

UMA ANÁLISE ENTRE A ENERGIA, RENDA E EMISSÕES DE CO₂: EVIDÊNCIAS PARA O BRASIL, 1962-2007

Thiago Costa Soares¹
João Eustáquio de Lima²

Resumo

Devido ao aumento da temperatura do planeta ocasionado principalmente pela emissão de gases causadores do efeito estufa, a preocupação com as fontes de energias (renováveis e não renováveis) tem sido crescente em todo mundo. Por isso, o objetivo geral deste estudo foi analisar a relação entre a produção de energia, a renda e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para o Brasil, no período de 1962 a 2007. A abordagem dinâmica entre as variáveis supracitadas foi estimada através do Modelo Autorregressivo Vetorial (VAR) Reparametrizado (Vetor de Correção de Erros – VECM). Os principais resultados revelam que, no curto prazo, choques na produção de energia elétrica afetam positivamente o PIB e não reduzem as emissões de CO₂. A decomposição da variância revela que a produção do setor elétrico brasileiro, depois de uma década, representa significativa parcela da variação da renda e do nível de emissões. Como conclusão, pode-se afirmar que, mesmo possuindo uma matriz energética relativamente limpa, não há indícios de que o Brasil esteja reduzindo, de fato, as emissões de CO₂.

Palavras-chave: energia, renda, emissões de poluentes

Classificação JEL: C00; O13; Q00;

¹ Professor do departamento de Economia da UFJF/GV. Mestre em Economia pela UFV/DEE e doutorando em Economia Aplicada pela UFV/DER. E-mail: thiago.costa@ufff.edu.br.

² Professor Titular de Econometria no Departamento de Economia Rural da UFV. Ph.D. em Economia Rural pela Michigan State University (USA), Pós-Doctor em Métodos Quantitativos, pela University.

1. INTRODUÇÃO

O objetivo deste estudo foi analisar a relação entre a geração de energia, a renda e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) para o Brasil, no período de 1962 a 2007. Em geral, os esforços de trabalhos anteriores sobre o setor energético brasileiro se concentraram na estimativa dos parâmetros da função de demanda e na capacidade de geração energética apenas. Estes trabalhos não se preocuparam, de fato, com a relação entre a geração energética, renda e o efeito ambiental causado pela produção de energia. Esta constatação motivou a realização deste trabalho.

As mudanças climáticas têm sido apontadas como um dos maiores obstáculos ao crescimento econômico e à qualidade de vida que a humanidade enfrentará durante as próximas décadas (SILVA et al., 2007). Segundo o Banco Mundial, os indicadores de qualidade ambiental se deterioraram principalmente a partir da década de 1960 devido ao aumento da temperatura do planeta advindo das emissões dos gases causadores do efeito estufa (GEE). Dentre esses gases, a emissão de CO₂ tem sido responsável por aproximadamente 57% do total. O segmento que mais contribui para esse cenário é o de fornecimento de energia, que representa cerca de 25,9% das emissões mundiais (IPCC, 2012).

Segundo dados do Banco Mundial (2012), o *ranking* dos maiores poluidores, a nível internacional, é liderado pelos Estados Unidos (EUA), que representam 29% das emissões mundiais (entre 1960 e 2008), seguidos da China (14%), Japão (6%) e Reino Unido (4%). O Brasil (1,22%), país com a maior biodiversidade do mundo, aparece na 18ª posição. Se analisado apenas o ano de 2007, a China assume o posto de maior poluidora do mundo (23%), seguida dos EUA (20%), Federação Russa (5,6%) e Índia (5,4%). O Brasil, por sua vez, se mantém na mesma posição e sua participação nas emissões mundiais gira em torno de 1,22%.

Após a criação do protocolo de Kyoto em 1997, que visa a redução das emissões dos GEE e o estímulo ao progresso técnico, a atenção oferecida ao meio ambiente tem sido crescente nos países desenvolvidos e em desenvolvimento, embora não tanto convincente devido aos conflitos de interesses econômicos e políticos entre a cúpula de países participantes (GUESNERIE, 2011). Uma das principais pautas dos eventos que fomentam o desenvolvi-

mento sustentável tem sido a redução das emissões a partir da substituição gradativa dos combustíveis não renováveis por energias renováveis mais limpas, como a eólica, hidráulica, solar etc. Segundo Jacob et al. (1995), a mais factível tem sido a energia fornecida por usinas hidrelétricas devido à potencialidade do processo de armazenamento, transmissão e distribuição em relação às demais.

O Brasil, que possui uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo, com 35,9% de origem renovável contra uma média mundial de apenas 13,5%, se destaca nos investimentos em infraestrutura hidrelétrica (BIODIESELBR, 2012). Dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2013) mostram que a partir da década de 1990, a capacidade instalada para a geração de energia elétrica no Brasil cresceu mais de 120%. Apenas na última década, a evolução foi de 42%, enquanto que a produção, de fato, aumentou em uma escala um pouco menor (34%).

A geração de energia não tem acompanhado a progressão da capacidade de produção instalada, o que coloca em pauta a produção do setor elétrico brasileiro e o impacto que essa variável, de fato, possui sobre os níveis de renda e as emissões de poluentes, argumento principal das políticas de incentivo ao uso de recursos renováveis.

Portanto, o objetivo geral deste estudo foi analisar a relação entre a produção energética brasileira, a renda e os níveis de emissões de CO₂ no período de 1962 a 2007. Especificamente, pretendeu-se: a) identificar o efeito de choques positivos da energia sobre o crescimento econômico e sobre o nível de emissões de poluentes no Brasil; e b) verificar se existe relação de longo prazo entre as variáveis energia, crescimento econômico e emissões de poluentes. Dentre todos os estudos aplicados no setor energético do Brasil, pouco ou quase nada se verifica em relação à evolução da geração de energia e o efeito que essa variável tem sobre a renda e emissões de poluentes, concomitantemente.

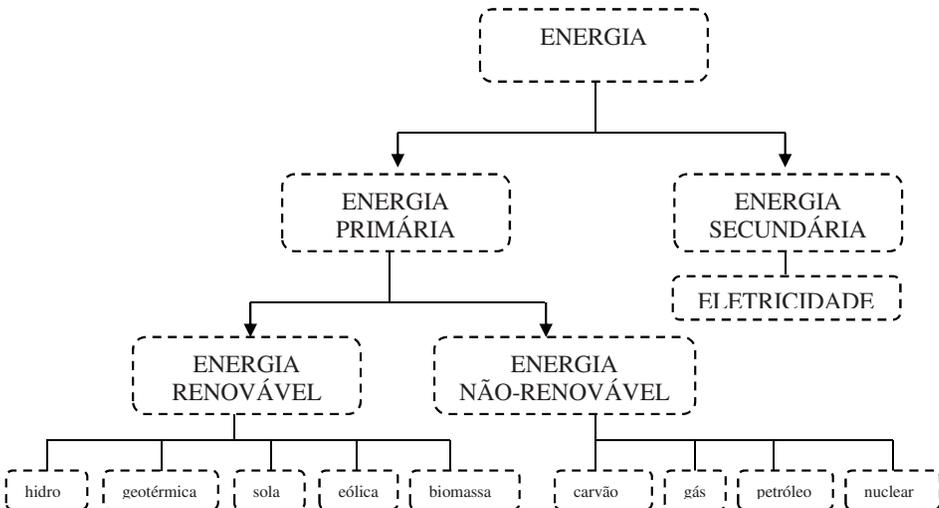
Além da introdução, este artigo está dividido em mais quatro seções. Na segunda seção, apresenta-se uma sucinta revisão bibliográfica sobre o setor energético. Na terceira, descreve-se as variáveis, o modelo proposto e demais detalhes metodológicos. Na quarta, apresenta-se os resultados obtidos. E na quinta, e última seção, aborda-se as considerações finais do estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Revisão sobre o setor elétrico

No passado, o fornecimento de energia era conduzido principalmente pelo Estado devido às características de bem público do produto. Entretanto, o setor passou por uma profunda transformação com o liberalismo econômico e a globalização, e o fornecimento de energia na atualidade é feito, em sua maioria, por empresas privadas (MUKHERJEE; GOSWAMI, 2009). A classificação da energia pode ser vista pela Figura 1.

Figura 1: Classificação da energia



Fonte: Elaboração própria adaptada de Mukherjee e Goswami (2009)

Um importante problema na definição dos serviços de energia é que não há uma clara distinção entre bens e serviços energéticos. O setor energético tradicionalmente tem sido integrado às atividades do Estado relacionadas à produção, transmissão e distribuição. Mas, alguns produtos energéticos estocáveis, como petróleo e combustíveis sólidos, são considerados bens públicos, enquanto que a eletricidade tem características similares de um bem privado.

A energia pode ser dividida em duas categorias distintas: energia primária e secundária. O primeiro grupo trata-se de fontes de energia que estão disponíveis de forma primária na natureza, como petróleo e gás natural. Este grupo pode ainda ser dividido em recursos renováveis (solar, eólica, biomassa etc.) e não renováveis (gás, carvão, energia nuclear etc.). A energia secundária, por sua vez, é a forma utilizável na qual a energia primária pode ser convertida, como a energia elétrica produzida a partir de gás ou hidrelétrica (MUKHERJEE; GOSWAMI, 2009) (Figura 1).

É pertinente ressaltar que mesmo não sendo clara a distinção das características dos bens e produtos energéticos, a produção energética, sendo de origem pública ou privada, tem a eficiência como uma condição necessária (mas não suficiente) para atingir as metas de desenvolvimento sustentável do século XXI. Para esse fim, políticas de mitigação e tecnologias que aumentam a eficiência energética e substituem os recursos não renováveis pelos renováveis são avaliadas e discutidas em muitos trabalhos (EDENHOFER et al., 2005; KEMFERT, 1998; FILIPPINI; HUNT, 2009; BERNDT; WOOD, 1975).

Dois caminhos são apontados por Linares e Labandeira (2010): a conservação energética (visão da demanda) e a eficiência energética (visão da oferta). A primeira se resume em criar medidas que reduzam a demanda energética e a segunda se preocupa com a produtividade do setor energético. A conservação dos recursos energéticos permite adiar o esgotamento dos recursos naturais e, ainda, é a melhor opção para reduzir as emissões de dióxido de carbono. Os autores argumentam que a chave para a existência desses benefícios reside no fato que a sociedade não consome energia, mas sim produtos e serviços que exigem energia. Ao se reduzir o consumo energético desses produtos e serviços, é possível conservar os recursos naturais envolvidos no processo de fornecimento de energia.

Entretanto, na maioria dos países a conservação energética não tem sido uma realidade, uma vez que em muitos deles ainda há demanda reprimida por bens e serviços que necessitam de energia. Nesse cenário, o aumento da renda inevitavelmente afeta a demanda energética. Por isso, para reduzir o impacto ambiental do setor, a atenção das políticas energéticas se volta, muitas vezes, ao lado da oferta.

Em suma, o benefício de matrizes energéticas mais limpas está no fato de que se pode reduzir o consumo de recursos naturais não renováveis e diminuir, ao mesmo tempo, o impacto ambiental relacionado ao uso de energia. Isso pode ser feito melhorando o gerenciamento dos recursos naturais e monetários da sociedade.

2.2. Estado da arte do setor elétrico brasileiro

O setor energético brasileiro, no qual a geração hidráulica corresponde à maior parte, demonstrou sinais de falhas em meados da década de 1980. Estas falhas ocorreram e foram consequência da crise fiscal do Estado, o qual apresentou um regime regulatório insuficiente para expandir a capacidade instalada a baixo custo, mostrando o possível esgotamento do modelo Estatal (PAIS, 2012). Por esse motivo, o sistema brasileiro passou por uma profunda transformação na década de 1990. Vieira et al. (2010), ao analisarem a reforma do setor, afirmam que o caráter Estatal se transformou em um ambiente de mercado com condições para investir na expansão do sistema através da iniciativa privada. A introdução de mecanismos competitivos exigia alterações pertinentes na legislação e o principal argumento para essa mudança estrutural foi o aumento da eficiência, a fim de viabilizar a expansão da capacidade instalada.

Muitos estudos buscaram estimar a função de demanda energética nacional com o objetivo de prever as possíveis oscilações a choques causados no mercado, como na renda e no preço da energia. Entre eles, destacam-se Modiano (1984), Andrade e Lobão (1997), Schmidt e Lima (2004), Irffi et al. (2009) e Pais (2012). O estudo pioneiro foi de Modiano (1984), que avaliou a evolução do consumo e dos preços da energia elétrica por classes distintas de consumidores. Sua principal conclusão foi que a demanda brasileira por energia é significativamente sensível a mudanças nos níveis de renda.

Andrade e Lobão (1997) também analisaram a evolução do consumo residencial de energia elétrica no Brasil. Para isso, estimaram a elasticidade renda e preço da demanda no período de 1963 a 1995. A inovação deste estudo em relação ao de Modiano (1984) foi o acréscimo da influência dos equipamentos eletrodomésticos, mensurados pelo estoque domiciliar. A principal conclusão obtida pelos autores é que a demanda energética é

bastante inelástica em relação à renda, preço da energia e ao preço dos eletrodomésticos, todavia, isso não implica que o efeito das variáveis supramencionadas possa ser negligenciado.

Schmidt e Lima (2004) estimaram os parâmetros da função de demanda por energia no Brasil nos segmentos residencial, comercial e industrial e chegaram à conclusão de que a elasticidade-renda nos três segmentos é maior que a unidade, e que a elasticidade-preço é inferior a um, em valor absoluto.

Pais (2012), ao estimar os parâmetros da função de demanda por energia elétrica pós-acionamento (2003 a 2011), concluiu que o governo necessita investir na expansão da capacidade de geração elétrica, pois o setor demanda maior prazo de maturação. Assim, possíveis descompassos entre a demanda e a oferta podem ocasionar déficits no fornecimento de energia e diminuir a eficiência do processo de produção, transmissão e distribuição.

Pelo lado da geração de energia, Serrato (2006) se propôs a desenvolver uma metodologia de coleta e tratamento de dados dos custos das empresas de transmissão que atuam no mercado, além de quantificar a eficiência de custos das empresas envolvidas por uma análise econométrica. O autor aponta que os resultados do modelo se mostraram satisfatórios, no entanto, a aplicação do índice estimado de eficiência como dispositivo de política econômica pode ser considerada precoce.

Tannuri-Pianto et al. (2009) analisaram as empresas de distribuição energética utilizando variáveis que afetam diretamente a eficiência, tais como o custo operacional, número de funcionários, volume de energia, percentual de perda de energia, duração média de interrupção de energia por consumidor (por ano) em horas e a quantidade média de interrupções por consumidor (por ano). Como resultado, os autores defenderam a ideia de que existem retornos de escala no setor, porém, as economias de escala são mínimas. Além disso, foi mostrado que a privatização parece ter influenciado positivamente a eficiência das empresas do segmento.

Dentre todos os estudos aplicados no setor energético do Brasil, pouco ou quase nada se verifica em relação à evolução da geração de energia e o efeito que essa variável tem sobre a renda e emissões de poluentes. Por esse motivo, este estudo objetiva analisar a relação temporal entre a geração de energia, a renda e as emissões de CO₂.

3. METODOLOGIA

A seção metodológica está dividida em duas subseções: (i) descrição sobre os modelos Vetorial Autorregressivo (VAR) e Vetor de Correção de Erros (VECM); e a (ii) descrição dos dados.

3.1. Modelo Autorregressivo Vetorial (VAR) e Vetor de Correção de Erros (VECM)

Neste estudo, emprega-se o modelo Autorregressivo Vetorial (VAR) para estimar a relação entre a produção energética, a renda e as emissões de poluentes. Essa metodologia, segundo Schmidt e Lima (2004), é pertinente para analisar a relação dinâmica entre variáveis econômicas, pois leva em consideração as variáveis e suas defasagens, além de flexibilizar a relação de curto e longo prazo entre elas. Nesse modelo, as variáveis são mutuamente afetadas, pois o VAR considera todas endogenamente (SILVA et al., 2007).

Na verdade, o VAR pode ser considerado uma extensão dos modelos autorregressivos univariados (AR), que possibilita a inclusão de um sistema de equações para cada variável, em que cada variável é afetada pelos seus valores defasados e os valores defasados das demais variáveis endógenas. Segundo Bueno (2008), o modelo pode ser expresso a partir de um vetor n de variáveis endógenas, conforme expressão (1).

$$Y_t = \beta_0 + \sum_{i=1}^p \beta_i Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (1)$$

em que Y_t é um vetor $n \times 1$ que contém a geração energética, renda e emissões de CO_2 ; β_0 é um vetor $n \times 1$ de constantes; β_1 é uma matriz $n \times n$ de coeficientes; Y_{t-1} é um vetor $n \times 1$ incluindo as variáveis defasadas; e ε_t é um vetor $n \times 1$ de oscilações aleatórias não correlacionadas $\varepsilon_t \text{ i.i.d.}(0, I_n)$.

Para estimar o modelo, é necessário que as variáveis sejam estáveis (estacionárias). Entende-se por estável o modelo em que os choques (ou inovações) causados no sistema eventualmente se dissipam ao longo do tempo. Para averiguar a hipótese nula de raiz unitária nas séries, utilizou-se os testes de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) e Phillips-Perron (PP), sugere-

ridos por Schmidt e Lima (2004), Bueno (2008) e Pais (2012). Os detalhes metodológicos dos testes podem ser vistos em Bueno (2008).

Outro fator peculiar ao modelo é a definição do número de defasagens necessário para se obter “resíduos brancos”. Neste estudo, utilizou-se os critérios de informação de Akaike (AIC), Schwarz (SIC) e Hannan-Quinn (HQ), onde se considera o menor valor entre o conjunto de valores estimados, conforme visto em Schmidt e Lima (2004), Bueno (2008) e Tiwari (2011). Aplicou-se o teste LM de correlação serial para averiguar a hipótese nula de ausência de autocorrelação.

No caso em que as variáveis não são estacionárias, mas possuem uma dinâmica semelhante de longo prazo, pode-se especificar o Vetor de Correção de Erros (VECM). Em suma, se as variáveis não são estáveis em nível, mas são em primeira diferença, pode-se dizer que as mesmas possuem um componente de curto prazo e um de longo prazo ou, em outras palavras, são cointegradas. Define-se, então, o conceito de cointegração como a condição na qual todas as variáveis são integradas de mesma ordem, ou seja, são I(d). Dessa forma, existe um vetor que garante o equilíbrio de longo prazo mesmo havendo desequilíbrios no curto prazo. Nesse contexto, a ordem de integração é o número de diferenciações necessárias para torná-las estáveis.

Por esse motivo, o modelo de correção de erro (VECM) é considerado uma versão mais abrangente que o VAR, pois o segundo, sendo não estacionário em nível, incorre em omissão de variável relevante (relações de longo prazo). O modelo VECM é descrito conforme a expressão (2).

$$\Delta Y_t = \Phi Y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \Lambda_i \Delta Y_{t-i} + \varepsilon_t \quad (2)$$

em que $\Lambda_i = -\sum_{j=1+i}^p \Phi_j$, $i = 1, 2, \dots, p - 1$, de modo que $\Phi = \alpha\beta'$. Define-se β' como a matriz de vetores de cointegração e α como a matriz de ajustamento de longo prazo (velocidade de ajustamento). ΔY_t é o vetor nx1 que inclui a primeira diferença da energia, renda e emissões. O termo ΦY_{t-1} denota o componente de longo prazo quando há cointegração entre energia, renda e emissões e os demais representam os fatores de curto prazo.

Johansen (1988) propôs um procedimento para testar a existência de cointegração baseado no VECM onde, além de estimar o modelo, se obtém simultaneamente os vetores de cointegração. Em essência, Φ é uma matriz

$n \times n$, onde o posto é $r < n$ quando há cointegração. Se o posto da matriz for igual a n , então as variáveis são estacionárias. Se o posto for nulo, não existe cointegração e as variáveis não são estáveis (raiz unitária multivariada).

Segundo Bueno (2008), convém acrescentar ao teste os termos determinísticos, como constante e tendência, uma vez que os valores críticos são sensíveis à configuração do modelo. Por esse motivo, pode-se reescrever o modelo conforme apresenta a expressão (3).

$$\Delta Y_t = \Phi Y_{t-1} + \sum_{i=1}^p \Lambda_i \Delta Y_{t-i} + \delta' d_t + \varepsilon_t \quad (3)$$

em que $\delta' d_t$ é o componente determinístico do modelo. Johansen (1988) propõe dois testes distintos: o teste do traço e da razão de verossimilhança. A hipótese nula do primeiro é a existência de r^* vetores de cointegração contra a hipótese de $r > r^*$. A estatística do teste é dada por $\lambda_{tr}(r) = -T \sum_{i=r+1}^n \ln(1 - \hat{\lambda}_i)$. O segundo teste tem como hipótese nula a existência de r^* vetores de cointegração contra a hipótese alternativa de r^*+1 vetores. A estatística do teste pode ser denotada por $LR(r) = -T \ln(1 - \hat{\lambda}_{r+1})^3$.

Em acréscimo, em razão da possibilidade de ocorrência de quebra estrutural no período de racionamento energético, acrescentou-se uma variável *dummy* em um modelo preliminar, sendo $d=1$, se o ano for 2001 ou 2002; e $d=0$, caso contrário. Esse procedimento permitiu testar a presença de quebra estrutural.

3.2. Descrição e fonte dos dados

Neste estudo, utilizou-se séries anuais da produção de energia elétrica, Produto Interno Bruto (PIB) e emissões de CO_2 para o Brasil no período 1962 a 2007. A escolha pelo período em questão se baseou na disponibilidade comum entre os dados, que foram extraídos de diferentes fontes (ver Tabela 1). A Tabela 1 apresenta as variáveis utilizadas, a unidade de medida, a fonte de dados e a periodicidade das séries.

³ Para maiores detalhes, ver Bueno (2008).

Tabela 1: As variáveis, unidades, fontes de dados e periodicidade

Sigla	Variável	Unidade	Fonte de dados	Periodicidade original
ENE	Geração de energia elétrica (hidráulica)	Gigawatts/hora (GWh)	Ministério de Minas e Energia (MME)	Anual
PIB	Produto Interno Bruto	Valores correntes (R\$)	Banco Central	Anual
CO ₂	Emissão de Dióxido de Carbono	Toneladas (Kt)	Banco Mundial	Anual

Fonte: Elaboração própria

A geração de energia elétrica representa o setor energético nacional neste estudo, visto que a maior parte da produção do setor se resume a esse tipo de energia. A variável é originalmente construída pelo Ministério de Minas e Energia e está disponível no sítio do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). O PIB foi considerado *proxy* da renda nacional, conforme visto em Modiano (1984), Andrade e Lobão (1997), Schmidt e Lima (2004) e Pais (2012), e representa o agregado monetário gerado pela produção de bens e serviços. Para representar a qualidade do meio ambiente, utilizou-se as emissões de CO₂, que é o principal gás causador do efeito estufa. Na próxima seção, apresenta-se os resultados e análises dos dados.

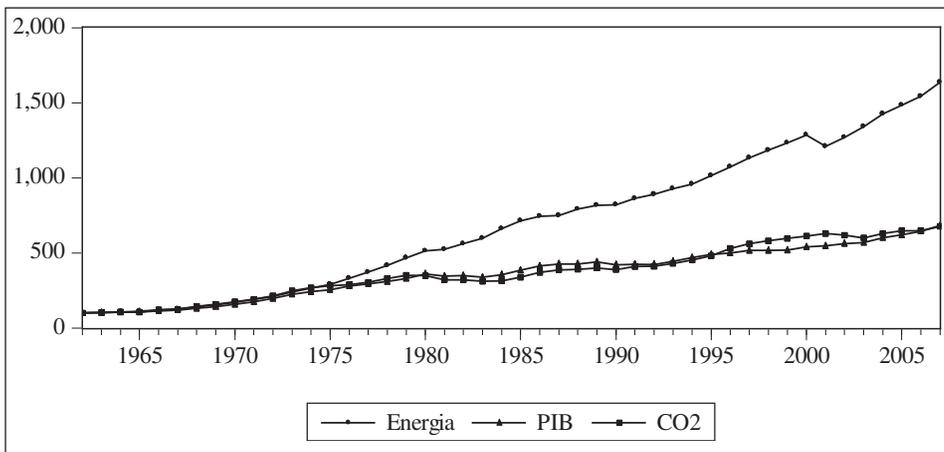
4. RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS

4.1. Análise descritiva das variáveis

Em relação às características inerentes às séries, pode-se verificar que todas as variáveis apresentaram tendência crescente no período analisado, com destaque para a produção energética que, em relação ao ano base (1962), aumentou mais de 16 vezes, enquanto que a renda aumentou 6,84 vezes e as emissões de CO₂, 6,77 vezes. Em termos percentuais, a produção de energia aumentou cerca de 1.537% no período analisado. Esse crescimento ratifica os investimentos realizados no setor elétrico nacional a partir da década de 1960 e o impacto que a privatização teve sobre a produção.

Por outro lado, mesmo com os investimentos realizados, pode-se verificar que, a partir de 2001, a produção energética brasileira sofreu influência de um fator exógeno que impactou sobre a série, que retomou a tendência de crescimento posteriormente a esse período. A quebra estrutural ocorrida pode ser atribuída ao programa nacional de racionamento que entrou em vigor em junho de 2001 a fevereiro de 2002, cujo objetivo foi evitar sobrecargas no sistema elétrico nacional. A crise foi ocasionada principalmente pela desfavorável condição hidrológica nas regiões Sudeste e Nordeste e devido à insuficiência de investimentos em geração e transmissão. No entanto, pelo modelo preliminar estimado entre energia e *dummy*, a quebra não foi estatisticamente significativa. A Figura 2 apresenta a evolução temporal das variáveis supracitadas.

Figura 2: Evolução temporal da produção de energia elétrica, PIB e emissões de CO₂, 1962-2007



Fonte: Elaboração própria

Pela análise gráfica, não houve indícios de mudanças estruturais nas variáveis renda e emissões. A trajetória das emissões manteve-se semelhante ao PIB e o crescimento das variáveis, em percentual, foi aproximadamente 580% no período de interesse. A seguir, descreve-se sobre o modelo econométrico.

4.2. Resultados empíricos dos modelos VAR e VECM

As séries foram transformadas em logaritmo, pois, assim, pode-se interpretar os parâmetros do modelo como elasticidades⁴. Não obstante, esse procedimento mantém as características inerentes às séries temporais não afetando o relacionamento original entre elas. Os resultados dos testes de raiz unitária são reportados pela Tabela 2.

Tabela 2: Resultados dos testes de raiz unitária ADF e PP

Variável	ADF (nível)			PP (nível)		
	Lags*	t-stat	Prob	Band**	t-stat	Prob
ENE	0	0,0488	0,996	4	-0,4367	0,9830
PIB	0	-1,0117	0,932	3	-1,1906	0,9004
CO ₂	1	-1,8984	0,639	3	-1,4930	0,817
Variável	ADF (primeira diferença)			PP (primeira diferença)		
	Lags	t-stat	Prob	Band	t-stat	Prob
ENE	0	-4,3837	0,006	1	-4,2962	0,0074
PIB	0	-4,2794	0,008	0	-4,2794	0,008
CO ₂	0	-4,4646	0,005	0	-4,4646	0,005

Fonte: Elaboração própria

Primeiramente, aplicou-se os testes de raiz unitária de Dickey-Fuller Aumentado (ADF) e Phillips-Perron (PP) para averiguar a estabilidade das séries, considerando deslocamento e tendência linear determinística em nível e em primeira diferença. Fica claro, a partir da Tabela 2, que as variáveis não são estacionárias em nível e, portanto, faz-se necessário diferenciá-las para torná-las estáveis. Os testes de raiz unitária em primeira diferença, com constante e tendência, mostraram que as séries são I(1). Definiu-se o número de *lags* do VAR com base nos critérios de informação de Akaike (AIC), Schwarz (SIC) e Hannan-Quinn (HQ). Os resultados podem ser visualizados pela Tabela 3.

⁴ Quando este artigo se reportar à energia, PIB e emissões a partir desse trecho entende-se logaritmo da energia, PIB e emissões, respectivamente.

* Lags obtidos automaticamente através do critério SIC.

** Bandwidth selecionado automaticamente através do critério de Newey-West.

Tabela 3: Critérios para seleção dos *lags*

Lag	AIC	SIC	HQ
0	-6,051352	-5,800585	-5,960036
1	-12,39905	-11,77213*	-12,17076
2	-12,58959	-11,58653	-12,22433*
3	-12,61716*	-11,23794	-12,11492
4	-12,26545	-10,51008	-11,62624
5	-12,11052	-9,979008	-11,33434

Fonte: Elaboração própria

Nota: *Indicação da ordem do *lag* selecionado pelo critério

O critério de informação de Akaike (AIC) apontou uma estrutura com três *lags*, ao passo que Schwarz (SIC) e Hannan-Quinn (HQ) sugeriram estruturas diferentes (um e dois *lags*, respectivamente). Por esse motivo, utilizou-se um quarto critério de informação (*Final Prediction Error – FPE*) a fim de dar sustentação aos demais e auxiliar na escolha no número de *lags* do modelo e, por esse critério, definiu-se três *lags*, conforme o critério AIC.

Para averiguar a hipótese de cointegração, aplicou-se o procedimento descrito por Johansen, que propôs estimar os vetores de cointegração através do VAR reparametrizado (VECM). Os procedimentos do teste são semelhantes ao teste ADF e podem ser vistos com mais detalhes em Bueno (2008). A Tabela 4 apresenta os resultados do teste.

Tabela 4: Teste de cointegração (traço e razão de verossimilhança) entre a produção energética, renda e emissões de CO₂

Número de CI	Autovalor	Traço	Valor crítico 5%	Prob.**
Nenhum*	0,562	47,909	29,798	0,000
No máximo 1	0,175	12,456	15,495	0,136
No máximo 2*	0,092	4,166	3,842	0,041
Número de CI	Autovalor	Est. RV***	Valor crítico 5%	Prob.**
Nenhum*	0,561	35,453	21,131	0,000
No máximo 1	0,175	8,289	14,264	0,151
No máximo 2*	0,092	4,166	3,842	0,041

Fonte: Elaboração própria

Nota: *Denota a rejeição da hipótese a 5% de significância. ** são os valores-p de MacKinnon-Haug-Michelis (1999). *** estatística da Razão de Verossimilhança.

Assumiu-se o pressuposto de tendência determinística linear no procedimento e dois *lags*, uma vez que perde-se uma observação no teste. O teste do traço do procedimento de Johansen, juntamente com o teste de razão de verossimilhança, indicou a existência de um vetor de cointegração ao nível de 5%. A evidência de um vetor de cointegração indica uma relação de equilíbrio de longo prazo entre a produção de energia, renda e emissões de poluentes, onde os desvios em relação à trajetória de equilíbrio ocorrem apenas no curto prazo.

Quando as variáveis estão em logaritmo e é identificado um vetor de cointegração, os coeficientes podem ser interpretados como elasticidades de longo prazo. Portanto, no longo prazo, uma variação positiva no PIB e nas emissões de CO₂ de 10% aumentam a produção de energia, em média, 13,43% e 0,91%, respectivamente (ver Tabela 5). Entretanto, apenas o impacto do PIB sobre a produção de energia é estatisticamente significativo. Além disso, cabe ressaltar o impacto positivo da tendência sobre a produção de energia. A Tabela 5 apresenta as estimativas das elasticidades de curto e longo prazo entre as variáveis.

Tabela 5: Estimativa do VECM com uma relação de cointegração

Vetores de cointegração	ENE (-1)	PIB (-1)	CO2 (-1)
Coefficientes de longo prazo	1,000	-1,343 [-9, 494]*	-0,091 [-0,518]
Constante	27,195		
Tendência	-0,0068		
Correção de Erro	D(ENE)	D(PIB)	D(CO2)
	-0,078868	0,214354*	0,381741*
Coefficientes de ajustamento	[-1,11226]	[2,73759]	[4,03646]
D(ENE (-1))	0,415385*	0,456160*	0,446245
	[2,06417]	[2,05278]	[1,66262]
D(ENE (-2))	-0,041546	0,107717	0,136446
	[-0,22498]	[0,52824]	[0,55398]
Correção de Erro	D(ENE)	D(PIB)	D(CO2)
	-0,357860	0,103114	0,027915
D(PIB(-1))	[-1,71068]	[0,44638]	[0,10005]

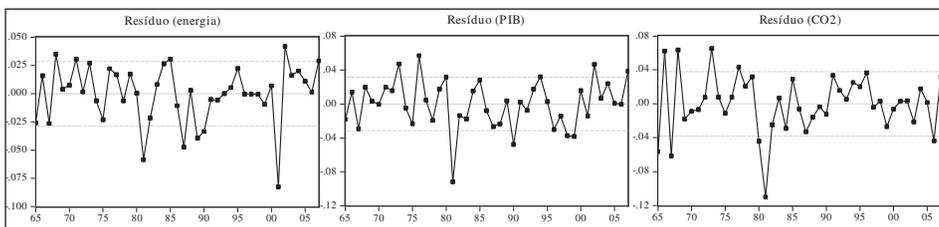
D(PIB(-2))	0,254489 [1,09015]	0,500858 [1,94295]	0,847785* [2,72286]
D(CO2(-1))	0,048986 [0,34670]	0,044033 [0,28222]	0,126874 [0,67326]
D(CO2(-2))	0,013048 [0,09208]	0,022522 [0,14394]	-0,028516 [-0,15089]
Constante	0,070952* [2,78197]	-0,029400 [-1,04391]	-0,051944 [-1,52704]
Tendência	-0,001213* [-2,31071]	0,000380 [0,65468]	0,000712 [1,01637]
R ²	0,551970	0,505842	0,523398
R ² Ajustado	0,446552	0,389570	0,411257
Estatística-F	5,235979	4,350490	4,667297
AIC	-4,087884	-3,889543	-3,511892
SIC	-3,719261	-3,520920	-3,143269

Fonte: Elaboração própria

Nota: *Parâmetros significativos a 5%.

O coeficiente de determinação (R^2) ressalta que 55,20% da variação da produção energética pode ser explicada pelas variáveis do modelo. Pelo coeficiente de determinação ajustado, esse percentual é inferior (44,66%). O mesmo indicador aponta que 50,58% da variação do PIB pode ser explicada pelo modelo, enquanto que cerca de 52,23% das emissões pode ser atribuída às variáveis impostas. Pela análise gráfica dos resíduos, o VECM se mostra estável. A Figura 3 apresenta os resíduos das equações estimadas.

Figura 3: Resíduos do modelo VECM

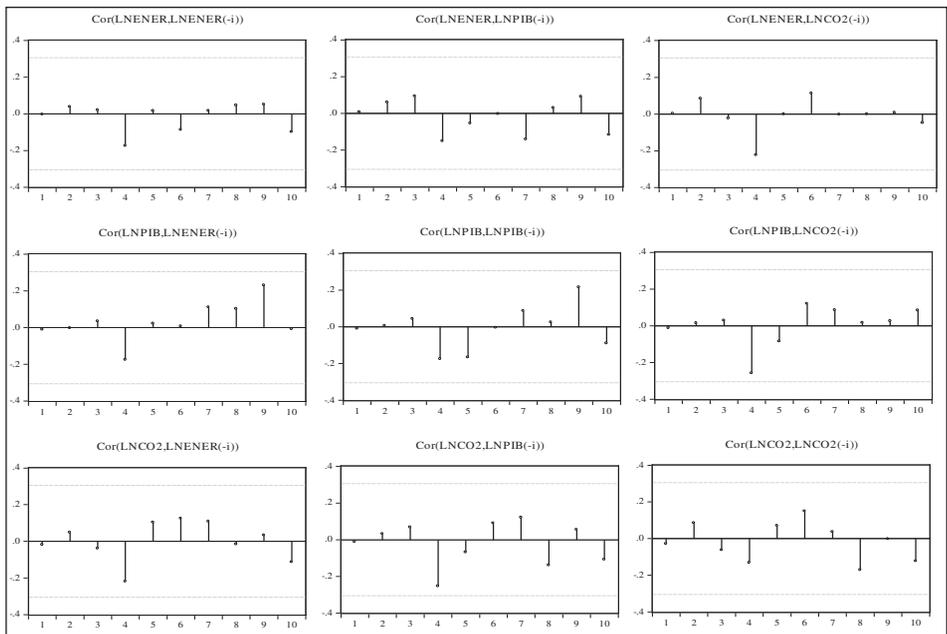


Fonte: Elaboração própria

Pelo teste LM, não se rejeita a hipótese nula de ausência de autocorrelação serial até a quinta defasagem. O correlograma dos resíduos do modelo estimado mostraram-se não significativos a 5%.

A produção de energia, no curto prazo, é estatisticamente afetada por sua defasagem. Em média, uma variação positiva de 10% no período t tende a elevar a variável em 4,15% em $t+1$. Todavia, não há indícios de que o PIB e as emissões de poluentes afetem a variável no curto prazo, pois os parâmetros não foram significativos. Segundo Pais (2012), a produção de energia possui maior prazo de maturação, por esse motivo, o governo deve investir na expansão da capacidade instalada a fim de evitar possíveis descompassos entre a demanda e oferta no futuro, como ocorreu no período de racionamento. A Figura 4 ressalta os valores calculados para os correlogramas estimados a partir do VECM.

Figura 4: Correlograma dos resíduos do VECM



Fonte: Elaboração própria

A renda, por sua vez, é afetada pela produção de energia no curto prazo. Em suma, uma variação positiva de 10% aumenta cerca de 4,56% o PIB no período posterior. Segundo os resultados do modelo, esse impacto é estatisticamente significativo a 5%. Na mesma perspectiva, o valor defasado da energia, no curto prazo, afeta as emissões de CO₂ positivamente (10% de significância). De fato, uma variação positiva na produção energética na mesma proporção expande as emissões em 4,46% no período posterior. Pode-se verificar que a segunda defasagem da renda também afeta as emissões no curto prazo (um choque de mesma magnitude tende a elevar os poluentes em 8,48% dois períodos à frente). A Tabela 6 mostra a decomposição do erro de previsão das variáveis.

Tabela 6 – Decomposição do termo de erro de previsão da Energia, PIB e emissões de CO₂

Decomposição da variância para Energia				
Período	EP*	ENE	PIB	CO ₂
1	0,029	100,000	0,000	0,000
2	0,045	98,519	1,330	0,151
3	0,058	98,785	0,878	0,337
4	0,072	98,424	1,141	0,434
5	0,087	97,577	1,946	0,477
6	0,104	97,080	2,415	0,505
7	0,121	96,750	2,723	0,527
8	0,137	96,606	2,848	0,546
9	0,152	96,541	2,899	0,560
10	0,167	96,536	2,893	0,571
Decomposição da variância para PIB				
Período	EP*	ENE	PIB	CO ₂
1	0,032	49,298	50,702	0,000
2	0,053	69,263	30,716	0,021
3	0,077	78,697	21,230	0,073
4	0,097	83,953	15,928	0,119
5	0,115	86,753	13,098	0,149
6	0,129	88,580	11,253	0,166
7	0,142	89,786	10,039	0,175
8	0,152	90,665	9,156	0,179
9	0,161	91,311	8,509	0,181
10	0,168	91,811	8,009	0,180

Decomposição da variância para CO ₂				
Período	EP*	ENE	PIB	CO ₂
1	0,038	28,627	5,967	65,407
2	0,062	43,255	2,279	54,466
3	0,089	58,427	1,218	40,354
4	0,111	64,111	1,175	34,714
5	0,130	66,393	1,474	32,133
6	0,144	66,292	2,375	31,333
7	0,155	65,358	3,330	31,311
8	0,165	63,849	4,458	31,693
9	0,172	62,193	5,541	32,266
10	0,179	60,487	6,595	32,918

Fonte: Elaboração própria

Nota: *Erro Padrão

Pela Tabela 6, fica evidente que a variância da produção de energia pode ser atribuída à própria variável. Ao final da década, cerca de 96,54% da variação energética ainda é relacionada aos valores defasados dessa variável. Portanto, o panorama pouco ou quase não se altera em uma década.

A renda, por sua vez, atribui 50,70% da variação à própria renda, sendo 49,29% explicada pela energia. Transcorrida uma década, a participação da energia para explicar a variação do PIB é ainda maior (91,81%). Em outras palavras, no curto prazo o crescimento econômico está intimamente relacionado à capacidade de produção energética nacional, entretanto, nota-se que o impacto da energia sobre a renda é ainda mais forte depois de uma década, o que ressalta a importância de investimentos permanentes na infraestrutura energética nacional, dado o tempo relativamente maior de maturação do setor.

Já as emissões de CO₂, no curto prazo, respondem a 65,41% da variação da própria variável, sendo 28,63% atribuída à energia e 5,97% ao PIB. De maneira semelhante ao PIB, a importância da energia ao final de uma década é acrescida (60,49%) e diminui para 32,92% a importância relativa das emissões para se autoexplicar. Pode-se dizer que, mesmo sendo considerado limpo o processo nacional de produção energética, não há evidências de que as emissões de poluentes reduzirão no longo prazo com a atual estrutura energética do Brasil.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas décadas tem sido crescente a preocupação da sociedade com a qualidade do meio ambiente, pois as mudanças climáticas, derivadas em sua maioria das emissões de poluentes, são apontadas como um dos maiores obstáculos ao crescimento econômico e à qualidade de vida da população mundial.

A principal discussão sobre o meio ambiente envolve a redução das emissões a partir da substituição gradativa dos combustíveis não renováveis por energias renováveis mais limpas, como eólica, solar e hidráulica, por exemplo. Esta última tem se mostrado factível devido à potencialidade do processo de armazenamento, transmissão e distribuição. O Brasil, nesse contexto, se destaca por possuir uma matriz energética mais limpa que a média mundial, baseada basicamente na produção hidrelétrica. Todavia, mesmo possuindo uma matriz energética relativamente limpa, não há indícios de que o país esteja reduzindo, de fato, as emissões de CO₂, considerado um dos principais agressores do meio ambiente.

A partir da análise do modelo VECM, foi possível comprovar que, no curto prazo, choques positivos no setor elétrico brasileiro impactam significativamente sobre o nível de renda e sobre as emissões de CO₂. Não obstante, esse panorama não se inverte no longo prazo, pois a energia persiste na determinação da renda e das emissões transcorrida uma década. E a principal preocupação recai sobre a relação entre energia e emissões, uma vez que são de interesse não apenas nacional, mas mundial, a redução dos poluentes e o uso eficiente das diversas fontes de energia. Por esse motivo, o Estado tem papel fundamental no sentido de complementar as políticas voltadas ao gerenciamento da demanda e da conservação energética para garantir o crescimento sustentável da renda, ao menor custo social possível.

Em linhas gerais, é possível analisar outras fontes de emissão de poluentes, como o desmatamento e a expansão da fronteira agrícola, pois esses fatores são também apontados como responsáveis pelo nível de emissões no país, assim como a produção energética. Certamente, do ponto de vista do Estado, intervir no processo de desmatamento é uma tarefa relativamente mais fácil do que alterar a matriz energética nacional. Portanto, mesmo que a relação entre a produção energética e as emissões de poluentes seja posi-

tiva no Brasil, há maneiras de reduzir as emissões a partir de instrumentos regulatórios sobre outros determinantes da poluição, como os supracitados.

Os resultados apresentados neste estudo não encerram o debate sobre a geração energética, renda e emissões de poluentes, mas, ao contrário, revelam novas possibilidades, como a desagregação de dados da geração energética nacional e o impacto de fontes diferentes de energia sobre os níveis de renda e emissão de poluentes. Também para futuros trabalhos, pode-se verificar a relação existente entre outros fatores, como desmatamento e expansão da fronteira agrícola juntamente com a renda e as emissões de poluentes.

AN ANALYSIS AMONG ENERGY, INCOME AND CO₂ EMISSIONS: EVIDENCE FROM BRAZIL, 1962-2007

Abstract

Due to increasing global temperatures caused primarily by the emission of greenhouse gases, the concern with the sources of energy (renewable and nonrenewable) has been increasing worldwide. Therefore, the aim of this study is to analyze the dynamic relationship between energy production, income and emissions of carbon dioxide (CO₂) to Brazil, in the period from 1962 to 2007. A dynamic approach between the aforementioned variables is estimated using the Vector Autoregressive Model (VAR) by Vector Error Correction (VECM). The main results show that, in the short term, positive shocks in the production of electricity positively affect GDP and not reduce CO₂ emissions. The variance decomposition shows that the production of the Brazilian electric sector, after a decade, represents a significant share of the variation in income and emissions. In conclusion even having a relatively clean energy matrix, there is no evidence that Brazil is reducing, in fact, CO₂ emissions.

Keywords: energy, income, emissions of pollutants

JEL Classification: C00; O13; Q00;

6. REFERÊNCIAS

ANDRADE, T. A., LOBÃO, W. J. A. Elasticidade renda e preço da demanda residencial de energia elétrica no Brasil. Rio de Janeiro: IPEA. **Texto para Discussão**, n. 489. 1997.

BANCO MUNDIAL, 2012. Disponível em: <www.worldbank.org>. Acesso em: 20 de janeiro, 2013.

BERNDT, E. R. WOOD, D. O. Technology, prices and the derived demand of energy. **Rev. Econ. Statist.** 57: 259-68. No. 21. 1975.

BIODIESELBR, 2012. Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com/efeito-estufa/co2/efeito-estufa-dioxido.htm>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2013.

BUENO, R.L.S. **Econometria de séries temporais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

CPTEC (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos), 2012. Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/estacoes/>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2013.

EDENHOFER, O.; BAUER, N.; KRIEGLER, E.; The impact of technological change on climate protection and welfare: Insights from the model MIND. **Ecological Economics.** 277-292. 2005.

FILIPPINI, M. HUNT, L. Energy demand and energy efficiency in the OECD countries: a stochastic demand frontier approach. **CEPE Working Paper** No. 68. 2009.

GOULAO, D. **Public goods: review of privately provided public goods literature**. University of Wisconsin-Madison. Mai., 2004.

GREENE, W. H. **Econometric Analysis**. 5ª Edição. Prentice-Hall. 1083p. 2003.

GRÔPPO, G. S. **Contratos futuros e Ibovespa: estudo com procedimento de auto-regressão vetorial estrutural**. Resenha BM&F, n.167, p.70-81, 2006.

GUESNERIE, R. **A future for Kyoto?** Paris-Jourdan Sciences Economiques. Working Paper. N.8. Mai., 2011.

HOLCOMBE, R.G. A theory of the theory of public goods. **Review of Austrian Economics** 10, Nº. 1 1-22 p. 1997.

IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE). Disponível em: <www.ipcc.ch>. Acesso em: 20 de janeiro de 2013.

IPEADATA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), 2012. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2013.

IRFFI, G., CASTELAR, I., SIQUEIRA, M. L., LINHARES, F. C. Previsão da demanda por energia elétrica para classes de consumo na região nordeste, usando OLS dinâmico e mudança de regime. **Economia Aplicada**, Ribeirão Preto, SP, v. 13, n.1, p.69-98, Jan., 2009.

JACOB, J., FREEMAN, G., GRYGIER, J., MORTON, D., SCHULTZ, G., STASCHUS, K., STENDINGER, J. **Socrates: A system for scheduling hydroelectric generation under uncertainty**. Annals of Operations Research 99-133 pp. 1995.

JANN, B. MOREMATA: **Stata module (Mata) to provide various functions**. Disponível em: <<http://ideas.repec.org/c/boc/bocode/s455001.html>>. Acesso em: 05 de janeiro de 2013.

JOHANSEN, S. **Statistical analysis of cointegration vectors**. Journal of Economic Dynamics and Control, v. 12, p. 234-254, 1988.

KEMFERT, C.; **Estimated Substitution elasticities of nested CES production function approach for Germany**. Energy Economics. 249-264. 1998.

LINARES, P., LABANDEIRA, X. **Energy Efficiency: Economics and Policy**. Journal of Economic Surveys. Vol. 24, No. 3, pp. 573–592. 2010.

MME (Ministério de Minas e Energia), 2013. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/mme>>. Acesso em: 20 de janeiro de 2013.

MODIANO, E. M. **Elasticidade-renda e preço da demanda de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Departamento de Economia – PIC/RJ. Texto para Discussão, n. 68, 1984.

MUKHERJEE, A., GOSWAMI, R. **Trade in Energy Services: GATS and India**. Indian council for research on international economic relations. Working Paper No. 231. Jan, 2009.

PAIS, P. S. M. **Demanda de energia elétrica no Brasil no período pós-acionamento**. Viçosa: UFV, 2012. 92 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

SAMUELSON, P. A. **Diagrammatic Exposition of a Theory of Public Expenditure**. The Review of Economics and Statistics, Vol. 37, No. 4. pp. 350-356. Nov., 1955.

SAMUELSON, P. A. **The Pure Theory of Public Expenditure**. The Review of Economics and Statistics, Vol. 36, No. 4., pp. 387-389. Nov., 1954.

SCHMIDT, C. A. J., LIMA, M. A. **A demanda por energia elétrica no Brasil**. Revista Brasileira de Economia. Rio de Janeiro, v.58, n.1, p. 67-99. Jan., 2004.

SERRATO, E. **Fronteiras Paramétricas de Eficiência para o Segmento de Transmissão de Energia Elétrica no Brasil**. Brasília: UNB, 2006. 79 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Economia do Setor Público, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVA, S., SOARES, I., PINHO, C. **The impact of renewable energy sources on economic growth and CO2 emissions – a SVAR approach.** FEP Working Paper. N.407, mar., 2007.

TANNURI-PIANTO, M. E., DE SOUZA, M. C. S. ARCOVERDE, F. D. **Fronteiras de Eficiência Estocásticas para as Empresas de Distribuição de Energia Elétrica no Brasil: Uma Análise de Dados de Pannel.** Estudos Econômicos, São Paulo, v. 39, n. 1, P. 221-247, Jan/Mar., 2009.

TIWARI, A. K. **A structural VAR analysis of renewable energy consumption, real GDP and CO2 emissions: Evidence from India.** Economics Bulletin, Vol. 31 no.2 pp. 1793-1806, 2011.

VARIAN, H.R. **Microeconomic Analysis.** 3ª Edição. Nova Iorque, EUA. Norton e Company. 563 pp. 1992

VIEIRA, J. P., DE CASTRO, N. J. GUERRA, S. M. **A experiência dos anos 1990 da indústria de energia elétrica brasileira: privatizações e expansão.** Observatorio de la economía Latinoamericana. Número 152, 2010.