



**TESOURO NACIONAL**

# Textos para Discussão

**Consumo de Eletricidade e Crescimento Econômico  
no Brasil, 1952-2010: Uma Análise de Causalidade**

**Sérgio Ricardo de Brito Gadelha**

**Renata Miyabara Gagliardi Cerqueira**

**TD Nº 016  
2013**

**MINISTRO DA FAZENDA**

Guido Mantega

**SECRETÁRIO-EXECUTIVO**

Nelson Barbosa

**SECRETÁRIO DO TESOURO NACIONAL**

Arno Hugo Augustin Filho

**SUBSECRETÁRIOS DO TESOURO NACIONAL**

Líscio Fábio de Brasil Camargo

Gilvan da Silva Dantas

Paulo Fontoura Valle

Cleber Ubiratan de Oliveira

Marcus Pereira Aucélio

Eduardo Coutinho Guerra

**CONSELHO EDITORIAL**

Fabiana Magalhães Almeida Rodopoulos - Coordenadora

Luis Felipe Vital Nunes Pereira - Assistente Editorial

Eduardo Coutinho Guerra

Jose Franco Medeiros de Moraes

Líscio Fábio de Brasil Camargo

Marcelo Pereira Amorim

Mário Augusto Gouvea de Almeida

Selene Peres Peres Nunes

**SUPLENTE**

Bergy Bezerra

Janete Duarte

José Eduardo Pimentel de Godoy Júnior

Leandro Giacomazzo

Lena Oliveira de Carvalho

Rosilene Oliveira de Souza

Viviane Aparecida da Silva

A Série de Textos para Discussão do Tesouro Nacional destina-se à publicação de artigos técnico-científicos, com permissão de acesso aberto e gratuito por meio do sítio da Secretaria na internet, admitindo-se também a divulgação impressa destinada a centros de pesquisas, bibliotecas e universidades do país. As opiniões expressas nesses trabalhos são exclusivamente dos autores e não refletem, necessariamente, a visão da Secretaria do Tesouro Nacional ou do Ministério da Fazenda.

Ficha Catalográfica

## 1. Sumário

1. Introdução	4
2. Panorama do Setor Energético Brasileiro	7
3. Breve Revisão de Literatura	8
3.1 Hipótese do Crescimento	8
3.2 Hipótese Conservadora	9
3.3 Hipótese <i>Feedback</i>	10
3.4 Hipótese de Neutralidade	11
4. Base Teórica	11
5. Dados	12
6. Tratamento Econométrico	13
6.1 Teste de Raiz Unitária com Quebra Endógena	13
6.2 Causalidade Multivariada	14
6.3 Exogeneidade Fraca	15
7. Análise dos Resultados	15
7.1 Teste de Raiz Unitária com Quebra Endógena	15
7.2 Causalidade Multivariada	16
7.3 Exogeneidade Fraca	20
8. Conclusões e Implicações de Política	21
9. Referências	22

# Consumo de Eletricidade e Crescimento Econômico no Brasil, 1952-2010: Uma Análise de Causalidade

Sérgio Ricardo de Brito Gadelha<sup>1</sup>

Renata Miyabara Gagliardi Cerqueira<sup>2</sup>

## Resumo

Esse estudo examina a relação entre consumo de eletricidade e crescimento econômico no Brasil durante o período de 1952-2010 em estrutura multivariada de cointegração e causalidade. O teste de causalidade de Granger (1969) em um modelo vetorial com correção de erro (VEC) indica uma forte evidência de causalidade unidirecional do consumo de eletricidade *per capita* para o PIB real *per capita*, indicando que o Brasil é uma nação dependente de energia elétrica e que políticas conservadoras de energia terão um efeito adverso no crescimento econômico.

Palavras-chave: Consumo de Eletricidade, Cointegração, Causalidade de Granger, Crescimento Econômico.

## Abstract

This study examines the relationship between electricity consumption and economic growth in Brazil during the period of 1952-2010 within a cointegration and causality multivariate framework. The Granger (1969) causality test within the vector error-correction model (VEC) indicates a strong evidence for unidirectional causality running from the *per capita* electricity consumption to the *per capita* real GDP, implying that Brazil is an energy dependent country and thus energy conservation policies will have an adverse effect on economic growth.

Keywords: Electricity Consumption, Cointegration, Granger Causality, Economic Growth

JEL Classification: C32, Q43

## 1. Introdução

A geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente hidrelétrica, com diversas bacias hidrológicas integradas através de uma extensa rede de transmissão, que cobre quase todo o país. A afluência hídrica segue um padrão temporal sazonal e de grande variabilidade, sobretudo nos meses úmidos. Essas características implicam a necessidade de construção de reservatórios de grande capacidade de acumulação. A alta participação de fontes hidráulicas torna esse sistema de geração elétrica vulnerável a situações de escassez de energia devido à incerteza do regime das chuvas, e implica o problema da utilização intertemporal da energia acumulada nos reservatórios.

De maneira específica, o risco da matriz com base hidráulica está no clima. Se chove pouco,

<sup>1</sup> Doutor em Economia pela Universidade Católica de Brasília. Analista de Finanças e Controle da Secretaria do Tesouro Nacional. Email para contato: professor.sergio.gadelha@gmail.com.

<sup>2</sup> Especialista em Economia e Finanças pelo Centro de Estudos e Pesquisa em Economia e Gestão Governamental. Email para contato: renata.gagliardi@gmail.com.

Os autores desejam expressar seus sinceros agradecimentos ao parecerista anônimo da série de Textos para Discussão da Secretaria do Tesouro Nacional pelos valiosos comentários e sugestões que contribuíram para a melhoria da qualidade desse artigo. Uma versão anterior deste estudo foi apresentada no 19º Simpósio Nacional de Probabilidade e Estatística (SINAPE) em 2010.

\* As opiniões expressas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade dos autores, não expressando necessariamente a visão da Secretaria do Tesouro Nacional.

todo o sistema perde capacidade de geração. A eletricidade nesse tipo de matriz só se estoca sob a forma de água acumulada em reservatórios. Porém, a grande maioria das hidrelétricas construídas a partir dos anos 1990 não tem mais reservatório. Ou seja, a água que se acumula junto à barragem é para uso corrente. A quantidade que chega à barragem é a mesma que sai pelas turbinas. Por isso, no chamado “período úmido”, com chuvas abundantes, essas hidrelétricas são mais utilizadas porque os rios que as alimentam estão volumosos. E como não acumulam água além do necessário para uso imediato, nos anos de chuvas abundantes o “excedente” é vertido, sem passar pelas turbinas instaladas nas casas de força (RESERVATÓRIOS..., 2013).

Apesar de o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) prever a destinação de R\$ 65,9 bilhões visando o acréscimo de 12.386 megawatts na geração de energia elétrica nos próximos anos, além de R\$ 12,5 bilhões destinados à construção de 13.826 quilômetros de linhas de transmissão, eventos recentes aumentaram a preocupação dos agentes econômicos sobre a possibilidade de ocorrer uma nova crise energética no Brasil<sup>3</sup>. Por exemplo, no início de 2008, o preço da energia no mercado livre (Preço de Liquidação de Diferença - PLD)<sup>4</sup>, fixado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) duplicou, tendo o valor reajustado de R\$ 247,01 por megawatt/hora (MWh) para R\$ 475,53/MWh, o maior valor desde o racionamento de energia de 2001 (R\$ 694/MWh). Além de ser um indicador econômico, o preço evidenciou um aumento da percepção de risco de racionamento de energia por parte dos agentes de mercado. Além disso, o nível médio da maior parte dos reservatórios, no início de 2008, encontrava-se abaixo do patamar de janeiro de 2001, dois meses antes da decretação do racionamento de energia iniciado naquele ano. A escassez de chuvas no último trimestre de 2007, provocada pelo fenômeno climático “La Niña”, esvaziou os reservatórios das hidrelétricas das regiões Nordeste, Norte e Sul em nível inferior ao do período pré-acionamento, exigindo um maior esforço das hidrelétricas das regiões Sudeste e Centro Oeste em enviar energia às outras regiões afetadas.

A eletricidade é a forma mais flexível de energia e constitui um dos insumos de infraestrutura vitais ao desenvolvimento socioeconômico de um país. Apesar de não haver teoria econômica para explicar a relação entre o consumo de energia elétrica e o crescimento econômico, sabe-se que o tipo de relação de causalidade entre essas variáveis pode afetar a eficácia de políticas econômicas em uma nação. Por essa razão, o estudo da relação de causalidade entre consumo de energia elétrica e crescimento econômico tem sido um dos temas mais recorrentes para os pesquisadores da área econômica nas últimas décadas (ALTINAY e KARAGOL, 2005). Desde o trabalho seminal de Kraft e Kraft (1978), inúmeros estudos, com diferentes metodologias, investigaram a relação de causalidade entre o consumo de energia e o crescimento econômico para países de todo o mundo. Os resultados variam de país para país, bem como de estudo para estudo considerando o mesmo país (PAYNE, 2010; OZTURK, 2010).

Embora a relação entre essas duas variáveis tenha sido debatida exaustivamente na literatura econômica, a direção da causalidade permanece não resolvida. Essa falta de consenso pode ser devida a diferenças nos estágios de desenvolvimento de vários países estudados, ou então diferenças nos dados e metodologias utilizados. Todavia, mesmo estudos direcionados aos mesmos países fornecem resultados diferentes. As diferenças nas metodologias podem ser classificadas em duas categorias: estruturas bivariadas e estruturas multivariadas. Embora a aplicação de teste de causalidade de

<sup>3</sup> Informações detalhadas sobre os investimentos em infraestrutura previstos no PAC, especialmente no setor de energia elétrica, podem ser obtidas no seguinte sítio eletrônico: <<http://www.brasil.gov.br/pac/>>.

<sup>4</sup> Mercado livre de energia foi criado com a reestruturação do setor elétrico em 1995, quando a mudança na regulamentação passou a permitir que determinada classe de consumidores passassem a contratar bilateralmente seu fornecimento de energia com aquelas empresas concessionárias cadastradas como agentes (produtores independentes, geradores e comercializadores). Informações detalhadas encontram-se disponíveis em: <<<http://appro.tractebelenergia.com.br/mercado-livredeenergia/>>>.

Granger em estruturas bivariadas possa ser criticada devido ao possível viés de omissão de variáveis relevantes, estudos em estruturas multivariadas também apresentam resultados conflitantes. Uma possível explicação para a falta de consenso em estudos multivariados para mesmos países pode estar relacionada à escolha arbitrária das variáveis de controle (SOYTAS e SARI, 2006).

Nesse contexto, as conclusões a respeito da relação de causalidade entre consumo de eletricidade e crescimento econômico da maior parte dos estudos desenvolvidos são baseadas em quatro hipóteses a seguir destacadas (OZTURK, 2010).

Primeiro, uma relação de causalidade unidirecional do consumo de eletricidade para o crescimento econômico implica que as restrições à eletricidade podem prejudicar o crescimento econômico, ao passo que os aumentos no uso da eletricidade podem contribuir para o crescimento econômico. Trata-se da hipótese do crescimento, a qual demonstra que políticas conservadoras relacionadas ao consumo de eletricidade devem ser desencorajadas por serem contraproducentes. Por exemplo, uma redução no consumo de eletricidade pode levar a uma queda na renda, evidenciando não apenas que o país em questão é dependente de energia elétrica, bem como os choques negativos de energia, tais como políticas de aumento dos preços da energia elétrica ou políticas conservadoras de energia elétrica, irão impactar negativamente no crescimento econômico.

Segundo, a relação de causalidade unidirecional do crescimento econômico para o consumo de eletricidade é uma forte justificativa para a adoção de políticas conservadoras de energia, tais como racionamento de eletricidade, já que essa relação indica que um país não é totalmente dependente de energia elétrica para o seu crescimento e desenvolvimento. Trata-se da hipótese conservadora, a qual indica que um aumento no crescimento econômico causa um aumento no consumo de eletricidade, sugerindo que políticas restritivas em relação ao consumo de eletricidade não tem efeito adverso no crescimento econômico. Logo, essas políticas conservadoras podem ser adotadas com certa segurança, tendo a sua adoção justificada com pouca ou nenhuma repercussão negativa sobre o crescimento econômico. Por outro lado, um aumento contínuo no crescimento pode implicar em um aumento permanente do consumo de eletricidade.

Terceiro, uma relação de bicausalidade entre o consumo de eletricidade e o crescimento econômico significa que essas duas variáveis são mutuamente afetadas e conjuntamente determinadas ao mesmo tempo. Se essa relação for constatada, o uso da energia elétrica aumenta como um resultado da renda elevada, pois o crescimento econômico pode demandar mais eletricidade. Contudo, o consumo de eletricidade pode induzir o crescimento econômico de um país através da produção industrial, por exemplo. A hipótese *feedback* implica que uma redução no consumo de eletricidade pode afetar, de maneira adversa, o crescimento econômico e vice-versa, de modo que uma abordagem diferente de política pública seria necessária ao considerar essas duas variáveis.

Finalmente, um quarto cenário associado à falta de relação de causalidade entre consumo de eletricidade e crescimento econômico indica que nem as políticas expansivas nem políticas conservadoras em relação ao consumo de energia elétrica tem qualquer efeito sobre o crescimento econômico, pois a energia elétrica é um pequeno componente do produto agregado. A conclusão revelaria um papel menor do consumo de eletricidade e seus efeitos no crescimento econômico de um país.

O consumo de eletricidade é um estímulo para o crescimento econômico brasileiro? Analisar se choques adversos no suprimento de energia elétrica comprometem ou não o crescimento econômico brasileiro é tema relevante ao atual debate acadêmico, com importantes implicações de política econômica, uma vez que a definição da direção da causalidade pode fornecer um retrato claro aos *policymakers* sobre a elaboração de políticas eficientes para o setor de energia elétrica, dada a preocupação, por um lado, com o crescimento econômico e, por outro lado, com o meio ambiente e

a escassez de recursos.

O objetivo desse estudo é investigar a relação de equilíbrio de longo prazo e de causalidade entre consumo de eletricidade e crescimento econômico no Brasil no período de 1952 a 2010, por meio da análise de causalidade de Granger (1969) desenvolvida em estrutura multivariada e cointegrada. A determinação do tipo de causalidade entre essas variáveis para o Brasil visa agregar informação aos processos decisórios de direcionamento de políticas energéticas e de expansão do sistema, bem como para os processos decisórios de políticas macroeconômicas de estímulo ao consumo e ao investimento.

O tema é atual, haja vista as discussões desenvolvidas a respeito da importância que a melhoria da infraestrutura brasileira, tanto logística como energética, tem para a elevação da taxa de crescimento potencial do país.

Essa investigação empírica contribui com a literatura porque pesquisas sobre o tema em análise ainda são escassas para o caso brasileiro, mas pode-se citar, por exemplo, o estudo de Yoo e Kwak (2010). Trabalhos que procurem avaliar a relação entre crescimento econômico e consumo de energia podem contribuir de forma destacada para a formulação de políticas públicas e, neste sentido, este estudo é inovador.

Os resultados aqui obtidos indicam que o Brasil se enquadra na hipótese do crescimento. Constata-se, empiricamente, a existência de relação de causalidade de Granger unidirecional do consumo de eletricidade para o crescimento econômico, sugerindo que o consumo de eletricidade é um fator limitante para o crescimento econômico, de modo que choques adversos em relação à eletricidade terão um impacto negativo no crescimento econômico brasileiro. Em outras palavras, o Brasil é uma nação dependente de energia elétrica, e políticas conservadoras de energia elétrica, por exemplo, racionamento de consumo de eletricidade, ou mesmo choques de oferta, como uma crise de energia elétrica, podem provocar efeitos adversos no crescimento econômico.

O artigo está organizado da seguinte forma. A próxima seção faz um panorama do consumo de eletricidade no Brasil. A terceira seção apresenta uma breve revisão de literatura sobre o tema. A quarta seção apresenta um breve relato da fundamentação teórica para investigar essa relação de causalidade. A quinta seção apresenta as variáveis envolvidas na análise. A sexta seção descreve o tratamento econométrico, onde são apresentados os testes de raízes unitárias e de causalidade multivariada. A sétima seção reporta e analisa os resultados. Finalmente, a oitava seção conclui o artigo.

## 2. Panorama do Setor Energético Brasileiro

A Matriz Energética Brasileira é composta por fontes renováveis e não renováveis. Segundo o Balanço Energético Nacional 2012, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética, as fontes renováveis representam 44% da oferta interna de energia enquanto as fontes não renováveis representam 56% da oferta. Esta participação de renováveis na matriz energética mantém o Brasil entre os países com as mais elevadas participações de fontes renováveis do mundo. A média mundial da participação de fontes renováveis nas matrizes energéticas é de 13%, sendo que nos países da OCDE este número reduz-se para 8%.

A oferta interna de energia no ano de 2011 foi de 272 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), enquanto que o consumo final (realizado pelas pessoas e pelas empresas) foi de 228,7 Mtep. Esses dados, comparados aos números de 2010, mostram que o crescimento da oferta interna de energia foi inferior ao crescimento do PIB, indicando aumento da eficiência da economia. Os dados mostram que o crescimento do consumo final energético foi superior ao crescimento da oferta interna de energia, indicando redução das perdas do sistema.

Em 2001, no entanto, o cenário era diferente deste panorama. A falta de mecanismos setoriais de planejamento, juntamente com a falta de investimentos, a falta de chuvas e, ainda, a falta de recursos para expansão do sistema, submeteram o Brasil a um racionamento de energia. Este choque de oferta porquanto deslocou a atenção da recuperação da demanda para os limites da expansão da oferta. Em um segundo movimento, as atenções voltaram-se não apenas para o futuro das chuvas e dos efeitos da autorrestrrição de consumo, mas também para as implicações que o novo quadro provocaria sobre o futuro das taxas de juros (CARNEIRO e WU, 2011, p. 159-171). Naquele momento, a previsão do impacto de um choque de oferta como o que o Brasil estava enfrentando não era tarefa fácil. Os impactos sobre a capacidade produtiva disponível para uso futuro poderiam, portanto, depender não apenas da magnitude da diminuição da oferta; ao passo que o maior ou menor sucesso da nova configuração de uso de eletricidade que resultaria do programa de racionamento em implementação poderia ter impactos diversos sobre a perda de PIB envolvida e, desta forma, sobre o grau de restrição de demanda global que se faria necessário.

Esta crise energética levou o governo brasileiro a criar a Câmara de Gestão da Crise de Energia Elétrica (GCE) com o objetivo de propor e implementar medidas de natureza emergencial para compatibilizar a demanda e a oferta de energia elétrica. As medidas adotadas compreenderam a construção de linhas de transmissão de energia, de gasodutos e oleodutos, de usinas termoelétricas, de usinas hidroelétricas, a geração de energia por fontes alternativas e a importação de energia (MP 2.198-5, de 24 de agosto de 2001). Ainda houve o Programa Emergencial de Redução de Consumo de Energia Elétrica, em que se estabeleceram limites de uso e de fornecimento de energia elétrica. O resultado revelado com o racionamento de energia elétrica foi a redução média de 2,4% do PIB nos quatro semestres que esteve em vigor (CARNEIRO e WU, 2011, p. 159-171).

A reestruturação do setor energético do Brasil que atualmente encontra-se em andamento é parte do processo de reconhecimento de que a qualidade e a quantidade da oferta de energia exerce um papel fundamental no desenvolvimento social e econômico. De maneira implícita nesta reestruturação está a hipótese de que os investimentos em energia e as políticas voltadas a tornar o setor de energia mais eficiente e moderno podem promover o crescimento econômico. Portanto, o conhecimento da direção da causalidade entre consumo de energia e crescimento econômico é de fundamental importância para que políticas de energia apropriadas sejam concebidas.

### 3. Breve Revisão de Literatura

A análise da relação entre consumo de eletricidade e crescimento econômico não é uma nova área de exploração científica, uma vez que esse tema tem sido pesquisado exaustivamente nas últimas décadas. Todavia, a direção da causalidade entre essas duas variáveis permanece contraditória. Essa seção tem como finalidade reportar as evidências empíricas a respeito de cada uma das hipóteses sobre o nexos causal entre essas duas variáveis.

#### 3.1 Hipótese do Crescimento

Altinay e Karagol (2005) investigam a relação de causalidade entre consumo de eletricidade e PIB real na Turquia usando dados anuais referentes ao período de 1950 a 2000. Os resultados obtidos a partir da estimação de um modelo VAR indicaram forte evidência de causalidade de Granger unidirecional do consumo de eletricidade para a renda, indicando que a oferta de eletricidade é de vital importância para atender ao crescente consumo de eletricidade e, assim, sustentar o crescimento econômico da Turquia.

Yuan *et al.* (2007) aplicaram a teoria da cointegração para examinar a relação de causalidade entre consumo de eletricidade e PIB real na China durante o período 1978 a 2004. Os resultados obtidos indicaram a existência de relação de longo prazo entre essas duas variáveis, assim como a existência de relação de causalidade de Granger unidirecional do consumo de eletricidade para o PIB real. Em seguida, o filtro Hodrick-Prescott (filtro HP) foi aplicado para decompor a tendência e o componente cíclico dessas séries, e os resultados indicaram que a existência de cointegração não apenas nos componentes de tendência, mas também nos componentes cíclicos das séries, indicando que a causalidade de Granger provavelmente estava relacionada ao ciclo de negócios.

Utilizando dados anuais de Fiji para o período 1971 a 2002, Narayan e Singh (2007) estimaram um modelo autorregressivo e de defasagens distribuídas (ADL) e os resultados obtidos indicaram uma relação de causalidade de Granger no longo prazo unidirecional do consumo de eletricidade para o PIB, evidenciando que Fiji é um país dependente de energia elétrica e, portanto, políticas de conservação de energia tem impacto adverso no crescimento econômico daquele país.

Abosedra, Dah e Ghosh (2008) investigam a relação causal entre consumo de eletricidade e crescimento econômico no Líbano cobrindo o período de janeiro de 1995 a dezembro de 2005. Os resultados empíricos do estudo confirmam a ausência de relação de equilíbrio de longo prazo entre essas duas variáveis, bem como a existência de causalidade de Granger unidirecional do consumo de eletricidade para o crescimento econômico, em um modelo VAR bivariado. Assim, os *policymakers* deviam dar prioridade nos estágios iniciais da reconstrução ao desenvolvimento da infraestrutura do setor elétrico, visando impulsionar o crescimento econômico do país.

Yoo e Kwak (2010) investigaram a relação entre consumo de eletricidade e crescimento econômico para sete países da América do Sul no período 1975 a 2006. Os resultados obtidos indicaram evidências de causalidade de Granger unidirecional do consumo de eletricidade para o crescimento econômico na Argentina, Brasil, Chile, Colômbia e Equador. Além disso, eles encontraram evidências de bi-causalidade de Granger na Venezuela, mas ausência de causalidade no Peru.

### 3.2 Hipótese Conservadora

Utilizando dados para o período 1947 a 1974, Kraft e Kraft (1978) encontraram causalidade de Granger unidirecional do crescimento econômico para o consumo de energia nos Estados Unidos, sugerindo que políticas de conservação de energia eram factíveis.

Narayan e Smyth (2005) examinam a relação entre consumo de eletricidade, emprego e renda real na Austrália, utilizando dados anuais de 1966 a 1999. Os resultados obtidos a partir da estimação de um modelo VEC indicaram relação de causalidade unidirecional da renda real para o consumo de eletricidade. Logo, políticas de conservação de eletricidade através de medidas de aprimoramento da eficiência, assim como políticas de gerenciamento de demanda desenhadas para reduzir o desperdício de eletricidade e redução do consumo, poderiam ser implementadas sem causar qualquer efeito adverso no nível de emprego e renda real.

Mozumder e Marathe (2007) examinam a relação de causalidade entre consumo de eletricidade *per capita* e PIB *per capita* para Bangladesh por meio de um modelo VEC. Utilizando dados anuais do período 1971 a 1999, os resultados obtidos indicaram causalidade de Granger unidirecional do PIB *per capita* para o consumo de eletricidade *per capita*, de modo que políticas de conservação de energia não prejudicariam o crescimento e desenvolvimento econômico.

Ghosh (2009) analisa o nexos causal entre oferta de eletricidade, emprego e PIB real para Índia estimando um modelo VEC. Utilizando dados anuais do período 1970 a 2006, os resultados obtidos indicaram causalidade de Granger unidirecional do crescimento econômico para a oferta de

eletricidade, de modo que uma maior renda impulsionava o aumento na demanda de eletricidade, através de um amplo uso de aparelhos elétricos nos setores industrial, comercial e doméstico, exigindo um aumento do fornecimento de energia elétrica para atender a essa demanda.

Pao (2009) investigou a relação entre consumo de eletricidade e crescimento econômico para Taiwan utilizando dados trimestrais durante o período 1980 a 2007. Os resultados econométricos obtidos a partir da estimação de um modelo de espaço-estado com correção de erros indicaram que essas variáveis não apenas são cointegradas, como também a existência de uma relação de causalidade unidirecional do crescimento econômico para o consumo de eletricidade.

Shahbaz, Tang e Shabbir (2011) re-examinaram a relação entre consumo de eletricidade, crescimento e emprego em Portugal. Utilizando dados anuais do período 1971 a 2009 em um modelo VEC, os resultados obtidos indicaram causalidade de Granger unidirecional do crescimento econômico para o consumo de eletricidade. Portanto, políticas ambientais voltadas para a conservação da eletricidade, incluindo medidas de melhoria na eficiência e políticas de gerenciamento da demanda, que visam reduzir o desperdício de eletricidade, não provocariam efeitos adversos na atividade econômica no curto prazo.

### 3.3 Hipótese *Feedback*

Odhiambo (2009) examinou a relação de causalidade entre consumo de eletricidade e crescimento econômico na África do Sul. Utilizando dados de séries temporais abrangendo o período 1971 a 2006, os resultados empíricos mostraram que existe uma relação de bi-causalidade de Granger entre essas duas variáveis. Logo, políticas voltadas para a expansão da infraestrutura em eletricidade devem ser intensificadas na África do Sul a fim de lidar com a crescente demanda exercida pelo forte crescimento econômico do país e rápido programa de industrialização.

Ouédraogo (2010) investigou a relação de causalidade de Granger entre consumo de eletricidade e crescimento econômico em Burkina Faso utilizando dados anuais para o período 1968 a 2003. Os resultados obtidos a partir da estimação de um modelo ADL, com mecanismo de correção de erros, indicaram uma relação de bi-causalidade de Granger no longo prazo entre essas duas variáveis. Assim, Burkina Faso não só é um país dependente de energia elétrica, como também trata-se de um país em que o consumo de eletricidade é crescente com o nível de renda.

Kouakou (2011) analisou a relação de causalidade entre a indústria de eletricidade e o crescimento econômico na Costa do Marfim. Usando dados de 1971 a 2008, os resultados obtidos a partir da estimação de um modelo ADL, com correção de erros, revelaram bi-causalidade de Granger entre consumo de eletricidade *per capita* e PIB *per capita*. Logo, a Costa do Marfim é dependente de energia elétrica no longo prazo, havendo a necessidade de assegurar a produção de energia elétrica e evitar “apagões”, a fim de assegurar a trajetória de crescimento sustentável. Além disso, o governo precisa adotar políticas visando aumentar os investimentos no setor elétrico para intensificar a produção de eletricidade a partir de novas fontes de energia existentes.

Utilizando dados trimestrais do período 2000 a 2009 para a Polônia, os resultados obtidos por Gurgul e Lach (2012) a partir da estimação de um modelo VEC indicaram relação de bi-causalidade de Granger entre consumo de eletricidade e PIB.

A partir da estimação de um modelo VEC utilizando dados anuais do período 1972 a 2009, Shahbaz e Lean (2012) encontraram evidências de relação de bi-causalidade de Granger entre consumo de eletricidade e crescimento econômico no Paquistão, evidenciando que a adoção de políticas de conservação de energia pode impactar, de maneira negativa, o crescimento econômico, ao passo que baixo crescimento econômico resultará em redução na demanda por eletricidade. Assim, governos

que adotam tais políticas conservacionistas devem explorar e desenvolver fontes alternativas de energia como uma estratégia de política, ao invés apenas de aumentar a produção de energia elétrica para atender a demanda crescente por eletricidade em sua busca para sustentar o crescimento econômico.

### 3.4 Hipótese de Neutralidade

Payne (2009) aplicou o teste de causalidade de Granger para investigar a natureza da relação entre consumo de energia renovável e de energia não renovável, assim como produto real nos Estados Unidos. Utilizando dados anuais para o período de 1949 a 2006, os resultados indicaram ausência de causalidade de Granger, apoiando a hipótese da neutralidade.

Menegaki (2011) investigaram a relação entre consumo de energia renovável e crescimento econômico no período de 1997 a 2007 para diversos países europeus. O estudo aplicou um modelo de efeitos aleatórios para essa finalidade, e os resultados obtidos indicaram ausência de causalidade de Granger entre essas duas variáveis, corroborando a hipótese de neutralidade.

## 4. Base Teórica

O processo de desenvolvimento econômico necessariamente envolve uma transição de níveis baixos de consumo de energia para altos níveis, onde as relações entre energia, outros fatores insumos e atividade econômica mudam de maneira significativa à medida que uma economia se move através de diferentes estágios de desenvolvimento (TOMAN e JEMELKOVA, 2003).

Duas vertentes são identificadas na literatura que analisa a relação entre consumo de energia e crescimento econômico. A primeira vertente inclui os proponentes do consumo de energia como o principal meio para alcançar o crescimento econômico, conforme postula a hipótese do crescimento. Espera-se que a energia desempenhe um papel fundamental no alcance ao progresso econômico, social e tecnológico, bem como complemente os insumos capital e trabalho no processo de produção (DUNKERLEY, 1982; EBOHON, 1996; TEMPLET, 1999). Nesse caso, a falta de energia é um fator limitador do crescimento econômico e progresso tecnológico. Acredita-se que a energia moderna, e em particular, a eletricidade, tem sido uma importante fonte de melhoria do padrão de vida dos países avançados, além de exercer um papel crucial nos avanços científicos e tecnológicos desses países (ROSENBERG, 1998). Mesmo em países pobres, resultados encontrados indicam que o uso de eletricidade está associado a melhorias nos padrões de saúde e educação, bem como no bem-estar da população pobre (IEA, 2002). Ao nível nacional, nessa era da economia digital, é difícil prever o desenvolvimento sem o uso de energia moderna, em particular, a eletricidade.

A segunda vertente descreve o papel da energia como mínimo ou neutro, de acordo com a hipótese da neutralidade, a qual decorre do fato de que o consumo de energia e, em particular, a eletricidade, não deve afetar o crescimento econômico, uma vez que a energia representa uma parcela muito pequena do produto interno bruto de um país (YU e CHOI, 1985; GHALI e EL-SAKKA, 2004). À medida que uma economia cresce, é provável que sua estrutura produtiva esteja voltada para o setor de serviços, o qual não necessita do uso intensivo de energia em comparação ao setor industrial (SOLOW, 1978; BRENDT, 1980; DENISON, 1985; CHENG, 1995).

A fim de investigar a relação entre energia e crescimento econômico, propõe-se neste estudo uma estrutura baseada em uma tecnologia de produção agregada neoclássica de um setor, onde se trata capital, trabalho e energia como insumos separados (GHALI e EL-SAKKA, 2004; SOYTAS e SARI, 2007), de modo que:

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

Onde  $Y$  é o produto agregado real;  $K$  é o estoque de capital;  $L$  é o nível de emprego;  $E$  é o consumo de energia total. O subscrito  $t$  denota o período de tempo. Caso se permita dinâmicas de curto prazo no comportamento dos fatores de insumo, a análise acima sugere que variações temporais no capital, trabalho e energia poderiam conter informações úteis em prever mudanças futuras no produto, *ceteris paribus*. Essas implicações serão investigadas por meio do teste de causalidade de Granger neste estudo.

## 5. Dados

Os dados de séries temporais utilizados nesse estudo consistem de observações anuais para o período de 1952 a 2010. Trata-se de dados de acesso livre ao público, sendo obtidos no sítio eletrônico do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)<sup>5</sup>, mas cujas fontes primárias serão comentadas a seguir.

A série do Produto Interno Bruto (PIB), em valores correntes (R\$ milhões), é a soma de todos os bens e serviços finais produzidos na economia (dentro do território nacional) durante determinado período de tempo. Essa série tem como fonte primária o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Sistema de Contas Nacionais Referência 2000 (IBGE/SCN 2000 Anual).

A série do consumo total de energia elétrica é expressa em termos de giga-watt horas (GWh), conforme divulgado pela Eletrobrás, tendo como fonte original o Boletim SIESE (Quadro: Consumo total de energia elétrica - Brasil).

O Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna (IGP-DI, agosto de 1994 = 100) - é calculado e divulgado originalmente pela Fundação Getúlio Vargas, Conjuntura Econômica (FGV/Conj. Econ. - IGP) e registra a inflação de preços desde matérias-primas agrícolas e industriais até bens e serviços finais<sup>6</sup>.

A série de população corresponde aos dados de população residente (habitante) calculada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Departamento de População e Indicadores Sociais. Divisão de Estudos e Análises da Dinâmica Demográfica (IBGE/Pop).

O tratamento dos dados ocorreu obedecendo as seguintes etapas. Em primeiro lugar, a série de dados do PIB, em valores correntes, foi convertida em termos reais, deflacionada pelo IGP-DI. Em seguida, as séries de PIB real e consumo total de energia elétrica são expressos em termos *per capita*. Finalmente, essas variáveis são convertidas na forma de logaritmos naturais, de modo que os coeficientes estimados podem ser interpretados como elasticidades. Portanto, o crescimento econômico será representado pela série do PIB real *per capita*, assim como o consumo de eletricidade também será expresso em termos *per capita*.

<sup>5</sup> As séries de dados estão disponíveis em: <<<http://www.ipeadata.gov.br>>>.

<sup>6</sup> O IGP-DI (Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna) faz medições no mês cheio, de 1 a 30 ou 31 de cada mês. Ele é formado pelo IPA-DI (Índice de Preços por Atacado - Disponibilidade Interna), IPC-DI (Índice de Preços ao Consumidor - Disponibilidade Interna) e INCC-DI (Índice Nacional do Custo da Construção - Disponibilidade Interna), com pesos de 60%, 30% e 10%, respectivamente. O período de coleta dos três é o mesmo do IGP-DI.

## 6. Tratamento Econométrico

### 6.1 Teste de Raiz Unitária com Quebra Endógena

O trabalho pioneiro de Perron (1989) ilustra a importância de se incluir uma quebra estrutural nos testes tradicionais de raízes unitárias, uma vez que esses testes possuem baixo poder na presença de quebras estruturais, tornando-se viesados no sentido da não rejeição da hipótese nula de existência de raiz unitária, mesmo quando a série é estacionária. Perron (1989) mostrou que um viés existe contra a rejeição da hipótese nula de uma raiz unitária quando a série temporal, sob investigação, é estacionária ao redor de uma quebra estrutural.

Pesquisas posteriores mudaram a hipótese de Perron (1989) de que o ponto de quebra é conhecido *a priori* e adotaram um procedimento endógeno para determinar o ponto de quebra a partir dos dados. Sob essa perspectiva, Saikkonen e Lütkepohl (2002) e Lanne, Saikkonen e Lütkepohl (2002) propõem que as quebras estruturais podem ocorrer ao longo de um número de períodos e expõe uma transição suave para um novo nível. Assim, uma função de mudança de nível, que é conhecida pela forma não linear geral é acrescentada ao termo determinístico do processo gerador de dados. Portanto, o modelo é expresso pela seguinte regressão:

$$q_t = \mu_0 + \mu_1 t + f(\theta)' \gamma + v_t \quad (2)$$

Onde  $\mu_0$  e  $\mu_1$  são parâmetros escalares desconhecidos, ao passo que  $v_t$  são erros residuais gerados por um processo AR(p) com possível raiz unitária. A mudança na função  $f(\theta)$  pode ser: (i) uma variável *dummy* de mudança simples com data de mudança (*shift dummy*); (ii) baseada em uma função de distribuição exponencial que permite uma mudança gradual não linear para um novo nível começando no período (*exponential shift*); (iii) uma função racional no operador de defasagem aplicado a uma *dummy* de mudança (*rational shift*). Saikkonen e Lütkepohl (2002) e Lanne, Saikkonen e Lütkepohl (2002) propuseram teste de raiz unitária baseado na estimação do termo determinístico por mínimos quadrados generalizados (GLS) e a subtração dessa tendência da série original. Em seguida, um teste ADF é desenvolvido para as séries ajustadas. Se a data da quebra é desconhecida, recomenda-se a escolha de uma ordem de defasagens maior no primeiro passo e, então, apanhar a data de quebra que minimiza a soma dos erros quadrados generalizada do modelo em primeiras diferenças. Valores críticos foram tabulados por Lanne, Saikkonen e Lütkepohl (2002).

## 6.2 Causalidade Multivariada

A análise de causalidade inicia-se pela estimação de um modelo vetorial autorregressivo (VAR) envolvendo todas as variáveis mencionadas anteriormente. O conceito de causalidade no sentido de Granger está associado à ideia de precedência temporal entre variáveis. Assim, se  $y_t$  contém informação passada que ajuda na previsão de  $z_t$ , e se essa informação não está contida em outras séries usadas no modelo, então  $y_t$  Granger-causa  $z_t$  (GRANGER, 1969). O VAR em forma reduzida de dimensão  $p$  pode ser escrito com:

$$X_t = A_0 + A_1 X_{t-1} + A_2 X_{t-2} + \dots + A_p X_{t-p} + \zeta_t \quad (3)$$

onde,  $X_t$  é um vetor de variáveis estacionárias,  $p$  é o número de defasagens,  $A_0$  é um vetor de interceptos,  $A_i$  são matrizes de coeficientes e  $\zeta_t$  é um vetor de resíduos não-autocorrelacionados e homocedásticos. A seleção da ordem de defasagem é feita pelos usuais critérios de informação. Como a análise de causalidade não requer a estimação de parâmetros estruturais, não há necessidade de se adotar alguma estratégia de identificação em (3).

A causalidade de Granger da variável para a variável é avaliada testando a hipótese nula de que os coeficientes da variável em todas as suas defasagens são, simultaneamente, estatisticamente iguais a zero na equação em que é a variável dependente. Caso a hipótese nula seja rejeitada, conclui-se que a variável Granger-causa a variável.

Caso as variáveis em  $X_t$  não sejam estacionárias, deve-se testar cointegração. Nesse caso, havendo cointegração entre as variáveis, utiliza-se o vetor cointegrante para obter uma combinação linear estacionária entre as variáveis e estima-se um modelo vetorial autorregressivo com correção de erros, chamado VEC. A significância estatística do termo de correção de erros também deve ser considerada na condução do teste de causalidade.

A cointegração pode ser testada seguindo o procedimento sugerido por Johansen (1988, 1991, 1992a, 1994, 1995), O teste consiste em modelar séries temporais como uma regressão de posto reduzido em que se calculam as estimativas de máxima verossimilhança do vetor cointegrante no modelo de correção de erros multivariado com erros gaussianos. O teste requer a estimação da representação de correção de erros dada por:

$$\Delta X_t = \mu + \pi X_{t-1} + \sum_{i=1}^{p-1} \pi_i \Delta X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (4)$$

onde  $X_t$  é um vetor coluna ( $m \times 1$ ) de variáveis;  $\mu$  é um vetor ( $n \times 1$ ) de termos constantes;  $\pi$  e  $\pi_i$  representam matrizes de coeficientes;  $p$  é a ordem das defasagens; e o resíduo  $\varepsilon_t$  é não autocorrelacionado e homocedástico. A matriz coeficientes  $\pi$  é conhecida como matriz cointegrante e contém informações sobre o equilíbrio de longo prazo entre as variáveis. O número de autovalores de  $\pi$  que são estatisticamente diferentes de zero, o que corresponde ao posto de  $\pi$ , fornece o número de vetores cointegrantes no sistema. Johansen propõe a estatística do traço para se testar quantos vetores cointegrantes existem em (4). Essa estatística é expressa por:

$$\lambda_{traço}(r) = -T \sum_{i=r+1}^n \ln(1 - \hat{\lambda}_i) \quad (5)$$

onde  $\hat{\lambda}_i$  são os valores estimados dos autovalores obtidos da matriz  $\pi$  e  $T$  é o número de observações.

O teste segue um procedimento recursivo, onde a hipótese nula é de que há, no máximo,  $r$  vetores cointegrantes. Os valores críticos foram tabulados por Johansen (1995).

Caso se confirme os resultados sobre a cointegração das séries analisadas, a análise de causalidade de Granger em uma estrutura multivariada deverá ser conduzida sob a estimação de um modelo VEC, ou seja, as variáveis em primeiras diferenças e a relação de equilíbrio de longo prazo na forma de termos de correção de erros são incluídas no sistema. O teorema da representação de Granger postula que, se as séries de tempo são cointegradas, então a regressão entre elas pode ser expressa com um modelo de correção de erros (ENGLE e GRANGER, 1987). Logo, a causalidade de Granger deve ser investigada inserindo-se o resíduo defasado de um período do vetor cointegrante, chamado mecanismo de correção de erros (MCE). Um termo de correção de erro estatisticamente significativo implica relação de causalidade de Granger de longo prazo das variáveis explicativas para a variável dependente (GRANGER, 1988).

### 6.3 Exogeneidade Fraca

Em um modelo de correção de erros, o mais apropriado para avaliar o grau de exogeneidade entre as variáveis dependentes é trabalhar com os conceitos de exogeneidade fraca e forte, definidos em Engle, Hendry e Richard (1983) e Ericsson (1994). A exogeneidade fraca em sistemas cointegrados corresponde a certas “zero restrições” sobre a matriz de parâmetros de ajustamento, podendo, assim, ser testada. Por exemplo, a hipótese de exogeneidade fraca de uma variável para a matriz de vetores de cointegração não é válida se um dos vetores de cointegração aparece em ambos os modelos, condicional e marginal.

Johansen (1992b) propõe um teste de verossimilhança para a exogeneidade fraca de vetores de cointegração. Se a hipótese de exogeneidade fraca é válida, a análise de cointegração pode ser feita para o modelo condicional sem perda de informação. As consequências da invalidade da hipótese também podem ser analisadas. Johansen (1992b) mostra como as distribuições assintóticas das estatísticas variam, dependendo da presença ou não de exogeneidade fraca. Empiricamente, testes de exogeneidade devem ser um guia para o desenvolvimento de sistemas cointegrados. Tendo sido estabelecida a validade da hipótese de exogeneidade fraca, é possível testar a hipótese de exogeneidade forte determinando-se a segunda condição para que ela ocorra, a não causalidade de Granger de sobre .

## 7. Análise dos Resultados

### 7.1 Teste de Raiz Unitária com Quebra Endógena

Os resultados do teste de Saikkonen e Lütkepohl (2002) são apresentados na Tabela 1 indicam que as séries das variáveis analisadas são integradas de ordem um, ou seja,  $I(1)$ , em modelos com constante, assim como constante e tendência determinística.

A quebra estrutural de 1995 na série do PIB real *per capita* está associada à implantação do Programa de Estabilização Econômica (Plano Real) no ano anterior, com o objetivo de eliminar uma das principais causas da inflação brasileira.

A quebra estrutural na série do consumo de eletricidade *per capita* está associada ao choque

de oferta devido à crise energética que atingiu a economia brasileira em 2001<sup>7</sup>. De maneira específica, entre os anos 2001 e 2002, ocorreu uma crise nacional, sem precedentes no Brasil, que afetou o fornecimento e distribuição de energia elétrica. Devido a um baixo volume de chuvas, o parque gerador de energia elétrica foi insuficiente para atender à demanda prevista e, como a instalação de novas usinas requer elevados investimentos e longo prazo de maturação, o governo federal teve de introduzir um programa de racionamento. O efeito imediato desse racionamento foi a retração da produção e do nível de emprego. O consumo de eletricidade, que era cerca de 213 GWh em 1991, chegou quase a 306 GWh em 2000, observando-se uma redução no ano seguinte para 282 GWh em função de práticas de racionalização de consumo.

Tabela 1 - Teste SL de Raiz Unitária com Quebra Estrutural Endógena

Variável	Modelo	Data da Quebra	Estatística Teste	Lags
$ypc_t$	C	1995	-1,98	1
$ypc_t$	C,T	1995	-1,30	1
$\Delta ypc_t$	C	1995	-4,20***	-
$\Delta ypc_t$	C,T	1995	-3,25**	-
$elpc_t$	C	2001	-1,71	1
$elpc_t$	C,T	2001	-0,41	-
$\Delta elpc_t$	C	2001	-4,60***	-
$\Delta elpc_t$	C,T	2001	-4,50***	-

Notas:

1 - Tipo de quebra endógena: *rational shift*.

2 - “Lags” significa defasagens. Variáveis na forma logarítmica. “C” significa constante. “T” significa tendência determinística. (\*\*\*) significância a 1%; (\*\*) significância a 5%; (\*) significância a 10%. Contagem inicial máxima de 12 defasagens.

3 - Os valores críticos do teste de Saikkonen-Lütkepohl são os seguintes (Lanne *et al.* 2002): (i) modelo com constante: -3,48 (1%); -2,88 (5%) e -2,58 (10%); (ii) modelo com constante e tendência determinística: -3,55 (1%); -3,03 (5%) e -2,76 (10%).

## 7.2 Causalidade Multivariada

Uma vez que as variáveis analisadas não são estacionárias em nível, o modelo apropriado para investigar a relação de causalidade entre crescimento econômico e consumo de eletricidade deve ser estimado em primeiras diferenças. Todavia, o problema óbvio para tal solução, isto é, a perda de informação de qualquer relação de longo prazo entre as variáveis, pode ser resolvido com a implementação da análise de cointegração. Isto envolve, dentro de uma estrutura multivariada, verificar se uma combinação linear de variáveis não estacionárias é estacionária, o que implicaria a existência de uma relação de equilíbrio de longo prazo entre as variáveis.

A fim de atingir essa finalidade, procedeu-se a análise de cointegração das séries segundo teste do traço de Johansen (1988, 1991, 1992a, 1994, 1995), em que a modelagem das duas quebras estruturais identificadas pelo teste de Saikkonen e Lütkepohl (2002) ocorreu com a inclusão das seguintes variáveis *dummies* de nível:  $D_{1995}=0$  entre os anos 1952-1994, e  $D_{1995}=1$  entre os anos 1995-2010;  $D_{2001}=0$  entre os anos 1952-2000, e  $D_{2001}=1$  entre os anos 2001-2010.

<sup>7</sup> De acordo com Carneiro e Wu (2011, p. 160), “*choques de oferta negativos são eventos exógenos que aumentam o custo de produção dos bens e serviços e, então, seus preços. Podem resultar, por exemplo, de um aumento unilateral de preços externos, como o realizado pelo cartel dos produtores de petróleo em 1973 e 1979, ou de um evento natural, como o El Niño dos anos 1980 (...)*”.

Os resultados do teste de cointegração de Johansen com quebra estrutural são reportados na Tabela 2 e indicam a existência de relação de equilíbrio de longo prazo entre as variáveis analisadas, ou seja, não se rejeita a hipótese de presença de vetores de cointegração.

Cointegração significa a existência de uma relação de equilíbrio de longo prazo entre as variáveis analisadas. Se a cointegração para uma formulação particular for estabelecida, recupera-se o termo de correção de erro (TCE), e constrói-se o correspondente mecanismo de correção de erro (MCE). Tal procedimento permite modelar, simultaneamente, o comportamento dinâmico de curto prazo das duas variáveis de interesse (causalidade de curto prazo), bem como testar a direção de causalidade entre as duas variáveis no longo prazo.

De acordo com o Teorema da Representação de Engle-Granger, a existência de relação de cointegração entre o consumo de eletricidade *per capita* e PIB real *per capita* sugere que existe causalidade de Granger em, pelo menos, uma direção, apesar de não indicar a direção da causalidade temporal entre essas variáveis. Logo, há a necessidade de se incluir o termo  $\alpha$ , que é o mecanismo de correção de erros defasado em um período, obtido a partir do modelo VEC estimado, portanto sendo  $I(0)$ , a fim de evitar a má-especificação do modelo e a perda de uma fonte de causalidade.

**Tabela 2** - Resultados do teste de cointegração de Johansen com quebra estrutural (*Johansen Trace Test*).

<i>rank (r)</i> co-integrante	LR	Valor-p	90%	95%	99%
$r = 0$	37,30	0,0047**	27,05	29,67	35,00
$r \leq 1$	7,85	0,4108	12,75	14,81	19,20

**Nota:** Modelo com constante. \*\*\*- Significa rejeição da hipótese nula de posto  $r$  co-integrante ao nível de significância de 1%. Selecionaram-se 3 (três) defasagens ótimas, segundo os critérios de informação de Hannan Quinn (HQ) e *Final Prediction Error* (FPE). Inclusão de *dummies* de nível para os anos 1995 e 2001.

Os resultados do VEC estimado podem ser analisados na Tabela 3 a seguir. A equação cointegrante tem um efeito ajustado significativo nas variáveis dependentes diferenciadas, conforme resultados da significância individual apresentado pela estatística  $t$  para  $\alpha$  e  $\beta$ . Em outras palavras, os resultados da estatística  $t$  indicam que os coeficientes estimados dos termos de correção de erros defasados são, individualmente, estatisticamente significantes ao nível de 5%, confirmando a relação de causalidade de Granger no longo prazo. Logo, sempre que houver a presença de um choque no sistema, o consumo de eletricidade irá fazer ajustes no curto prazo para restabelecer o equilíbrio de longo prazo.

No caso do PIB real *per capita* como variável dependente, observa-se que o coeficiente estimado e diferenciado do consumo de eletricidade *per capita* na segunda defasagem, bem como o coeficiente estimado e diferenciado do PIB real *per capita* na primeira defasagem, são, individualmente, estatisticamente significantes ao nível de 5%, confirmando a relação de causalidade no curto prazo. Por exemplo, note que um aumento de 1% no consumo de eletricidade *per capita* irá estimular o crescimento econômico real *per capita* em 0,67%.

No tocante ao vetor cointegrante, note que o coeficiente estimado do consumo de eletricidade *per capita* é estatisticamente igual a 1, significando que as variáveis possuem uma forte relação de longo prazo, ainda que haja desvios de trajetória de curto prazo. Como o termo de correção de erros mede o desvio da relação de equilíbrio cointegrante, então as variáveis devem ser ajustadas para

restaurar a relação de equilíbrio de longo prazo dentro do sistema tendo em vista que o coeficiente de ajuste do MCE é estatisticamente significativo para as variáveis PIB real *per capita* e consumo de eletricidade *per capita*, as quais se tornam endógenas no sistema.

Sob a hipótese nula de que os resíduos do modelo VEC estimado são normais na estrutura multivariada, o resultado da estatística Jarque-Bera no segundo componente é de 3,46 (valor-p = 0,1767), aproximadamente, de modo que não se pode rejeitar a hipótese nula de normalidade dos resíduos com base neste teste.

No tocante à hipótese nula de ausência de autocorrelação (correlação serial) de ordem  $k$ , em que  $k$  é o número de defasagens, é possível verificar por meio dos resultados apresentados na Tabela 3 que não se pode rejeitar a referida hipótese nula, considerando 2 defasagens.

Quanto à hipótese nula de ausência de heterocedasticidade nos resíduos do modelo VEC estimado, os resultados do teste de White, incluindo termos cruzados, indicam que não se pode mais rejeitar a hipótese nula, isto é, a hipótese de homocedasticidade da variância dos resíduos está presente na estimação econométrica.

**Tabela 3 - Resultado do Modelo VEC**

Equação Cointegrante:	CointEq1	
$elpc_{t-1}$	1,000000	
$yipc_{t-1}$	-1,552733**	
	[-8,02148]	
C	8,145079**	
	[12,2140]	
Correção de Erro:	$\Delta elpc_t$	$\Delta yipc_t$
$MCE_{t-1}$	-0,042823**	0,040207**
	[-3,48553]	[ 2,08304]
$\Delta elpc_{t-1}$	0,219260	0,288195
	[ 1,46395]	[ 1,22479]
$\Delta elpc_{t-2}$	0,020926	0,674376**
	[ 0,14171]	[ 2,90687]
$\Delta yipc_{t-1}$	0,032631	0,293294**
	[ 0,36615]	[ 2,09478]
$\Delta yipc_{t-1}$	-0,013068	-0,041761
	[-0,14646]	[-0,29791]
D1995	0,002022	0,002442
	[ 0,31289]	[ 0,24052]
D2001	-0,001562	0,004132
	[-0,19403]	[ 0,32664]
R <sup>2</sup>	0,262571	0,3164
Estatística-F	2,907846	3,7806
Akaike (AIC)	-5,381992	-4,4785
Teste de Jarque-Bera <sup>(1)</sup>	3,466164	
	(0,1767)	
Teste LM de Autocorrelação <sup>(2)</sup>	2,955181	
	(0,5654)	
Teste de Heterocedasticidade de White <sup>(3)</sup>	100,8090	
	(0,3485)	

**Nota:** Séries na forma logarítmica. Estatísticas- $t$  entre colchetes. (\*\*) significância a 5%. Número de observações incluídas após ajustamento: 56.

1 - Método de Ortogonalização: Cholesky (Lutkepohl). Valor obtido para o segundo componente.

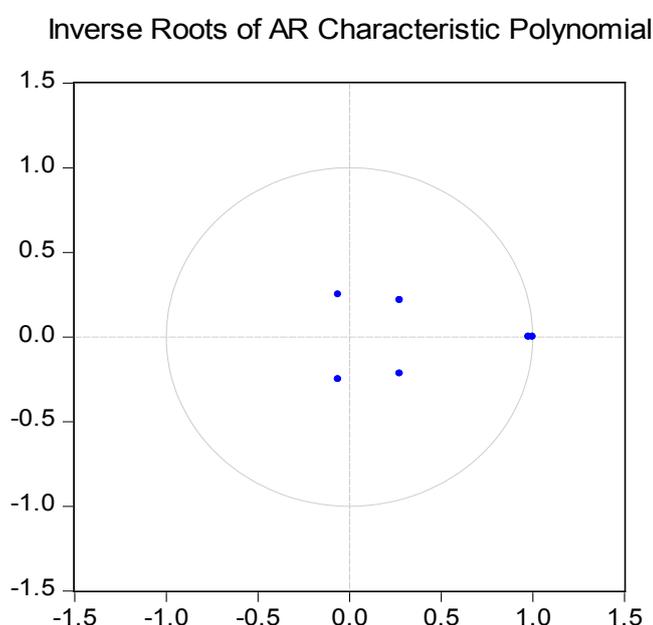
2 - Valor obtido para a segunda defasagem.

3 - Teste de Heterocedasticidade de White com termos cruzados.

**Tabela 4 - Raízes do Polinômio Característico**

Raiz	Módulos
1.000000	1.000000
0.978374	0.978374
0.275198 - 0.216419i	0.350101
0.275198 + 0.216419i	0.350101
-0.060734 - 0.250028i	0.257299
-0.060734 + 0.250028i	0.257299

Em termos de estabilidade do modelo VEC, a Figura 1 e a Tabela 4 mostram que não há uma raiz fora do círculo unitário, de modo que se trata de um modelo VEC que satisfaz a condição de estabilidade.

**Figura 1 - Raízes Inversas do Polinômio Característico do Processo AR**

A dinâmica da causalidade de Granger pode ser analisada a partir do VEC derivado da relação de cointegração (GRANGER, 1988), conforme descrito na seção 6.2:

$$\begin{bmatrix} \Delta ypc_t \\ \Delta elpc_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^p \begin{bmatrix} \phi_{11i} & \phi_{12i} \\ \phi_{21i} & \phi_{22i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta ypc_{t-i} \\ \Delta elpc_{t-i} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} MCE_{t-1} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{1t} \\ \varepsilon_{2t} \end{bmatrix} \quad (6)$$

em que  $\varepsilon_{1t}$  e  $\varepsilon_{2t}$  são termos de erros aleatórios, normalmente distribuídos, serialmente independentes e não correlacionados, com média zero e matriz de covariância finita. Os termos  $c_1$  e  $c_2$  são constantes. Os termos  $\phi_{11i}$ ,  $\phi_{12i}$ ,  $\phi_{21i}$ ,  $\phi_{22i}$ ,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são as elasticidades (curto e longo prazos) a serem estimadas. Em particular, os termos de correção de erros  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$ , derivados da relação de cointegração de longo prazo via teste de cointegração de Johansen, podem ser interpretados como sendo a velocidade de ajustamento do equilíbrio no longo prazo, em outras palavras, essas elasticidades de longo prazo medem os desvios do consumo de eletricidade *per capita* e do PIB real *per capita* de sua trajetória de equilíbrio de longo prazo e estabelecem a direção da causalidade.

Em termos de significância estatística, a relação de causalidade de Granger unidirecional no curto prazo do consumo de eletricidade *per capita* para o PIB real *per capita* implica que  $\phi_{12i} \neq 0$ ,  $\phi_{21i} = 0$ ,  $\forall i, i = 1, 2$ . Por outro lado, a relação de causalidade de Granger unidirecional no curto prazo do PIB real *per capita* para o consumo de eletricidade *per capita* implica que  $\phi_{12i} = 0$ ,  $\phi_{21i} \neq 0$ ,  $\forall i, i = 1, 2$ . Finalmente, a relação de causalidade de Granger no longo prazo será observada se  $\alpha_1 \neq 0$  e  $\alpha_2 \neq 0$ .

Portanto, a causalidade de Granger entre as séries pode ser investigada por meio dos seguintes três canais: (i) a significância conjunta dos termos de correção de erros defasados a partir das estatísticas  $t$  nos coeficientes de ajustamento; (ii) um teste  $F$  conjunto ou teste Wald aplicado aos coeficientes de cada variável explicativa em uma equação; (iii) um teste  $F$  conjunto ou teste Wald aplicado conjuntamente nos termos em (i) e nos termos em (ii).

A Tabela 5 a seguir apresenta os resultados do teste de causalidade de Granger/bloco-exogeneidade baseado na estimação do modelo VEC, os quais indicam a existência de causalidade de Granger unidirecional do consumo de eletricidade *per capita* para o PIB real *per capita*, ao nível de significância de 1%. Os impactos do consumo de eletricidade *per capita* no crescimento econômico provam-se positivos e estatisticamente significantes no coeficiente do MCE. Esses resultados corroboram as evidências obtidas por Yoo e Kwak (2010) e sugerem que o Brasil é uma nação dependente de energia elétrica, indicando não apenas que um choque no consumo de eletricidade, como também políticas conservadoras de energia elétrica, por exemplo, a adoção de racionamento de consumo de eletricidade em resposta a esse choque, podem provocar efeitos adversos no crescimento econômico brasileiro.

**Tabela 5 - Resultados do teste de causalidade de Granger Aplicado ao VEC**

Variáveis Independentes	Variáveis Dependentes	
	$\Delta ypc_t$	$\Delta elpc_t$
$\Delta ypc_t$	-	0,135199 (0,9346)
$\Delta elpc_t$	11,33046*** (0,0035)	-

**Nota:** VEC Granger Causality/Block Exogeneity Wald Tests. Observações incluídas: 56. Os valores em parênteses são os valores-p. Todos os outros valores são testes da Causalidade de Granger. (\*\*\*) significância a 1%. “ $\Delta$ ” significa operador de primeiras diferenças. Selecionaram-se duas defasagens ótimas no VEC estimado. Inclusão de variáveis *dummies* de nível para os anos 1995 e 2001.

Nesse caso, um aumento no consumo de eletricidade pode ser visto como um indicador de crescimento econômico. Dessa forma, a oferta de eletricidade é de vital importância ao atendimento do crescente consumo de eletricidade e, portanto, para sustentar o crescimento econômico no Brasil.

### 7.3 Exogeneidade Fraca

De acordo com Bueno (2008, p. 222), quando os coeficientes da matriz são zeros, a variável explicada é dita fracamente exógena. Assim, é preciso reinterpretar a condição de causalidade em sistemas cointegrados. Em um sistema cointegrado, não Granger causa se os valores defasados não explicam, e se não responde aos desvios de equilíbrio de longo prazo. Portanto, é fracamente exógena.

A Tabela 6 a seguir apresenta os resultados da estimação do modelo VEC, impondo as

“restrições zero” aos coeficientes de ajustamento. Notem que a hipótese de exogeneidade fraca é rejeitada a 1% de significância na equação em que o consumo de eletricidade *per capita* é a variável dependente. Todavia, na equação em que o PIB real *per capita* é a variável dependente, a hipótese de exogeneidade fraca é rejeitada a 5% de significância.

Portanto, neste estudo, não apenas se rejeita a hipótese de exogeneidade fraca, como também o resultado do teste de causalidade de Granger é conclusivo ao indicar relação de causalidade, no sentido de precedência temporal, do consumo de eletricidade *per capita* para o crescimento econômico *per capita*.

**Tabela 6** - Teste da Razão de Verossimilhança (LR) para restrições nos parâmetros de cointegração

Variável Dependente	Teste LR ( $\chi^2$ )	Valor-P
$\Delta ypc_t$	4,138331**	0,041922
$\Delta elpc_t$	10,70326***	0,001069

Nota: Elaboração dos autores. (\*\*\*) significância a 1%. (\*\*) significância a 5%.

## 8. Conclusões e Implicações de Política

A energia é um fator fundamental para a determinação do crescimento econômico nas economias modernas. Indivíduos e organizações necessitam de diferentes fontes de energia para assegurar a sustentabilidade de seus empreendimentos. Além disso, o setor energético, que inclui a eletricidade, exerce um papel significativo no desenvolvimento econômico de um país, que pode ser sentido não apenas em melhorias nas produtividades do trabalho e do capital, mas também pelo fato de que o consumo de eletricidade é uma *proxy* de bem estar da população de nações como o Brasil.

O presente estudo procurou analisar a relação de causalidade entre o consumo de eletricidade *per capita* e o crescimento econômico *per capita* em uma estrutura multivariada. Os resultados aqui obtidos corroboram as evidências obtidas por Yoo e Kwak (2010) de que o Brasil encontra-se sob a hipótese do crescimento. O consumo de eletricidade é um fator limitante para o crescimento econômico, de modo que choques adversos em relação à eletricidade terão um impacto negativo no crescimento econômico brasileiro. Em outras palavras, o Brasil é uma nação dependente de energia elétrica, e políticas conservadoras de energia elétrica, por exemplo, racionamento de consumo de eletricidade, ou mesmo choques de oferta como uma crise de energia elétrica, podem provocar efeitos adversos no crescimento econômico.

A eletricidade é uma das fontes vitais para o crescimento econômico de um país e o fornecimento de energia elétrica é uma condição de necessidade para o crescimento regular do

produto agregado. Dessa forma, problemas como a falta de investimentos em infraestrutura no setor de energia elétrica, assim como “apagões” e constantes interrupções no fornecimento de energia elétrica podem comprometer o desenvolvimento social e o progresso econômico do Brasil.

## 9. Referências

- ABOSEDRA, S.; DAH, A.; GHOSH, S. Electricity consumption and economic growth, the case of Lebanon. *Applied Energy*, 2008.
- ALTINAY, G.; KARAGOL, E. Electricity consumption and economic growth: evidence from Turkey. *Energy Economics*, v. 27, p. 849-856, 2005.
- BRENDT, E. Energy price increases and productivity slowdown in United States manufacturing. In: Federal Reserve Bank of Boston, the Decline in Productivity Growth, Federal Reserve Bank of Boston Conference Series 1980, Boston, USA, 1980.
- BUENO, R. L. S. *Econometria de séries temporais*. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- CARNEIRO, D. D.; WU, T. *Política macroeconômica: a experiência brasileira contemporânea*. Rio de Janeiro, LTC: 2011.
- CHENG, B. An investigation of cointegration and causality between energy consumption and economic growth. *Journal of Energy and Development*, v. 21, p. 73-84, 1995.
- DENISON, E. *Trends in American Economic Growth*. Brookings Institution, Washington, DC, p. 1929-1982, 1985.
- DUNKERLEY, J. Estimating energy demand: the developing countries. *Energy Journal*, v. 23, p. 79-99, 1982.
- EBOHON, O. J. Energy, economic growth and causality in developing countries: a case study of Tanzania and Nigeria. *Energy Policy*, v. 24, p. 447-453, 1996.
- ENGLE, R. F.; GRANGER, C. W. J. Co-integration and error correction: representation, estimation and testing. *Econometrica*, v. 55, n. 2, p. 251-276, 1987.
- ENGLE, R. F.; HENDRY, D. F.; RICHARD, J. F. Exogeneity. *Econometrica*, v. 51, n. 2, p. 277-304, 1983.
- ERICSSON, N. R. Testing Exogeneity: an introduction. In: Ericsson, N. R. & IRONS, J. S., *Testing Exogeneity: advanced texts in econometrics*. Oxford University Press, cap. 1, p. 3-38, 1994.
- 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 supply, employment and real GDP in India: evidence from cointegration and Granger-causality tests. *Energy Policy*, v. 37, p. 2926-2929, 2009.
- GRANGER, C. W. J. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral models. *Econometrica*, v. 34, p. 541-551, 1969.
- \_\_\_\_\_. Causality, cointegration and control. *Journal of Economic Dynamics and Control*, v. 12, p. 551-559, 1988.
- GURGUL, H.; LACH, L. The electricity consumption versus economic growth of the Polish economy. *Energy Economics*, v. 34, p. 500-510, 2012.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World energy outlook: energy and poverty*. Paris, 2002.
- JOHANSEN, S. Statistical analysis of cointegration vectors, *Journal of Economic Dynamics and Control* 12: 231-254, 1988.
- \_\_\_\_\_. Estimation and hypothesis test of cointegration vectors in Gaussian vector autoregressive models. *Econometrica*, v. 59, p. 1551-1580, 1991.
- \_\_\_\_\_. Determination of cointegration rank in the presence of a linear trend, *Oxford Bulletin of Economics and Statistics* 54, p. 383-397, 1992a.
- \_\_\_\_\_. Cointegration in partial systems and the efficiency of single-equation analysis. *Journal of Econometrics*, v. 52, n. 3, p. 389-402, 1992b.
- \_\_\_\_\_. The role of the constant and linear terms in cointegration analysis of nonstationary time series, *Econometric Reviews* 13: 205-231, 1994
- \_\_\_\_\_. *Likelihood-based Inference in Cointegrated Vector Autoregressive Models*, Oxford University Press, Oxford, 1995.

- KOUAKOU, A. K. Economic growth and electricity consumption in Cote d'Ivoire: evidence from time series analysis. *Energy Policy*, v. 39, p. 3638-3644, 2011.
- KRAFT, J.; KRAFT, A. On the relationship between energy and GNP. *Journal of Energy and Development*, v. 3, p. 401-403, 1978.
- LANNE, M.; SAIKKONEN, P.; LÜTKEPOHL, H. Comparison of unit root tests for time series with level shifts. *Journal of Time Series Analysis*, 23, pp. 667-685, 2002.
- 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.
- MOZUMDER, P.; MARATHE, A. Causality relationship between electricity consumption and GDP in Bangladesh. *Energy Policy*, v. 35, p. 395-402, 2007.
- NARAYAN, P. K.; SMYTH, R. Electricity consumption, employment and real income in Australia: evidence from multivariate Granger causality tests. *Energy Policy*, v. 33, p. 1109-1116, 2005.
- NARAYAN, P. K.; SINGH, B. The electricity consumption and GDP nexus for the Fiji Islands. *Energy Economics*, v. 29, p. 1141-1150, 2007.
- ODHIAMBO, N. M. Electricity consumption and economic growth in South Africa: a trivariate causality test. *Energy Economics*, v. 31, p. 635-640, 2009.
- OUÉDRAOGO, I. M. Electricity consumption and economic growth in Burkina Faso: a cointegration analysis. *Energy Economics*, v. 32, p. 524-531, 2010.
- OZTURK, I. A literature survey on energy-growth nexus. *Energy Policy*, v. 38, n. 1, p. 340-349, 2010.
- PAO, H. T. Forecast of electricity consumption and economic growth in Taiwan by state space modeling. *Energy*, v. 34, p. 1179-1791, 2009.
- PAYNE, J. E. On the dynamics of energy consumption and output in the US. *Applied Energy*, v. 86, p. 575-577, 2009.
- \_\_\_\_\_. A survey of the electricity consumption-growth literature. *Applied Energy*, v. 87, p. 723-731, 2010.
- PERRON, P. The great crash, the oil price shock, and the unit root hypothesis. *Econometrica*, v. 57, n. 6, p. 1361-1401, 1989.
- RESERVATÓRIOS insuficientes e risco de energia. O Globo (editorial), Rio de Janeiro, 09 jan. 2013.
- ROSENBERG, N. The role of electricity in industrial development. *Energy Journal*, v. 19, p. 7-24, 1998.
- SAIKKONEN, P.; LÜTKEPOHL, H. Testing for a unit root in a time series with a level shift at unknown time. *Econometric Theory*, 18, pp. 313-348, 2002.
- SHAHBAZ, M.; TANG, C. F.; SHABBIR, M. S. Electricity consumption and economic growth nexus in Portugal using cointegration and causality approaches. *Energy Policy*, v. 39, p. 3529-3536, 2011.
- SHAHBAZ, M.; LEAN, H. H. The dynamics of electricity consumption and economic growth: a revisited study of their causality in Pakistan. *Energy*, v. 39, p. 146-153, 2012.
- SOLOW, R. M. Resources and economic growth. *American Economist*, v. 22, n. 2, p. 5-11, 1978.
- SOYTAS, U.; SARI, R. Energy consumption and income in G-7 countries. *Journal of Policy Modeling*, v. 28, p. 739-750, 2006.
- \_\_\_\_\_. The relationship between energy and production: evidence from Turkish manufacturing industry. *Energy Economics*, v. 29, p. 1151-1165, 2007.
- TEMPLET, P. H. Energy, diversity and development in economic systems: an empirical analysis. *Energy policy*, v. 30, p. 223-233, 1999.
- TOMAN, T.; JEMELKOVA, B. Energy and economic development: an assessment of the state of knowledge. *Energy Journal*, v. 24, p. 93-112, 2003.
- YUAN, J.; ZHAO, C.; YU, S.; HU, Z. Electricity consumption and economic growth in China: Cointegration and co-feature analysis. *Energy Economics*, v. 29, p. 1179-1191, 2007.
- YOO, S. H.; KWAK, S. Y. Electricity consumption and economic growth in seven South American countries. *Energy Policy*, v. 38, p. 181-188, 2010.
- YU, E. S. H.; CHOI, J. Y. The causal relationship between energy and GNP: an international comparison. *Journal of Energy and Development*, v. 10, p. 249-272, 1985.