nesse setor é renovável. Em determinados contextos, essas fontes renováveis podem, inclusive, contribuir para a redução das emissões, especialmente quando substituem fontes não renováveis e mais poluentes (Ali *et al*.; 2023).

Verifica-se que o consumo energético industrial e as vendas de produtos e/ou serviços industriais não apresentam uma correlação significativa. Apesar de a atividade industrial demandar energia para seu funcionamento, há fatores que contribuem para a redução dessa relação, como a incorporação de tecnologias mais eficientes, a heterogeneidade na intensidade energética entre os diferentes segmentos industriais e a melhoria da eficiência energética por unidade produzida, entre outros elementos (Potrc *et al*., 2021; Bogdanov *et al*., 2021).

Ao analisar as fontes energéticas utilizadas na atividade industrial, observa-se que o consumo de gás natural apresenta uma elevada correlação com o consumo energético do setor, evidenciando-se como uma das principais fontes utilizadas pela indústria brasileira. Essa preferência se deve ao fato de o gás natural ser uma alternativa menos poluente em comparação às fontes derivadas do petróleo, além de oferecer uma boa relação custo-benefício (Ribeiro *et al*., 2023).

O consumo de carvão vapor apresentou elevado coeficiente de correlação com as três variáveis analisadas nesta pesquisa. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de o carvão ainda ser amplamente utilizado na atividade industrial, contribuindo tanto para o aumento das vendas do setor (nesta pesquisa, utilizadas como *proxy* do nível de atividade industrial) quanto para os altos níveis de emissões de GEE. Trata-se de uma fonte energética empregada, principalmente, em processos industriais que demandam combustíveis com elevado poder calorífico para geração de calor (Gerres *et al*., 2019), bem como, na operação de termelétricas (Ram *et al*., 2022).

O consumo de energia obtido através da lenha também apresentou um índice de correlação elevado com as três variáveis analisadas. Embora ainda seja utilizada na geração de energia, seu uso vem sendo gradualmente substituído, ao longo dos anos, por fontes renováveis e menos poluentes (Ribeiro *et al*., 2023).

As fontes energéticas com uso restrito, como o carvão metalúrgico, utilizado quase exclusivamente na siderurgia, produtos da cana destinados ao autoconsumo da indústria sucroalcooleira, carvão vegetal utilizado em aplicações regionais e derivados secundários de petróleo com participação marginal na matriz energética industrial, apresentaram baixo coeficiente de correlação com o consumo energético, com as emissões de GEE e com o volume de vendas da indústria como um todo. O carvão metalúrgico, por exemplo, utilizado na produção de aço, gera emissões significativas de dióxido de carbono e, por essa razão, vem sendo gradualmente substituído pelo hidrogênio verde (Vieira *et al*., 2024).

Outras fontes primárias, como o petróleo e o carvão mineral (Li; Tao, 2017), apresentaram forte correlação com as emissões de GEE e com as vendas industriais, aproximando-se de 1. Isso se deve ao fato de que, embora essas fontes estejam sendo gradualmente substituídas na matriz energética, ainda são utilizadas em determinadas atividades industriais e possuem alto potencial poluente (Gerres *et al*., 2019).

O biodiesel apresentou alto índice de correlação com as vendas industriais e com as emissões de gases de efeito estufa pois é amplamente utilizado em motores de veículos e máquinas industriais, além de servir como matéria-prima para diversos produtos. Ele é produzido a partir de fontes renováveis, como óleos de espécies

vegetais e, em comparação com fontes derivadas do petróleo, apresenta menor emissão de GEE (Silva; Freitas, 2008). Além disso, o biodiesel também é empregado na produção do bioquerosene, que tem sido utilizado na aviação (Peres *et al.*, 2021).

O óleo diesel apresentou alta correlação com as três variáveis estudadas. Ele é amplamente utilizado no transporte, assim como em maquinários industriais e na geração de energia elétrica (Brasil, 2024). Por ser um derivado do petróleo, portanto, uma fonte não renovável, o óleo diesel é poluente e tem sido gradativamente substituído pelo biodiesel (Silva; Freitas, 2008).

Já o óleo combustível apresentou correlação inversa com as três variáveis analisadas, o que significa que, à medida que essas variáveis aumentam, seu uso diminui. Esse comportamento se deve ao fato de que esse combustível vem sendo substituído na indústria por fontes energéticas renováveis e menos poluentes, como a biomassa (Galembeck; Barbosa; Sousa, 2009).

O Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) apresentou alta correlação com as vendas industriais e com as emissões de gases de efeito estufa. Isso se deve ao fato de o GLP ser uma fonte energética estratégica em diversos setores industriais, devido à sua praticidade, relação custo-benefício e eficiência, além de também ser amplamente utilizado no consumo doméstico (Consigaz, 2023). A indústria de sorvetes, por exemplo, utiliza o GLP no processo de pasteurização, no entanto, por ser um derivado do petróleo, seu uso contribui para um elevado índice de emissões de gases de efeito estufa (Melquíades *et al*., 2019).

O querosene é um combustível derivado de petróleo utilizado em processos industriais, motores, aquecimento, iluminação, entre outros usos que podem representar riscos à saúde humana e ao meio ambiente (Maiyoh; Njoroge; Tuei, 2015). Ele tem sido gradualmente substituído por fontes mais sustentáveis, por isso apresentou correlação inversa com as variáveis analisadas na pesquisa. Seu principal destaque está na formulação de combustíveis para a aviação, e apesar dessa essencialidade, trata-se de um derivado fóssil e altamente poluente, nesse sentido, o querosene tem sido substituído pelo bioquerosene, uma alternativa mais limpa e ambientalmente responsável (Peres *et al*., 2021).

O gás de cidade e o gás de coqueria apresentaram alta correlação com as emissões de GEE e com o consumo energético industrial, mas apresentam correlação inferior a 0,5 em relação às vendas industriais. Esse resultado se explica pelo fato de esses insumos serem utilizados em indústrias específicas e altamente poluentes, como a de ferro-gusa (Boico; Camioto; Rebelatto, 2013). O coque de carvão mineral apresentou comportamento semelhante, sendo também empregado na produção de ferro-gusa (Boico; Camioto; Rebelatto, 2013).

A eletricidade apresentou correlação elevada com as três variáveis analisadas. Isso se deve ao fato dela ser amplamente utilizada no processo de transição energética de combustíveis fósseis para fontes renováveis, além de contribuir para o aumento da eficiência energética na produção industrial (Bogdanov *et al.*, 2021). Dessa forma, sua demanda tende a acompanhar a dinâmica da atividade industrial. Apesar de seu uso direto não resultar em emissões relevantes de gases de efeito estufa, a geração de eletricidade pode ser altamente poluente (Lima; Hamzagic, 2022), especialmente quando proveniente de termelétricas movidas a carvão mineral (Ram *et al.*, 2022).

O alcatrão é recuperado e reutilizado em fornos, caldeiras e secadores, contribuindo para o aumento da eficiência energética (Freitas, 2020). Por esse motivo, apresentou alta correlação com o consumo energético total. No entanto, como seu uso é restrito a setores industriais específicos, sua correlação com as emissões de gases de efeito estufa e com as vendas de produtos e/ou serviços industriais não é tão significativa. Um exemplo disso é sua aplicação em alto forno na indústria de ferro-gusa e aço (Camioto; Rebelatto, 2014).

Embora as fontes energéticas não renováveis ainda sejam amplamente utilizadas no Brasil, as análises realizadas por meio desta investigação indicam a existência de um movimento de substituição gradual por fontes renováveis e menos intensivas em emissões de GEE. Pois, as fontes que apresentaram correlação inversa nas análises, comparativamente às emissões de GEE, podem estar sendo progressivamente substituídas por alternativas mais limpas, enquanto aquelas com forte correlação direta, em sua maioria, correspondem a fontes renováveis. Esse cenário reflete o comprometimento do Brasil com as metas estabelecidas no Acordo

de Paris, firmado em 2015, no que se refere à transição energética e à mitigação das mudanças climáticas.

5 Considerações Finais

A presente pesquisa teve como propósito compreender de que forma o consumo energético e as vendas de produtos e/ou serviços industriais estão correlacionados com as emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil. Esse tema demonstrou-se relevante diante do crescente debate sobre sustentabilidade, mudanças climáticas e transição energética, especialmente no contexto industrial brasileiro, que tem papel central tanto no desenvolvimento econômico quanto na geração de impactos ambientais.

A análise de correlação realizada ao longo deste estudo revelou que algumas fontes energéticas não renováveis, como coque de carvão mineral e óleo diesel, mantêm forte correlação com o aumento das emissões de GEE, enquanto algumas fontes renováveis, como biodiesel e eletricidade, têm se destacado por sua associação mais equilibrada com o consumo energético e com as vendas industriais. Verificou-se ainda que o consumo de fontes energéticas de origens fósseis, dentre elas o óleo diesel, tendem a ter correlação significativa com as emissões, ao passo que outras fontes como o biodiesel apresentam alta correlação com as vendas e com o consumo energético, sem apresentar uma alta correlação com as emissões de GEE. Isso pode ser um indício de que as fontes renováveis podem ser utilizadas na atividade industrial sem afetar o meio ambiente na mesma proporção. Esta investigação também demonstrou que algumas fontes energéticas possuem correlação inversa, o que pode estar relacionado à possibilidade delas já estarem sendo substituídas por outras, uma vez que enquanto produção e vendas industriais aumentam, o seu consumo está sendo reduzido.

Esses achados indicam que é possível promover crescimento industrial aliado à sustentabilidade, desde que haja um redirecionamento na matriz energética da indústria brasileira. Para os gestores públicos e privados, esses resultados são importantes porque demonstram que decisões estratégicas no campo da energia

podem influenciar diretamente os indicadores econômicos e ambientais, contribuindo para políticas mais eficazes e alinhadas às metas do Acordo de Paris. Além disso, os dados obtidos e analisados por meio desta pesquisa ajudam a compreender quais fontes energéticas são alternativas para substituição de combustíveis fósseis e, portanto, merecem maior incentivo em termos de investimento e regulação.

Embora esta investigação traga contribuições relevantes, ela apresenta algumas limitações que merecem ser reconhecidas. Apesar deste estudo ter sido realizado com base em dados públicos e agregados, seu recorte temporal pode ser considerado limitado, além de apresentar uma defasagem de aproximadamente três anos, o que pode comprometer parcialmente a atualidade das análises. Para mitigar esses impactos, optou-se por utilizar as bases mais confiáveis e recentes disponíveis, com ênfase em séries históricas fornecidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, além da aplicação de métodos estatísticos compatíveis com a estrutura dos dados disponíveis. Complementarmente, a fundamentação teórica foi construída a partir de artigos científicos atualizados, o que contribuiu para manter o alinhamento da discussão com o cenário contemporâneo, mesmo diante das restrições impostas pelos dados.

Como desdobramento com vistas à continuidade deste estudo, recomenda-se, em primeiro lugar, a aplicação de métodos estatísticos mais robustos, como a análise de regressão por exemplo, a fim de identificar possíveis correlações multivariadas entre as variáveis estudadas. Sugere-se também o aprofundamento da análise por setor, levando em consideração as particularidades energéticas de segmentos específicos, como a metalurgia e siderurgia, a agroindústria e a indústria têxtil, entre outros. Além disso, propõe-se a realização de estudos comparativos entre diferentes unidades da federação ou entre países em desenvolvimento, o que pode ampliar o entendimento sobre padrões de desenvolvimento sustentável. A continuidade dessa investigação pode gerar contribuições relevantes tanto para o avanço da pesquisa científica nas áreas de contabilidade ambiental e economia da energia, quanto para a elaboração de políticas públicas mais eficientes. Sendo que, os resultados encontrados também podem auxiliar empresas industriais na escolha de fontes

energéticas que lhe permitam manter sua capacidade produtiva e, ao mesmo tempo, possam colaborar para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

REFERÊNCIAS

AGACHE, I.; SAMPATH, V.; AGUILERA, J.; AKDIS, C. A.; AKDIS, M.; BARRY, M.; BOUAGNON, A.; CHINTHRAJAH, S.; COLLINS, W.; DULITZKI, C.; ERNY, B.; GOMEZ, J.; GOSHUA, A.; JUTEL, M.; KIZER, K. W.; KLINE, O.; LABEAUD, A. D.; PALI-SCHÖLL, I.; PERRETT, K. P.; PETERS, R. L.; PLAZA, M. P.; PRUNICKI, M.; SACK, T.; SALAS, R. N.; SINDHER, S. B.; SOKOLOW, S. H.; THIEL, C.; VEIDIS, E.; WRAY, B. D.; TRAIDL-HOFFMANN, C.; WITT, C.; NADEAU, K. C.. Climate change and global health: a call to more research and more action. Allergy, [s. l.], v. 77, issue 5, p. 138-140, May 2022. DOI: https://doi.org/10.1111/all.15229. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/all.15229. Acesso em: 10 out. 2024.

ALI, K.; JIANGUO, D.; KIRIKKALELI, D.; MENTEL, G.; ALTUNTAS, M. Testing the role of digital financial inclusion in energy transition and diversification towards COP26 targets and sustainable development goals. **Gondwana Research**, [*s. l*], v. 121, p. 293-303, set. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.05.006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1342937X23001387?via%3Dihub. Acesso em: 29 jul. 2024.

BIEL, K.; GLOCK, C. H. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning. **Computers & Industrial Enginering**, [*s. l*], v. 101, p. 243-259, nov. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.08.021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835216303254?via%3Dihub. Acesso em: 29 ago. 2024.

BHATTI, U. A.; BHATTI, M. A.; TANG, H.; SYAM, M. S.; AWWAD, E. M.; SHARAF, M.; GHADI,Y. Y.. Global production patterns: Understanding the relationship between greenhouse gas emissions, agriculture greening and climate variability. Environmental Research, [s. l.], v. 245, e-article 118049, 15 March 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118049. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935123028530?via%3Dihub. Acesso em: 20 jul. 2025

BOGDANOV, D.; GULAGI, A.; FASIHI, M.; BREYER, C. Full energy sector transition towards 100% renewable energy supply: Integrating power, heat, transport and industry sectors including desalination. **Applied Energy**, [*s. l*], v. 283, p. 1-17, fev. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116273. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920316639?via%3Dihub. Acesso em: 04 set. 2024.

BOICO, V. F.; CAMIOTO, F. C.; REBELATTO, D. A. N. A redução das emissões de gases do efeito estufa na indústria de ferro-gusa e aço por meio da alteração da matriz energética. I*n*: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – SIMPEP, 20., 2013, Bauru. **Anais [...]**. Bauru, SP: FEB/UNESP, 2013. Disponível em:

https://repositorio.usp.br/directbitstream/ecd641f1-6f7a-4a5a-9e91-6a75cd7d73d4/%5BTrab%20ev%5D%20Boico_A%20redu%C3%A7%C3%A3o%20das%20emiss%C3%B5es%20de%20gases.pdf. Acesso em: 6 jul. 2025.

BOLUK, G.; KAPLAN, R. Effectiveness of renewable energy incentives on sustainability: evidence from dynamic panel data analysis for the EU countries and Turkey. **Environmental Science and Pollution Research**, [*s. l*], v. 29, p. 26613-26630, dez. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s11356-021-17801-y. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-17801-y. Acesso em: 07 set. 2024.

BRASIL. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP)**. Óleo diesel. Publicado em 09/11/2020 - 15h28. Atualizado em 02/08/2024 - 16h24. Brasília, DF: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, base volátil com consulta realizada em 03 jul. 2025. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/oleo-diesel. Acesso em: 03 jul. 2025.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Sistema de Registro Nacional de Emissões (SIRENE)**: Emissões/Emissões de GEE por Setor. Publicado em 19/08/2021-15h58. Atualizado em 30/01/2023-14h23. Brasília-DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, base volátil com consulta realizada em: 03 jun. 2025-14h19. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/emissoes/emissoes-de-gee-por-setor-1 Acesso em: 18 set. 2024-08h57.

CAMIOTO, F. C.; REBELATTO, D. A. N. Análise da contribuição ambiental por meio da alteração da matriz energética do setor brasileiro de ferro-gusa e aço. **Gestão & Produção**, Campinas, v. 21, n. 4, p. 807–820, dez. 2014. DOI: 10.1590/0104-530X448/12. Disponível em: https://www.scielo.br/j/gp/a/WSvLvDhRYCpdHLrX63gFdNh/. Acesso em: 05 jul. 2025.

CHEN, X.; FU, Q.; CHANG, C. What are the shocks of climate change on clean energy investment: A diversified exploration. **Energy Economics**, [*s. l*], v. 95, p. 1-12, mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105136. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140988321000414?via%3Dihub. Acesso em: 31 jul. 2024.

CONSIGAZ. Gás natural e GLP: entenda as diferenças entre os tipos de gás. Consigaz, Canoas, RS, 2023. Disponível em: https://consigazempresas.com.br/gas-natural-e-glp/. Acesso em: 07 set. 2023.

D'ADAMO, I.; MAMMETTI, M.; OTTAVIANI, D.; OZTURK, I. Photovoltaic systems and sustainable communities: New social models for ecological transition. The impact of incentive policies in profitability analyses. **Renewable Energy**, [*s. l*], v. 202, p.

1291-1304, jan. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.127. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148122017852?via%3Dihub. Acesso em: 07 set. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional (BEN)**: séries históricas e matrizes/ arquivos/ Matrizes Consolidadas (em tep) 1970 - 2024. Brasília-DF: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/BEN-Series-Historicas-Completas. Acesso em: 03 jun. 2025-14h33.

FIELD, A. **Descobrindo a estatística usando o SPSS**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009.

FREITAS, R. S. O trabalho dos laboratórios, a indústria do alcatrão mineral e a hodierna concepção de atividade científica. **Revista Sociedade e Estado**, [*s. l*], v. 35, n. 2, p. 501-524, mai./ago. 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/s0102-6992-202035020006. Disponível em: https://www.scielo.br/j/se/a/TrLB39tw7mW35Pdtj4KfLrP/. Acesso em: 10 jul. 2025.

GALEMBECK, F.; BARBOSA, C. A. S.; SOUSA, R. A. Aproveitamento sustentável de biomassa e de recursos naturais na inovação química. **Química Nova**, Campinas, v. 32, n. 3, p. 571-581, mar. 2009. DOI: 10.1590/S0100-40422009000300003. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/CX6LXZWGJW9XC4Gy6W8WWsF/?lang=pt. Acesso em: 05 jul. 2025.

GERRES, T.; ÁVILA, J. P. C.; LHAMAS, P. L.; ROMÁN, T. G. S. A review of cross-sector decarbonisation potentials in the European energy intensive industry. **Journal of Clean Production**, [*s. l*], v. 210, p. 585-601, fev. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.036. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965261833436X. Acesso em: 12 set. 2024.

HENDERSON, J.; SEN, A. **The energy transition**: key challenges for incumbent and new players in the global energy system. Oxford: The Oxford Institute for Energy Studies, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Industrial Anual – Produto (2013)**: Tabela 5806 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos - Prodlist Indústria 2013. [*S. l.*]: Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)©, IBGE, consulta on-line realizada em: 19 set. 2024a-09h34. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5806#/n1/all/v/215/p/all/c718/33562/l/v,p+c718,t/resultado. Acesso em: 03 jun. 2025-14h16.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Industrial Anual – Produto (2016, 2019 e 2022)**: Tabela 7752 - Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos - Prodlists Indústria 2016, 2019 e 2022. [*S. l.*]: Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA)©, IBGE, consulta on-line realizada em: 19 set. 2024b-10h04. Disponível em: https://sidra.ibge.gov.br/tabela/7752#/n1/all/v/215/p/all/c1264/51583/l/v,p+c1264,t/resultado. Acesso em: 03 jun. 2025-14h28.

KHAN, I.; ZAKARI, A.; ZHANG, J.; DAGAR, V.; SINGH, S. A study of trilemma energy balance, clean energy transitions, and economic expansion in the midst of environmental sustainability: New insights from three trilemma leadership. **Energy**, [*s. l*], v. 248, p. 1-11, jun. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123619. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222005229?via%3Dihub. Acesso em: 26 ago. 2024.

KLEINEKORTE, J.; LEITL, M.; ZIBUNAS, C.; BARDOW, A. What shall we do with stell mill off-gas: Polygenerations systems minimizing greenhouse gas emissions. **Environmental Science & Technology**, [*s. l*], v. 56, p. 13294-13304, ago. 2022. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02888. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.2c02888. Acesso em: 14 set. 2024.

LI, J.; DAI, J.; ISSAKHOV, A.; ALMOJIL, S. F.; SOURI, A. Towards decision support systems for energy management in the smart industry and Internet of Things. **Computers & Industrial Engineering**, [*s. l*], v. 161, p. 1-10, nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107671. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835221005751?via%3Dihub. Acesso em: 08 set. 2024.

LI, M. J.; TAO, W. Q. Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry. **Applied Energy**, [*s. l*], v. 187, p. 203-215, fev. 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.039. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916316245?via%3Dihub. Acesso em: 14 set. 2024.

LIAO, J.; LIU. X.; ZHOU, X.; TURSUNOVA, N. R. Analyzing the role of renewable energy transition and industrialization on ecological sustainability: Can green innovation matter in OECD countries. **Renewable Energy**, [*s. l*], v. 204, p. 141-151, mar. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.089. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148122018857?via%3Dihub. Acesso em: 20 ago. 2024.

LIMA, L. J. B.; HAMZAGIC, M. Gases de efeito estufa e poluição do ar: semelhanças e diferenças. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, [*s. l*], v. 6, p. 112-144, set. 2022. DOI:

https://doi.org/10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/gases-de-efeito-estufa. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/meio-ambiente/gases-de-efeito-estufa. Acesso em: 07 ago. 2024.

LUIZ, C. M.; CARMO, C. R. S. Avaliação dos danos impostos ao setor privado da economia por eventos climáticos extremos no Brasil. **CONTABILOMETRIA – Brazilian Journal of Quantitative Methods Applied to Accounting**, Monte Carmelo, v. 13, n. 2, p. 86–104, jul.–dez. 2026. Publicado em: 27 maio 2025. Disponível em: https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/contabilometria/article/view/3867. Acesso em: 20 jul. 2025.

MAIYOH, G. K.; NJOROGE, R. W.; TUEI, V. C. Effects and mechanisms of kerosene use-related toxicity. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, [*s. l.*], v. 40, p. 57-70, jul. 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.05.010. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1382668915001258. Acesso em: 10 jul. 2025.

MELQUÍADES, T. F.; CARVALHO, M.; ARAÚJO, Y. R. V.; COELHO JUNIOR, L. M. Pegada de carbono associada ao processo de pasteurização de sorvetes. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 12, p. 609–629, maio 2019. DOI: 10.17765/2176-9168.2019v12n2p609-629. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333407311_PEGADA_DE_CARBONO_ASSOCIADA_AO_PROCESSO_DE_PASTEURIZACAO_DE_SORVETES. Acesso em: 05 jul. 2025.

OLIVEIRA, T. B.; STAKOVIAK JÚNIOR, P. B. M. O Mercado de carbono no contexto do Acordo de Paris: Desafios e perspectivas para a regularização do setor no Brasil. **Singular. Sociais e Humanidades**, Palmas, v. 1, n. 6, p. 154-167, jan./jun. 2024. DOI: https://doi.org/10.33911/singularsh.v1i6.194. Disponível em: https://ulbra-to.br/singular/index.php/SingularSH/article/view/194/122. Acesso em: 06 ago. 2024.

PERES, S.; DRUMMOND, A. R. F.; DE MIRANDA LOUREIRO, E. C.; PALHA, M. L. A. P. F. Uso dos coprodutos da indústria do biodiesel para produção de bioquerosene de aviação. **Revista Brasileira de Desenvolvimento,** [*s. l.*], v. 4, pág. 36898–36907, set. 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n4-245. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/27964. Acesso em: 27 jun. 2025.

POTRC, S.; CUCEK, L.; MARTIN, M.; KRAVANJA, Z. Sustainable renewable energy supply networks optimization – The gradual transition to a renewable energy system within the European Union by 2050. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l*], v. 146, p. 1-16, ago. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111186. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121004743?via%3Dihub. Acesso em: 06 ago. 2024.

RAM, M.; GULAGI, A.; AGHAHOSSEINI, A.; BOGDANOV, D.; BREYER, C. Energy transition in megacities towards 100% renewable energy: A case for Delhi. **Renewable Energy**, [*s. l*], v. 195, p. 578-589, ago. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.073. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148122009053?via%3Dihub. Acesso em: 04 set. 2024.

RIBEIRO, L. C. S.; SOUSA FILHO, J. F.; SANTOS, G. F.; FREITAS, L. F. S. Structural decomposition analysis of Brazilian greenhouse gas emissions. **World Development Sustainability**, [*s. l*], v. 2, p. 1-14, jun. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wds.2023.100067. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772655X23000253?via%3Dihub. Acesso em: 30 ago. 2024.

SANTOS, F. S.; NASCIMENTO, K. K. F.; JALE, J, S.; JÚNIOR, S. F. A. X.; FERREIRA, T. A. E. Brazilian wind energy generation potential using mixtures of Weibull distributions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [*s. l*], v. 189, p. 1-13, jan. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113990. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123008481?via%3Dihub. Acesso em: 30 jul. 2024.

SANTOS, A. C. S.; PONTES, A. N. Emissões de gases de efeito estufa e mudanças climáticas no estado do Pará. **Revista EDUCAmazônia - Educação Sociedade e Meio Ambiente**, Humaitá, v. 15, n. 1, p. 87-105, jan./jun. 2022.

SILVA, P. R. F.; FREITAS, T. F. S**.** Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural,** Santa Maria, v. 38, n. 3, p. 843–851, maio–jun. 2008. DOI:10.1590/S0103-84782008000300044. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/hzvVJwxwkxswDVhh7ChdX9K/. Acesso em: 10 jul. 2025.

SOUSA, A. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de correlação de Spearman. O que medem e em que situações devem ser utilizados? **Correio dos Açores**, [*s. l.*], matemática, p. 19, 21 mar. 2019. Disponível em: https://repositorio.uac.pt/bitstream/10400.3/5365/1/Sousa_CA_21%20Mar%C3%A7o%202019.pdf. Acesso em: 18 set. 2024.

SU, M.; WANG, Q.; LI, R.; WANG, L. Per capita renewable energy consumption in 116 countries: The effects of urbanization, industrialization, GDP, aging, and trade openness. **Energy**, [*s. l*], v. 254, p. 1-18, set. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124289. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544222011926?via%3Dihub. Acesso em: 19 ago. 2024.

VAKULCHUK, R.; OVERLAND, I.; SURYADI, B. ASEAN's energy transition: how to attract more investment in renewable energy. **Energy, Ecology and Environment**,

[*s. l*], v. 8, p. 1-16, nov. 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s40974-022-00261-6. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s40974-022-00261-6. Acesso em: 08 set. 2024.

VEGA, L. P.; BAUTISTA, K. T.; CAMPOS, H.; DAZA, S.; VARGAS, G. Biofuel production in Latin America: A review for Argentina, Brazil, Mexico, Chile, Costa Rica and Colombia. Energy Reports, [s. l.], v. 11, p- 28-38, jun. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.060. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723014944?via%3Dihub. Acesso em: 20 jul. 2025.

VIEIRA, R.; FERNANDES, M.; OLIVEIRA, J. R. L; DELANE, M. Descarbonização do setor da construção civil através do uso do hidrogênio verde na produção do aço. **Revista SODEBRAS**, [*s. l.*], v. 19, n. 222, p. 1-8, set.–dez. 2024. DOI: 10.29367/g5y9sh46. Disponível em: https://revista.sodebras.com.br/index.php/revista/article/view/37. Acesso em: 05 jul. 2025.

WAHEED, R.; SAWAR, S.; WEI, C. The survey of economic growth, energy consumption and carbon emission. **Energy Reports**, [*s. l*], v. 5, p. 1103-1115, nov. 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.006. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719302082?via%3Dihub. Acesso em: 21 ago. 2024.

WORRELL, E.; BERNSTEIN, L.; ROY, J.; PRICE, L.; HARNISCH, J. Industrial energy efficiency and climate change mitigation. **ENERGY EFFICIENCY**, v. 2, p. 109–123, 2008. DOI: 10.1007/S12053-008-9032-8. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12053-008-9032-8. Acesso em: 20 jul. 2025.

YAPICIOGLU, P.; DEMIR, O. Minimizing greenhouse gas emissions of an industrial wastewater treatment plant in terms of water–energy nexus. **Applied Water Science**, [*s. l*], v. 11, p. 1-14, nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s13201-021-01484-4. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-021-01484-4. Acesso em: 15 set. 2024.

ZHANG, H.; SUN, W.; LI, W.; MA, G. A carbon flow tracing and carbon accounting method for exploring CO2 emissions of the iron and steel industry: An integrated material–energy–carbon hub. **Applied Energy**, [*s. l*], v. 309, p. 1-17, mar. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118485. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261921017062?via%3Dihub. Acesso em: 14 set. 2024.

ZHENG, S.; WANG, R.; MAK, T. M. W.; HSU, S.; TSANG, D. C. W. How energy service companies moderate the impact of industrialization and urbanization on carbon emissions in China? **Science of The Total Environment**, [*s. l*], v. 751, p. 1-9, jan. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141610. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969720351391?via%3Dihub. Acesso em: 19 ago. 2024.