

CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E CRESCIMENTO ECONÔMICO NO BRASIL: EVIDÊNCIAS SETORIAIS DE COINTEGRAÇÃO E CAUSALIDADE DE GRANGER

Paulo André Manhães Barbosa¹, Leonardo Bornacki de Mattos²

Resumo: Embora exista ampla literatura sobre o nexos entre consumo de energia e crescimento econômico, ainda são escassas as evidências setoriais para o caso brasileiro, o que dificulta a formulação de políticas energéticas adequadas às especificidades dos diferentes segmentos produtivos. Nesse contexto, o presente estudo analisou a relação entre consumo de energia elétrica e Produto Interno Bruto (PIB) nos setores agropecuário, industrial e de comércio e serviços da economia brasileira no período de 1970 a 2024. Para tanto, empregou-se um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM) para investigar a existência de relações de longo prazo e a direção da causalidade no sentido de Granger. Adicionalmente, realizou-se a decomposição da variância dos erros de previsão para avaliar a importância relativa dos choques entre as séries. Os resultados indicaram a existência de cointegração entre consumo de eletricidade e PIB em todos os setores analisados. Também foi verificada causalidade unidirecional do PIB para o consumo de eletricidade nos setores agropecuário e industrial, enquanto no setor de comércio e serviços foi identificada causalidade bidirecional de longo prazo. Os achados sugerem que a dinâmica entre energia e crescimento não é homogênea na economia brasileira, apresentando implicações distintas para a formulação de políticas energéticas conforme as especificidades de cada setor produtivo.

Palavras-chave: consumo de energia elétrica; PIB; causalidade de Granger; VECM.

ELECTRICITY CONSUMPTION AND ECONOMIC GROWTH IN BRAZIL: SECTORAL EVIDENCE OF COINTEGRATION AND GRANGER CAUSALITY

Abstract: Although there is extensive literature on the link between energy consumption and economic growth, sectoral evidence for the Brazilian case is still scarce, hindering the formulation of energy policies suited to the specificities of different productive segments. In this context, the present study analyzed the relationship between electricity consumption and Gross Domestic Product (GDP) in the agricultural, industrial, and trade and services sectors of the Brazilian economy from 1970 to 2024. To this end, a Vector Error Correction Model

-
- 1 Bacharel em Economia. Doutorando em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa. E-mail: pauloandremanhaesbarbosa@gmail.com
 - 2 Bacharel em Economia. Doutor em Economia Aplicada. Professor do Departamento de Economia Rural da Universidade Federal de Viçosa. E-mail: lbmattos@ufv.br

-- ARTIGO RECEBIDO EM 30/03/2026. ACEITO EM 15/07/2026. --

(VECM) was used to investigate the existence of long-term relationships and the direction of causality in the Granger sense. Additionally, the variance decomposition of forecast errors was performed to assess the relative importance of shocks between the series. The results indicated the existence of cointegration between electricity consumption and GDP in all sectors analyzed. Unidirectional causality of GDP for electricity consumption was also verified in the agricultural and industrial sectors, while in the trade and services sector, long-term bidirectional causality was identified. The findings suggest that the dynamics between energy and growth are not homogeneous in the Brazilian economy, presenting distinct implications for the formulation of energy policies according to the specificities of each productive sector.

Keywords: electricity consumption; GDP; Granger causality; VECM.

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica ocupa posição central na dinâmica de crescimento econômico e no processo de desenvolvimento produtivo das economias modernas. Além de representar um insumo essencial nos processos de industrialização, urbanização e modernização tecnológica, seu nível de consumo é frequentemente utilizado como indicador de bem-estar social e do grau de desenvolvimento econômico de um país (Wolde-Rufael, 2006; Steinberger; Roberts, 2010).

No Brasil, essa discussão assume algumas particularidades. Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2025 (BEN, 2025), divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a matriz elétrica brasileira apresenta elevada participação de fontes renováveis, com destaque para a geração hidráulica, responsável por 55,3% da oferta interna em 2024. Embora essa característica represente uma importante vantagem comparativa no que se refere ao uso de fontes mais limpas de energia, ela também torna o sistema elétrico fortemente dependente da disponibilidade hídrica.

A água, apesar de renovável, constitui um recurso limitado e sujeito a usos concorrentes, como abastecimento humano, irrigação e atividades industriais, além de ser sensível a eventos climáticos extremos e a mudanças nos regimes de precipitação. Nesse contexto, períodos prolongados de estiagem podem comprometer a segurança energética e exigir a utilização de fontes alternativas, geralmente mais custosas e intensivas em emissões. Soma-se a isso o fato de que a expansão da infraestrutura de geração e transmissão envolve custos sociais e ambientais relevantes.

Nesse cenário, compreender a dinâmica entre consumo de energia elétrica e crescimento econômico torna-se fundamental para o planejamento energético e para a formulação de políticas públicas eficientes. O trabalho seminal de Kraft e Kraft (1978), ao evidenciar empiricamente que a direção da causalidade entre consumo de energia e produto possui implicações distintas para a condução da política energética, inaugurou uma ampla agenda de pesquisa dedicada à investigação do nexo energia–crescimento. A partir desse estudo, a abordagem de causalidade no sentido de Granger (1969)³

3 A causalidade no sentido de Granger não deve ser interpretada como causalidade estrutural ou relação de causa e efeito em sentido estrito. Trata-se de um conceito baseado em capacidade preditiva: uma variável X causa Y no sentido de Granger quando seus valores defasados contribuem significativamente para a previsão de Y, após controlados os valores passados desta última.

consolidou-se como uma das principais ferramentas empíricas para identificar se a energia atua como fator indutor do crescimento econômico, se a demanda energética responde à expansão da atividade produtiva ou se ambas as variáveis se influenciam mutuamente. A identificação dessa direção causal possui implicações diretas para a definição de estratégias de conservação, expansão da oferta e promoção da eficiência energética.

Com base nas sistematizações propostas por autores como Ghali e El-Sakka (2004), Ozturk (2010) e Stern (2015), a literatura sobre o nexa energia–crescimento consolidou quatro hipóteses principais para caracterizar essa relação: (i) a hipótese do crescimento, segundo a qual o consumo de energia causa, no sentido de Granger, o crescimento econômico; (ii) a hipótese da conservação, em que o crescimento econômico causa, no sentido de Granger, o consumo de energia; (iii) a hipótese da neutralidade, que pressupõe ausência de causalidade entre as variáveis; e (iv) a hipótese de *feedback*, caracterizada pela causalidade bidirecional no sentido de Granger.

A verificação empírica dessas hipóteses fornece subsídios relevantes para decisões de política energética e ambiental. Por exemplo, quando constatada uma relação causal unidirecional do Produto Interno Bruto (PIB) para o consumo de energia elétrica (hipótese de conservação), políticas de conservação de energia baseadas no gerenciamento da demanda, que têm como objetivo reduzir o consumo final de eletricidade, a partir, por exemplo, de aumentos tarifários ou racionamentos, podem ser adotadas causando pouco ou nenhum efeito adverso no nível de produto (Ghosh, 2002; Mehrara, 2007; Huang *et al.*, 2008; Alsaedi; Tularam, 2020; Fernandes; Reddy, 2020).

Por outro lado, se for verificada uma relação unidirecional do consumo de eletricidade para o PIB (hipótese de crescimento), políticas de restrição ao consumo de energia devem ser desencorajadas, ao passo que políticas de incentivo a ampliação da oferta de energia, como a construção de grandes e pequenos empreendimentos de geração de energia, e de estímulos ao uso eficiente de eletricidade devem ser incentivadas de forma a garantir que o consumo de energia não seja um limitador do crescimento (Shiu; Lam, 2004; Paul; Bhattacharya, 2004; Thaker *et al.*, 2019; Al-Mulali *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2020).

Apesar da vasta literatura sobre o tema, grande parte dos estudos empíricos concentra-se em dados agregados em nível nacional. Ainda que essa abordagem seja importante, ela pode ocultar diferenças estruturais entre os setores econômicos, que apresentam distintos padrões de intensidade energética, participação no PIB e capacidade de incorporação tecnológica (Bowden; Payne, 2009; Abbas; Choudhury, 2013; Tang; Shahbaz, 2013; Nain *et al.*, 2017; Tiwari *et al.*, 2021). No Brasil, existem contribuições de destaque, como os trabalhos de Carminati e Scalco (2013), Gadelha e Cerqueira (2014), Pao *et al.* (2014) e Barbosa e Dos Santos (2020). Contudo, as investigações sobre o nexa energia–crescimento sob uma perspectiva setorial ainda permanecem escassas.

Tendo em vista que a economia brasileira passou por transformações significativas ao final do século XX e início do século XXI, espera-se que a relação entre consumo de energia elétrica e crescimento econômico não seja homogênea entre os setores da economia. Nesse período, observou-se a ampliação da participação do setor de comércio e serviços no produto, a perda relativa de participação da indústria de transformação e a modernização da agropecuária, marcada pela maior mecanização e incorporação tecnológica. Paralelamente,

a matriz energética dos diferentes segmentos produtivos tornou-se mais diversificada, com a expansão da eletrificação dos processos produtivos e a crescente inserção de fontes renováveis, como a biomassa, a energia eólica e a solar. Essas mudanças alteraram a intensidade e o padrão de uso da energia entre os setores, reforçando a importância de uma análise desagregada do nexo entre eletricidade e crescimento econômico.

A partir do exposto, o presente estudo tem como objetivo investigar a existência e a direção da causalidade no sentido de Granger entre o consumo de energia elétrica e o Produto Interno Bruto (PIB) nos três principais setores produtivos brasileiros: agropecuária, indústria e comércio e serviços⁴, no período de 1970 a 2024. Esse intervalo foi definido em função da disponibilidade de séries históricas consistentes e comparáveis para ambas as variáveis, uma vez que os dados setoriais de PIB e consumo de eletricidade passam a ser sistematicamente divulgados a partir da década de 1970. Além disso, o período abrange transformações estruturais relevantes na economia brasileira, permitindo capturar mudanças na composição setorial do produto e na matriz energética dos diferentes segmentos produtivos. Para tanto, empregou-se um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM), o qual permitiu analisar simultaneamente as dinâmicas de curto e longo prazo entre as variáveis, bem como identificar relações de equilíbrio de longo prazo por meio da análise de cointegração.

Ao adotar uma perspectiva setorial, este estudo buscou contribuir para a literatura ao fornecer evidências empíricas desagregadas que permitem compreender melhor a heterogeneidade do nexo energia-crescimento no Brasil, além de oferecer subsídios para a formulação de políticas energéticas diferenciadas conforme as características estruturais de cada setor.

2 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E PIB SETORIAL NO BRASIL

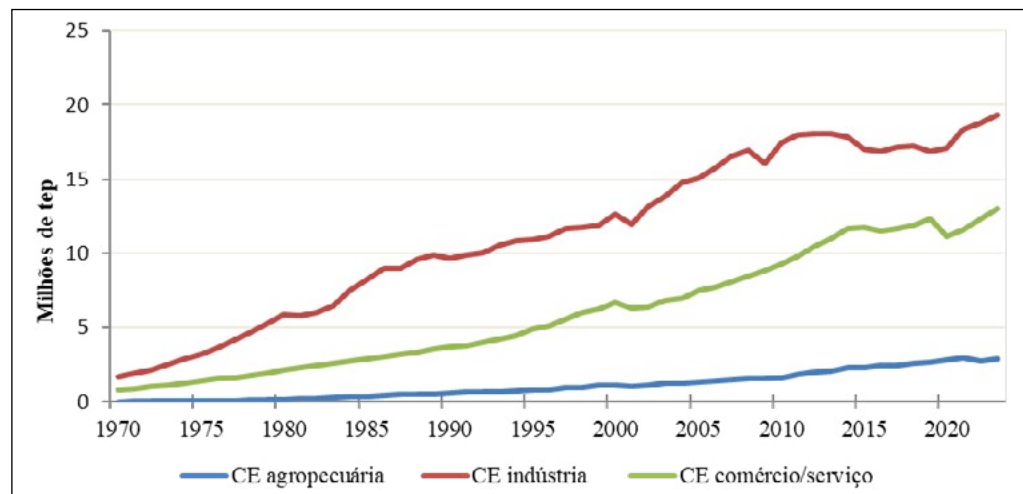
Segundo dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2025 (AEEE, 2025), disponibilizado pela EPE, o Brasil contava, até 2024, com mais de 212 milhões de habitantes e cerca de 94 milhões de unidades consumidoras de energia elétrica, das quais mais de 88% correspondiam a consumidores residenciais. Esse crescimento da base consumidora reflete a expansão do acesso à energia elétrica e a ampliação da infraestrutura energética ao longo das últimas décadas, elementos que contribuíram para a elevação sustentada da demanda por eletricidade no país.

De acordo com o Balanço Energético Nacional, no período de 1970 a 2024, o consumo final de energia elétrica apresentou taxa média de crescimento anual de aproximadamente 5%, acumulando expansão superior a 1.200% ao final do período. Tal trajetória evidencia a crescente importância da energia elétrica como insumo produtivo e como componente fundamental da estrutura econômica brasileira. A evolução setorial desse consumo pode ser observada na Figura 1, que apresenta o comportamento dos três

4 Os setores de comércio e serviços foram examinados conjuntamente, dado que as informações sobre o consumo de energia elétrica de ambos são computadas e disponibilizadas de forma conjunta pelas instituições responsáveis.

principais setores produtivos analisados neste estudo: indústria, comércio e serviços e agropecuária.

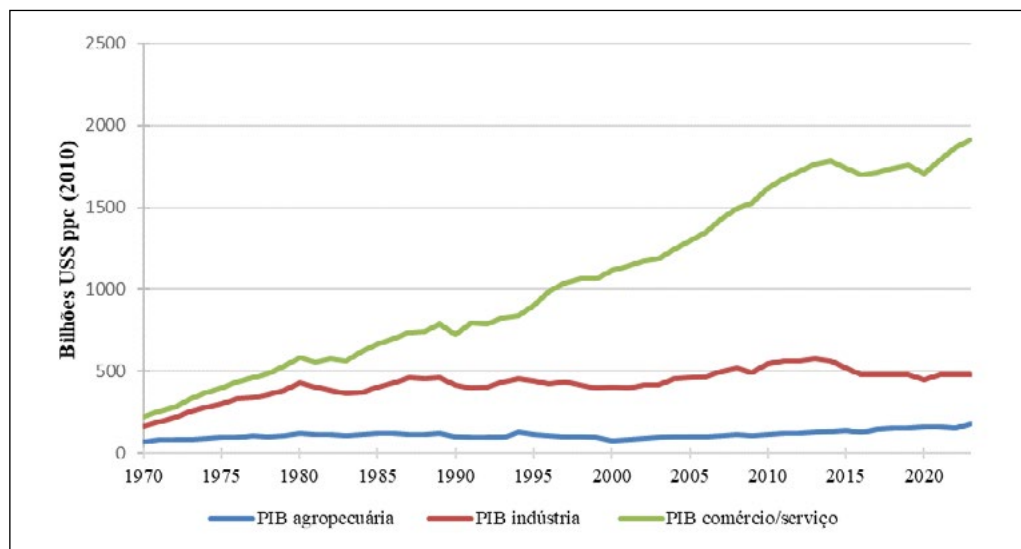
Figura 1 – Consumo setorial de energia elétrica no Brasil em toneladas equivalentes de petróleo (tep)



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN (2025).

A Figura 1 evidencia que o setor industrial apresentou, ao longo de todo o período analisado, o maior nível absoluto de consumo de energia elétrica, respondendo por mais de 45% do consumo total acumulado. Esse resultado está associado à maior intensidade energética das atividades industriais, especialmente nos segmentos de transformação e produção de bens intermediários. O setor de comércio e serviços, por sua vez, respondeu por aproximadamente 23% do consumo acumulado, refletindo sua crescente participação na estrutura produtiva nacional, enquanto o setor agropecuário representou cerca de 4%, compatível com sua menor intensidade energética relativa. No que se refere à produção setorial, a distribuição do Produto Interno Bruto (PIB) ao longo do período pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 – PIB setorial no Brasil em dólares em paridade do poder de compra (ppc) de 2010



Fonte: Elaboração própria a partir de dados do BEN (2025).

A Figura 2 indica que o setor de comércio e serviços foi o principal responsável pelo crescimento do produto agregado ao longo do período analisado, respondendo por aproximadamente 53,9% do PIB acumulado, seguido do setor industrial (22,8%) e da agropecuária (5,9%). Essa configuração evidencia uma transformação estrutural da economia brasileira, marcada pela expansão do setor terciário e pela redução relativa da participação industrial no produto.

A comparação entre as Figuras 1 e 2 sugere que a relação entre consumo de energia elétrica e crescimento econômico não se manifesta de forma homogênea entre os setores. Enquanto a indústria apresenta elevada participação no consumo energético, sua participação no produto é relativamente inferior à observada no setor de comércio e serviços, o que pode refletir diferenças na intensidade energética e na estrutura tecnológica dos segmentos produtivos. Essas evidências descritivas reforçam a hipótese de que o nexos energia-crescimento pode assumir padrões distintos conforme o setor analisado, justificando a adoção de uma abordagem econométrica desagregada.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Duas vertentes principais podem ser identificadas na literatura que analisa a relação entre consumo de energia e crescimento econômico. A primeira sustenta que o uso de energia moderna (ex.: petróleo, gás natural e eletricidade) constitui elemento fundamental para o progresso econômico, social e tecnológico, desempenhando papel complementar aos fatores capital e trabalho no processo produtivo. Nessa perspectiva, a energia pode atuar tanto como fator limitante quanto como impulsionador da atividade econômica,

a depender de sua disponibilidade, custo e qualidade (Stern, 2015; Gadelha; Cerqueira, 2014). Tal abordagem está associada à chamada hipótese do crescimento, segundo a qual o consumo de energia causa o crescimento econômico no sentido de Granger.

A segunda vertente argumenta que o papel da energia pode ser secundário ou até mesmo irrelevante para o crescimento econômico. A hipótese da conservação sustenta que a causalidade ocorre no sentido inverso, isto é, do crescimento econômico para o consumo de energia. Nesse caso, a expansão do produto implicaria maior demanda por energia, mas políticas de conservação energética não comprometeriam significativamente o crescimento. Já a hipótese da neutralidade pressupõe ausência de causalidade entre as variáveis, sendo frequentemente justificada pelo argumento de que o custo da energia representa pequena proporção do PIB, de modo que variações no consumo energético teriam impacto limitado sobre o produto agregado (Ghali; Sakka, 2004).

Do ponto de vista teórico, os estudos empíricos que investigam o nexo energia-crescimento frequentemente se fundamentam na ampliação do modelo de crescimento neoclássico, incorporando a energia como fator adicional de produção. Nesse contexto, estudos como o de Sari e Soytas (2007), Pala (2020) e Churchill e Ivanovski (2020), por exemplo, tomam como base uma função de produção agregada neoclássica que pode ser especificada da seguinte maneira:

$$Y_t = F(K_t, L_t, E_t) \quad (1)$$

onde Y_t representa o produto agregado, K_t o estoque de capital, L_t o nível de emprego e E_t o consumo total de energia no período t .

Assumindo, por exemplo, uma forma funcional Cobb-Douglas e tomando logaritmos, é possível interpretar os coeficientes associados aos fatores como elasticidades do produto. Nessa estrutura, espera-se, em termos teóricos, que a elasticidade do produto em relação à energia seja positiva, sugerindo que aumentos no consumo energético estejam associados a elevações no nível de produto. Tal relação fundamenta a possibilidade de causalidade do consumo de energia para o crescimento econômico.

Uma abordagem alternativa consiste na modelagem de uma função de demanda por energia. Conforme proposto por Schmidt e Lima (2004), o consumo de energia pode ser especificado como função da renda, dos preços da energia e de bens substitutos:

$$E_t = G(P_t, Y_t, L_t, S_t) \quad (2)$$

onde E_t representa o consumo de energia, P_t a tarifa de energia (preço), Y_t a renda ou nível de atividade econômica, L_t o preço dos bens complementares (eletrodomésticos) e S_t o preço de bens substitutos. Nesse caso, o crescimento da renda tende a exercer efeito positivo sobre a demanda por energia.

A coexistência dessas duas abordagens teóricas (energia como insumo produtivo e energia como bem demandado em função da renda) sugere a possibilidade de causalidade bidirecional entre consumo de energia e produto, configurando a chamada hipótese de

feedback. Sob essa perspectiva, tanto o consumo de energia quanto o produto podem ser tratados como variáveis endógenas em modelos econométricos, justificando a utilização de estruturas como VAR ou VECM para investigar a direção da causalidade no sentido de Granger entre essas variáveis.

Cabe destacar que embora as funções apresentadas incorporem variáveis como capital, trabalho, preços da energia e bens substitutos, sua finalidade nesta seção é essencialmente teórica, buscando ilustrar os principais mecanismos pelos quais energia e atividade econômica podem estar relacionados. Assim, a investigação empírica desenvolvida neste estudo não pretende estimar diretamente essas funções estruturais, mas analisar a direção da causalidade no sentido de Granger entre consumo de energia elétrica e PIB setorial, cuja especificação econométrica é apresentada na seção seguinte.

4 METODOLOGIA E DADOS

No estudo da causalidade de Granger entre consumo de energia e crescimento econômico, um dos primeiros desafios metodológicos consiste na definição da estrutura do modelo empírico, particularmente na escolha entre especificações bivariadas e multivariadas. Conforme argumentam Smyth e Narayan (2015), essa decisão envolve um importante *trade-off*: modelos bivariados podem estar sujeitos ao viés decorrente da omissão de variáveis relevantes, enquanto modelos multivariados tendem a enfrentar problemas de parametrização excessiva e perda de graus de liberdade, especialmente quando se trabalha com séries temporais longas.

Ainda segundo Smyth e Narayan (2015), na ausência de dados consistentes para a construção de modelos multivariados, especificações bivariadas podem ser suficientes para investigar a causalidade no sentido de Granger entre duas variáveis. Fuinhas e Marques (2012) reforçam esse argumento ao destacar que, embora a omissão de variáveis possa reduzir a probabilidade de detectar relações de causalidade, quando estas são identificadas em modelos bivariados não há necessidade de incorporar variáveis adicionais caso o objetivo central do estudo seja investigar a direção da relação causal.

Considerando a indisponibilidade de séries anuais setoriais longas e consistentes para variáveis como estoque de capital, trabalho e preços relativos da energia ao longo de todo o período analisado (1970–2024), optou-se pela utilização de uma especificação bivariada. Essa estratégia tem sido empregada em estudos sobre o nexo entre consumo de energia e crescimento econômico, como os de Dogan *et al.* (2016), Nain *et al.* (2017) e Tiwari *et al.* (2021), especialmente quando o objetivo consiste em examinar a direção da causalidade entre essas variáveis. Nesse contexto, assume-se que o nível de produto pode ser expresso como função do consumo de eletricidade como segue:

$$PIB_{it} = f(CE_{it}) \quad (3)$$

em que $i = 1,2,3$ representa cada um dos três setores analisados (indústria, comércio e serviços e agropecuária) e $t = 1,...,55$ ao período analisado (1970–2024). PIB denota o Produto Interno Bruto e CE o consumo de energia elétrica setorial.

Para investigar a dinâmica donexo causal entre consumo de eletricidade e PIB, o presente estudo seguiu uma abordagem baseada na realização de testes de causalidade no sentido de Granger (1969) em um contexto de series temporais a partir da estimação de um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM) para cada um dos setores individualmente.

Com o intuito de facilitar a apresentação do método, esta seção foi dividida em duas subseções, a saber: 4.1 descrição do Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM) e a causalidade de Granger em um VECM; e 4.2 Descrição, tratamento e fonte dos dados.

4.1 Causalidade de Granger em um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM)

De acordo com Pao *et al.* (2014), o procedimento para a análise de causalidade de Granger em um VECM pode ser dividido em três etapas principais. Primeiro, é necessário determinar a ordem de integração de cada série do modelo, uma vez que grande parte dos testes de cointegração empregados na etapa seguinte requer que as variáveis apresentem a mesma ordem de integração. Para essa finalidade, optou-se pelo teste de raiz unitária Dickey-Fuller de Mínimos Quadrados Generalizados (DF-GLS), que, segundo Maddala e Kim (1998), apresenta maior poder estatístico (probabilidade de não cometer erro do Tipo II) do que testes mais tradicionais, como o Dickey-Fuller Aumentado (ADF). Adicionalmente, considerando que o período analisado (1970–2024) abrange eventos associados a mudanças estruturais na economia brasileira, aplicou-se, como análise de robustez, o teste de raiz unitária de Zivot e Andrews (1992), que permite a identificação endógena de uma quebra estrutural na série.

Na sequência, determinada a ordem de integração das variáveis, a etapa seguinte consiste em verificar a existência de relações de equilíbrio de longo prazo entre as séries por meio da análise de cointegração. Para esse propósito, foi empregado o teste de cointegração de Johansen, baseado na estimação de um Modelo de Autorregressão Vetorial (VAR). Como verificação adicional da robustez dos resultados, também foi aplicado o teste de cointegração de Gregory e Hansen (1996), que admite uma quebra estrutural endógena na relação de longo prazo entre as variáveis.

Por último, caso as séries de dados apresentem a mesma ordem de integração e a presença de relações de equilíbrio de longo prazo (relações de cointegração) seja verificada, um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM) pode ser estimado⁵.

Baseado na abordagem proposta por Oh e Lee (2004) e Yoo (2005), um VECM foi especificado para cada um dos setores analisados da seguinte maneira:

5 Caso as variáveis sejam não-estacionárias e não cointegradas, deve-se utilizar o teste de Granger padrão baseado em um VAR em diferenças. Neste caso a ênfase da análise é no curto prazo, visto que não é possível incorporar a análise de longo prazo.

(a) Agropecuária

$$\Delta \text{LPIBAG}_t = \beta_{10} + \sum_{i=1}^{L_{11}} \beta_{11i} \Delta \text{LPIBAG}_{t-i} + \sum_{j=1}^{L_{12}} \beta_{12j} \Delta \text{LCEAG}_{t-j} + \beta_{13} \varepsilon_{t-1} + u_{1t} \quad (4)$$

$$\Delta \text{LCEAG}_t = \beta_{20} + \sum_{i=1}^{L_{21}} \beta_{21i} \Delta \text{LPIBAG}_{t-i} + \sum_{j=1}^{L_{22}} \beta_{22j} \Delta \text{LCEAG}_{t-j} + \beta_{23} \eta_{t-1} + u_{2t} \quad (5)$$

(b) Indústria

$$\Delta \text{LPIBIN}_t = \beta_{30} + \sum_{i=1}^{L_{31}} \beta_{31i} \Delta \text{LPIBIN}_{t-i} + \sum_{j=1}^{L_{32}} \beta_{32j} \Delta \text{LCEIN}_{t-j} + \beta_{33} \varepsilon_{t-1} + u_{3t} \quad (6)$$

$$\Delta \text{LCEIN}_t = \beta_{40} + \sum_{i=1}^{L_{41}} \beta_{41i} \Delta \text{LPIBIN}_{t-i} + \sum_{j=1}^{L_{42}} \beta_{42j} \Delta \text{LCEIN}_{t-j} + \beta_{43} \eta_{t-1} + u_{4t} \quad (7)$$

(c) Comércio/Serviços

$$\Delta \text{LPIBCS}_t = \beta_{50} + \sum_{i=1}^{L_{51}} \beta_{51i} \Delta \text{LPIBCS}_{t-i} + \sum_{j=1}^{L_{52}} \beta_{52j} \Delta \text{LCECS}_{t-j} + \beta_{53} \varepsilon_{t-1} + u_{5t} \quad (8)$$

$$\Delta \text{LCECS}_t = \beta_{60} + \sum_{i=1}^{L_{61}} \beta_{61i} \Delta \text{LPIBCS}_{t-i} + \sum_{j=1}^{L_{62}} \beta_{62j} \Delta \text{LCECS}_{t-j} + \beta_{63} \eta_{t-1} + u_{6t} \quad (9)$$

em que, LCEAG_t , LCEIN_t e LCECS representam o logaritmo natural do consumo de energia elétrica dos setores agropecuário, industrial e comercial/serviços, respectivamente. LPIBAG_t , LPIBIN_t e LPIBCS_t representam o logaritmo natural do Produto Interno Bruto dos setores agropecuário, industrial e comercial/serviços, respectivamente. L representa o número de defasagens, os β 's representam os parâmetros a serem estimados, os u_t 's representam os termos de erros serialmente não correlacionados, e os ε_{t-1} 's e η_{t-1} 's são termos de correção de erros (ECT) defasados obtidos das equações de cointegração referentes ao modelo de cada setor.

Tomando o setor agropecuário como exemplo, equações (4) e (5), a presença de causalidade de curto e longo prazo podem ser testadas. Considere a equação (4). Se os coeficientes estimados da variável consumo de eletricidade defasada (β_{12} 's) forem estatisticamente significativos, em conjunto, então, isso implica que o consumo de eletricidade causa no sentido de Granger o PIB. Neste caso, teríamos a causalidade de Granger fraca. Pode-se interpretar a causalidade de Granger fraca, de acordo com Asafu-Adjaye (2000), como causalidade de “curto prazo”, visto que a variável dependente responde somente a choques de curto prazo no ambiente estocástico. Por outro lado, a causalidade de

longo prazo pode ser encontrada testando a significância estatística do coeficiente associado do Termo de Correção de Erro (ECT) representado por β_{13} . O coeficiente associado ao ECT representa o desvio da variável dependente do equilíbrio de longo prazo. Se, por exemplo, β_{13} for zero, então o consumo de energia não responde a desvios do equilíbrio de longo prazo em períodos passados, não havendo, portanto, causalidade de longo prazo (Oh; Lee, 2004).

Similarmente, é possível examinar se o PIB causa, no sentido de Granger, o consumo de eletricidade na Equação (5). Em suma, nas equações (4) e (5), as variações nas respectivas variáveis dependentes são causadas não apenas por variações passadas, mas também pelo desequilíbrio em nível do período anterior. Dado isso, é possível testar a presença de causalidade de curto e de longo prazo (Yoo, 2005).

Como complemento à análise de causalidade, também foi realizada a decomposição da variância dos erros de previsão, conforme sugerido por Ghali e Sakka (2004) e Alsaedi e Tularam (2020), a fim de avaliar a contribuição relativa de cada variável na explicação da variância do erro de previsão ao longo do horizonte temporal.

4.2 Descrição, tratamento e fonte dos dados

Foram utilizados dados anuais para o período de 1970 a 2024, abrangendo os setores agropecuário, industrial e de comércio e serviços. O PIB setorial foi obtido no Balanço Energético Nacional (BEN, 2025), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) com base nas Contas Nacionais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). O BEN disponibiliza as séries do PIB setorial em dólares, a preços constantes de 2010 e em paridade do poder de compra (PPC)⁶, para todo o período analisado, permitindo a utilização de uma base homogênea nas estimativas realizadas neste estudo. Já o consumo setorial de energia elétrica, medido em toneladas equivalentes de petróleo (tep), corresponde ao total de eletricidade utilizado por cada setor, tendo como fonte primária o Boletim SIESE, também acessado por meio do BEN (2025).

Todas as variáveis foram transformadas em logaritmos naturais, permitindo interpretar os coeficientes como elasticidades e reduzir problemas de heterocedasticidade. Além disso, tal transformação contribui para evitar problemas de *overdifferencing* associados à aplicação sucessiva de operadores de diferença em séries integradas, conforme discutido por Charemza e Deadman (1997).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como primeiro passo da análise empírica, verificou-se a estacionariedade e a ordem de integração de todas as séries de dados envolvidas no estudo. Inicialmente, foi aplicado o teste de raiz unitária DF-GLS. Os resultados obtidos para as séries em logaritmos naturais são apresentados na Tabela 1.

6 A utilização desse tipo de unidade de medida para o PIB atende a uma padronização internacional seguida por outras instituições como o *World Bank*, *International Energy Agency* e o Fundo Monetário Internacional (FMI).

Tabela 1 – Resultados do teste de raiz unitária DF-GLS para as séries logaritmizadas do PIB e do CE de cada setor (1970–2024)

Variáveis	Em Nível	Primeira Diferença
LCEAG	-0,665	-4,831***
LPIBAG	-1,822	-6,738***
LCEIN	-0.597	-5.697***
LPIBIN	-1,581	-4.356***
LCECS	-0,847	-5,250***
LPIBCS	-1,040	-3,135*
Nível de Significância	Valores Críticos	
1%	-3,770	
5%	-3,190	
10%	-2,890	

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.
Nota: LCE representa o logaritmo natural do consumo de energia elétrica setorial; LPIB representa o logaritmo natural do Produto Interno Bruto setorial. AG = agropecuária; IN = indústria; CS = comércio e serviços. (***) e (*) denotam significância estatística aos níveis de 1% e 10%, respectivamente.

Os resultados indicam que, ao nível de significância de 1%, não se rejeita a hipótese nula de presença de raiz unitária para nenhuma das séries em nível. Entretanto, ao considerar as séries em primeira diferença, a hipótese nula é rejeitada para todas as variáveis ao nível de 1%, com exceção da série LPIBCS, cuja estacionariedade é verificada ao nível de 10%. Dessa forma, conclui-se que todas as variáveis podem ser classificadas como integradas de ordem um, I(1).

Como verificação adicional da robustez desses resultados, aplicou-se o teste de raiz unitária de Zivot e Andrews (1992), que permite a ocorrência de uma quebra estrutural endógena na série. A incorporação desse procedimento mostra-se particularmente relevante em razão do longo horizonte temporal analisado, marcado por eventos econômicos capazes de provocar mudanças estruturais nas séries, como os choques do petróleo, o racionamento de energia de 2001 e a crise econômica de 2015. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados do teste de raiz unitária Zivot–Andrews com quebra estrutural endógena para as séries logaritmizadas do PIB e do CE de cada setor (1970–2024)

Variáveis	Estatística ZA	Ano da quebra
LCEAG	-4,601	1978
LPIBAG	-4,018	1995
LCEIN	-3,655	2014
LPIBIN	-4,431	2010
LCECS	-3,498	2015
LPIBCS	-4,962	2015
Nível de Significância	Valores Críticos	
1%	-5,57	
5%	-5,08	
10%	-4,82	

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.
Nota: LCE representa o logaritmo natural do consumo de energia elétrica setorial; LPIB representa o logaritmo natural do Produto Interno Bruto setorial. AG = agropecuária; IN = indústria; CS = comércio e serviços. O teste foi estimado considerando quebra simultânea no intercepto e na tendência, com seleção automática de defasagens pelo Critério de Informação Bayesiano (BIC).

Os resultados do teste de Zivot–Andrews corroboram as evidências obtidas pelo teste DF-GLS. Em todos os casos, a hipótese nula de presença de raiz unitária com quebra estrutural endógena não pôde ser rejeitada, indicando que as séries permanecem não estacionárias em nível mesmo quando se admite uma mudança estrutural na trajetória dos dados. Os anos de quebra estimados concentram-se em diferentes períodos da amostra, refletindo alterações específicas na dinâmica de cada setor. Em conjunto, os resultados dos dois testes reforçam a conclusão de que todas as variáveis são integradas de ordem um, $I(1)$, justificando a realização dos testes de cointegração na etapa subsequente da análise.

Dado que todas as séries são integradas de mesma ordem, é possível averiguar se possuem, entre si, relações de equilíbrio de longo prazo, ou seja, se são cointegradas. Para esse objetivo, foi empregado inicialmente o procedimento de Johansen, o qual também foi utilizado por Oh e Lee (2004). Como esse procedimento é baseado na estimação de um modelo VAR, inicialmente determinou-se o número ótimo de defasagens utilizando os critérios de informação LR, FPE, AIC, Schwarz e Hannan-Quinn, além do teste LM de autocorrelação serial dos resíduos. Ao final, optou-se pela utilização de duas defasagens para todos os modelos, garantindo a ausência de autocorrelação serial dos resíduos. Considerando a inclusão de uma tendência determinística linear como variável exógena, realizou-se então o teste de Johansen, cujos resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados do Teste do Traço e do Máximo Autovalor

Nº de vetores de cointegração	Agropecuária		Indústria		Comércio/Serviços	
	Traço	Máximo Autovalor	Traço	Máximo Autovalor	Traço	Máximo Autovalor
Nenhum**	32,875	25,474	45,507	31,629	34,674	23,155
Pelo Menos 1	7,401	7,401	13,878	13,877	11,519	11,520

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: Adotou-se o nível de significância de 5% e o intervalo de defasagem de 1-1; (**) denota a rejeição da hipótese ao nível de 5%.

Os testes do Traço e do Máximo Autovalor indicam a rejeição da hipótese nula de inexistência de vetor de cointegração ao nível de 5% para todos os setores analisados. Por outro lado, não se rejeita a hipótese de existência de pelo menos um vetor de cointegração. Assim, conclui-se que há evidência de uma relação de equilíbrio de longo prazo entre o consumo de energia elétrica e o PIB setorial. Os vetores de cointegração normalizados para o consumo de energia elétrica encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Vetores de cointegração normalizados (LCE normalizada)

Variáveis	Agropecuária	Indústria	Comércio/Serviços
LCE	1,0000	1,0000	1,0000
Constante	69,3593 (33,2311)	-6,6279 (13,8625)	-10,4135 (8,7048)
LPIB	-3,3623 (1,3264)	-0,3781 (0,5233)	-0,1591 (0,3274)

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.

Nota: LCE – log. do consumo de energia elétrica setorial; LPIB – log. do Produto Interno Bruto setorial. Erros-padrão entre parênteses.

Os coeficientes estimados indicam uma relação positiva de longo prazo entre o nível de atividade econômica e o consumo de eletricidade nos três setores analisados. Especificamente, os sinais dos coeficientes associados ao PIB são consistentes com a hipótese de que o crescimento da atividade econômica está associado ao aumento do consumo de energia elétrica no longo prazo.

A presença de cointegração entre as variáveis sugere que o consumo de energia elétrica e o PIB compartilham uma trajetória comum de longo prazo, afastando a possibilidade de regressões espúrias típicas de séries não estacionárias não relacionadas (Ghosh, 2002). Ademais, conforme argumentam Engle e Granger (1987), a existência de cointegração implica a presença de causalidade de Granger em pelo menos uma direção. A partir dos vetores estimados, pode-se representar a relação de equilíbrio de longo prazo entre as variáveis. A normalização pode ser realizada conforme a direção de causalidade identificada na etapa seguinte da análise, permitindo expressar o PIB como função do consumo de energia ou vice-versa.

Como verificação complementar da robustez dessas evidências, aplicou-se o teste de cointegração de Gregory e Hansen (1996), o qual permite a existência de uma quebra estrutural endógena na relação de longo prazo entre as variáveis. Diferentemente do procedimento de Johansen, esse teste admite que a relação de cointegração possa sofrer alterações decorrentes de mudanças estruturais ocorridas ao longo da amostra. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do teste de cointegração de Gregory–Hansen com quebra estrutural endógena

Setor	Estatística ADF	Estatística Zt	Ano da quebra
Agropecuária	-5,63**	-5,69**	1998
Indústria	-5,47*	-5,80**	2006/2007
Comércio/Serviços	-5,75**	-5,79**	2001

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.
Nota: O teste foi estimado considerando quebra simultânea no intercepto, na tendência e na relação de longo prazo, com seleção automática de defasagens pelo Critério de Informação Bayesiano (BIC). (**) e (*) indicam rejeição da hipótese nula aos níveis de significância de 5% e 10%, respectivamente.

Os resultados do teste de Gregory–Hansen corroboram aqueles obtidos pelo procedimento de Johansen. A hipótese nula de ausência de cointegração com quebra estrutural foi rejeitada para os três setores analisados, ainda que com diferentes níveis de significância estatística. As datas de quebra identificadas concentram-se em períodos compatíveis com importantes mudanças econômicas e institucionais observadas no país, indicando que a relação de equilíbrio de longo prazo entre consumo de energia elétrica e PIB permanece válida mesmo quando se admite a ocorrência de mudanças estruturais endógenas. Dessa forma, os resultados reforçam a robustez da evidência de cointegração e fornecem suporte adicional para a estimação do Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM).

Com o objetivo de determinar a direção da causalidade, bem como a dinâmica de curto e longo prazo entre o PIB setorial e o consumo de energia elétrica, empregou-se um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM), apropriado para a análise de relações entre variáveis integradas de mesma ordem e cointegradas. Essa abordagem é amplamente utilizada na literatura empírica, como em Oh e Lee (2004) e Gadelha e Cerqueira (2014). A Tabela 6 apresenta os resultados dos testes de causalidade de Granger no contexto do VECM estimado para cada setor.

Tabela 6 – Teste de Causalidade de Granger Baseado em um VECM

Setor	Variável Dependente	Fonte de Causalidade (Variável Explicativa)	Curto Prazo (Wald) ^a	Longo Prazo (ECT) ^b
Agropecuária	Δ LCEAG	Δ LPIBAG	3,041*	-0,035***
	Δ LPIBAG	Δ LCEAG	0,395	0,005
Indústria	Δ LCEIN	Δ LPIBIN	0,961	-0,063***
	Δ LPIBIN	Δ LCEIN	0,970	-0,013
Comércio/ Serviços	Δ LCECS	Δ LPIBCS	1,010	-0,100***
	Δ LPIBCS	Δ LCECS	1,228	-0,105***

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.
Nota: a,b denota, respectivamente, que foi utilizado o teste Wald e teste t; NS indica que é não significativo; (***) e (*) indica que é significativo a 1% e 10%, respectivamente.

Com relação ao setor agropecuário, os resultados indicam a existência de causalidade unidirecional do PIB agropecuário para o consumo de energia elétrica tanto no curto quanto no longo prazo. A causalidade de curto prazo é confirmada pela significância conjunta dos coeficientes das defasagens da variável PIB no teste de Wald ao nível de 10%. Já a causalidade de longo prazo é evidenciada pela significância estatística do termo de correção de erro (ECT) na equação do consumo de energia elétrica ao nível de 1%, indicando que desvios do equilíbrio de longo prazo são corrigidos por meio de ajustes na variável consumo de energia.

Esse resultado é consistente com a hipótese da conservação, segundo a qual o crescimento econômico precede e determina a expansão do consumo de energia, sem que o inverso necessariamente ocorra. Evidências semelhantes foram encontradas por Abbas e Choudhry (2013), que, ao investigarem a economia do Paquistão por meio de modelos de cointegração e causalidade de Granger, identificaram causalidade unidirecional do crescimento econômico para o consumo de energia. De forma semelhante, Dogan *et al.* (2016), ao analisarem diferentes regiões da Turquia utilizando modelos VECM, também encontraram predominância da hipótese da conservação, sugerindo que o consumo energético responde ao dinamismo da atividade econômica.

Do ponto de vista econômico, esse comportamento pode ser explicado pelas características do próprio setor agropecuário brasileiro. Embora a eletricidade desempenhe papel relevante em atividades como irrigação, armazenamento, beneficiamento e mecanização, o desempenho do setor permanece fortemente condicionado por fatores como disponibilidade de terra, condições climáticas, incorporação de tecnologias agrícolas, crédito rural e demanda por commodities. Nesse contexto, a expansão da produção agropecuária tende a elevar a demanda por energia elétrica, ao passo que aumentos no consumo de eletricidade, isoladamente, não são suficientes para induzir o crescimento do produto setorial.

Os resultados obtidos também reforçam a percepção de que a eletricidade atua como um insumo ajustável à dinâmica produtiva do setor, e não como fator limitante ao crescimento no período analisado. Em termos de política econômica, isso sugere que medidas voltadas à racionalização do consumo de energia ou ao aumento da eficiência energética tendem a produzir impactos limitados sobre o crescimento da agropecuária, desde que não comprometam a disponibilidade do insumo. Ao mesmo tempo, investimentos em infraestrutura elétrica rural e na ampliação da geração distribuída podem acompanhar a expansão da atividade econômica, contribuindo para atender ao aumento da demanda energética decorrente do próprio crescimento do setor.

No que se refere ao setor industrial, apenas o coeficiente do termo de correção de erro na equação do consumo de energia elétrica mostrou-se estatisticamente significativo ao nível de 1%, indicando a presença de causalidade unidirecional do PIB industrial para o consumo de eletricidade exclusivamente no longo prazo. A ausência de causalidade de curto prazo sugere que variações transitórias na atividade econômica não se traduzem imediatamente em alterações no consumo de energia elétrica. Por outro lado, no longo prazo, a expansão da produção industrial é acompanhada por aumentos graduais da demanda por eletricidade, evidenciando um processo de ajuste em direção ao equilíbrio de longo prazo.

Esse resultado é consistente com a hipótese da conservação e encontra respaldo na literatura internacional. Murugan *et al.* (2012), ao investigarem a relação entre consumo de eletricidade e crescimento econômico no Paquistão por meio de modelos de cointegração e causalidade de Granger, identificaram causalidade unidirecional do crescimento econômico para o consumo de energia. De forma semelhante, Tiwari *et al.* (2021), utilizando um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM) para a economia indiana, verificaram que a expansão da atividade econômica precede o aumento do consumo de eletricidade, reforçando a predominância da hipótese da conservação em economias emergentes.

Sob a perspectiva econômica, esse comportamento pode estar associado às características estruturais da indústria. Embora a eletricidade constitua um insumo essencial para diversos segmentos industriais, o desempenho do setor depende simultaneamente de fatores como investimento em capital físico, incorporação de novas tecnologias, demanda interna e externa, condições de crédito e expectativas empresariais. Dessa forma, aumentos no consumo de eletricidade, isoladamente, não são suficientes para impulsionar a produção industrial. Em contrapartida, à medida que a atividade econômica se expande e a capacidade produtiva é ampliada, a demanda por eletricidade tende a crescer de forma gradual, refletindo a intensificação do processo produtivo e a maior utilização da infraestrutura instalada.

Em termos de política econômica, os resultados sugerem que medidas voltadas à eficiência energética ou à conservação de energia dificilmente comprometeriam o crescimento industrial no curto prazo. Contudo, a expansão sustentada da atividade manufatureira requer planejamento energético de longo prazo, capaz de assegurar o fornecimento de eletricidade em níveis compatíveis com o aumento da capacidade produtiva e com a crescente incorporação de tecnologias intensivas em energia.

Para o setor de comércio e serviços, os coeficientes dos termos de correção de erro mostraram-se estatisticamente significativos em ambas as equações ao nível de 1%, indicando causalidade bidirecional de longo prazo entre o PIB e o consumo de eletricidade. Esse resultado caracteriza a hipótese de *feedback*, segundo a qual crescimento econômico e consumo de energia se reforçam mutuamente ao longo do tempo. Evidência semelhante foi encontrada por Bowden e Payne (2009), que, ao analisarem os Estados Unidos por meio de modelos de cointegração e causalidade de Granger, identificaram uma relação bidirecional entre consumo de eletricidade e atividade econômica no setor comercial, sugerindo que políticas energéticas e políticas de crescimento econômico são mutuamente dependentes.

Os resultados obtidos podem ser compreendidos a partir das características estruturais do setor de comércio e serviços. Diferentemente da agropecuária e da indústria, grande parte das atividades desse segmento depende diretamente do fornecimento contínuo de eletricidade para o funcionamento de sistemas de iluminação, climatização, refrigeração, telecomunicações, processamento de dados, equipamentos eletrônicos e tecnologias da informação. Além disso, a crescente digitalização das atividades econômicas, a expansão do comércio eletrônico e a maior incorporação de serviços intensivos em tecnologia tornam a eletricidade um insumo essencial para a continuidade das operações produtivas. Nesse contexto, a expansão da atividade econômica eleva a demanda por energia elétrica e, simultaneamente, a disponibilidade de energia favorece ganhos de produtividade, expansão da oferta de serviços e crescimento do produto setorial, justificando a presença da hipótese de *feedback*.

Em termos de política econômica, instabilidades no fornecimento ou aumentos persistentes nos custos da energia podem produzir efeitos diretos sobre o desempenho do setor. Em contrapartida, investimentos em confiabilidade do sistema elétrico, modernização das redes de distribuição, digitalização da infraestrutura e diversificação da matriz elétrica tendem a favorecer simultaneamente o consumo de energia e a expansão da atividade econômica, reforçando a interdependência observada entre essas variáveis no longo prazo.

A análise setorial evidencia que a direção da causalidade no nexo energia-crescimento não é homogênea na economia brasileira. Nos setores agropecuário e industrial, os resultados corroboram a hipótese da conservação, indicando que a expansão da atividade econômica precede o aumento do consumo de energia elétrica, sem evidências de que a eletricidade atue como fator indutor do crescimento econômico. Em contrapartida, o setor de comércio e serviços apresentou evidências da hipótese de *feedback*, caracterizada pela causalidade bidirecional entre consumo de energia elétrica e PIB no longo prazo.

Esses resultados sugerem que o papel da energia elétrica difere substancialmente entre os setores produtivos. Enquanto na agropecuária e na indústria a demanda por eletricidade responde predominantemente ao crescimento da produção, no setor de comércio e serviços a energia elétrica assume simultaneamente o papel de insumo e de condicionante da expansão econômica. Tal evidência reforça a importância de abordagens desagregadas na investigação do nexo energia-crescimento e indica que políticas de planejamento energético, expansão da infraestrutura elétrica e transição para fontes mais sustentáveis devem considerar as especificidades de cada segmento da economia brasileira.

De forma a complementar e conferir maior robustez aos resultados obtidos pelos testes de causalidade de Granger, procedeu-se à decomposição da variância dos erros de previsão das variáveis do sistema. Essa técnica permite quantificar a importância relativa dos choques próprios e dos choques provenientes da outra variável na explicação da variância do erro de previsão ao longo do horizonte temporal. Dessa forma, torna-se possível verificar se a dinâmica de transmissão identificada pelos testes de causalidade também se manifesta na magnitude das interações entre as variáveis. Os resultados são apresentados na Tabela 7, considerando a decomposição baseada na ordenação de Cholesky com a sequência $LPIB \rightarrow LCE^7$.

Tabela 7 - Decomposição da variância dos erros de previsão do PIB e do consumo de energia elétrica dos setores agropecuário, industrial e comercial/serviços (1970–2024)

Agropecuária				
Período (anos)	Decomposição da variância do LPIBAG		Decomposição da variância do LCEAG	
	LCEAG	LPIBAG	LCEAG	LPIBAG
1	0,000000	100,0000	97,70423	2,29577
5	0,720973	99,27903	55,44164	44,55836
10	0,793439	99,20656	30,39809	69,60191
15	0,793992	99,20601	18,56786	81,43214
20	0,780292	99,21971	12,50916	87,49084
Indústria				
Período (anos)	Decomposição da variância do LPIBIN		Decomposição da variância do LCEIN	
	LCEIN	LPIBIN	LCEIN	LPIIN
1	0,000000	100,0000	50,15862	49,84138
5	0,908757	99,09124	57,41866	42,58134
10	0,622274	99,37773	51,33048	48,66952
15	0,412798	99,58720	44,12067	55,87933
20	0,315028	99,68497	37,61433	62,38567
Comércio/Serviços				
Período (anos)	Decomposição da variância do LPIBCS		Decomposição da variância do LCECS	
	LCECS	LPIBCS	LCECS	LPIBCS
1	0,000000	100,0000	95,85793	4,142072
5	0,582272	99,41773	87,26669	12,73331
10	4,808406	95,19159	83,00334	16,99666
15	10,31096	89,68904	79,42009	20,57991
20	15,06780	84,9322	76,47607	23,52393

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.
Nota: LCE – log. do consumo de energia elétrica setorial (AG – agropecuário, IN – Industrial e CS – comercial/serviços); LPIB – log. do Produto Interno Bruto setorial (AG – agropecuário, IN – Industrial e CS – comercial/serviços); ordenamento de Cholesky: LPIB LCE.

7 O ordenamento $LPIB \rightarrow LCE$ assume que o produto é contemporaneamente exógeno ao consumo de energia, hipótese compatível com a interpretação da energia como insumo condicionado à atividade econômica.

No caso do PIB agropecuário (LPIBAG), observa-se que, mesmo após 20 períodos, aproximadamente 99% da variância do erro de previsão é explicada por choques próprios, enquanto menos de 1% decorre de choques no consumo de energia elétrica (LCEAG). Isso indica baixa influência dinâmica da variável energética sobre o produto setorial.

Por outro lado, a decomposição da variância do consumo de energia elétrica (LCEAG) revela comportamento distinto. Após cinco anos, cerca de 44% da variância do erro de previsão já é explicada por choques no PIB agropecuário, percentual que se eleva para aproximadamente 87% ao final de 20 anos. Esse padrão reforça os resultados do VECM, indicando que a dinâmica do consumo de energia no setor agropecuário é fortemente condicionada à evolução do produto, corroborando a evidência de causalidade unidirecional do PIB para o consumo de energia tanto no curto quanto no longo prazo.

Para o setor industrial, a decomposição da variância do PIB industrial (LPIBIN) apresenta resultado semelhante ao observado no setor agropecuário. Após 20 períodos, aproximadamente 99% da variância do erro de previsão permanece explicada por choques próprios, enquanto a contribuição do consumo de energia elétrica (LCEIN) é inferior a 1%. No caso do consumo de energia elétrica industrial (LCEIN), observa-se que, no horizonte de longo prazo, os choques no PIB industrial passam a exercer influência relevante. Após 20 períodos, cerca de 62% da variância do erro de previsão de LCEIN é explicada por choques no produto industrial. Esse resultado confirma a evidência obtida no VECM: ausência de causalidade de curto prazo e presença de causalidade de longo prazo do PIB para o consumo de energia no setor industrial, caracterizando ajuste gradual da demanda energética à trajetória do produto.

No setor de comércio e serviços, a dinâmica é distinta. A decomposição da variância do PIB (LPIBCS) mostra que, ao longo do tempo, a contribuição do consumo de energia elétrica (LCECS) para explicar o erro de previsão do produto aumenta progressivamente, alcançando aproximadamente 15% após 20 períodos. Simultaneamente, a decomposição da variância do consumo de energia elétrica indica que os choques no PIB passam a explicar parcela crescente de sua variância, atingindo cerca de 23% ao final do horizonte considerado. Esse comportamento evidencia interdependência dinâmica entre as variáveis e corrobora os resultados do VECM, confirmando a presença de causalidade bidirecional de longo prazo no setor de comércio e serviços.

De modo geral, a decomposição da variância confirma os resultados obtidos pelos testes de causalidade de Granger, evidenciando que a importância relativa dos choques entre consumo de energia elétrica e produto difere substancialmente entre os setores da economia brasileira. Enquanto na agropecuária e na indústria os choques no produto explicam parcela crescente da variância do consumo de energia, sem que ocorra o movimento inverso, no setor de comércio e serviços observa-se influência mútua entre as variáveis. Esses resultados reforçam que o nexos energia-crescimento apresenta natureza essencialmente setorial e que análises baseadas apenas em dados agregados podem ocultar importantes heterogeneidades na dinâmica entre atividade econômica e consumo de energia elétrica.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo investigou a relação entre consumo de energia elétrica e crescimento econômico nos setores agropecuário, industrial e de comércio e serviços da economia brasileira por meio de modelos de cointegração e testes de causalidade de Granger. Os resultados evidenciaram que o nexos energia-crescimento apresenta comportamento heterogêneo entre os setores analisados, indicando que a relação entre essas variáveis depende das características estruturais de cada segmento produtivo. Ademais, as evidências mostraram-se robustas à consideração de quebras estruturais endógenas, reforçando a consistência das relações de longo prazo identificadas.

Nos setores agropecuário e industrial, observou-se predominância da causalidade do produto para o consumo de energia elétrica, sem evidências de que a expansão do consumo energético constitua fator determinante do crescimento setorial. Esse padrão sugere que a eletricidade atua como um insumo cuja demanda acompanha a evolução da atividade econômica, e não como seu principal indutor. Nesse contexto, políticas de conservação e racionalização do uso de energia tendem a produzir impactos limitados sobre o crescimento desses setores, reforçando a viabilidade de estratégias voltadas ao aumento da eficiência energética.

Em contrapartida, no setor de comércio e serviços foi identificada a hipótese de *feedback*, caracterizada pela causalidade bidirecional entre consumo de energia elétrica e produto no longo prazo. Esse resultado indica uma relação de interdependência entre as variáveis, na qual a expansão da atividade econômica eleva a demanda por eletricidade e, simultaneamente, a disponibilidade de energia contribui para sustentar o crescimento do setor. Dessa forma, políticas de expansão da oferta, melhoria da confiabilidade do sistema elétrico e gestão eficiente da demanda tornam-se particularmente relevantes para esse segmento da economia.

Sob essa perspectiva, a expansão da oferta de energia elétrica deve ser acompanhada por estratégias capazes de conciliar crescimento econômico e sustentabilidade ambiental. Isso envolve não apenas investimentos em infraestrutura de geração e transmissão, mas também o estímulo à participação de fontes renováveis de menor impacto ambiental, como energia eólica, solar fotovoltaica e biomassa. Da mesma forma, o fortalecimento de políticas de eficiência energética, a exemplo do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), do Selo de Eficiência Energética e de iniciativas voltadas à modernização tecnológica e à redução de perdas, pode contribuir simultaneamente para aumentar a competitividade da economia, reduzir emissões e postergar investimentos em expansão da capacidade instalada. Em conjunto, os resultados reforçam que políticas energéticas uniformes tendem a ser menos eficazes do que estratégias formuladas a partir das especificidades de cada setor econômico.

Embora as evidências obtidas sejam consistentes, algumas limitações metodológicas devem ser reconhecidas. Em primeiro lugar, a análise restringe-se ao consumo agregado de energia elétrica por setor, não distinguindo diferentes fontes energéticas nem incorporando fatores institucionais, tecnológicos e outros determinantes potencialmente relevantes da atividade econômica. Além disso, a especificação bivariada adotada pode estar sujeita ao viés decorrente da omissão de variáveis relevantes, em razão da indisponibilidade de séries

setoriais longas e consistentes para variáveis como estoque de capital, trabalho e preços relativos da energia ao longo de todo o período analisado. Essas limitações, inerentes à disponibilidade de dados, não invalidam os resultados obtidos, mas recomendam cautela quanto à sua interpretação e generalização. Nesse sentido, pesquisas futuras poderão explorar modelos multivariados, desagregações mais detalhadas da matriz energética, estratégias alternativas de identificação estrutural e abordagens em painel heterogêneo, capazes de incorporar um conjunto mais amplo de variáveis e captar, com maior profundidade, as heterogeneidades regionais e setoriais da relação entre energia e crescimento no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABBAS, F.; CHOUDHURY, N. Electricity consumption–economic growth nexus: an aggregated and disaggregated causality analysis in India and Pakistan. **Journal of Policy Modeling**, Nova York, v. 35, n. 4, p. 538–553, 2013.
- ALI, S.; ZHANG, J.; AZEEM, A.; MAHMOOD, A. Impact of electricity consumption on economic growth: an application of vector error correction model and artificial neural networks. **The Journal of Developing Areas**, Tennessee, v. 54, n. 4, p. 89–104, 2020.
- AL-MULALI, U.; TANG, C. F.; TAN, B. W.; OZTURK, I. The nexus of electricity consumption and economic growth in Gulf Cooperation Council economies: evidence from non-stationary panel data methods. **Geosystem Engineering**, Londres, v. 22, n. 1, p. 40–47, 2019.
- ALSAEDI, Y. H.; TULARAM, G. A. The relationship between electricity consumption, peak load and GDP in Saudi Arabia: a VAR analysis. **Mathematics and Computers in Simulation**, Amsterdã, v. 175, p. 164–178, 2020.
- ASAFU-ADJAYE, J. The relationship between energy consumption, energy prices and economic growth: time series evidence from Asian developing countries. **Energy Economics**, Amsterdã, v. 22, n. 6, p. 615–625, 2000.
- BOWDEN, N.; PAYNE, J. E. The causal relationship between U.S. energy consumption and real output: a disaggregated analysis. **Journal of Policy Modeling**, Nova York, v. 31, n. 2, p. 180–188, 2009.
- BARBOSA, P. A. M.; DOS SANTOS, V. F. Cointegração e causalidade entre consumo de energia elétrica e PIB na Região Sudeste do Brasil. **Revista Estudo & Debate**, Lajeado, v. 27, n. 3, p. 104–118, 2020.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Anuário estatístico de energia elétrica 2024**. Rio de Janeiro: EPE; MME, 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanco Energético Nacional 2024**. Rio de Janeiro: EPE; MME, 2025.

CARMINATI, J. G. D. O.; SCALCO, P. R. Relações de causalidade entre energia e crescimento econômico no Brasil. **Revista Brasileira de Energia**, Itajubá, v. 19, n. 2, p. 355–374, 2013.

CHAREMZA, W. W.; DEADMAN, D. **New directions in econometric practice: general to specific modelling, cointegration and vector autoregression**. 2. ed. Cheltenham: Edward Elgar Publishing Limited, 1997.

CHURCHILL, S. A.; IVANOVSKI, K. Electricity consumption and economic growth across Australian states and territories. **Applied Economics**, Londres, v. 52, n. 2, p. 866–878, 2020.

DOGAN, E.; SEBRI, M.; TURKEKUL, B. Exploring the relationship between agricultural electricity consumption and output: new evidence from Turkish regional data. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 95, p. 370–377, 2016.

FERNANDES, K.; REDDY, Y. V. Energy consumption and economic growth in newly industrialised countries of Asia. **International Journal of Energy Economics and Policy**, Antalya, v. 10, n. 4, p. 384–391, 2020.

FUINHAS, J. A.; MARQUES, A. C. Energy consumption and economic growth nexus in Portugal, Italy, Greece, Spain and Turkey: an ARDL bounds test approach (1965–2009). **Energy economics**, v. 34, n. 2, p. 511–517, 2012.

GADELHA, S. R. B.; CERQUEIRA, R. M. G. Consumo de eletricidade e crescimento econômico no Brasil, 1952–2010: uma análise de causalidade. **Revista Faz Ciência**, Toledo, v. 16, n. 24, p. 11–28, 2014.

GHALI, K. H.; EL-SAKKA, M. I. T. Energy use and output growth in Canada: a multivariate cointegration analysis. **Energy Economics**, Amsterdã, v. 26, n. 2, p. 225–238, 2004.

GHOSH, S. Electricity consumption and economic growth in India. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 30, n. 2, p. 125–129, 2002.

GRANGER, C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral models. **Econometrica**, Nova York, v. 34, n. 3, p. 541–551, 1969.

GREGORY, A. W.; HANSEN, B. E. Residual-based tests for cointegration in models with regime shifts. **Journal of Econometrics**, Amsterdam, v. 70, n. 1, p. 99–126, 1996.

- HUANG, B. N.; HWANG, M. J.; YANG, C. W. Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: a dynamic panel data approach. **Ecological Economics**, Amsterdã, v. 67, n. 1, p. 41–54, 2008.
- KRAFT, J.; KRAFT, A. On the relationship between energy and GNP. **Journal of Energy and Development**, Denver, v. 3, n. 2, p. 401–403, 1978.
- MADDALA, G. S.; KIM, I. M. **Unit roots, cointegration, and structural change**. New York: Cambridge University Press, 1998. 505 p.
- MEHRARA, M. Energy consumption and economic growth: the case of oil exporting countries. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 35, n. 5, p. 2939–2945, 2007.
- MURUGAN, N. T. *et al.* Are sectoral outputs in Pakistan led by energy consumption? **Economics Bulletin**, Nashville, v. 32, n. 3, p. 2326–2331, 2012.
- NAIN, M. Z.; SAILAJA, B. S.; KAMAIAH, B. Electricity consumption and NSDP nexus in Indian states: a panel analysis with structural breaks. **Economics Bulletin**, Nashville, v. 37, n. 3, p. 1581–1601, 2017.
- OH, W.; LEE, K. Causal relationship between energy consumption and GDP revisited: the case of Korea, 1970–1999. **Energy Economics**, Amsterdã, v. 26, n. 1, p. 51–59, 2004.
- OZTURK, I. A literature survey on energy–growth nexus. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 38, n. 1, p. 340–349, 2010.
- PALA, A. Energy and economic growth in G20 countries: panel cointegration analysis. **Economics and Business Letters**, Oviedo, v. 9, n. 2, p. 56–72, 2020.
- PAO, H. T.; LI, Y. Y.; FU, H. C. Causality relationship between energy consumption and economic growth in Brazil. **Smart Grid and Renewable Energy**, Irvine, v. 5, n. 3, p. 1–10, 2014.
- PAUL, S.; BHATTACHARYA, R. N. Causality between energy consumption and economic growth in India: a note on conflicting results. **Energy Economics**, Amsterdã, v. 26, n. 6, p. 977–983, 2004.
- PAYNE, J. E. A survey of the electricity consumption–growth literature. **Applied Energy**, Amsterdã, v. 87, n. 3, p. 723–731, 2010.
- SARI, R.; SOYTAS, U. The growth of income and energy consumption in six developing countries. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 35, n. 2, p. 889–898, 2007.
- SCHMIDT, C. A. J.; LIMA, M. A. M. A demanda por energia elétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, Rio de Janeiro, v. 58, n. 1, p. 67–98, 2004.

- SHIU, A.; LAM, P. Electricity consumption and economic growth in China. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 32, n. 1, p. 47–54, 2004.
- SMYTH, R.; NARAYAN, P. K. Applied econometrics and implications for energy economics research. **Energy Economics**, Amsterdã, v. 50, p. 351–358, 2015.
- STEINBERGER, J. K.; ROBERTS, J. T. From constraint to sufficiency: the decoupling of energy and carbon from human needs, 1975–2005. **Ecological Economics**, Amsterdã, v. 70, n. 2, p. 425–433, 2010.
- STERN, D. I. The role of energy in economic growth. In: **International Energy and Poverty**. Londres: Routledge, 2015. p. 35–47.
- TANG, C. F.; SHAHBAZ, M. Sectoral analysis of the causal relationship between electricity consumption and real output in Pakistan. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 60, p. 885–891, 2013.
- THAKER, M. A. M. T.; THAKER, H. M. T.; AMIN, M. F.; PITCHAY, A. A. Electricity consumption and economic growth: a revisit study of their causality in Malaysia. **Etikonomi: Jurnal Ekonomi**, Jakarta, v. 18, n. 1, p. 1–12, 2019.
- TIWARI, A. K.; EAPEN, L. M.; NAIR, S. R. Electricity consumption and economic growth at the state and sectoral level in India: evidence using heterogeneous panel data methods. **Energy Economics**, Amsterdã, v. 94, p. 105064, 2021.
- WOLDE-RUFANEL, Y. Electricity consumption and economic growth: a time series experience for 17 African countries. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 34, n. 10, p. 1106–1114, 2006.
- YOO, S. H. Electricity consumption and economic growth: evidence from Korea. **Energy Policy**, Amsterdã, v. 33, n. 12, p. 1627–1632, 2005.
- ZIVOT, E.; ANDREWS, D. W. K. Further evidence on the great crash, the oil-price shock, and the unit-root hypothesis. **Journal of Business & Economic Statistics**, Alexandria (VA), v. 10, n. 3, p. 251–270, 1992.