

CRESCIMENTO ECONÔMICO, ENERGIA E MEIO AMBIENTE: EFEITOS DA SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL

9. Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade

Yuri Cesar de Lima e Silva

Professor do Departamento de Economia, Universidade Federal de Roraima – UFRR
Economista da Secretaria de Planejamento e Orçamento de Roraima.
yuricesar_silva@hotmail.com

Luis Abel da Silva Filho

Professor do Departamento de Economia da Universidade Regional do Cariri – URCA
Bolsista da Diretoria de Estudos e Políticas Regionais, Urbanas e Ambientais (DIRUR) –
Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA
luis.abel@urca.br

Andrei de Lima e Silva (UFRR)

Professor do Departamento de Economia, Universidade Federal de Roraima – UFRR
andrei_als@hotmail.com

Resumo: Foi examinada a inter-relação dinâmica entre o crescimento econômico, o percentual de combustíveis fósseis na matriz energética, o uso de energia e as emissões de CO₂. Para isso, foi estimado um vetor autorregressivo de dados organizados em painel (PVAR) em 75 países, que foram classificados por diferentes grupos de renda, entre os períodos de 1974 e 2013. Nossos principais resultados revelam que o choque que reduz o percentual de combustíveis fósseis na matriz energética obtém como resposta uma redução nas emissões de CO₂ per capita e no uso de energia per capita enquanto não afetam estatisticamente o PIB per capita. Além disso, a causalidade entre o crescimento econômico e o uso de energia é bidirecional nos países de renda alta e renda média-alta enquanto a energia causa Granger o crescimento econômico no caso dos países de renda média-baixa e renda baixa. Por fim, não encontramos evidências para sustentar a curva ambiental de Kuznets (EKC).

Palavras-chave: PVAR; Combustíveis Fósseis; Emissões de CO₂.

Abstract: The dynamic interrelationship between economic growth, the percentage of fossil fuels in the energy matrix, energy use, and CO₂ emissions were examined. An autoregressive vector of panel data (PVAR) was estimated in 75 countries, classified by different income groups between 1974 and 2013. Our main results reveal that the shock that reduces the percentage of fuel fossils in the energy matrix reduces CO₂ emissions per capita and the use of energy per capita. At the same time, they do not statistically affect GDP per capita. Furthermore, the causality between economic growth and energy use is bidirectional in high-income and upper-middle-income countries. In contrast, energy Granger causes economic growth in the case of lower-middle-income and low-income countries. Finally, we found no evidence to support the environmental Kuznets curve (EKC).

Keywords: PVAR; Fossil fuels; CO₂ emissions.

1. Introdução

Os problemas relacionados às mudanças climáticas e ao aquecimento global introduziram a questão ambiental na agenda política, social e econômica de praticamente todos os países do mundo. Estudos recentes mostraram que as emissões de CO₂ provenientes do uso de combustíveis fósseis e dos processos industriais contribuíram com cerca de 78% do aumento total das emissões de gases do efeito de estufa (GEE) de 1970 para 2010 (IPCC, 2014, p. 5).

Uma das opções, bastante discutida internacionalmente (IPCC, 2011), para reduzir as emissões antropogênicas de GEE vinculadas ao uso de energia, sem que as taxas de crescimento econômico tenham que ser drasticamente reduzidas, é a substituição do uso de energia proveniente de combustíveis fósseis¹ por fontes de energia renováveis ou de energia nuclear.

Entretanto, entender como se constitui a relação entre o crescimento econômico, o uso de energia (e suas fontes) e as emissões de CO₂ não é uma tarefa trivial. A atual literatura empírica que trata sobre os vínculos causais dessas variáveis ainda não chegou a um consenso. Existem basicamente três grupos nesta área de pesquisa: o primeiro deles se preocupa com os vínculos entre o crescimento econômico e o uso de energia, uma consistente revisão dessa literatura pode ser encontrada em Yıldırım et al. (2014). Essa literatura trabalhar com quatro hipóteses importantes para a questão ambiental, que são: i) hipótese do crescimento, quando a direção da causalidade é da energia para o PIB; ii) hipótese do *feedback*, quando as variáveis causam uma à outra simultaneamente; iii) hipótese da conservação, quando o sentido é do PIB para a energia; e, iv) hipótese da neutralidade, quando não são observadas relações de causalidade em nenhum dos sentidos; o segundo grupo se concentra na relação existente entre o PIB e as emissões de GEE, se alimentando da comprovação empírica, ou não, da curva ambiental de Kuznets (EKC). Um bom apanhado sobre essa literatura pode ser encontrado em Al-Mulali et al. (2015); por fim, o terceiro e mais recente grupo, busca entender as relações entre as três variáveis (PIB-Energia-CO₂) de forma unificada, alguns dos mais recentes trabalhos nesta área foram sumarizados por Antonakakis et al. (2017). No entanto, a principal característica entre estes três grupos de pesquisa é falta de similaridade nos resultados encontrados. Esse fato pode ser parcialmente explicado pelo grande e divergente número de países estudados, pelas diferenças entre os períodos analisados e pelas diversas metodologias empregadas para entender os vínculos entre essas variáveis.

Este estudo não pretende encerrar as divergências encontradas nesta literatura. Na prática, pretende inserir outra questão ao debate. Isto é, busca-se compreender como a substituição dos combustíveis fósseis por fontes alternativas não poluentes podem impactar, ou não, o PIB, o uso de energia e as emissões de CO₂ e seus vínculos relacionais. Isto porque, ainda é uma deficiência da literatura específica da área, entender os efeitos de uma redução da parcela dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial.

Para isso, foi utilizado um vetor autorregressivo de dados organizados em painel (PVAR), desenvolvido por Holtz-Eakin et al. (1988), para um conjunto de dados sobre crescimento econômico, uso de energia, parcela de energia proveniente de combustíveis fósseis na matriz energética e emissões de CO₂. A base de dados é composta por uma amostra de 75 países, classificados segundo seu nível de desenvolvimento, no período entre 1974 e 2013.

Até o presente momento, existem poucos estudos, vinculados a esta agenda de pesquisa, que utilizaram a metodologia PVAR [Magazzino (2016; 2017); Ojewumi e Akinlo (2017); Bakirtas e Cetin (2017); Antonakakis et al. (2017)]. Entretanto, existem algumas

¹ De acordo com a mesma base de dados utilizada no trabalho, mais de 80% do consumo total de energia mundial em 2014 era formada por energia proveniente de combustíveis fósseis (compreendendo energia proveniente de carvão, petróleo e gás natural).

vantagens desse método em relação aos utilizados anteriormente na literatura, Antonakakis et al. (2017, p. 809) cita alguns fatos que merecem ser destacados: i) o PVAR consegue aliviar o problema da endogeneidade ao tratar todas as variáveis como potencialmente endógenas, permitindo uma modelagem explícita dos efeitos de *feedback* de todas as variáveis do modelo; ii) O PVAR é bastante útil quando a informação teórica sobre as relações entre as variáveis é ambígua ou insuficiente para especificar corretamente o modelo; iii) As funções de impulso resposta (IRFs) podem ajudar a examinar as interdependências de curto e longo prazo entre as variáveis; iv) A inclusão de efeitos fixos dos países são capazes de captar os componentes invariantes no tempo que diferenciam cada país; e, v) graças a dimensão transversal a eficiência da estimação não é reduzida por questões relacionadas ao tamanho da série temporal utilizada.

Os resultados encontrados apontam para certa consistência quando analisamos efeitos dos choques que reduzem o percentual de combustíveis fósseis para os diferentes grupos de renda. As funções de impulso resposta demonstraram que esse tipo de choque obtém com resposta uma redução nas emissões de CO₂ per capita e no uso de energia per capita enquanto não afetam estatisticamente o PIB per capita. Esses resultados se sustentam em praticamente todos os grupos de renda, a única exceção foi observada na resposta do PIB per capita dos países de renda baixa que apresentaram um aumento pequeno, mas estatisticamente significativo, no quarto período da IRF estimada.

Por outro lado, quando observamos os choques do PIB per capita, encontramos resultados um pouco mais heterogêneos com relação às respostas da parcela de combustíveis não fósseis, para os países de renda alta não foram encontrados efeitos estatisticamente significativos, nos países de renda média-alta a resposta indica um aumento na parcela de combustíveis não fósseis e nos países de renda média-baixa e renda baixa observou-se uma redução nesta parcela.

Com relação ao nexos entre PIB e Energia, o teste de causalidade de Granger sustentou a hipótese do *feedback* para os países de renda alta e média-alta e a hipótese da conservação para os países de renda média-baixa e baixa. No tocante a EKC, os dados apontam para um agravamento crescente das emissões de CO₂ com o aumento do nível de desenvolvimento, portanto, não encontramos nenhuma evidência da curva em formato de U invertido relatada por Kuznets (1955).

Este artigo está organizado da seguinte forma: na próxima seção os dados serão apresentados e será discutida em detalhes a metodologia empregada. A seção 3 irá apresentar os resultados empíricos. Por fim, na seção 4 são levantadas algumas considerações finais sobre o estudo.

2. Metodologia

2.1. Dados

Os dados utilizados se referem a uma amostra de 75 países que foram classificados em 4 faixas de renda per capita, como demonstrado na Tabela 1. A classificação foi definida utilizando a metodologia empregada pelo Banco Mundial que vem sendo o padrão dos estudos da área.

Tabela 1 - Lista de países da amostra utilizada, por grupo de renda.

Classificação	Faixa de renda per capita (em US\$ de 2016)	Países
Renda Alta	Acima de 12.236	Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, Dinamarca, Finlândia, França, Grécia, Islândia, Irlanda, Itália, Japão,

		Coreia do Sul, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Portugal, Arábia Saudita, Espanha, Suécia, Trindade e Tobago, Reino Unido, Estados Unidos e Uruguai.
Renda Média-Alta	Entre 3.956 e 12.235	Argentina, Brasil, China, Colômbia, Costa Rica, Cuba, República Dominicana, Equador, Gabão, Irã, Iraque, Jamaica, Malásia, México, Panamá, Paraguai, Peru, África do Sul, Tailândia, Turquia e Venezuela.
Renda Média-Baixa	Entre 1.006 e 3.955	Bangladesh, Bolívia, Camarões, República do Congo, Costa do Marfim, Egito, El Salvador, Gana, Guatemala, Honduras, Índia, Indonésia, Quênia, Marrocos, Myanmar, Nicarágua, Nigéria, Paquistão, Filipinas, Sri Lanka, Sudão, Tunísia e Zâmbia.
Renda Baixa	Abaixo de 1.005	Benin, República Democrática do Congo, Nepal, Senegal, Togo e Zimbabwe.

Nota: Os grupos de renda seguem a classificação do Banco Mundial. Mais informações podem ser encontradas em: <http://data.worldbank.org/about/country-classifications/country-and-lending-groups>.

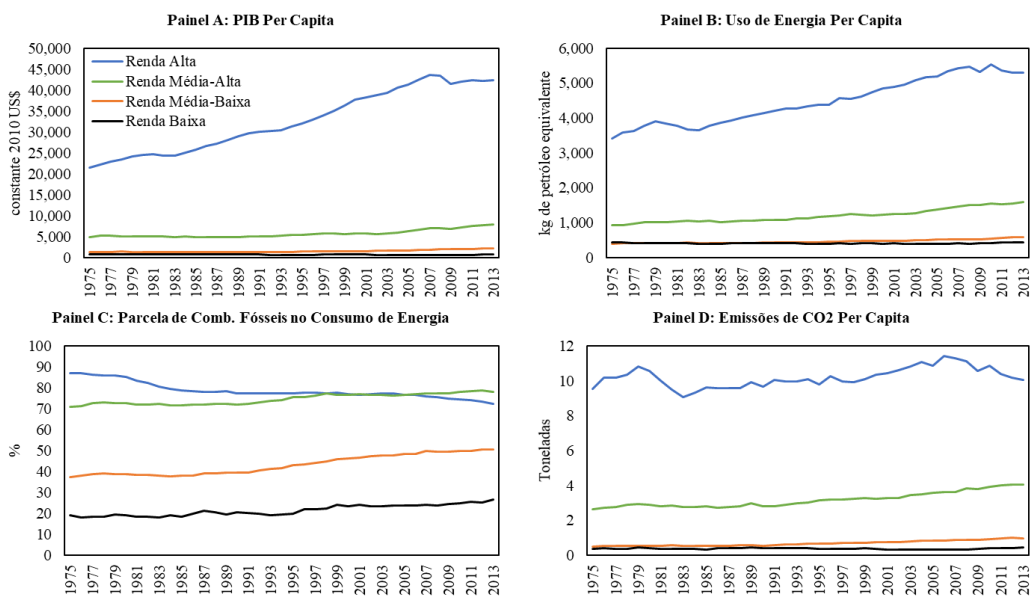
Os dados têm periodicidade anual e foram coletados na base de dados *World Development Indicators* (WDI) do Banco Mundial para os anos entre 1974 e 2013. As variáveis utilizadas no estudo são: PIB real per capita, em US\$ de 2010 (PIB); uso de energia, em kg de petróleo equivalente (ENERGIA); parcela de combustíveis não fósseis no consumo total de energia, em % (NFF²); e, emissões de CO₂, em toneladas (CO₂).

Na Figura 1, são apresentadas as médias das séries utilizadas (em nível) para cada um dos quatro estratos de renda. Percebe-se que existe uma grande distância entre as médias do PIB per capita, do uso de energia per capita e das emissões de CO₂ per capita entre os países de renda alta e os demais.

Com relação à questão ambiental, o Painel D da Figura 1 mostra que, em 2013, a média de emissões per capita dos países de renda alta era mais de 2,46 vezes maior que a dos países de renda média-alta, 10,34 vezes maior que a dos países de renda média-baixa e 22,48 vezes maior que a países de renda baixa. Esse fato pode ser parcialmente explicado pela composição da matriz energética, que é mostrado no Painel C da Figura 1. As matrizes energéticas dos países de renda alta ainda possuem uma composição fortemente dependente de combustíveis fósseis, mesmo existindo uma substituição dessas fontes nos últimos anos. Os demais grupos de países, por sua vez, parecem estar elevando a parcela de combustíveis fósseis na matriz, contrariando as recomendações dos fóruns internacionais. Pode-se observar ainda que os países de renda média-alta já possuem matrizes energéticas mais “suja” que os de renda alta desde 2005.

Figura 1 – Médias do PIB per capita, uso de energia per capita, parcela de combustíveis fósseis no consumo total de energia e emissões de CO₂ per capita, por grupo de renda.

² Consideramos $NFF = 100 - \%$ de combustíveis fósseis no consumo total de energia.



Fonte: Elaboração própria.

Essas características levantam importantes questões que devem ser analisadas com mais cuidado. Portanto, o entendimento dos vínculos causais entre o PIB, o uso de energia, a parcela de combustíveis fósseis e as emissões de CO2 são de suma importância. Assim, seguiremos com os detalhes metodológicos utilizados para este fim.

2.2. Testes de raiz unitária

Para testar a presença de raiz unitária e identificar a ordem de integração das variáveis utilizamos os testes de Levin, Lin e Chu (2002), LLC, e de Im, Pesaran e Shin (2003), IPS. Para compreender as diferenças entre eles, considere a seguinte especificação:

$$Y_{it} = \rho_i Y_{it-1} + \sum_{j=1}^{p_i} \delta_{i,j} Y_{it-j} + u_{it} \quad (1)$$

onde, Y_{it} é o vetor de variáveis endógenas, ρ_i é um parâmetro de autorregressivo, p_i são os lags utilizados no teste e u_{it} são os termos de erro (ruído branco). O teste de LLC assume que todos os painéis possuem o mesmo parâmetro autorregressivo, ou seja, que $\rho_i = \rho$ para todo i . Então, a hipótese alternativa do teste é simplesmente que $\rho < 0$. Por sua vez, o teste IPS relaxa o pressuposto de um ρ comum e, em vez disso, permite que cada painel tenha seu próprio ρ_i . Neste caso, a hipótese nula é que todos os painéis possuem uma raiz unitária ($H_0: \rho_i = 0$ para todo i) e, a hipótese alternativa é que a fração de painéis estacionários é diferente de zero.

2.3. Teste de causalidade de Granger

Examinamos a direção de causalidade no sentido de Granger realizando um conjunto de testes de Wald de causalidade de Granger para cada equação do modelo de autorregressão para todos os vetores do painel. A estatística χ^2 testa a relação nula de causalidade no sentido de Granger para qualquer uma das unidades de seção transversal, contra a hipótese alternativa de que as relações causais ocorrem para pelo menos em um subgrupo do painel. A rejeição da hipótese nula indica que, uma variável Granger causa a outra para todos os países i .

2.4. A abordagem VAR painel

A abordagem PVAR utilizada segue a estrutura desenvolvida por Holtz-Eakin et al. (1988), que combina a abordagem VAR tradicional com a abordagem de dados em painel. O modelo pode ser descrito pela seguinte equação, em sua forma reduzida, que permite a presença de efeito fixo:

$$Y_{it} = \sum_{l=1}^m A_{lt} Y_{it-l} + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Onde, os subscritos i e t correspondem aos países, $i = 1, \dots, 75$, e o período, $t = 1975, \dots, 2013$, utilizados na amostra. Por sua vez, Y_{it} é o vetor 4×1 de variáveis endógenas, que são: i) PIB per capita (PIB_{it}); ii) percentual do consumo de energia não derivado de combustíveis fósseis (NFF_{it}); iii) uso de energia per capita ($Energia_{it}$); e, iv) emissões de CO2 per capita ($CO2_{it}$). Todas as variáveis foram utilizadas no modelo como a primeira diferença do logaritmo natural, que correspondem as suas taxas de crescimento. A estrutura autoregressiva é definida pelo número de *lags*, $l = 1, \dots, m$, utilizados no modelo, que foi definido pelos critérios de informação³ de Akaike (AIC), Bayesiano (BIC) e Hannan e Quinn (HQIC), como definidos por Andrews e Lu (2001). As matrizes A_{lt} , 4×4 , correspondem aos coeficientes dos *lags* que coletam os efeitos dos *lags* próprios e das demais variáveis dependentes com relação aos seus valores atuais. A inclusão de efeitos fixos de cada país é inserida no modelo por μ_i , que captura todos os fatores invariáveis do tempo de um país. E, por fim, ε_{it} é o termo de erro 4×1 com as seguintes características: $E(\varepsilon_{it}) = 0$, $E(\varepsilon_{it}\varepsilon'_{it}) = \Sigma_{\varepsilon}$ (definida como uma matriz não singular) e $E(\varepsilon_{is}\varepsilon'_{it}) = 0$ para $s \neq t$.

A inclusão do μ_i no modelo apresenta um desafio, uma vez que esses efeitos fixos são correlacionados com o termo de erro e, portanto, a estimativa através de OLS levaria a coeficientes tendenciosos. Para evitar este problema, usamos o “procedimento de Helmert” como definido em Arellano e Bover (1995), que implementa uma transformação capaz de remover a média de todas as observações futuras disponíveis para cada país e ano. Em seguida, usamos uma estimação GMM utilizando como instrumentos as observações atrasadas. Como demonstrado em Antonakakis et al. (2017), este procedimento preserva a ortogonalidade entre variáveis transformadas e os *lags* dos regressores, o que nos permite usar esses regressores atrasados como instrumentos para estimar os coeficientes pelo método GMM. A rotina de estimação computacional do PVAR segue a estrutura desenvolvida por Love e Zicchino (2006) que é baseada no trabalho de Holtz-Eakin et al. (1988).

Para um entendimento completo das interações entre as variáveis estudadas foram realizadas análises das funções de impulso resposta (IRFs) que foram estimadas impondo uma identificação de Cholesky padrão, com a ordem de entrada das variáveis sendo definidas como foram apresentadas no início da seção⁴.

3. Resultados

Nesta seção apresentaremos os resultados empíricos dos nossos exercícios. Inicialmente serão apresentados a análise de causalidade de Granger e, posteriormente, analisaremos as funções de impulso resposta (IRFs).

Entretanto, antes de passarmos para os resultados das estimações, serão relatados os testes realizados para a definição das variáveis e defasagens do modelo. Os testes de estacionariedade (raiz unitária) foram executados em nível e em primeira diferença dos logaritmos naturais das variáveis. Os resultados, relatados na Tabela A.1 do apêndice,

³ O modelo selecionado será o que minimizar o valor do AIC, BIC ou HQIC.

⁴ A ordem de entrada das variáveis no PVAR foi definida utilizando-se dois critérios: i) a sequência utilizada pela literatura (PIB, Energia e CO2); e, ii) os resultados obtidos no teste de causalidade de Granger.

demonstram que todas as variáveis são estacionárias em primeiras diferenças, enquanto em nível acusam a presença de raiz unitária em pelo menos um dos testes realizados. Assim, todas as variáveis entraram nas estimações do PVAR em primeira diferença.

Os PVARs foram estimados separadamente para cada um dos grupos de renda. Em todos os casos foram utilizados modelos com apenas uma defasagem, como sugerido pelos critérios de seleção apresentados na Tabela A.2 do apêndice.

A seguir, serão analisados os resultados dos testes de causalidade de Granger e posteriormente serão analisadas as funções de impulso resposta. Em todos os casos os resultados se baseiam nas estimações de quatro PVARs, um para cada grupo de renda, como descrito na Tabela 1.

3.1. Causalidade de Granger

Os resultados do teste de causalidade de Granger, que são apresentados na Tabela 4, sugerem alguns fatos interessantes quando são observados os diferentes grupos de renda. Três aspectos gerais podem ser encontrados nesses resultados: i) definição de como a variável NFF entra no PVAR para a composição da identificação de Cholesky; ii) comportamento da relação PIB-Energia; iii) identificação das causas do CO2 e, principalmente, da relação PIB-CO2.

Com relação ao primeiro ponto, observamos que os testes indicam que NFF Granger causa Energia nos países de renda-alta, renda média-baixa e renda baixa. Nos países de renda média alta não foram observadas relações de causalidade entre essas variáveis. Portanto, esses resultados sugerem que a variável NFF entre antes da variável Energia no PVAR para uma correta identificação de Cholesky, ou seja, choques contemporâneos de NFF afetam a Energia, mas isso não acontece no caso contrário.

No que diz respeito à relação PIB-Energia, foram encontradas duas distintas relações. Nos países de renda alta e de renda média-alta observa-se uma relação bidirecional entre o uso de energia e o crescimento econômico, o que sustenta a hipótese do *feedback*, e nos países de renda média-baixa e renda baixa o PIB Granger causa a Energia, sustentando a hipótese da conservação.

Tabela 4 – Testes de causalidade Granger para painel.

Granger Causa	Renda Alta		Renda Média-Alta		Renda Média-Baixa		Renda Baixa	
	χ^2	<i>p</i> -valor	χ^2	<i>p</i> -valor	χ^2	<i>p</i> -valor	χ^2	<i>p</i> -valor
Energia → PIB	4.1420*	0.0420	3.7330*	0.0530	0.1080	0.7420	0.8760	0.3490
NFF → PIB	1.0090	0.3150	1.3980	0.2370	1.0220	0.3120	3.9880**	0.0460
CO2 → PIB	0.7210	0.3960	1.0630	0.3030	1.2580	0.2620	6.6040**	0.0100
PIB → Energia	52.6560***	0.0000	3.6820*	0.0550	23.6210***	0.0000	13.4790***	0.0000
NFF → Energia	19.7290***	0.0000	0.8390	0.3600	20.5590***	0.0000	5.7030**	0.0170
CO2 → Energia	2.1750	0.1400	0.8400	0.3600	2.0280	0.1540	0.2640	0.6070
PIB → NFF	3.1980*	0.0740	1.0530	0.3050	15.8090***	0.0000	6.2030**	0.0130
Energia → NFF	0.0560	0.8130	0.4240	0.5150	2.0420	0.1530	0.0200	0.8880
CO2 → NNF	0.0350	0.8510	0.7580	0.3840	14.4680***	0.0000	0.0680	0.7940
PIB → CO2	20.8910***	0.0000	0.0080	0.9290	3.5510*	0.0590	10.9250***	0.0010
Energia → CO2	6.3430**	0.0120	9.6090***	0.0020	3.9860*	0.0460	4.9760**	0.0260
NFF → CO2	4.9100**	0.0270	0.3030	0.5820	0.0230	0.8790	7.4560***	0.0060

Fonte: Elaboração própria.

Nota: *, ** e *** indicam a rejeição da hipótese nula com níveis de significância de 10, 5 e 1 por cento, respectivamente.

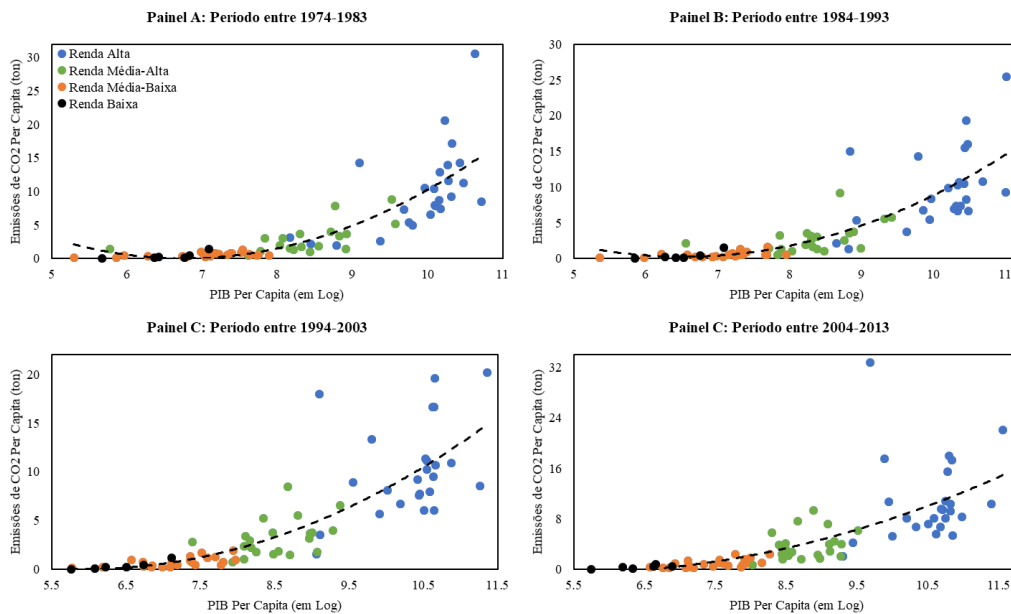
De acordo com Yıldırım et al. (2014, p. 15-16), na hipótese do *feedback* a dependência energética do desempenho econômico do país vai depender da parcela que a energia desempenha na função de produção dos países. Se a parcela for muito alta, políticas

ambientais poupadoras de energia terão um impacto negativo no crescimento econômico. Se for baixa, a relação causal entre o consumo de energia e o crescimento econômico pode desaparecer, diminuindo o efeito anteriormente. Portanto, a validação da hipótese do *feedback*, nos países mais ricos da amostra, implica que soluções ambientais poupadoras de energia podem resultar em restrições ao crescimento econômico de médio e longo prazo. Assim, políticas ambientais voltadas para a substituição dos combustíveis fósseis poderia ser uma solução mais interessante do que a pura redução do uso de energia.

Por sua vez, a hipótese da conservação, observada nos países mais pobres da amostra, indica que a dinâmica do crescimento econômico é que Granger causa o consumo de energia. Nesse cenário, uma vez que exista um consumo excessivo de energia, as políticas poupadoras de energia não terão um impacto negativo no crescimento econômico.

Por fim, o terceiro ponto a ser discutido nesta seção está relacionado aos efeitos que as variáveis exercem nas emissões de CO₂. Nos países de renda alta e renda baixa, encontramos efeitos estatisticamente significativos do PIB, Energia e NFF causando Granger o CO₂. Nos países de renda média-alta apenas a Energia causa Granger as emissões e nos países de renda média-baixa, o PIB e a Energia causam Granger as emissões. Entretanto, esses fatos não são suficientes para demonstrar, ou não, a curva em formato de U invertido relatada por Kuznets (1955). Para isso, foram plotados na Figura 2 os dados relativos ao PIB per capita e as emissões de CO₂ per capita.

Figura 2 – Gráfico de dispersão entre emissões de CO₂ per capita e PIB per capita para diferentes períodos da amostra, por grupo de renda.



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados apresentados não são condizentes com a hipótese de Kuznets, pelo contrário, o que pode ser observado é que existe uma relação positiva entre o desenvolvimento das nações e seu nível de poluição ambiental. Na Figura 2 foram plotados 4 painéis que compreendem o período temporal de uma década. Em todos os casos, a relação positiva se manteve presente, o que sugere que as políticas ambientais que foram mais fortemente implementadas no pós-década de 1990 nos países ricos ainda não surtiram os efeitos esperados.

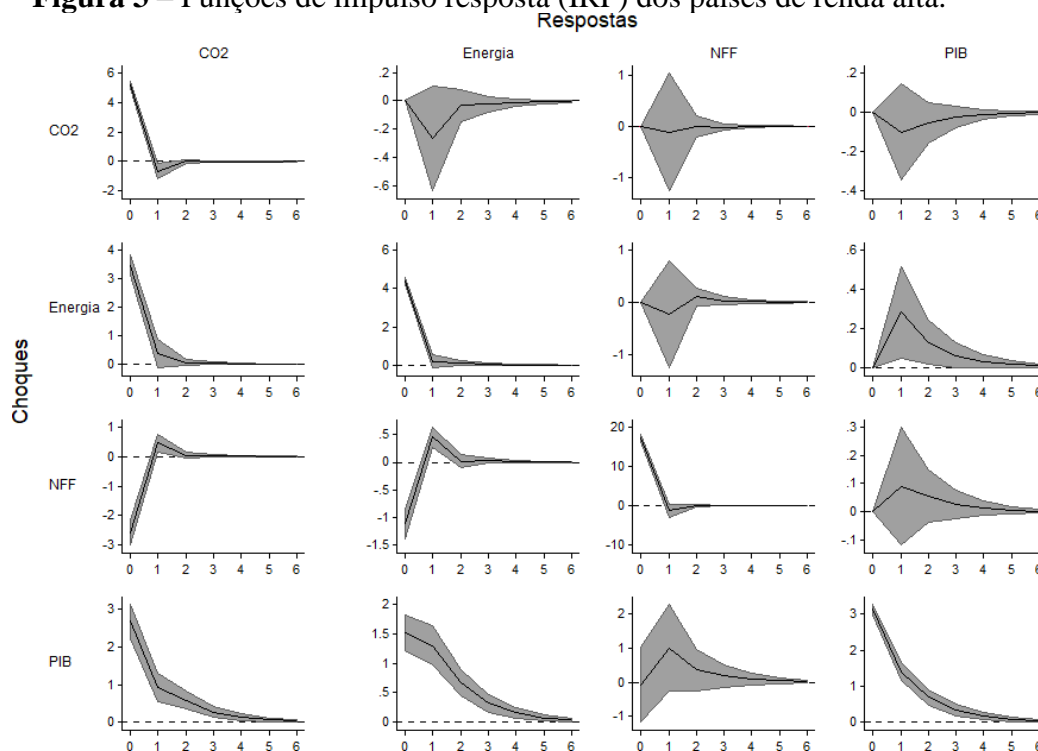
3.2. Funções de impulso resposta

Nesta seção, apresentamos os resultados das funções de impulso resposta (IRF). Como discutido anteriormente, as variáveis PIB per capita (PIB), uso de energia per capita (Energia), parcela de combustíveis não fósseis no consumo total de energia (NFF) e emissões de CO2 per capita (CO2), foram estimadas em primeira diferença do logaritmo natural, portanto, as respostas das IRFs podem ser interpretadas como taxas de crescimento da variável⁵. Os choques ortogonais utilizados foram de um desvio-padrão e os intervalos de confiança foram estimados utilizando 500 simulações de Monte Carlo e detém um nível de significância de 95%.

3.2.1. Países de renda alta

Começaremos nossa discussão com os resultados dos países de renda alta que são apresentadas na Figura 3. Observa-se que um choque no PIB gerou respostas positivas e estatisticamente significativas na Energia e no CO2, mas não teve efeito no NFF. Ou seja, aumentos na taxa de crescimento desses países geram aumentos no uso de energia e nas emissões de CO2, sem modificar a estrutura da matriz energética.

Figura 3 – Funções de impulso resposta (IRF) dos países de renda alta.



Fonte: Elaboração própria.

No caso do choque de NFF, são observados efeitos negativos e estatisticamente significativos na Energia e no CO2, enquanto os efeitos no PIB não são estatisticamente significativos. Portanto, a substituição do uso de combustíveis fósseis, por fontes alternativas, gera uma diminuição no uso de energia e reduzem os níveis de emissões, sem modificar os níveis de crescimento econômico.

⁵ Nesta seção, quando as variáveis forem tratadas pelas siglas entre parêntese, estaremos sempre nos referindo à taxa de crescimento dessas variáveis.

Por seu turno, o choque na Energia é acompanhado por efeitos positivos e estatisticamente significativos no PIB e no CO₂, mas não geram efeitos no NFF. Esses resultados informam que aumentos na taxa de crescimento são acompanhados por aumentos na taxa de crescimento do produto e nas emissões de CO₂, mas não geram incentivos para mudanças na estrutura da matriz energética.

Por fim, o choque do CO₂ não gera efeitos estatisticamente significativos em nenhuma das quatro variáveis utilizadas no nosso modelo.

Com relação às magnitudes das IRFs pode-se perceber que o choque da Energia gera um impacto relativamente maior no CO₂ que os choques do PIB e de NFF (esse último tem sentido inverso). Também se pode observar que os impactos na energia foram relativamente mais intensos no aumento vinculado ao choque do PIB do que na queda gerada pelo choque do NFF.

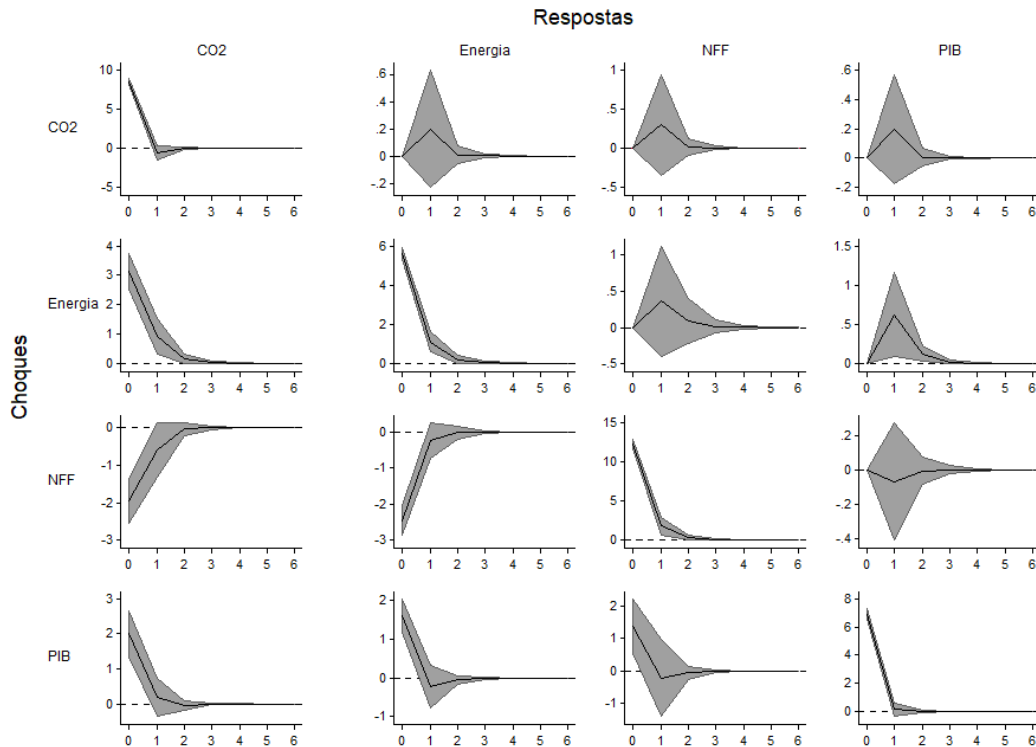
3.2.2. Países de renda média-alta

Por sua vez, os resultados dos países de renda média-alta são apresentados na Figura 4. Nestes países, o choque no PIB gerou respostas positivas e estatisticamente significativas nas três demais variáveis do modelo. Isto significa que aumentos na taxa de crescimento desses países geram aumentos no uso de energia, porém, mesmo gerando aumento nas emissões de CO₂ geram incentivos à substituição da energia proveniente dos combustíveis fósseis por fontes alternativas mais “limpas”.

Os demais choques geram respostas semelhantes às encontradas nos países de renda alta. Ou seja, um choque de NFF gera efeitos negativos e estatisticamente significativos na Energia e no CO₂, enquanto os efeitos no PIB não são estatisticamente significativos. Já o choque na Energia é acompanhado por efeitos positivos e estatisticamente significativos no PIB e no CO₂, mas não geram efeitos no NFF. E, o choque do CO₂ não gera efeitos estatisticamente significativos em nenhuma das quatro variáveis do modelo.

Com relação às magnitudes das IRFs, os resultados são bastante semelhantes aos dos países de renda alta quando observamos as respostas do CO₂. Ou seja, o choque da Energia gera um impacto relativamente maior que os choques do PIB e de NFF (esse último tem sentido inverso). Porém, com relação às respostas na Energia, sofre-se uma inversão, isto é, os impactos foram relativamente mais intensos na queda gerada pelo choque do NFF do que no aumento vinculado ao choque do PIB.

Figura 4 – Funções de impulso resposta (IRF) dos países de renda média-alta.



Fonte: Elaboração própria.

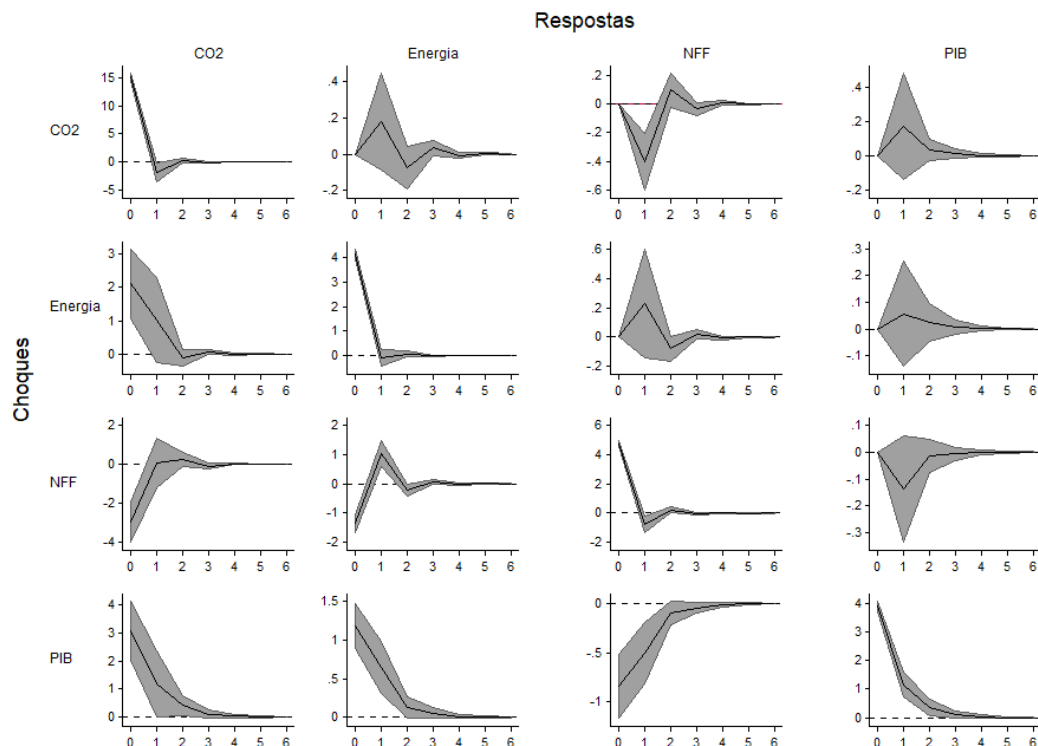
3.2.3. Países de renda média-baixa

Os resultados dos países de renda média-baixa são relatados na Figura 5. Nestes países, o choque no PIB gerou respostas positivas e estatisticamente significativas na Energia e no CO2, além de gerar uma queda estatisticamente significativa no NFF. Isto significa que aumentos na taxa de crescimento desses países geram aumentos no uso de energia e nas emissões de CO2, além de gerarem incentivos a um aumento na parcela de energia proveniente dos combustíveis fósseis na matriz energética. Este fato pode estar vinculado à falta de tecnologia nesses países para que as energias alternativas sirvam de motor para o crescimento econômico.

O choque de NFF geraram respostas semelhantes às encontradas nos países de renda alta e renda média-alta. Ou seja, gerou efeitos negativos e estatisticamente significativos na Energia e no CO2, enquanto os efeitos no PIB não são estatisticamente significativos. Já o choque na Energia obteve efeitos positivos e estatisticamente significativos no CO2, mas não geram efeitos estatisticamente significativos no NFF e no PIB. Por fim, o choque do CO2 não gerou efeitos na Energia e no PIB, mas gerou um efeito negativo e estatisticamente significativo no NFF.

Com relação às magnitudes das IRFs, o choque da Energia gera um impacto relativamente menor que os choques do PIB e de NFF (esse último tem sentido inverso). As respostas na Energia são praticamente semelhantes no que diz respeito aos choques de NFF e PIB. Por fim, os efeitos negativos no NFF foram mais intensamente sentidos quando o choque é de CO2 do quando a fonte da perturbação é o PIB. Uma explicação para este último fato pode ser encontrada na maior variabilidade do CO2 que gerou um choque de um desvio padrão com uma magnitude muito maior que no caso do choque do PIB.

Figura 5 – Funções de impulso resposta (IRF) dos países de renda média-baixa.



Fonte: Elaboração própria.

3.2.2. Países de renda baixa

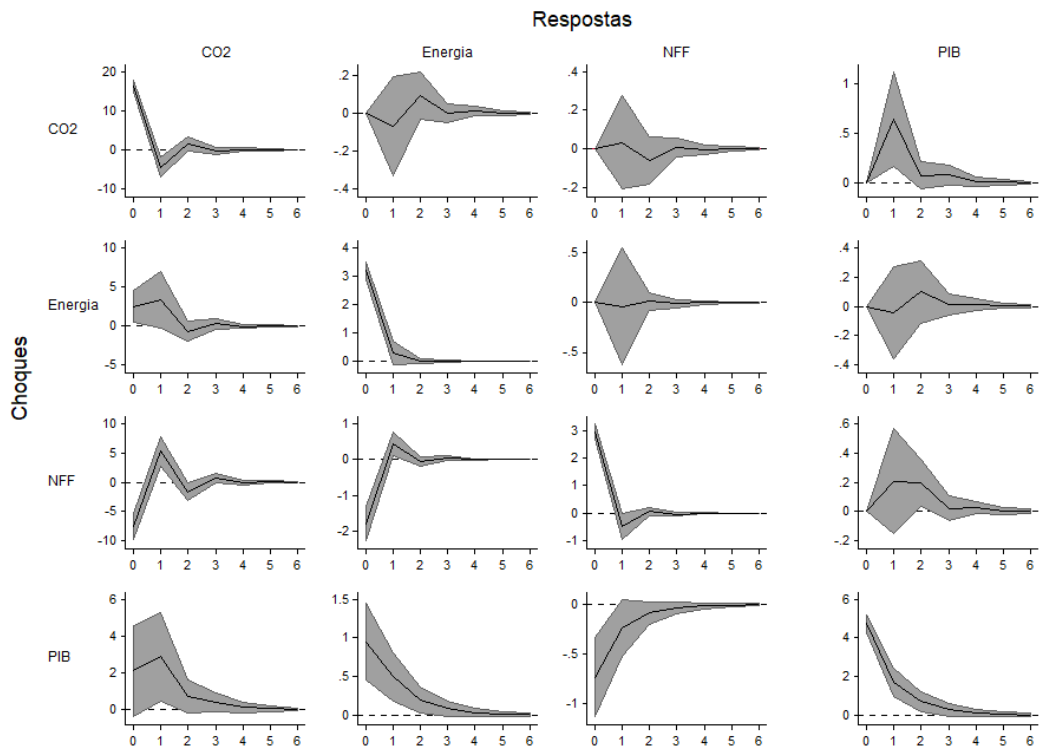
Por fim, os resultados dos países de renda baixa são apresentados na Figura 6. Percebe-se, neste caso, que o choque no PIB gerou respostas semelhantes às encontradas nos países de renda média-baixa. Ou seja, aumentos na Energia e no CO2 e queda no NFF.

O choque de NFF geraram efeitos negativos e estatisticamente significativos na Energia e no CO2, enquanto pôde-se observar um efeito positivo no PIB com um atraso de 2 períodos. Este fato indica que um aumento na utilização de combustíveis não fósseis pode gerar crescimento econômico nesses países. Este fato está menos vinculado às políticas ambientais e mais ligado ao fato dessas nações terem como base energética o uso de lenha e carvão vegetal por ainda não estarem em uma etapa de desenvolvimento avançada.

O choque na Energia só obteve efeito positivo no CO2, sem gerar efeitos estatisticamente significativos no NFF e no PIB. Por fim, o choque do CO2 não gerou efeitos na Energia e no NFF, mas gerou um efeito positivo no PIB.

Com relação às magnitudes das IRFs, o choque da Energia gera um impacto relativamente maior que os choques do PIB, mas menor que no choque de NFF (esse último tem sentido inverso). Nas respostas da Energia, o efeito do choque de NFF foram maiores que os do choque do PIB. Por fim, os efeitos no PIB bem pequenos, mas atingiu a variável de forma intensa quando o choque foi de CO2 do quando a fonte da perturbação foi o NFF.

Figura 6 – Funções de impulso resposta (IRF) dos países de renda baixa.



Fonte: Elaboração própria.

4. Considerações finais

Neste estudo, foram investigadas as inter-relações entre o crescimento econômico, o percentual de energia não derivada de combustíveis fósseis no total de energia consumida, o uso total de energia e as emissões de CO₂, para um conjunto de 75 países que foram classificados em grupos distintos em virtude de sua renda per capita. Para isso, utilizamos testes de causalidade de Granger, aplicamos um PVAR e estimamos as funções de impulso resposta. Buscou-se identificar a direção da causalidade que caracteriza e explica a evolução nas variáveis acima mencionadas, além de examinar os efeitos dos choques originários das variáveis acima mencionadas. Portanto, a principal contribuição deste estudo foi compreender o vínculo das variáveis listadas acima, em particular buscamos compreender os efeitos de choques na parcela de energia não derivada de combustíveis fósseis, fato que ainda não possuía um estudo específico, nos diferentes grupos de renda em que os países foram divididos.

Especificamente este estudo buscou investigar: (i) em qual das hipóteses discutidas por Yildirim et al. (2014), relativas ao vínculo Energia-PIB, nossos resultados se encaixavam; (ii) quais os principais impactos do choque na parcela de energia não derivada de combustíveis fósseis e como esta variável responde aos demais choques; (iii) a existência, ou não, da curva ambiental em formato de U invertido de Kuznets.

Nossos resultados sustentam a hipótese do *feedback* para os países de renda alta e média-alta e a hipótese da conservação para os países de renda média-baixa e baixa. Além de apontar que nos países de renda alta, renda média-alta e renda média-baixa, choques que reduzem o percentual de combustíveis fósseis obtém com resposta uma redução nas emissões de CO₂ per capita e no uso de energia per capita enquanto não afetam estatisticamente o PIB per capita. Já nos países de renda baixa observou-se um aumento pequeno, mas estatisticamente significativo no PIB per capita.

Por outro lado, quando observamos os efeitos dos choques do PIB per capita, Energia e CO2 na parcela de combustíveis não fósseis encontramos resultados um pouco mais heterogêneos. No caso dos países de renda alta, o choque do PIB não gerou efeitos estatisticamente significativos, nos países de renda média-alta a resposta indica um aumento na parcela de combustíveis não fósseis e nos países de renda média-baixa e renda baixa observou-se uma redução nesta parcela. O choque de Energia obteve resultados homogêneos, ou seja, em todos os grupos não foram observadas respostas estatisticamente significativas. E, com relação ao choque de CO2, apenas nos países de renda média-baixa foram encontrados efeitos negativos, nos demais casos não tivemos efeitos estatisticamente significativos.

Por fim, nossos dados apontaram para uma curva crescente na relação emissões de CO2 e nível de desenvolvimento econômico, portanto, não encontramos nenhuma evidência da curva ambiental em formato de U invertido relatada por Kuznets.

5. Referências

AL-MULALI, U.; SABOORI, B.; OZTURK, I. Investigating the environmental Kuznets curve hypothesis in Vietnam. *Energy Policy*, v. 76, p. 123-131, 2015.

ANDREWS, D.; LU, B. Consistent model and moment selection procedures for GMM estimation with application to dynamic panel data models. *Journal of Econometrics*, v. 101, p. 123-164, 2001.

ANTONAKAKISA, N.; CHATZIANTONIOU, N.; FILIS, G. Energy consumption, CO2 emissions, and economic growth: An ethical dilemma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, p. 808-824, 2017.

ARELLANO, M.; BOVER, O. Another Look at the Instrumental Variable Estimation of Error-Components Models. *Journal of Econometrics*, v. 68, p. 29-51, 1995.

BAKIRTAS, I.; CETIN, M. A. Revisiting the environmental Kuznets curve and pollution haven hypotheses: MIKTA sample. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 24, p. 18273-18283, 2017.

HOLTZ-EAKIN, D.; NEWEY, W.; ROSEN, H.S. Estimating vector autoregressions with panel data. *Econometrica*, v. 56, n. 6, p. 1371-1395, 1988.

IMA, K. S.; PESARAN, M. H., SHIN, Y. Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, v. 115, p. 53-74, 2003.

IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2017.

IPCC. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. 2011. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_Full_Report.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2017.

KUZNETS, S. Economic growth and income inequality. *American Economic Review*, v. 49, p. 1-28, 1955.

LEVIN, A.; LIN, C. F.; CHU, C. S. J. Unit root tests in panel data: Asymptotic and finite-sample properties. *Journal of Econometrics*, v. 108, p. 1-24, 2002.

LOVE, I.; ZICCHINO, L. Financial development and dynamic investment behavior: evidence from panel VAR. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, v. 46, n. 2, p. 190-210, 2006.

MAGAZZINO, C. Economic Growth, CO2 Emissions and Energy Use in the South Caucasus and Turkey: a PVAR analyses. *International Energy Journal*, v. 16, p. 153-162, 2016.

MAGAZZINO, C. The relationship among economic growth, CO2 emissions, and energy use in the APEC countries: a panel VAR approach. *Environment Systems and Decisions*, v. 37, n. 3, p. 353-366, 2017.

OJEWUMI, S. J.; AKINLO, A. E. Foreign Direct Investment, Economic Growth and Environmental Quality in SubSaharan Africa: A Dynamic Model Analysis. *African Journal of Economic Review*, v. 5, p. 48-68, 2017.

YILDIRIM, E.; SUKRUOGLU, D.; ASLAN, A. Energy consumption and economic growth in the next 11 countries: the bootstrapped autoregressive metric causality approach. *Energy Economics*, v. 44, p. 14-21, 2014.

APÊNDICE

Tabela A.1 – Testes de raiz unitária, por nível de renda.

Classificação	Variável	LLC	p-valor	IPS	p-valor
Renda Alta	PIB	-1.3796*	0.0839	3.1198	0.9991
	ENERGIA	-0.6448	0.2595	0.9928	0.8396
	NFF	-2.2917**	0.0110	2.0463	0.9796
	CO2	-0.6367	0.2621	0.1779	0.5706
	diff-ln(PIB)	-14.4759***	0.0000	-15.4468***	0.0000
	diff-ln(ENERGIA)	-19.2279***	0.0000	-24.6947***	0.0000
	diff-ln(NFF)	-14.9941***	0.0000	-23.3683***	0.0000
	diff-ln(CO2)	-24.2705***	0.0000	-26.8892***	0.0000
Renda Média-Alta	PIB	8.6814	1.0000	8.7966	1.0000
	ENERGIA	3.0361	0.9988	3.4337	0.9997
	NFF	-3.0616***	0.0011	0.3207	0.6258
	CO2	1.7954	0.9637	1.7505	0.9600
	diff-ln(PIB)	-15.6299***	0.0000	-16.7306***	0.0000
	diff-ln(ENERGIA)	-21.7225***	0.0000	-22.7426***	0.0000
	diff-ln(NFF)	-22.1097***	0.0000	-20.7551***	0.0000
	diff-ln(CO2)	-23.4475***	0.0000	-22.9988***	0.0000
Renda Média-Baixa	PIB	18.3718	1.0000	13.9257	1.0000
	ENERGIA	4.7302	1.0000	5.9217	1.0000
	NFF	-4.0693***	0.0000	-0.8083	0.2095
	CO2	2.5788	0.9950	3.6862	0.9999
	diff-ln(PIB)	-13.8937***	0.0000	-11.5765***	0.0000
	diff-ln(ENERGIA)	-22.7466***	0.0000	-25.7571***	0.0000
	diff-ln(NFF)	-24.7812***	0.0000	-24.6896***	0.0000
	diff-ln(CO2)	-27.2395***	0.0000	-27.0555***	0.0000
Renda Baixa	PIB	2.7373	0.9969	3.5564	0.9998
	ENERGIA	2.3403	0.9904	2.7503	0.9970
	NFF	0.9345	0.8250	1.1354	0.8719
	CO2	1.1439	0.8737	0.6922	0.7556
	diff-ln(PIB)	-7.7939***	0.0000	-10.5689***	0.0000
	diff-ln(ENERGIA)	-11.5515***	0.0000	-12.4573***	0.0000
	diff-ln(NFF)	-12.7788***	0.0000	-12.8488***	0.0000
	diff-ln(CO2)	-12.1509***	0.0000	-15.9192***	0.0000

Fonte: Elaboração própria.

Tabela A.2 – Critério de seleção dos lags do PVAR

Estrato	lags	CD	J	J p-valor	MBIC	MAIC	MQIC
Renda Alta	1	0.6884	92.9633	0.1524	-441.81	-67.04	-211.01
	2	0.7230	80.0120	0.0854	-347.80	-47.99	-163.16
	3	0.4388	60.5643	0.1053	-260.30	-35.44	-121.82
Renda Média-Alta	1	0.1962	87.5268	0.2645	-433.29	-72.47	-212.21
	2	0.2451	77.4248	0.1209	-339.23	-50.58	-162.37
	3	0.3081	57.5073	0.1636	-254.99	-38.49	-122.34
Renda Média-Baixa	1	0.4905	87.5580	0.2637	-440.54	-72.44	-214.40
	2	0.5252	67.0310	0.3735	-355.45	-60.97	-174.54
	3	0.4670	48.1359	0.4673	-268.72	-47.86	-133.04
Renda Baixa	1	0.4757	88.0278	0.2524	-332.57	-71.97	-177.52
	2	0.5286	63.5095	0.4938	-272.97	-64.49	-148.93
	3	0.3457	30.0760	0.9800	-222.28	-65.92	-129.25

Fonte: Elaboração Própria.