

RELAÇÃO ENTRE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E CRESCIMENTO ECONÔMICO NO BRASIL: UMA ANÁLISE A NÍVEL SETORIAL

Paulo André Manhães Barbosa¹
Leonardo Bornacki de Mattos²

Resumo – Estudos que abordam a relevância da energia elétrica na sua relação com o crescimento econômico em um nível setorial vêm ganhando espaço na literatura econômica ao longo dos últimos anos. Diante da importância da energia elétrica para a economia nacional, o objetivo deste trabalho foi analisar a relação causal entre consumo de eletricidade e PIB dentro de três importantes setores da economia brasileira (agropecuária, indústria e comércio/serviços), no período de 1970 a 2019. Por meio de um Modelo de Correção de Erros Vetorial (VECM), foram examinadas a existência e a direção das relações de causalidade no sentido de Granger entre o produto setorial e o consumo de eletricidade setorial. O método de decomposição de variância também foi empregado no intuito de confirmar os resultados dos testes de causalidade. Os resultados apontaram para a presença de causalidade unidirecional do produto para o consumo de eletricidade dentro dos setores agropecuário e industrial, e para presença de causalidade bidirecional entre produto e consumo de eletricidade dentro do setor comercial/serviços. A partir dos resultados, concluiu-se que tanto políticas de incentivo a ampliação da oferta de energia elétrica quanto de incentivo a conservação do seu consumo podem influenciar o crescimento econômico do Brasil a depender do setor em que são empregadas pelos formuladores de políticas econômicas e energéticas.

Palavras-chave: Energia elétrica, PIB, Brasil.

Abstract – Studies that address the relevance of electricity in its relationship with economic growth at a sectoral level have been gaining ground in economic literature over the past few years. Given the importance of electricity for the national economy, the aim of this paper was to analyze the causal relationship between electricity consumption and GDP within three important sectors of the Brazilian economy (agriculture, industry and trade/services), in the period from 1970 to 2019. Through a Vector Error Correction Model (VECM), the existence and direction of causal relationships in the Granger sense between the sectorial product and sectorial electricity consumption were examined. The variance decomposition method was also used in order to confirm the results of the causality tests. The results pointed to the presence of unidirectional causality between product and electricity consumption within the agricultural and industrial sectors, and to the presence of bidirectional causality between product and electricity consumption within the commercial/services sector. From the results, it was concluded that both policies to encourage the expansion of the supply of electricity and to encourage the conservation of its consumption can influence economic growth in Brazil depending on the sector in which they are employed by economic and energy policy makers.

Keywords: Electricity, GDP, Brazil.

Classificação JEL: C32, Q43 e O11.

Área de submissão: 2 – Desenvolvimento Econômico

¹ Mestrando em Economia Aplicada pela Universidade Federal de Viçosa - UFV

² Professor do Departamento de Economia Rural da Universidade Federal de Viçosa - UFV

1. INTRODUÇÃO

A relevância da energia elétrica em diferentes atividades de produção e consumo concedeu a ela o status de insumo de infraestrutura³ vital para os processos de industrialização, urbanização e crescimento econômico ao longo das últimas décadas. Além disso, seu nível de consumo pode ser usado como um importante indicador de bem-estar social e das diferenças socioeconômicas e tecnológicas entre diferentes países.

A partir do trabalho seminal de Kraft e Kraft (1978), que analisou a relação entre consumo de energia e Produto Nacional Bruto para os EUA, a análise de causalidade passou a ser a abordagem mais utilizada na literatura econômica para determinar qual o papel da energia na sua relação com o crescimento econômico, tendo em vista que a definição da direção da causalidade entre essas variáveis pode gerar grandes implicações na eficácia de políticas públicas voltadas para o setor energético.

Por exemplo, se for constatada uma relação causal unidirecional do Produto Interno Bruto (PIB) para o consumo de energia (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 e TULARAM, 2020; e FERNANDES e 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 e LAM, 2004; PAUL e BHALLACHARYA, 2004; THAKER et al., 2019; AL-MULALI et al., 2019; e ALI et al., 2020).

Existe ainda a possibilidade de causalidade bidirecional (hipótese de *feedback*), que sugere que o consumo de energia e o PIB são determinados e afetados em conjunto e ao mesmo tempo, de modo que uma redução no consumo de eletricidade pode afetar, de maneira adversa, o crescimento econômico e vice-versa (OH e LEE, 2004; SOLARIN e OZTURK, 2015; e LIN e WANG, 2019). E por último, a hipótese de neutralidade, que corresponde à ausência de causalidade em qualquer direção. Ela sugere que a energia elétrica representa uma parcela muito pequena do produto agregado da economia de modo que o consumo de energia desempenha um papel relativamente pequeno na determinação do crescimento econômico de um país (PAYNE, 2009; MENEGAKI, 2011; e AHMAD et al., 2016).

Também cabe destacar que uma parte significativa da literatura existente sobre a temática energia-crescimento se baseia em análises que utilizam dados agregados a nível nacional referentes ao consumo de energia e ao crescimento econômico em casos específicos de um país ou de grupos com vários países. Em contra partida, estudos que examinam a relação entre consumo de energia e o crescimento a partir de dados desagregados a nível setorial e/ou regional dentro de um mesmo país, apesar de oferecerem uma análise mais precisa acerca da dinâmica entre essas variáveis, ainda são limitados onde merecem destaque trabalhos com o de Bowden e Payne (2009), Abbas e Choudhury (2013), Tang e Shahbaz (2013), Nain et al. (2017) e Tiwari et al. (2021).

Estudos que abordam o tema energia-crescimento de forma específica para o território brasileiro ainda são escassos na literatura e têm como foco principal análises agregadas a

³ Entende-se por insumo de infraestrutura produtos e serviços como transporte, comunicação, saneamento, energia, entre outros (BRAMBILLA e MUELLER, 2004).

nível regional e nacional, onde se destacam trabalhos como o de Carminati e Scalco (2013), Gadelha e Cerqueira (2014), Pao et al. (2014) e Barbosa e Dos Santos (2020).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2020, disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Brasil conta atualmente com uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, onde a geração de energia hidráulica se destaca por responder a 64,9% da oferta interna. Essa característica faz com que o setor elétrico brasileiro apresente algumas limitações associadas principalmente a sua vulnerabilidade a fatores climáticos e aos altos custos sociais e ambientais ligados à ampliação da infraestrutura de oferta de energia. Dada a crescente participação da eletricidade como principal forma de energia consumida entre importantes setores produtivos da economia do país, acredita-se que entender a dinâmica da relação entre o consumo de energia elétrica e o crescimento econômico se configura como algo relevante no cenário brasileiro, pois pode servir de base para políticas públicas mais eficazes voltadas para o estímulo a ampliação ou conservação da oferta de energia existente.

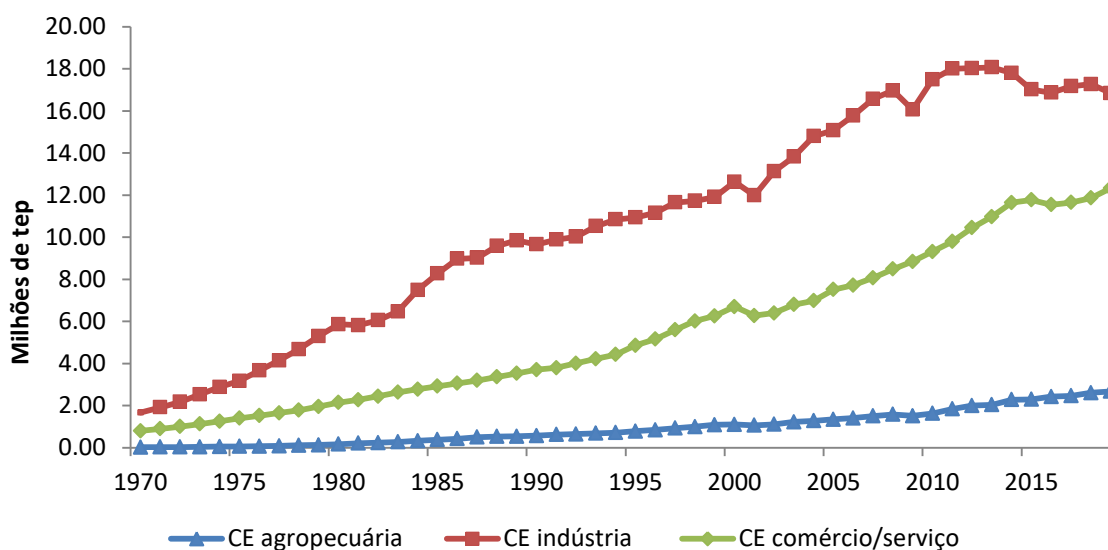
A partir do exposto, o presente trabalho teve como objetivo investigar a existência e a direção da relação de causalidade entre o consumo de energia elétrica e PIB dentro de três importantes setores da economia brasileira - indústria, comércio/serviços e agropecuária - compreendendo o período de 1970 a 2019.

2. CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA E PIB SETORIAL NO BRASIL (1970-2019)

Segundo dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2020, disponibilizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Brasil contava, até 2019, com mais de 211 milhões de habitantes e cerca de 80 milhões de unidades consumidoras de energia elétrica, das quais mais de 85% correspondiam a consumidores residenciais.

No período de 1970 a 2019, o consumo final de energia elétrica no país apresentou uma taxa média de crescimento de 5,58% ao ano, totalizando um aumento de pouco mais de 1276% ao final do período analisado. O elevado padrão de crescimento do consumo desse recurso energético no Brasil pode ser observado na Figura 1, que reproduz o comportamento dos três setores analisados nesse estudo: indústria, comércio/serviços e agropecuária.

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

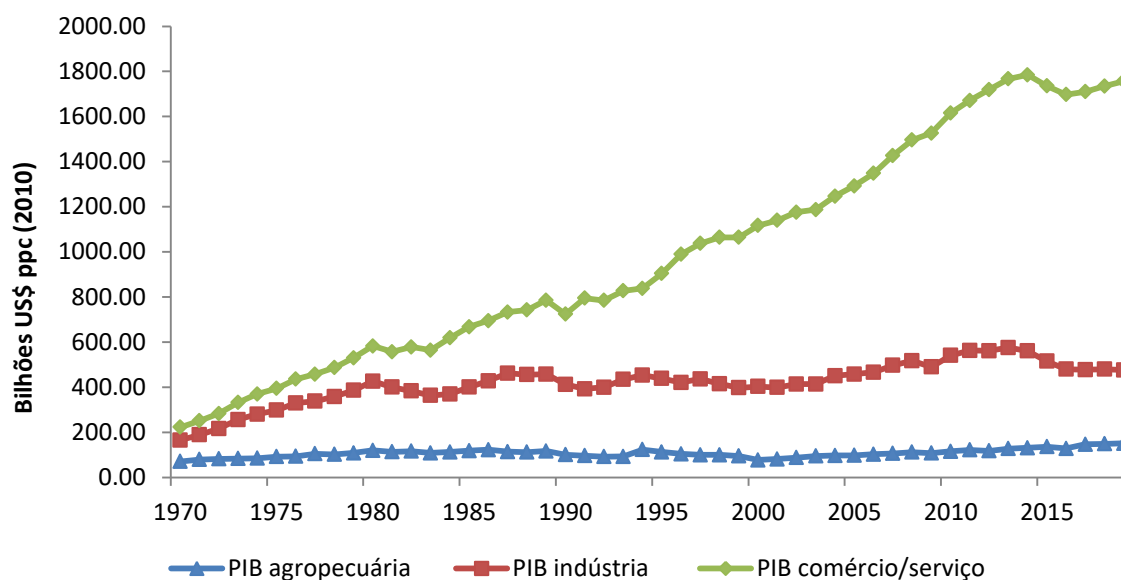


Fonte: Elaboração própria com base no Balanço Energético Nacional (2020).

A partir da Figura 1, pode-se observar que o setor industrial apresentou o nível de consumo mais elevado entre os setores, correspondendo a mais de 45% do consumo total acumulado do período, acompanhado pelo setor de comércio/serviços, responsável por 23% e o setor agropecuário por 4%.

No que se refere à produção setorial, a distribuição do PIB de cada um dos setores para o período analisado 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 com base no Balanço Energético Nacional (2020).

A Figura 2 mostra que o setor de comércio/serviços se destaca como aquele que mais contribuiu para o crescimento do PIB brasileiro ao longo do período analisado, respondendo por cerca de 53,94% do produto total acumulado, seguido do setor industrial e agropecuário com 22,79% e 5,86% respectivamente.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Duas vertentes principais podem ser identificadas na literatura que analisa a relação entre consumo de energia e crescimento econômico. A primeira descreve que o uso de energia moderna (petróleo, gás e eletricidade) se configura como o principal meio para alcançar o progresso econômico, social e tecnológico, bem como é responsável por complementar os insumos capital e trabalho no processo de produção (hipótese de crescimento). Nesse cenário, acredita-se que a de energia pode ser tanto um fator limitante como impulsionador da atividade econômica, a depender da sua disponibilidade e qualidade. (STERN, 2015; GADELHA e CERQUEIRA, 2014).

A segunda vertente, entretanto, descreve que o papel da energia é mínimo ou neutro para o crescimento econômico. A possibilidade de influência mínima da energia sobre o crescimento (hipótese de conservação) é sustentada pelo argumento de que, à medida que a economia cresce, sua estrutura de produção tende a se deslocar para setores como o de serviços e tecnologia que, em comparação ao o setor industrial, por exemplo, são menos dependentes de energia. Já a possibilidade extrema de neutralidade entre energia e crescimento é sustentada pelo argumento de que o custo da energia é muito pequeno como

proporção do PIB e, portanto, o consumo de energia não deve ter um impacto significativo no crescimento do produto (hipótese da neutralidade) (GHALI e SAKKA, 2004).

Na ausência de uma teoria que explique de forma explícita a relação entre consumo de energia e crescimento econômico, grande parte dos estudos empíricos que analisam onexo causal entre essas variáveis têm como principal base teórica o modelo de crescimento neoclássico onde o produto é determinado não só pelo estoque de capital e pelo estoque de mão-de-obra disponível, mas também pelo consumo total de energia.

Estudos como o de Sari e Soytaş (2007), Pala (2020) e Churchill e Ivanovski (2020), 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 é o nível de produto agregado ou PIB real, K o estoque de capital, L o nível de emprego, E é o consumo total de energia (agregada ou elétrica) e o subscrito t denota o período tempo. Tomando a diferencial total de (1), obtém-se a seguinte expressão:

$$\dot{Y}_t = a\dot{K}_t + b\dot{L}_t + c\dot{E}_t \quad (2)$$

em que o ponto sobre as variáveis significa que as mesmas estão na forma de taxa de crescimento. Os parâmetros a , b e c são as elasticidades do produto com respeito ao capital, trabalho e energia, respectivamente. A partir das equações (1) e (2) espera-se que, ao menos em termos teóricos, haja uma relação positiva entre a quantidade consumida de energia elétrica e o nível de produto, em outras palavras, o esperado é que uma das direções da causalidade seja do consumo de eletricidade para o crescimento.

Uma abordagem teórica alternativa que também ilustra a relação entre energia e crescimento consiste na formulação de uma função de demanda por energia elétrica. Assim, como proposto por Schmidt e Lima (2004), uma função de demanda por energia pode ser especificada da seguinte maneira:

$$E_t = f(P_t, Y_t, L_t, S_t) \quad (3)$$

onde E_t é o consumo de energia (residencial, comercial e industrial), P_t é a tarifa de energia (o preço), Y_t é a renda ou PIB, L_t é o preço dos eletrodomésticos e S_t é o preço de um bem substituto. Ao se observar a equação (3), o esperado é que o produto das firmas e/ou da renda das famílias possa influenciar positivamente o consumo de energia.

Ao se observar os dois modelos teóricos propostos nota-se que, ao menos em termos teóricos, também pode-se esperar é que haja causalidade bi-direcional entre consumo de energia e produto. Portanto, a dependência em ambos os sentidos entre crescimento e energia faz com que ambas as variáveis possam ser consideradas endógenas e ao mesmo tempo regressores em cada um dos modelos.

4. METODOLOGIA E DADOS

A literatura empírica existente voltada para a análise da relação entre energia e crescimento econômico é bastante vasta e pode ser dividida entre técnicas econométricas mais consolidadas baseadas em modelos de séries temporais e em modelos de construção mais recente como os de dados em painel. Trabalhos como o de Payne (2010) e Ozturk (2010) e trazem uma extensa revisão da literatura a cerca da análise empírica da relação causal entre energia e crescimento econômico.

Para investigar a dinâmica envolvida nonexo causal entre consumo de eletricidade e PIB nos principais setores da economia brasileira (indústria, comércio/serviços e agropecuária), 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.

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

4.1. Teste 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 (etapa seguinte) só é válida se as variáveis apresentarem 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 Madalla e Kim (1998), tem maior poder (probabilidade de não se cometer um erro Tipo II) e tamanho do que testes mais tradicionais, como o Dickey-Fuller Aumentado (ADF).

Segundo, determinada a ordem de integração das variáveis, a etapa seguinte consiste em verificar a existência ou não de relações de longo prazo ou de equilíbrio entre as variáveis, o que pode ser feito por meio da análise de cointegração. Para esse propósito, foi empregado o teste de cointegração proposto por Johansen, o qual se baseia em um Modelo de Auto-regressão Vetorial (modelo VAR).

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 estimado⁴.

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:

(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

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

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

⁴Caso 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.

(b) Comércio/Serviços

$$\Delta LPIBCS_t = \beta_{50} + \sum_{i=1}^{L_{51}} \beta_{51i} \Delta LPIBCS_{t-i} + \sum_{j=1}^{L_{52}} \beta_{52j} \Delta LCECS_{t-j} + \beta_{53} \varepsilon_{t-1} + u_{5t} \quad (8)$$

$$\Delta LCECS_t = \beta_{60} + \sum_{i=1}^{L_{61}} \beta_{61i} \Delta LPIBCS_{t-i} + \sum_{j=1}^{L_{62}} \beta_{62j} \Delta LCECS_{t-j} + \beta_{63} \eta_{t-1} + u_{6t} \quad (9)$$

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, 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 de ECT (β_{13}). O coeficiente associado ao ECT representa o desvio da variável dependente do equilíbrio de longo prazo. Se, por exemplo, β_{13} é zero, então LCE não responde a desvios do equilíbrio de longo prazo em períodos passados (OH e 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 forma de verificar a validade dos possíveis resultados dos testes de causalidade de Granger descritos acima, também empregou-se uma análise de decomposição da variância dos erros de previsão.

4.2. Descrição, tratamento e fonte dos dados

Para a análise proposta foram utilizados dados de séries temporais de periodicidade anual para o Produto Interno Bruto setorial em reais constantes de 2010 convertidos para dólares em paridade do poder de compra (ppc) de 2010 e o consumo total de energia elétrica setorial em toneladas equivalentes de petróleo (tep), compreendendo os setores industrial, comercial/serviços e agropecuário, no período de 1970 a 2019.

A escolha do período analisado se deve ao fato de ser o maior intervalo de tempo disponível na base de dados consultada, compreendendo um horizonte temporal de 49 anos.

A série do PIB industrial refere-se ao cálculo do PIB pela ótica contábil da produção e compreende todas as atividades econômicas investigadas pela Pesquisa Industrial Anual (Indústrias extrativas e de transformação) e pela Pesquisa Anual da Indústria da Construção, acrescentando-se ainda os serviços de produção e distribuição de eletricidade e gás, água, esgoto e limpeza urbana. A série do PIB comercial/serviços compreende os serviços cuja

atividade principal é a compra e venda de mercadorias cobertas pela Pesquisa Anual de Comércio, as unidades locais de comércio da Pesquisa Industrial Anual e a atividade comercial exercida por unidades familiares, proveniente da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio. Por último, a série do PIB agropecuário compreende os estabelecimentos agropecuários com produção para o mercado e para o próprio consumo, abrangendo os seguintes segmentos: agricultura, pecuária, produção florestal, pesca e aquicultura. Todas as séries têm como fonte primária o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Sistema de Contas Nacionais (IBGE/SCN) e foram obtidas a partir do banco de dados do BEN (2020) disponível no sítio eletrônico da EPE.

As séries de consumo de energia elétrica industrial, comercial/serviços e agropecuário correspondem à soma de toda energia elétrica consumida pelos respectivos setores. Todas têm como fonte primária Boletim SIESE (Quadro: Consumo indústria e comercial/serviços de energia elétrica – Brasil) e também foram obtidas a partir do banco de dados do BEN (2020) disponível no sítio eletrônico da EPE.

Cabe destacar que todas as variáveis foram convertidas para forma de logaritmos naturais, de forma a evitar os problemas de *overdifferencing* resultante da sobreposição dos operadores de diferença, conforme apontado por Charemza e Deadman (1997, p.103).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como primeiro passo da análise empírica foi verificado a estacionariedade e a ordem de integração de todas as séries de dados envolvidas no estudo. Para isso, foi utilizado o teste DF-GLS. Os resultados do teste com as séries logaritmizadas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do teste de raiz unitária DF-GLS para as séries logaritmizadas do PIB e do CE de cada setor, no período de 1970 a 2019

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: *** e * significativo ao nível de 1% e 10% respectivamente. Para todos os testes foram incluídos componentes de tendência linear e intercepto. Utilizou-se o critério de Schwarz, com número máximo de defasagens igual a 10.

Os resultados do teste DF-GLS indicam que, ao nível de significância de 1%, todas as séries são não-estacionárias em nível, porém, estacionárias em primeira diferença, com exceção da série LPIBCS, cuja primeira diferença se mostrou estacionária ao nível de 10%.

Dado que todas as séries são integradas de mesma ordem, é possível averiguar se as mesmas possuem, entre elas, relações de equilíbrio de longo prazo, ou seja, se são cointegradas. Para esse objetivo foi empregado o procedimento de Johansen, que também pode ser observado em Oh e Lee (2004).

Como o teste de cointegração de Johansen tem como base a estimação de um modelo VAR, antes de sua estimação é necessário determinar o número de defasagens a ser considerado. Assim, além dos critérios de informação de LR (Razão de Verossimilhança), FPE (Erro Final de Previsão), Akaike, Schwarz e Hannan-Quinn, também foi considerado o teste LM de autocorrelação serial dos resíduos. No final, acabou-se optando por um número de defasagens igual a dois (2) para todos os modelos estimados.

Selecionada a ordem de defasagem e considerando como variável exógena uma tendência determinística linear, realizou-se então o teste de cointegração de Johansen, cujos resultados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do Teste do Traço e do Máximo Autovalor

Nº de vetores de cointegração	LCEAG-LPIBAG		LCEIN-LPIBIN		LCECS-LPIBCS	
	Teste do Traço	Teste do Máximo Autovalor	Teste do Traço	Teste do Máximo Autovalor	Teste do Traço	Teste do 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 sugerem a rejeição da hipótese nula de não haver nenhum vetor de cointegração. Por outro lado, a hipótese de que existe pelo menos um vetor de cointegração não é rejeitada a 5%. Logo, há evidência de uma relação de longo prazo entre as variáveis, que pode ser representada pelos vetores de cointegração associados a cada modelo estimado. Os vetores de cointegração estimados de cada modelo podem ser observados na Tabela 1A do apêndice.

Como apontado por Ghosh (2002), a presença de cointegração entre as variáveis exclui a possibilidade de correlação espúria e indica a presença de causalidade de Granger em pelo menos uma direção, caracterizando uma relação de equilíbrio de longo prazo entre o PIB real e o consumo de eletricidade. A partir do vetor de cointegração é possível escrever a relação de equilíbrio (longo prazo). A variável dependente pode ser definida de acordo com a direção de causalidade. Caso seja constatado que o consumo de energia elétrica é que influencia o PIB, basta normalizar a variável LPIB e isolá-la na Tabela 1A.

Com o objetivo de determinar a direção da causalidade, assim como a dinâmica existente no curto e longo prazo, entre o PIB setorial e o consumo de energia elétrica setorial, optou-se pelo emprego de um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM), indicado para o estudo de causalidade entre variáveis não-estacionárias em nível e que sejam co-integradas. A mesma abordagem pode ser vista em Oh e Lee (2004) e Gadelha e Cerqueira (2014).

A Tabela 3 mostra os resultados do teste de causalidade de Granger por meio de um Modelo de Correção de Erro Vetorial (VECM) especificado para cada um dos setores analisados.

Tabela 3 – Teste de Causalidade de Granger Baseado em um VECM

Variável Dependente	Fonte de Causalidade (variável independente)		
	Curto Prazo ^a		Longo Prazo ^b
	$\Delta LCEAG$	$\Delta LCEAG$	Termo de Correção de Erro (ECT)
$\Delta LCEAG$	---	3,040553*	-0,035430***
$\Delta LPIBAG$	0,394933 ^{NS}	---	0,005141 ^{NS}

Variável Dependente	Fonte de Causalidade (variável independente)		
	Curto Prazo ^a		Longo Prazo ^b
	$\Delta LCEIN$	$\Delta LPIBIN$	Termo de Correção de Erro (ECT)
$\Delta LCEIN$	---	0,960870 ^{NS}	-0,063191***
$\Delta LPIBIN$	0,969931 ^{NS}	---	-0,012685 ^{NS}

Variável Dependente	Fonte de Causalidade (variável independente)		
	Curto Prazo ^a		Longo Prazo ^b
	$\Delta LCECS$	$\Delta LPIBCS$	Termo de Correção de Erro (ECT)
$\Delta LCECS$	---	1,009737 ^{NS}	-0,099551***
$\Delta LPIBCS$	1,227954 ^{NS}	---	-0,105059***

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 da Tabela 3 mostram a existência de causalidade unidirecional do PIB agropecuário (PIBAG) para o consumo de energia elétrica agropecuária (CEAG) tanto no curto quanto no longo prazo. A causalidade de curto prazo é confirmada pelo teste de Wald ao nível de significância de 10% enquanto a causalidade de longo prazo é confirmada pela significância estatística do termo de correção de erro (ECT) associado à variável LCEAG ao nível de 1%.

Nesse cenário, entende-se que o produto do setor agropecuário brasileiro não depende do consumo de eletricidade e sim o contrário. Dentre os fatores que podem ter contribuído para esse resultado pode-se destacar a melhora na infraestrutura de acesso à eletricidade no campo, principalmente para as atividades de irrigação, e a produção de eletricidade para consumo próprio a partir do processamento de biomassa pelos grandes e pequenos produtores nos últimos anos. Resultados semelhantes também foram encontrados por Abbas e Choudhry (2013) no Paquistão e Dogan et al. (2016) em algumas regiões da Turquia.

No que se refere ao setor industrial, pode-se observar que apenas o coeficiente do termo de correção de erro (ECT) associado ao consumo de energia elétrica industrial (CEIN) foi significativo ao nível de 1%, o que caracteriza a presença de relação de causalidade unidirecional do PIB industrial (PIBIN) para o consumo de eletricidade apenas no longo prazo. Esse resultado sugere que, assim como no setor agropecuário, é o crescimento do produto industrial no longo prazo que determina o aumento da demanda de eletricidade do setor. Apesar de ser o responsável pela maior parcela de energia elétrica consumida no período analisado, o setor industrial brasileiro vem perdendo participação no PIB nos últimos anos e o resultado encontrado pode sugerir a possibilidade de um cenário de consumo excessivo de energia dentro de um setor relativamente ineficiente. Resultado semelhante também foi encontrado por Murugan et al. (2012) no Paquistão e por Tiwari et al. (2021) na Índia.

Em se tratando do setor comercial/serviços, os resultados mostram que apenas os coeficientes do termo de correção de erro, associados tanto ao consumo de energia elétrica comercial/serviços (CECS) quanto ao PIB comercial/serviços (PIBCS), foram significativos ao nível de 1%, indicando a presença de relação de causalidade bidirecional de longo prazo entre o produto e o consumo de eletricidade do setor. Nesse cenário, o consumo de energia elétrica pode aumentar como um reflexo do aumento da demanda por eletricidade proporcionada pelo crescimento do produto setorial, assim como o crescimento do produto pode aumentar induzido por um aumento no uso de energia como um insumo de produção, caracterizando, por tanto, a hipótese de feedback. Resultado similar também foi encontrado por Bowden e Payne (2009) para os EUA.

De forma a sustentar os resultados encontrados nos testes de causalidade de Granger discutidos acima, realizou-se uma análise de Decomposição da Variância das variáveis sob estudo. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.

Tabela 4 - Decomposição da variância dos erros de previsão do PIB e do consumo de energia elétrica dos setores agropecuário, industrial e comercial/serviços, de 1970 a 2019.

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

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

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 1: Ordenamento de Cholesky: LPIB LCE.

Nota 2: 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).

Com relação ao setor agropecuário, os resultados da decomposição da variância dos erros de previsão da variável LPIBAG expostos na Tabela 4 indicam que, decorridos 20 anos após um choque não esperado sobre essa variável, aproximadamente 99% do seu comportamento decorre dela própria e pouco menos de 1% pode ser atribuído a variável LCEAG. Já com relação à decomposição da variância dos erros de previsão da variável LCEAG, pode-se observar que grande parte do seu erro de previsão é explicada pela variável LPIBAG, 44% nos primeiros cinco anos e 87% ao final do período considerado. Isso confirma, assim como na análise de causalidade, que tanto no curto quanto no longo prazo, é o PIB agropecuário que determina o consumo de energia elétrica do setor.

Em se tratando do setor industrial, a decomposição da variância dos erros de previsão da variável LPIBIN indica resultado similar ao encontrado para o setor agropecuário. Após um choque inicial não antecipado, aproximadamente 99% do comportamento da variável LPIBIN é explicado por ela própria e menos de 1% é explicado pela variável LCEIN no decorrer de 20 anos. Já a decomposição da variância dos erros de previsão da variável LCEIN, mostra que, somente no longo prazo a variável LPIBIN passa a explicar a maior parcela do comportamento da variável LCEIN, cerca de 62%. Esses resultados confirmam a ausência de causalidade de curto prazo e a presença de causalidade de longo prazo do PIB industrial para o consumo de energia elétrica do setor.

No que se refere ao setor comercial/serviços, após um choque não esperado, a decomposição da variância dos erros de previsão da variável LPIBCS mostra que no decorrer do tempo, parte significativa do seu erro de previsão passa a ser explicado gradualmente pela variável LCECS. Comportamento similar também pode ser observado a partir da decomposição da variância dos erros de previsão da variável LCECS. Esses resultados corroboram com os encontrados na análise de causalidade, confirmando a complementariedade ou presença de causalidade bidirecional de longo prazo entre o PIB e o consumo de energia elétrica do setor de comércio/serviços.

6. CONCLUSÃO

De modo geral, os resultados encontrados para os testes de causalidade no sentido de Granger sugerem que o consumo de energia elétrica não desempenha papel determinante no crescimento do produto dos setores agropecuário e industrial. Pelo contrário, quanto maior o nível de produto, maior será a demanda por energia elétrica. Nesse cenário, entende-se que

políticas de conservação de energia, que incentivam a redução do consumo de eletricidade e a manutenção da oferta de energia existente com o objetivo de reduzir a poluição e as emissões relacionadas a geração de eletricidade, podem ser implementadas com pouco ou nenhum efeito adverso sobre o crescimento econômico desses setores.

Para o caso do setor comercial/serviços, o consumo de energia elétrica e o produto setorial apresentam uma relação de complementariedade (*feedback*), de modo que o crescimento do produto pode exigir mais energia, ao passo que mais consumo de energia pode induzir ao crescimento do produto. Nesse cenário, entende-se que tanto políticas de estímulo à conservação da energia quanto de estímulo à ampliação da oferta existente, podem influenciar na dinâmica do setor e, portanto, devem estar sob o foco dos formuladores de políticas econômicas e energéticas.

Também cabe destacar que para garantir que a oferta energia elétrica acompanhe o aumento no nível do produto setorial do Brasil, é importante que o investimento de capital público em infraestrutura seja direcionado não só para construção de grandes projetos de geração de energia, mas também para projetos que apresentam menor tempo de construção, menor impacto ambiental e preços mais competitivos como é o caso das pequenas centrais hidrelétricas, eólicas e de biomassa. Como a expansão da oferta de energia pode levar a efeitos negativos associados principalmente a impactos ambientais e a possibilidade de esgotamento de recursos naturais e financeiros necessários para sua produção. Uma alternativa para ampliação da produção de energia elétrica no Brasil pode estar na adoção de políticas que estimulem a descoberta e utilização de novas fontes renováveis de energia e no desenvolvimento de novas tecnologias que utilizam energia de forma mais eficiente. A exemplo do que vem ocorrendo ao redor do mundo, o investimento em eficiência energética pode se tornar uma importante ferramenta capaz de reduzir os custos e impactos ambientais da produção de energia sem comprometer a qualidade dos serviços prestados aos consumidores, além de postergar a necessidade de investimentos na ampliação da infraestrutura do setor elétrico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, F.; CHOUDHURY, N. Electricity consumption-economic growth nexus: na aggregated and disaggregated causality analysis in India and Pakistan. **Journal of Policy Modeling**. v. 35 (4), p. 538-553, 2013.

AHMAD, A., ZHAO, Y. SHAHBAZ, M., BANO, S., ZHANG, Z., WANG, S., LIU, Y. Carbon emissions, energy consumption and economic growth: An aggregate and disaggregate analysis of the Indian economy. **Energy Policy**. v. 96, p.131-143, 2016.

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**. 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**. v. 22 (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**. 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**. v. 22, p. 615-625, 2000.

BOWDEN, N., PAYNE, J. E. The causal relationship between U.S. energy consumption and real output: adisaggregated analysis. **Journal of Policy Modeling**, v. 31, 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**, v. 27, n. 3, 2020.

BRAMBILLA, P. H. M.; MUELLER, B. M. P. **Impacto da energia elétrica no crescimento econômico**. UNOPAR Cient., Ciênc. Juríd. Empres., Londrina, v. 5, p. 33-45, mar. 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Anuário estatístico de energia elétrica 2020. Rio de Janeiro: EPE e MME, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE) E MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Balanço Energético Nacional 2020. Rio de Janeiro: EPE e MME, 2020.

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 Publishier Limited, 1997.

CHURCHILL, S. A.; IVANOVSKI, K. Electricity consumption and economic growth across Australian states and territories. **Applied Economics**. v. 52, 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**. 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**. 10(4), p. 384-391, 2020.

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**, v. 16, n. 24, p. 11, 2014.

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

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

- GRANGER, C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral models. **Econometrica**, v. 34, p. 541-551, 1969.
- 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**. v. 67, p. 41–54, 2008.
- KRAFT, J.; KRAFT, A. On the relationship between energy and GNP. **Journal of Energy and Development**, v. 3, p. 401-403, 1978.
- LIN, B.; WANG, Y. Inconsistency of economic growth and electricity consumption in China: A panel VAR approach. **Journal of Cleaner Production**. v. 229, p. 144-156, 2019.
- Maddala, G. S.; Kim, I. M. **Unit roots, cointegration, and structural change**. New York: Cambridge University, 1998. 505 p.
- MEHRARA, M. Energy consumption and economic growth: the case of oil exporting countries. **Energy Policy**. v. 35, 2939–2945, 2007.
- MENEGAKI, A. N. Growth and renewable energy in Europe: a random effect model with evidence for neutrality hypothesis. **Energy Consumption**, v. 33, p. 257-263, 2011.
- MURUGAN N. T. et al. Are sectoral outputs in Pakistan led by energy consumption?. **Economics Bulletin**, 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**. v. 37 (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**. v. 26, p. 51-59, 2004.
- OZTURK, I. A literature survey on energy-growth nexus. **Energy Policy**, v. 38, n. 1, p. 340-349, 2010.
- PALA, A. Energy and economic growth in G20 countries: Panel cointegration analysis, **Economics and Business Letters**, 9(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**, v. 2014, 2014.
- PAUL, S.; BHATTACHARYA, R. N. Causality between energy consumption and economic growth in India: a note on conflicting results. **Energy Economics Energy Economics**. v. 26, p. 977-983, 2004.
- PAYNE, J. E. On the dynamics of energy consumption and output in the US. **Applied Energy**, v. 86, p. 575-577, 2009.

PAYNE, J. E. A survey of the electricity consumption-growth literature. **Applied Energy**, v. 87, p. 723-731, 2010.

SARI, R.; SOYTAS, U. The growth of income and energy consumption in six developing countries. **Energy Policy**. v.35, 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, p.-67-98, jan-mar. 2004.

SOLARIN, S. A.; OZTURK, I. On the causal dynamics between hydroelectricity consumption and economic growth in Latin America countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 52, p. 1857-1868, 2015.

SHIU, A.; LAM, P. Electricity consumption and economic growth in China. **Energy Policy**. v. 32, p. 47-54, 2004.

STERN, D. I. The role of energy in economic growth. **International energy and poverty**, p. 35-47, 2015.

TANG, C. F.; SHAHBAZ, M. Sectoral analysis of the causal relationship between electricity consumption and real output in Pakistan. **Energy Policy**, 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**. v. 18 (1), p. 1 – 12, 2019.

TIWARI, A. K.; EAPEN, L. Mary.; NAIR, S. R. Electricity consumption and economic growth at the state and sectoral level in India: Evidence using heterogeneous panel data methods. **Energy Economics**, v. 94, p. 105-064, 2021.

YOO, S. H. Electricity consumption and economic growth: evidence from Korea. **Energy Policy**. v. 33, p. 1627-1632, 2005.

APÊNDICE

Tabela 1A – Vetores de cointegração

LCEAG	Constante	LPIBAG
1,0000	69,35929 (33,2311)	-3,362260 (1,32643)
LCEIN	Constante	LPIBIN
1,0000	-6,627898 (13,8625)	-0,378126 (0,52329)
LCECS	Constante	LPIBCS
1,0000	-10,41352 (8,70477)	-0,159135 (0,32737)

Fonte: Elaboração própria a partir dos resultados da pesquisa.