

Relação entre Emissões de CO₂, Crescimento Econômico e Energia Renovável

Ceretta, Paulo Sergio; Sari, Jorge Fernando; Cougo da Cruz Ceretta, Franciane
Relação entre Emissões de CO₂, Crescimento Econômico e Energia Renovável

Desenvolvimento em Questão, vol. 18, núm. 50, 2020
Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil
Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo oa?id=75262392019>
DOI: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2020.50.268-286>

Relação entre Emissões de CO₂, Crescimento Econômico e Energia Renovável

RELATION BETWEEN CO₂ EMISSIONS, ECONOMIC GROWTH AND RENEWABLE ENERGY

Paulo Sergio Ceretta

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil

ceretta10@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2020.50.268-286>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=75262392019>

Jorge Fernando Sari

Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil

jfsari@yahoo.com.br

Franciane Cougo da Cruz Ceretta

Instituto Federal Farroupilha (IFFar), Brasil

francianecougo@gmail.com

Recepção: 28 Janeiro 2018

Aprovação: 06 Agosto 2019

RESUMO:

O objetivo deste estudo é investigar a relação entre emissão de CO₂, crescimento econômico, energia fóssil e energia renovável. A amostra utilizada na pesquisa é composta por 37 países e os dados são do período de 1996 até 2013. Foi utilizada a abordagem de dados em painel com *threshold*, incluindo as variáveis emissão de dióxido de carbono; consumo de combustíveis fósseis; consumo de energia renovável e Produto Interno Bruto per capita baseado na paridade de poder de compra como indicador de crescimento econômico dos países. Com relação à utilização de combustíveis fósseis, constatou-se que a variável tem um relacionamento direto com a emissão de CO₂, porém a magnitude do impacto é bem mais forte nos países classificados no regime 1 (baixa renda per capita). Relativamente ao crescimento econômico foram encontrados impactos positivos e estatisticamente significativos para todos os grupos de países, com a influência na emissão de CO₂ apresentando-se mais forte nos países do regime 2. Quanto ao uso de energia renovável foi encontrada uma relação significante e negativa para todos os grupos, observando-se que para os países menos geradores de riqueza o uso de energia renovável tem um *trade off* mais forte do que para os países mais geradores de riqueza.

PALAVRAS-CHAVE: Crescimento econômico, Poluição global, Dados em painel com *threshold*.

ABSTRACT:

The objective of this study is to investigate the relationship between CO₂ emission, economic growth, fossil energy and renewable energy. The sample used in the survey is composed of 37 countries and the data are from the period 1996 to 2013. The panel data approach with threshold, including the emission of carbon dioxide variables; consumption of fossil fuels; renewable energy consumption and GDP per capita based on purchasing power parity as an indicator of the countries' economic growth. Regarding the use of fossil fuels, it was verified that the variable has a direct relationship with the emission of CO₂. However, the magnitude of the impact is much stronger in countries classified under regime 1 (low per capita income). Regarding economic growth, positive and statistically significant impacts were found for all groups of countries, and the influence on the CO₂ emission is stronger in the countries of the regime 2. Regarding the use of renewable energy, a significant and negative relation was found for all groups, and for the less wealthy countries the use of renewable energy has a stronger trade off than for the most wealth-generating countries.

KEYWORDS: Economic growth, Global pollution, Panel data with threshold.

A emissão de gases poluentes gerados pela ação humana tem se tornado um problema crônico que, inclusive, responde por grande parte das mudanças climáticas. Por esta razão, o assunto vem ganhando cada vez mais destaque entre os governos, pesquisadores e organismos internacionais. O dióxido de carbono (CO₂) é um dos principais desses gases e sua emissão aumentou drasticamente e, no último século, mais ainda, principalmente devido ao uso de combustíveis fósseis e mudanças na superfície do planeta provocadas pelo crescimento econômico e desenvolvimento dos países.



Entre 1960 e 2008, de acordo com Stolyarova (2013), as emissões de CO₂ triplicaram, resultado direto de um aumento de 210% no consumo de energia e 370% na geração de eletricidade. As variações nas emissões de cada país podem ser explicadas pelo *mix* de fontes de energia utilizadas por cada um, como o percentual de uso de combustíveis fósseis ou de fontes de energia renovável. Ressalta-se que a produção de energia desempenha um papel fundamental no crescimento econômico dos países, uma vez que atingir um crescimento econômico forte e sustentado sempre foi um dos principais objetivos dos governos ao redor do mundo, tendo em vista que permite reduzir a pobreza e melhorar a vida das pessoas de maneira geral.

Nesse contexto, notou-se que até a década de 60 do século 20 houve um descuido com a origem da produção energética, posto que, apenas a partir dos anos 70 é que se passou a considerar que o crescimento econômico deveria vir acompanhado de preocupações com o meio ambiente. Inquietações com as mudanças climáticas causadas pela emissão antropogênica de gases do efeito estufa levaram à assinatura do Protocolo de Kyoto em 1997. Este protocolo internacional (em vigor a partir de 2004) estabeleceu comprometimentos obrigatórios aos países desenvolvidos com a responsabilidade de diminuírem suas emissões de gases que provocam o efeito estufa e previu que suas metas fossem alcançadas entre os anos de 2008 e 2012 (BÖHRINGER, 2003).

Embora a diminuição na emissão de gases que provocam o efeito estufa seja algo desejável, isso gerou uma preocupação de que os países signatários pudessem sofrer impactos negativos nas suas economias devido ao aumento nos custos de manufatura dos bens que utilizam energia de forma intensa na sua produção. Além disso, uma redução no uso de combustíveis que emitem esses gases reduziria o seu preço no mercado internacional e essa alteração nos preços teria consequências complexas, podendo prejudicar alguns países enquanto beneficiariam outros (BABIKER; REILLY; JACOBY, 2000). Ito (2016) ressalta então que saber como as ações para reduzir as emissões de gases poluentes vão impactar no crescimento econômico é fundamental para estes países.

Devido a essas questões, muitos estudos procuram analisar a relação entre as emissões de CO₂ com o crescimento econômico de países ou regiões, para identificar o impacto que possíveis reduções de gases podem ter na economia. A maioria desses estudos, entretanto, não divide a energia entre fontes renováveis e não renováveis, considerando apenas o consumo total e sua influência nas emissões e crescimento econômico. O objetivo deste estudo é analisar as emissões de CO₂ para um grupo de países e verificar como o crescimento econômico, consumo de combustíveis fósseis e de energia proveniente de fontes renováveis impactam nas emissões.

O artigo está estruturado da seguinte forma: primeiramente realizou-se uma revisão da literatura existente; posteriormente apresentou-se os dados, a metodologia e os cálculos realizados. Por fim, são discutidos os resultados e realizadas as considerações finais.

QUESTÕES AMBIENTAIS DISCUTIDAS PELO MUNDO

O cenário começou a sofrer novos delineamentos a partir da década de 60, especialmente em razão de grandes acidentes ambientais de repercussão nacional e mundial que ocorreram, tais como o rompimento de tanques de armazenagem de dioxina TCDD na indústria química Icmesa (Seveso, na Itália, 1976), as explosões e o incêndio no gasoduto da Petrobras (São Paulo, no Brasil, 1984), a colisão do navio superpetroleiro, o Exxon Valdez, que deixou escapar 260 mil barris de petróleo (Costa do Alasca, 1989), o vazamento de petróleo da plataforma americana “Deepwater Horizon” (Golfo do México, 2010), o acidente da usina nuclear de Fukushima (Fukushima, no Japão, 2011), entre outros tantos acidentes ambientais demonstram a grande fragilidade do planeta Terra (MACHADO, 2006; COSTA; COSTA; MONTEIRO, 2015; SCHMIDT; HORTA; PEREIRA, 2014).

Esses acontecimentos corroboraram para uma alteração da visão sobre os impactos ambientais gerados por acidentes e para uma reflexão mundial sobre a ação do homem na natureza que pode gerar a poluição

produzida pela indústria que se desloca por diferentes fronteiras, sobre a ideia de inesgotabilidade dos recursos naturais que aos poucos é desfeita, entre outras questões. Esta nova concepção torna possível o fortalecimento de ações sociais, governamentais e empresariais, ou por meio de Organizações Não Governamentais (ONGs), tais como a Greenpeace e a World Wide Found for Nature (WWF), para pressionar empresários e governantes no controle de suas atividades industriais e na prevenção de acidentes ambientais. Barbieri *et al.* (2010) expõem que são incontáveis as iniciativas voluntárias relacionadas com o desenvolvimento sustentável do planeta.

Grupos de empresas constituíram organizações como forma de demonstrar o comprometimento com a sustentabilidade e a sociedade. A exemplo, o *World Business Council for Sustainable Development* – WBCSD – criado em 1992; a *Cement Sustainability Initiative* – CSI – criada em 2002 e posteriormente transferida para a *Global Cement & Concrete Association* – GCCA – em 2019. Destaque especial ocorre com a indústria do cimento que é responsável por lançar na atmosfera, por ano, 5% de dióxido de carbono (RAMOS, 2015). Acrescenta, o autor, que no coprocessamento em fábricas de cimento existe a preocupação com os poluentes formados que posteriormente são emitidos à atmosfera. Andrew (2018) aponta que este fato ocorre principalmente por que a produção global de cimento cresceu muito rapidamente nos últimos anos e depois dos combustíveis fósseis e mudança no uso da terra, o dióxido de carbono é a terceira maior fonte de emissões antrópicas. Dessa maneira, desenvolver pesquisas que tenham por objeto investigar a relação entre as variáveis apresentadas aqui são importantes para alimentar um novo banco de dados global de emissões de CO₂ e o impacto que causam ao meio ambiente, aumentando desta maneira a dependência de fontes de dados oficiais e confiáveis e reduzindo a dependência de suposições.

Resultado da preocupação com o desenvolvimento sustentável é que surgiram movimentos sociais e inúmeras conferências de âmbito internacional que contribuíram com o processo de defesa e preservação do meio ambiente. A formação do Clube de Roma em 1968, a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente Humano em 1972, em Estocolmo, são alguns exemplos. A Conferência de Estocolmo reuniu 114 representantes de diferentes países, reconheceu e enfatizou a necessidade de políticas integradas com enfoque ambiental, em diferentes escalas de atuação: globais, nacionais, estaduais e municipais. Algumas metas específicas foram estabelecidas e também foi elaborado um relatório sobre o uso da energia até 1975 (JOYNER; JOYNER, 1974).

No Brasil foi instituída em 1981 a Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA). Em 1988, a nova Constituição Federal apresentou um capítulo voltado para o tema, fornecendo subsídios para a criação da primeira Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) em 1983, cujos trabalhos itinerantes pelo mundo inteiro resultaram no relatório com o conceito de desenvolvimento sustentável como sendo um “desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender às necessidades das gerações futuras” (BRUNDTLAND, 1987). É o desenvolvimento que não esgota os recursos naturais. O documento reafirma uma visão crítica do modelo de desenvolvimento adotado pelos países industrializados e reproduzido pelas nações em desenvolvimento, e que ressaltam os riscos do uso excessivo dos recursos naturais sem considerar a capacidade de suporte dos ecossistemas. Aponta que o padrão de produção e o consumo em expansão no mundo não têm possibilidade de perdurar, surgindo assim a noção de sustentabilidade sobre a percepção da finitude dos recursos naturais (NASCIMENTO, 2012; MEBRATU, 1998).

A industrialização do planeta, necessária para o desenvolvimento, é uma situação que causa preocupação por agravar o problema ambiental e por isso o mecanismo científico *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) que alerta o mundo sobre o aquecimento do planeta, foi criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma). O mecanismo prepara, com base nas informações científicas disponíveis, avaliações sobre as mudanças climáticas e seus impactos sociais e econômicos que, principalmente, são provocadas pela emissão de CO₂ durante a queima de combustíveis fósseis. Desse modo, este movimento desempenhou um papel decisivo na

criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas (UNFCCC), o principal tratado internacional para reduzir o aquecimento global e lidar com as consequências das alterações climáticas (IPCC, 2007).

Na década de 90 ocorreu a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano no Brasil, a Rio/92, que tratou sobre a situação e os problemas ambientais. O evento contou com a participação de 170 países, resultando em documentos como a Carta da Terra; a Convenção das Mudanças Climáticas; a Convenção da Biodiversidade; a Convenção da Desertificação; a Declaração dos Princípios sobre as Florestas e a Agenda 21 (BARRETO, 2009).

Em 1995 foi realizada a primeira Conferência das Partes (COP), em Berlim, na Alemanha, quando foi proposto um protocolo de decisões sobre as obrigações identificadas na Convenção. Segundo a *United Nations Framework Convention On Climate Change* (UNFCCC, 2008), o protocolo foi adotado em 1997, em Kyoto, no Japão, definido como Protocolo de Kyoto, que é um instrumento internacional que visa a reduzir as emissões de gases-estufa poluentes na atmosfera que são os responsáveis pelo aquecimento global. Em sua origem, o Protocolo previu a diminuição da emissão de gases dos países que compõem a União Europeia em 8%, já os Estados Unidos em 7% e o Japão em 6%. Países em desenvolvimento, tais como Brasil, México, Argentina, Índia e China não receberam metas de redução.

O Instituto Humanitas Unisinos (IHU, 2019) aponta que a concentração de CO₂ na atmosfera já atingiu altos níveis em 2019 e que com isso o mundo precisará, além de parar de emitir gases de efeito estufa (GEE), precisará realizar emissões negativas, limpando a atmosfera. Este processo torna-se mais caro do que o custo de reduzir as emissões. Nesse sentido a mudança da matriz energética, eliminando o uso do combustível fóssil, é fundamental. O Instituto destacou as boas intenções do Acordo de Paris assinado em 2015, e das Conferências das Partes, no entanto as emissões globais estão aumentando e os compromissos dos países estão sendo insuficientes para atingir os objetivos acordados. Quando Silva (2019), portanto, se refere às conferências internacionais para a promoção da sustentabilidade e seus respectivos produtos finais alerta que o Protocolo de Kyoto encontra-se em estado de alerta.

No ano de 2012 o Brasil foi sede da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (UNCSD), também conhecida como a Rio+20, que reuniu países das Nações Unidas para discutirem os rumos do desenvolvimento sustentável para os próximos 20 anos. O evento serviu para assegurar o comprometimento político, renovar o desenvolvimento sustentável, avaliar o progresso feito e verificar as lacunas existentes na instituição dos resultados dos principais encontros sobre desenvolvimento sustentável (BRASIL, 2012).

Em 2015 líderes mundiais reuniram-se na sede da Organização das Nações Unidas (ONU), em Nova York, e elaboraram um plano de ação para erradicar a pobreza, proteger o planeta e garantir que as pessoas alcancem a paz e a prosperidade: a Agenda 2030. Esta nova agenda pactuada entre o Brasil e outros 192 países possui 17 objetivos e 169 metas de desenvolvimento sustentável que se construíram sobre o legado dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), criados entre o fim da década de 90 e 2000. Eles são integrados e indivisíveis, e equilibram as três dimensões do desenvolvimento sustentável: a econômica, a social e a ambiental. Por isso, ainda na Rio+20 em 2012, iniciou-se um processo de discussão e planejamento da construção de novos objetivos e metas comuns para o desenvolvimento mundial, que pudessem ser mais participativos e abrangentes (ONU, 2015).

Diante de toda essas preocupações com os aspectos ambientais, econômicos e sociais designados por Elkington (2001) como *triple bottom line*, o tripé deve interagir de forma holística. Por isso, o componente ambiental deve fazer parte da vida das pessoas e, definitivamente, do processo produtivo e da padronização de procedimentos utilizados na indústria, devendo cada vez mais ser cobrada a inclusão das práticas ambientais nestes processos, uma vez que as empresas se percebem em um mercado novo, precisando se preocupar com o meio ambiente, tendo também este fator como um forte aliado e como uma estratégia de competitividade no mercado.



Nidumolu, Prahalad e Rangaswami (2009) descrevem a sustentabilidade como o principal fator para a inovação e uma oportunidade para um melhor posicionamento da indústria no mercado, uma vez que aponta, em um cenário futuro, que apenas as empresas que fazem a sustentabilidade como negócio alcançarão uma vantagem competitiva. Os autores abordam que a prática da sustentabilidade depende da legislação e muito da educação também, com as pessoas devendo exigir das empresas práticas sustentáveis.

Prova disso está no surgimento da série ISO 14000, que é uma certificação internacional criada como uma ferramenta para que as empresas passassem a realizar a gestão de seus impactos ambientais a fim de melhorarem continuamente o seu desempenho. A série surgiu em virtude de uma crescente pressão da sociedade para que as empresas fossem mais sustentáveis e conscientes, no entanto neste momento havia uma falta de capacidade interna das empresas e de diretrizes para tornar a função logística mais responsável (CORRÊA; XAVIER, 2013).

Neste contexto Isenmann (2003) define a ecologia industrial como sendo um processo de equilibrar o desenvolvimento dos sistemas industriais em combinação com a natureza, observando o alto custo ambiental da industrialização. Erkman (1997) destaca o Japão como parte da história da ecologia industrial. Em 1960 o país observou o alto custo ambiental da industrialização, uma vez que possuía uma deficiência de fontes de energia fóssil doméstica e dependia significativamente dos combustíveis importados.

Assim, encomendou ao seu Ministério do Comércio Internacional e Indústria (MITI) alguns estudos a fim de orientar o desenvolvimento da economia japonesa em direção a atividades que seriam menos dependente. Promoveu a energia renovável como fonte alternativa para melhorar a segurança energética e lançou o *New Sunshine Project*. Este projeto visou ao desenvolvimento de novas tecnologias energéticas (primordialmente a energia solar, mas também a geotérmica, a gaseificação de carvão e hidrogênio), tendo em vista, entre outros objetivos, alcançar uma importante redução nas emissões de GEE. Em 1993 reorganizou o novo programa *New Sunshine Program*, que incluía a P&D em economia de energia. O Japão foi o líder de mercado em todo o mundo em capacidade de geração de energia solar instalada até o final de 2004, apesar de sua escassez de grandes campos abertos adequados para a instalação de sistemas fotovoltaicos em larga escala e relativamente baixa irradiação solar durante o ano todo (ERKMAN, 1997; CHEN; KIM; YAMAGUCHI, 2014).

A busca por uma matriz energética sustentável

A energia, historicamente definida como ponto de partida para o desenvolvimento econômico e social, envolve não apenas o emprego e a utilização de recursos naturais, mas também pode provocar a degradação do meio. Diante da situação exposta, o desenvolvimento de políticas que incentivam a geração e a utilização energética adequada (limpa, sustentável e renovável), preservando e conservando o meio, é essencial, uma vez que o referido avanço econômico, somado ao aumento do quantitativo demográfico, intensificou o consumo de energia nas suas mais diversas formas, como pode ser observado no caso do Brasil com o aumento do consumo do uso de energias a partir de combustíveis fósseis. Isso deu-se ao mesmo tempo que ocorreram as mudanças no uso do solo, aumento e diversificação da frota de automóveis, expansão das atividades industriais, entre outras atividades necessárias aos indivíduos (CUNHA; SCALCO, 2013).

Dessa maneira, os autores advertem que é preciso fortalecer o consumo de energia ambientalmente correta em relação à elevação da queima de combustíveis fósseis. Há uma necessidade ecológica de que os governos limitem e regulamentem as emissões desses gases, com o intuito de alcançar impactos ambientais menos danosos. Na mesma linha de pensamento, quanto ao ambiente organizacional, Barbieri *et al.* (2010) apontam que ao se comprometer com o desenvolvimento sustentável, as empresas devem alterar a sua forma de atuação para reduzir os impactos sociais e ambientais adversos. Para tanto é necessário substituir os meios e as práticas antigas por outras que traduzem os princípios, objetivos e diretrizes do novo movimento social.

Proporcionar um incentivo ao desenvolvimento de tecnologias geradoras de energias limpas torna-se uma estratégia inteligente para países que desejam minimizar as emissões de GEE. Entre as energias limpas

citam-se as energias renováveis e sustentáveis que são inesgotáveis, se regeneram e respeitam o ambiente (DUPONT; GRASSI; ROMITTI, 2015). Como exemplos tem-se a energia do hidrogênio, a solar, a eólica, a hidráulica, a oceânica e a geotérmica, conforme menciona o Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC, 2019). Quanto às vantagens da utilização destes tipos de energia, tem-se que o impacto ambiental é menor do que o provocado pelas fontes de energia com origem nos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás); não produzem dióxido de carbono ou outros gases com “efeito estufa”; permitem reduzir as emissões de CO₂ e melhorar a qualidade de vida da população; minimizam a dependência energética em relação aos combustíveis fósseis; conferem autonomia energética a um país, que passa a não depender mais da importação de combustíveis fósseis, entre outras.

Cunha e Scalco (2013), entretanto, apontam que embora seja notável o crescimento da utilização de energias renováveis, observam que ainda há uma grande demanda pela utilização de energia baseada em combustíveis fósseis. Apesar dos avanços na competitividade dessas fontes energéticas limpas, as tecnologias de base fóssil ainda desfrutam de muitos subsídios governamentais em detrimento das fontes renováveis. Dessa forma, ações sugerem reverter essa situação, tais como maior investimento, desenvolvimento e suporte à pesquisa e inovação para utilização de fontes limpas, sustentáveis e renováveis; diminuição de subsídios para a utilização de combustíveis fósseis; taxação nas emissões de CO₂, entre outras.

Essa nova situação colabora para a criação de empregos verdes, conforme argumentam Simas e Pacca (2013, 2014). A geração de empregos verdes é um aspecto-chave para a avaliação do desenvolvimento econômico em uma região. Este tipo de atividade humana contribui para preservar ou recuperar a qualidade ambiental e pode gerar postos de trabalho em diversos setores da economia, incluindo empregos em eficiência energética, tecnologias limpas, eficiência na utilização de recursos naturais e em atividades de baixa emissão de GEE (UNEP, 2008).

A preocupação com o meio ambiente, contudo, não pode se dissociar da relevância do crescimento econômico para a sociedade. Existe a necessidade de serem conciliados o desenvolvimento e a preservação do meio ambiente de forma a garantir a melhoria da qualidade de vida em todos os aspectos, inclusive ambiental. A necessidade mundial da busca de novas fontes renováveis que garantam desenvolvimento socioeconômico mundial deve-se tanto ao fato da comprovada extinção do petróleo em médio prazo, como também das altas taxas de emissões de gases de efeito estufa (CUNHA; SCALCO, 2013).

Crescimento Econômico e a Emissão de CO₂

Movimentos internacionais e a constituição de Organizações Não Governamentais, tais como a Greenpeace, a World Wide Fund for Nature (WWF), a World Business Council For Sustainable Development (WBCSD), que desenvolvem ações preocupados com a preservação do meio ambiente e questões relacionadas à sustentabilidade, despertam a atenção e um questionamento contínuo com relação aos efeitos do crescimento econômico sobre o ambiente natural e, ainda, quanto à sustentabilidade do modelo de desenvolvimento atual.

Santos, Fernandes e Coelho (2012) destacam que a queima de combustíveis fósseis está entre as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa e o recente aumento na concentração do gás é consequência direta da atividade humana, sendo de extrema importância analisar a relação existente entre CO₂ e crescimento econômico. A preocupação reflete em uma grande discussão mundial que analisa as ameaças do aquecimento global e as alterações climáticas. Este fato cede espaço ao desenvolvimento de estratégias direcionadas para a minimização dos impactos que, devido à importância, torna-se uma questão dominante tanto na área política como na econômica.

Apesar de ter um papel fundamental como motor do desenvolvimento econômico, o CO₂ é considerado o principal responsável por poluir o meio e é impossível apontar o impacto nocivo e exato da energia sobre



o ambiente. Naturalmente, o crescimento de uma economia é prioridade do governo de cada país, uma vez que este avanço proporciona melhores condições de vida para a população, melhores salários e oferta de bens. A produção de bens, no entanto, está diretamente relacionada a modificações no meio ambiente, uma vez que recursos são extraídos deste meio e dejetos oriundos da produção retornam a ele, passando a existir uma relação indissolúvel neste processo, de crescimento econômico e emissão de CO₂ (BARBIERI *et al.*, 2010).

Assim sendo, o aquecimento global é classificado como um problema mundial de cunho ambiental tendo como sua principal causa o aumento das emissões de dióxido de carbono. O que preocupa, todavia, não é a presença do dióxido de carbono na atmosfera e sim a alta concentração em que se encontra. Dessa forma, embora não seja o único responsável pelo efeito estufa, o CO₂ é o principal causador deste problema e também é o principal gás gerado pela ação humana. As emissões de CO₂, também conhecido como gás carbônico (que é essencial por um lado e prejudicial por outro), são causadas principalmente pela queima de combustível fóssil.

Evidências empíricas

Arouri *et al.* (2012) analisaram a relação entre emissões de CO₂, consumo de energia e crescimento econômico para 12 países do Oriente Médio e norte da África no período de 1981 até 2005, utilizando dados anuais. Valendo-se do método *panel cointegration* eles encontraram uma relação positiva entre o consumo de energia e emissões de CO₂. Com relação às emissões de CO₂ e crescimento econômico, para alguns países foi encontrada uma correlação positiva em um primeiro momento, observando-se que em seguida os países continuam a crescer enquanto as emissões de CO₂ estabilizam e, por fim, a economia seguia em crescimento enquanto as emissões de CO₂ caíam, resultado que vai ao encontro da hipótese *Environmental Kuznets Curve* (EKC), teoria que propõe que ao atingir um certo grau de desenvolvimento econômico, os países conseguem continuar crescendo economicamente enquanto diminuem seu nível de poluição, apresentando uma espécie de U invertido. Segundo Arouri *et al.* (2012), porém, em outros países essa virada nas emissões de CO₂ é muito fraca. Os resultados, num âmbito regional, confirmam a hipótese EKC, demonstrando que os diversos esforços empreendidos pelos países nos últimos anos tiveram resultados positivos para melhorar o meio ambiente, ao mesmo tempo em que permitiram que a economia continuasse crescendo.

Utilizando a técnica *panel cointegration*, Farhani (2015) analisou a relação causal entre o consumo de energia renovável, crescimento econômico e emissões de CO₂ em 12 países do Oriente Médio e norte da África. O estudo cobriu o período de 1975 até 2008 com coleta de dados anuais. No curto prazo, foi encontrada uma relação positiva entre o consumo de energia renovável e diminuição das emissões de CO₂. No longo prazo, apenas foi encontrada uma relação entre o aumento de emissões de CO₂ e diminuição do consumo de energia renovável, indicando que, diferentemente do trabalho realizado por Arouri *et al.* (2012), os países deste estudo não conseguiram estabelecer uma política bem-sucedida de uso de energia renovável que levasse à redução das emissões de CO₂.

Stolyarova (2013) realizou uma análise empírica envolvendo 93 países entre os anos de 1960 e 2008. Os dados aplicados foram anuais e foi utilizado o *panel cointegration test*. O objetivo do estudo foi verificar a relação entre crescimento econômico, emissões de CO₂ e uso de energia alternativa e nuclear (Aneu). Diferente de outros estudos, Stolyarova (2013) utilizou 17 critérios para classificar os países em grupos homogêneos, por meio da técnica *Hierarchical Clustering on Principal Components*. Os resultados do teste indicaram que os países ficariam mais bem dispostos em 7 grupos com características similares. Com base nos resultados, o estudo encontrou que a emissão de CO₂ depende positivamente do crescimento econômico, enquanto que o aumento no uso de Aneu provoca um decréscimo nas emissões.

Para analisar o nexo causal entre consumo de energia, tais como carvão, petróleo bruto, eletricidade e gás natural, emissões de CO₂, crescimento econômico e comércio na Índia, Palamalai, Ravindra e Prakasam

(2015) utilizaram *Gregory and Hansen cointegration test and Vector Error Correction Model*. No longo prazo os resultados empíricos mostram que um alto nível de atividade econômica leva a um maior consumo de petróleo bruto e gás natural. Também existe uma relação bidirecional entre atividade econômica e consumo de carvão e eletricidade, bem como uma relação bidirecional entre emissões de CO₂ e consumo de carvão e eletricidade. O comércio exterior também influencia no consumo de carvão e eletricidade. Consumo de petróleo bruto e gás natural possuem uma relação bidirecional com o comércio. Com relação ao curto prazo, os testes indicaram que a atividade econômica influencia no consumo de carvão, eletricidade e gás natural. Existe também uma relação bidirecional entre consumo de petróleo bruto e atividade econômica. Uma relação causal existe entre emissões de CO₂ e atividade econômica para o consumo dos vários tipos de energia. Por fim, com exceção do consumo de petróleo bruto, nenhuma outra fonte de energia possui qualquer influência no comércio exterior da Índia.

Silva, Soares e Pinho (2012) analisaram como o aumento na utilização de fontes de energia renovável (RES) na produção de eletricidade interferem nas emissões de CO₂ e no Produto Interno Bruto (PIB), utilizando a metodologia *Structural Vector Autoregressive* (SVAR). Para isso eles utilizaram dados de quatro países, no período de 1960 até 2004, com diferentes níveis de desenvolvimento social e econômico, mas que possuem em comum o fato de terem feito grandes investimentos em RES nas últimas décadas. Com exceção dos Estados Unidos, os resultados demonstraram que investir em RES tem um custo econômico elevado, e isso causa um impacto negativo no PIB. Por outro lado, para todos os quatro países analisados, os investimentos em energia renovável contribuíram de forma positiva para reduzir as emissões de CO₂.

Utilizando dados anuais de 106 países, entre 1971 e 2011, Antonakakis, Chatziantoniou e Filis (2017) utilizaram *Panel Vector Autoregression* (PVAR) e *impulse response function analyses* para verificar o nexo entre emissões de CO₂, PIB per capita e consumo de energia (eletricidade, petróleo, gás natural, carvão e energia renovável). Os países foram classificados em 4 grupos, conforme a renda de cada um. Uma relação bidirecional foi encontrada entre o consumo de energia e crescimento econômico, no entanto não foram encontrados resultados estatisticamente significativos entre o uso de energia renovável e crescimento econômico, o que leva à conclusão de que o uso de energia limpa não tem ajudado os países a terem um maior crescimento do PIB. O estudo também analisou a hipótese EKC entre o grupo de países que possuem maior renda. Os testes rejeitaram a hipótese, mostrando que o crescimento econômico desses países continua elevando os níveis de poluição.

Para testar como o uso de energia renovável na produção de energia elétrica, crescimento econômico, taxas aplicadas sobre emissão de CO₂ e inovação tecnológica afetam as emissões de CO₂, Abolhosseini, Heshmati e Altmann (2014) utilizaram dados de 15 países da União Europeia no período de 1995 a 2010. Utilizando a técnica de painel de dados, os resultados apontaram que o crescimento econômico e emissões de CO₂ apresentam uma correlação positiva. Além disso, o uso de energia renovável, taxas e inovação tecnológica afetam negativamente as emissões de CO₂, indicando que as políticas adotadas por esses países desempenham um papel importante na diminuição da poluição. O estudo também testou a hipótese EKC. Apesar de serem países com um avançado grau de desenvolvimento econômico, o crescimento do PIB ainda é acompanhado do crescimento nas emissões de gases.

Verificar a inter-relação entre crescimento econômico, emissões de CO₂ e consumo de energia na Turquia, entre 1960 e 2010, foi o objetivo do estudo conduzido por Bozkurt e Akan (2014) por meio de *cointegration test*. Utilizando dados anuais, o estudo mostrou que, diferentemente de muitos outros estudos que encontraram uma relação bidirecional entre crescimento econômico e emissões de CO₂, na Turquia o aumento nas emissões provoca uma queda no crescimento econômico. Já o consumo de energia apresenta um impacto positivo nesse aspecto.

Ito (2016) realizou um teste empírico para verificar a relação entre consumo de energia renovável e não renovável, crescimento econômico e emissões de CO₂ para 31 países desenvolvidos, utilizando dados anuais de 1996 até 2011. As principais conclusões do estudo foram que políticas de conservação de energia impactam

negativamente o crescimento econômico, o uso de energia renovável contribui para reduzir as emissões, não existe relação entre uso de energia renovável e crescimento econômico e não existe relação entre uso de energia renovável e não renovável. O método utilizado foi de *Granger causality test within LA-VAR*.

Estudo conduzido por Shaari *et al.* (2014) procurou analisar como o crescimento econômico e o investimento estrangeiro direto influenciam nas emissões de CO₂ em 15 países desenvolvidos. No longo prazo, a conclusão é de que o investimento estrangeiro não possui nenhuma influência nas emissões de CO₂, enquanto que o crescimento econômico possui uma relação positiva com as emissões de CO₂. Já no curto prazo, o teste de causalidade de Granger mostrou que não existe nenhuma relação entre investimento estrangeiro, crescimento econômico e emissões de CO₂. O método utilizado foi *panel data and Johansen cointegration* para o período de 1992 até 2012.

Em síntese, ao observar os estudos verifica-se que na maioria existe uma relação positiva entre crescimento econômico e aumento nas emissões de CO₂. A tendência dos estudos publicados recentemente é de que investimentos em energia renovável contribuem de forma positiva para reduzir as emissões de CO₂, no entanto, por gerar um custo econômico a utilização de fontes de energias renováveis pode impactar negativamente no PIB. Deve-se destacar que em cada um dos estudos analisados a relação entre as variáveis é sempre a mesma para cada um dos países componentes da amostra. A abordagem aqui proposta pretende contribuir para a literatura no sentido de permitir um relacionamento distinto entre as variáveis, entre os países componentes da amostra, ou seja, haverá um valor limiar (limite) que irá procurar reagrupar os países em subamostras de forma a permitir um melhor ajuste no relacionamento das variáveis.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

No que se refere à metodologia, o estudo utilizou-se de um método estatístico, quantitativo, descritivo e bibliográfico. Quanto à forma de análise dos dados, utilizou-se de um painel de dados longitudinal que empregou como variáveis de pesquisa a emissão de dióxido de carbono (CO₂; toneladas *per capita*); o consumo de combustíveis fósseis, incluindo carvão, petróleo, gasolina e gás natural (FEC, % do total); o consumo de energia renovável (REC, % do total final de energia consumida) e o Produto Interno Bruto (PIB) *per capita* baseado na paridade de poder de compra (GDP) como indicador de crescimento econômico dos países.

Com relação aos dados utilizados, foram informações anuais de 37 países e compreendeu o período de 1996 até 2013. Os países analisados são aqueles que apresentaram todos os dados no período analisado, assim a amostra ficou composta pelos seguintes países: Austrália, Áustria, Bélgica, Brasil, Canadá, Suíça, China, Chipre, República Tcheca, Alemanha, Dinamarca, Espanha, Finlândia, França, Reino Unido, Grécia, Índia, Irlanda, Islândia, Israel, Itália, Japão, Coreia do Sul, Lituânia, Luxemburgo, Letônia, México, Holanda, Noruega, Nova Zelândia, Portugal, Rússia, Eslováquia, Eslovênia, Suíça, Estados Unidos e África do Sul.

Ressalta-se que os dados utilizados nesta pesquisa não incluem as emissões de CO₂ provenientes do uso da terra, foram utilizados apenas dados oriundos da queima de combustível fóssil e produção de cimento. Essa medida é indireta e, portanto, pode apresentar uma margem de erro e diferir de outras fontes, dependendo da metodologia utilizada. Destaca-se, ainda, que os dados utilizados foram extraídos do Banco Mundial, definidos com a designação de *World Development Indicator Database*.

A heterogeneidade é um problema comum enfrentado pelos pesquisadores ao utilizar o método de análise em painel de dados. Hansen (1999) questiona se a função de regressão deveria ser idêntica para todos os indivíduos na amostra. Se cada indivíduo na amostra é diferente, o relacionamento estrutural pode variar entre eles. As abordagens tradicionais (efeitos fixos e efeitos aleatórios) possibilitam considerar essa heterogeneidade de forma parcial (intercepto). Hsiao (2014) apresentou uma discussão mais avançada das diversas opções dessas abordagens.

Threshold panel data surge como uma opção que pode acomodar de maneira mais refinada a heterogeneidade dos indivíduos na amostra. A abordagem proposta por Hansen (1999) permite descrever os saltos ou as quebras estruturais nas variáveis para diferentes indivíduos considerados, segmentando a amostra com base em um valor de uma determinada variável observada.

Dessa forma, uma amostra inicialmente heterogênea pode ser segmentada em duas, três ou quatro subamostras menos heterogêneas nas quais é identificado um relacionamento estrutural específico entre as variáveis.

O modelo proposto por Hansen (1999), permite que o coeficiente da equação de regressão possa mudar de valor dependendo da subamostra ou regime em que se encontra. O modelo com dois regimes (*single-threshold*) pode ser descrito como (1).

$$y_{it} = \mu_i + x_{it}I(q_{it} \leq \gamma)\beta_1 + x_{it}I(q_{it} > \gamma)\beta_2 + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

Em (1) Γ é uma função indicadora assumindo valores de 1 = 1, quando ($q_{it} \leq \gamma$) e 0 nos outros casos, e 1 = 1, quando ($q_{it} > \gamma$) e 0 nos outros casos; q_{it} é a variável threshold, γ o parâmetro threshold que divide a equação em dois regimes com coeficientes $\beta = (\beta_1, \beta_2)$; ε_{it} é o termo de erro assumido ser independente e identicamente distribuído (iid) com média zero e variância finita podendo ser heterocedástico.

Uma representação alternativa de (1) pode ser descrita por (2).

$$y_{it} = \mu_i + \beta z_{it}(\gamma) + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

Em (2), $z_{it}(\gamma) = (x_{it}I(q_{it} \leq \gamma), x_{it}I(q_{it} > \gamma))$ e $B = (\beta_1 \text{ e } \beta_2)$. Defina um espaço amostral $\Gamma = (\underline{\gamma}, \bar{\gamma})$, onde $\underline{\gamma} > \min\{q_{it}\}$ e $\bar{\gamma} < \max\{q_{it}\}$. Observe que para cada valor de $\gamma \in \Gamma$, o vetor $z_{it}(\gamma)$ assumirá uma forma específica. A estimativa dos coeficientes é por meio de OLS e a seleção é por grid search das estimativas dos coeficientes que gerem menor Sum of Squared Error (SSE), ou seja, para cada valor de $\gamma \in \Gamma$, obtém-se por OLS os coeficientes e a Sum of Squared Error ($SSE_\gamma = \sum \varepsilon_{it}^2$), as estimativas mais adequadas são as que minimizam a função SSE_γ no espaço Γ .

O modelo com três regimes (*double-threshold*) pode ser descrito como (3).

$$y_{it} = \mu_i + x_{it}I(q_{it} \leq \gamma_1)\beta_1 + x_{it}I(\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2)\beta_2 + x_{it}I(\gamma_2 < q_{it})\beta_3 + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

Uma forma mais intuitiva de escrever o modelo *double-threshold* é conforme (4).

$$\gamma_{it} = \begin{cases} \alpha_1 + \beta_1 x_{it} + \varepsilon_{it}, & q_{it} \leq \gamma_1 \\ \alpha_2 + \beta_2 x_{it} + \varepsilon_{it}, & \gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2 \\ \alpha_3 + \beta_3 x_{it} + \varepsilon_{it}, & q_{it} > \gamma_2 \end{cases} \quad (4)$$

Em (4), a amostra é dividida em três regimes dependendo apenas se a variável *threshold* é menor, maior ou está entre um intervalo de valores definidos pelos *thresholds*. Por definição, esse procedimento garante maior homogeneidade dentro de cada regime, que por sua vez contribui para a obtenção de coeficientes mais realistas. O modelo de Hansen (1999) suporta até trêshreshold.

Para uma melhor compreensão do processo de estimativa considere uma representação alternativa das equações (3) e (4), dado por (5).

$$y_{it} = \mu_i + \beta z_{it}(\gamma_1, \gamma_2) + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

Em (5), $(z_{it}(\gamma_1, \gamma_2) = (x_{it}I(q_{it} \leq \gamma_1), x_{it}I(\gamma_1 < q_{it} \leq \gamma_2), x_{it}I(\gamma_2 < q_{it}))$ e $B = (\beta_1, \beta_2 \text{ e } \beta_3)$. Observe que para cada par $(\gamma_1, \gamma_2) \in \Gamma_{x\Gamma}$, o vetor $z_{it} = (\gamma_1, \gamma_2)$ assumirá uma forma específica. A estimativa dos coeficientes é através de OLS e a seleção é por grid search das estimativas dos coeficientes que gerem menor Sum of Squared Error, ou seja, para cada valor de $\gamma_1, \gamma_2 \in \Gamma_{x\Gamma}$, obtém-se por OLS os coeficientes e a Sum of Squared Error ($SSE_{\gamma_1, \gamma_2} = \sum \varepsilon_{it}^2(\gamma_1, \gamma_2)$), as estimativas mais adequadas são as que minimizam a função SSE_{γ_1, γ_2} no espaço $\Gamma_{x\Gamma}$.

Para valores de (γ_1, γ_2) os coeficientes $(\beta_1, \beta_2 \text{ e } \beta_3)$ são lineares e a estimativa por OLS através do grid search é adequada. Os coeficientes são aqueles que minimizam a Sum of Squared Error $SSE_{\gamma_1, \gamma_2} = \sum \varepsilon_{it}^2(\gamma_1, \gamma_2)$.

No contexto do modelo (1) é necessário verificar a significância do efeito threshold (γ), ou seja, se a diferença $\beta_1 - \beta_2$ é suficientemente grande para que (γ) seja significativo. O teste de Multiplicador de Lagrange (LR), proposto por Hansen (1999) é descrito por (6.a, 6.b e 6.c).

$$LR(\gamma) = (SSE(lm) - SSE(\gamma)) / \sigma_\gamma^2 \quad (6.a)$$

$$LR(\gamma_1, \gamma_2) = (SSE(\gamma) - SSE(\gamma_1, \gamma_2)) / \sigma_{\gamma_1, \gamma_2}^2 \quad (6.b)$$

$$LR(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = (SSE(\gamma_1, \gamma_2) - SSE(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3)) / \sigma_{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3}^2 \quad (6.c)$$



O teste LR é robusto a heterocedasticidade e tem seus valores críticos determinados por um procedimento *bootstrap*. Em (6.a), se o valor da estatística LR superar o valor crítico, conclui-se que existem dois regimes, em que a associação entre a variável dependente e as variáveis independentes é distinta, pelo menos para uma das variáveis. Por outro lado, se a estatística LR não superar o valor crítico, conclui-se que o modelo linear (lm) de efeito fixo é o mais adequado. A análise é idêntica em 6.b e 6.c, porém agora a comparação realizada é 1vs2 *threshold* e 2 vs 3 *threshold*.

RESULTADOS DO ESTUDO

De forma que se possa reduzir o problema da heterogeneidade dentro da amostra composta por 37 países, utilizou-se a metodologia dados em painel com *threshold* que foi proposto por Hansen (1999). Os resultados para a escolha do número de *threshold* a ser utilizado são apresentados na Tabela 1.

A variável escolhida para ser utilizada como variável *threshold* foi L_GDP *per capita* (valor em logaritmo), foi realizado um primeiro teste dividindo os países em dois regimes (único *threshold*). O primeiro regime contém os países que apresentem L_GDP *per capita* ≤ 9,13 e o segundo regime contém os países que apresentem 9,13 < L_GDP *per capita*. O teste LR, porém, identificou que o modelo com duplo *threshold* (LR = 19,920) apresentou ajuste significativamente superior (p-valor 0,010) se comparado com o modelo de simples *threshold*. Dessa forma, os países ficam divididos em 3 regimes. O primeiro é formado com os países que apresentam L_GDP *per capita* ≤ 9,13; o segundo regime é formado com os países que apresentam 9,13 < L_GDP *per capita* ≤ 10,00; e o terceiro é formado por países que apresentam 10,00 < L_GDP *per capita*.

Tabela 1 – Teste para determinação do número de *threshold* a ser utilizado no modelo

| Threshold | SSE | Teste LR | Valor Crítico 5% | Valor Crítico 1% | p-valor |
|-----------|-------|----------|------------------|------------------|---------|
| Zero | 1,083 | - | - | - | - |
| Simples | 1,033 | 32,320 | 16,809 | 21,946 | 0,001 |
| Duplo | 1,003 | 19,920 | 15,524 | 19,009 | 0,010 |
| Triplio | 0,973 | 20,520 | 32,902 | 41,921 | 0,220 |

SSE =Soma dos quadrados dos erros; Número de observações = 684; Número de grupos = 37; Observações por grupo = 18; Variável threshold = L_GDP *per capita* (1º = 9,13 e 2º = 10,00).

Fonte: Elaborada pelos autores.

O modelo de dados em painel mais adequado (duplo *threshold*) identifica que 48% das emissões de CO₂ estão relacionadas com as variáveis independentes e permite que a amostra seja analisada sob a perspectiva de três distintos regimes (ver Tabela 2).

Observando-se os valores na Tabela 2, pode-se constatar que a maioria dos países está agrupada no regime 3, podendo-se também identificar que muitos países participam em mais de um regime, ou seja, num certo período estão atuando sob um regime e após um tempo passam a atuar em outro regime.

A mudança de regime ocorre do regime_1 para o regime_2 (Brazil, China, India, Lithuania, Latvia, Russian and South Africa) e do regime_2 para o regime_3 (Cyprus, Czech, Spain, Finland, France, United Kingdom, Greece, Ireland, Korea, Latvia, New Zealand, Portugal, Russian, Slovak and Slovenia).

A mudança na participação de um país de um regime para outro ao longo do tempo evidencia a característica dinâmica da economia dos países, ou seja, com a melhoria no seu desenvolvimento econômico ao longo do tempo os países acabam por migrar para outro regime, sinalizando que o relacionamento das variáveis também deverá ser alterado.



Tabela 2 – *Cluster* de países formados de acordo com o valor do *threshold* (L_GDP per capita), dados anuais de 1996 até 2013

| Regime_1 | Regime_2 | Regime_3 |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Brazil (1996-2001) | Argentina | Australia |
| China (1996-2009) | Brazil (2002-2013) | Austria |
| India | China (2010-2013) | Belgium |
| Lithuania (1996-2000) | Cyprus (1996-2000) | Canada |
| Latvia (1996-2001) | Czech (1996-2005) | Switzerland |
| Russian (1996-2003) | Spain (1996-2000) | Cyprus (2001-2013) |
| South Africa (1996-2004) | Finland (1996-1997) | Czech (2006-2013) |
| | France (1996) | Germany |
| | United Kingdom (1996) | Denmark |
| | Greece (1996-2001) | Spain (2001-2013) |
| | Ireland (1996) | Finland (1998-2013) |
| | Korea (1996-2003) | France (1997-2013) |
| | Lithuania (2001-2013) | United Kingdom (1997-2013) |
| | Latvia (2002-2012) | Greece (2002-2013) |
| | Mexico | Ireland (1997-2013) |
| | New Zealand (1996-2000) | Iceland |
| | Portugal (1996-2004) | Israel |
| | Russian (2004-2011) | Italy |
| | Slovak (1996-2007) | Japan |
| | Slovenia (1996-2003) | Korea (2004-2013) |
| | South Africa (2005-2013) | Luxembourg |
| | | Latvia (2013) |
| | | Netherlands |
| | | Norway |
| | | New Zealand (2001-2013) |
| | | Portugal (2005-2013) |
| | | Russian (2012-2013) |
| | | Slovak (2008-2013) |
| | | Slovenia (2004-2013) |
| | | Sweden |
| | | United States |

Variável L_GDP per capita = 9,13 é o primeiro threshold e L_GDP per capita = 10,00 o segundo threshold.

Fonte: Elaborada pelos autores.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos dados em painel com *threshold*. A variável d_L_FEC apresenta-se de forma expressiva em todos os regimes, o que significa que o consumo de combustível fóssil está positivamente associado com as emissões de CO₂. Dessa maneira, o aumento do consumo de combustível fóssil ocorre junto com o aumento das emissões de CO₂, e essa relação é mais impactante nos países que pertencem ao regime_1 e menos acentuada nos países pertencentes ao regime_2.

Em relação à variável crescimento econômico variável (d_L_GDP), também pode-se identificar uma relação significativa com as variáveis emissões de CO₂ para todos os regimes, porém é menos acentuada nos países que atuam no regime 1. Este resultado já era esperado e de acordo com a maioria dos estudos já realizados que também concluíram que o crescimento econômico leva a um maior nível de emissões de CO₂ (AROURI *et al.*, 2012; STOLYAROVA, 2013; PALAMALAI; RAVINDRA; PRAKASAN, 2015; ABOLHOSSEINI; HESHMATI; ALTMANN, 2014; SHAARI *et al.*, 2014).



Tabela 3 – Resultados das estimativas de curto prazo para dados em painel com *threshold*. Dados anuais de 1996 até 2013 (variável dependente: d_L_CO2 per capita)

| Variáveis | Regimes | Coefficientes | Erro padrão* | Teste t | p-value |
|-----------|----------|---------------|--------------|---------|---------|
| Constante | | -0,011 | 0,002 | -4,410 | 0,000 |
| d_L_FEC | Regime_1 | 1,387 | 0,564 | 2,460 | 0,014 |
| | Regime_2 | 0,539 | 0,104 | 5,180 | 0,000 |
| | Regime_3 | 1,221 | 0,076 | 16,020 | 0,000 |
| d_L_GDP | Regime_1 | 0,233 | 0,105 | 2,230 | 0,026 |
| | Regime_2 | 0,439 | 0,057 | 7,760 | 0,000 |
| | Regime_3 | 0,310 | 0,050 | 6,150 | 0,000 |
| d_L_REC | Regime_1 | -0,569 | 0,130 | -4,370 | 0,000 |
| | Regime_2 | -0,187 | 0,036 | -5,180 | 0,000 |
| | Regime_3 | -0,076 | 0,019 | -3,960 | 0,000 |

Todas as variáveis são expressas em primeira diferença; Emissões de CO₂ (toneladas métricas per capita); FEC = Consumo de energia fóssil (% do consumo total); GDP = GDP per capita; PPP (moeda internacional \$); REC = Consumo de energia renovável (% do consumo total); Fator de inflacionamento da variação (VIF); FEC > 1,090; GDP > 1,029; REC > 1,030. * Erro padrão robusto a heterocedasticidade ; Número de observações = 684; Número de grupos = 36; Observações por grupo: > 18; R2: within = 0,4819; Variável threshold = L_GDP per capita (19 = 9,13 e 29 = 10,00).

Fonte: Elaborada pelos autores.

Finalmente, nossos resultados identificam uma relação significativa entre as variáveis d_L_REC e d_L_CO₂. Esta relação identifica que o aumento do uso de energia renovável está associado à redução das emissões de CO₂. Embora a proporção seja significativa para os três regimes, é muito mais pronunciada para os países que operam no primeiro regime, a relação é um pouco mais fraca para os países do segundo regime e muito mais fraca para os países do terceiro, que concentra a maioria dos países. Estes resultados são consistentes com os encontrados por Farhani (2015), Stolyarova (2013), Silva, Soares e Pinho (2012), Ito (2016) e Abolhosseini, Heshmati e Altmann (2014).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou investigar como o crescimento econômico, consumo de combustíveis fósseis e consumo de energia renovável influenciam nas emissões de CO₂ em 37 países. Para isso foi utilizado o método de painel de dados com efeito *threshold*, resultando na divisão dos países em três grupos, conforme GDP per capita.

Os resultados identificaram que para os países analisados existem distintos relacionamentos entre as variáveis. Relativamente à utilização de combustíveis fósseis, constatou-se que a variável tem um relacionamento direto com a emissão de CO₂, porém a magnitude do impacto é bem mais forte nos países classificados no regime 1 (baixa renda per capita). Assim, pode-se afirmar que nos países mais pobres o consumo de combustível fóssil é o principal propulsor da emissão de CO₂.

Em relação ao crescimento econômico foram encontrados impactos positivos e estatisticamente significativos para todos os grupos de países, com a influência na emissão de CO₂ mostrando-se mais forte nos países do regime 2. Cabe destacar que este regime engloba países em transição econômica, que estão buscando maior crescimento econômico, a exemplo do Brasil, da China, do México e da Rússia. Nestes países a geração de renda per capita é muito vinculada à emissão de CO₂.

Quanto ao uso de energia renovável foi encontrada uma relação significante e negativa para todos os grupos, ressaltando-se que para os países menos geradores de riqueza o uso de energia renovável tem um *trade off* mais forte do que para os países mais geradores de riqueza. Nesse contexto, conclui-se que nos países que mais geram riqueza per capita a conversão de energia renovável em redução da emissão de CO₂ é mais difícil se comparado aos demais países.

REFERÊNCIAS

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10, p. 195-217, 2018.

- ANTONAKAKIS, N.; CHATZIANTONIOU, I.; FILIS, G. Energy Consumption, CO₂ Emissions, and Economic Growth: A Moral Dilemma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 68, n. 1, p. 808-824, 2017.
- ABOLHOSSEINI, S.; HESHMATI A.; ALTMANN, J. The effect of renewable energy development on carbon emission reduction: an empirical analysis for the EU-15 countries, n. 7989, 2014. Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=2403126>. Acesso em: 14 jul. 2019.
- AROURI, M. E. H.; YOUSSEF, A. B.; M'HENNI, H.; RAULT, C. Energy Consumption, Economic Growth and CO₂ Emissions in Middle East and North African Countries. *Energy Policy*, v. 45, p. 342-349, 2012.
- BABIKER, M.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D. The Kyoto Protocol and developing countries. *Energy Policy*, v. 28, p. 525-536, 2000.
- BARBIERI, J. C.; VASCONCELOS, I. F. G.; ANDREASSI, T.; VASCONCELOS, F. C. Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições. *Revista de Administração de Empresas*, v. 50, n. 2, p. 146-154, 2010.
- BARRETO, P. Rio-92: mundo desperta para o meio ambiente. *Desafios do desenvolvimento: Revista Ipea*, ano 7, edição 56, p. 82-83, 2009. Disponível em: <http://desafios.ipea.gov.br/>. Acesso em: 16 dez. 2016.
- BÖHRINGER, C. The Kyoto protocol: a review and perspectives. *Oxford Review of Economic Policy*, v. 19, p. 451-466, 2003.
- BOZKURT, C.; AKAN, Y. Economic Growth, CO₂ Emissions and Energy Consumption: The Turkish Case. *International Journal of Energy Economics and Policy*, v. 4, n. 3, p. 484-494, 2014.
- BRASIL. Senado Federal, 2012. *A herança da Rio+20*. Brasília. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/publicacoes/estudos-legislativos/tipos-de-estudos/outras-publicacoes/temas-e-agendas-para-o-desenvolvimento-sustentavel/a-heranca-da-rio-20>. Acesso em: 20 mar. 2017.
- BRUNDTLAND, G. H. (org.). *Nosso futuro comum*. Rio de Janeiro: FGV, 1987.
- CHEN, W.; KIM, H.; YAMAGUCHI, H. Renewable energy in eastern Asia: Renewable energy policy review and comparative SWOT analysis for promoting renewable energy in Japan, South Korea, and Taiwan. *Energy Policy*, vol. 74, p. 319-329, 2014.
- CORRÊA, H. L.; XAVIER, L. H. Concepts, design and implementation of Reverse Logistics Systems for sustainable supply chains in Brazil. *Journal of Operations and Supply Chain Management*, v. 6, n. 1, p. 1-25, 2013.
- COSTA, D. A. M. M.; COSTA, T. S. D.; MONTEIRO, I. P. C. Danos ambientais ocasionados por navios petroleiros. *Revista do Ced*s, v. 1, n. 3, 2015.
- CUNHA, C. A.; SCALCO, P. R. Crescimento econômico brasileiro e emissão de CO₂. *Revista de Desenvolvimento Regional – Redes*, v. 18, n. 2, p. 214-230, 2013.
- DUPONT, F. H.; GRASSI, F.; ROMITTI, L. Energias renováveis: buscando por uma matriz energética sustentável. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 19, n. 1, Ed. Especial, p. 70-81, 2015.
- ELKINGTON, J. *Canibais com garfo e faca*. São Paulo: Makron Books, 2001.
- ERKMAN, S. Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner Production*, v. 5, n. 1-2, p. 1-10, 1997.
- FARHANI, S. Renewable energy consumption, economic growth and CO₂ emissions: Evidence from selected MENA countries. Working Papers nº 612, Department of Research, Ipag Business School, 2015.
- FARHANI, S.; REJEB, J. B. Energy Consumption, Economic Growth and CO₂ Emissions: Evidence from Panel Data for MENA Region. *International Journal of Energy Economics and Policy*, vol. 2, n. 2, p. 71-81, 2012.
- HANSEN, B. E. Threshold effects in non-dynamic panels: estimation, testing, and inference. *Journal of Econometrics*, v. 93, n. 2, p. 345-368, 1999.
- HSIAO, C. *Analysis of Panel Data*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- IHU. Instituto Humanitas Unisinos. Concentração de CO₂ na atmosfera atinge novo recorde em maio de 2019. *Revista IHU on-line*, São Leopoldo, 2019. Disponível em: <http://www.ihu.unisinos.br/78-noticias/589995-concentracao-de-co2-na-atmosfera-atinge-novo-recorde-em-maio-de-2019>. Acesso em: 13 jun. 2019.



- IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *History of Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007. Disponível em: www.ipcc.ch/organization/organization.shtml. Acesso em: 19 mar. 2017.
- ISENMANN, R. Industrial ecology: shedding more light on its perspective of understanding nature as model. *Sustainable Development*, v. 11, p. 143-158, 2003.
- ITO, K. CO₂ emissions, renewable and non-renewable energy consumption, and economic growth: evidence from panel data for developed countries, *Economics Bulletin*, v. 36, issue 1, p. 553-559, 2016.
- JOYNER, C. C.; JOYNER, N. D. Global eco-management and international organizations: the Stockholm Conference and problems of cooperation. *Natural Resources Journal*, v. 14, p. 533-547, 1974.
- MACHADO, A. A. O local e o global na estrutura da política ambiental internacional: a construção social do acidente químico ampliado de Bhopal e da Convenção 174 da OIT. *Revista Contexto Internacional*, v. 28, n. 1, p. 7-51, 2006.
- MEBRATU, D. Sustainability and sustainable Development: historical and Conceptual review. *Environmental Impact Assessment Review*, v.18, n. 6, p. 493-520, 1998.
- MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. *Energias Renováveis*. Brasília, 2019. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/tecnologia/SETEC/paginas/energia/Energias-Renovaveis.html?searchRef=gera%C3%A7%C3%A3o&tipoBusca=expressaoExata>. Acesso em: 14 jul. 2019.
- NASCIMENTO, E. P. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. *Revista Estudos Avançados da USP*, v. 26, n. 74, p. 51-74, 2012.
- NIDUMOLU, R.; PRAHALAD, C. K.; RANGASWAMI, M. R. Why Sustainability Is Now the Key Driver of Innovation. *Harvard Business Review*, 87 (9), p. 56-64, 2009.
- ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS 2015. *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>. Acesso em 14 jul. 2019.
- PALAMALAI, S.; RAVINDRA I. S.; PRAKASAM, K. Relationship between Energy Consumption, CO₂ Emissions, Economic Growth and Trade in India. *Journal of Economic and Financial Studies* (Jefs), Lar Center Press, 3(2), p. 1-17, 2015.
- RAMOS, M. D. *Estudo da formação e emissão de poluentes na atmosfera originários do coprocessamento de resíduos em fábricas de cimento*. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2015.
- SANTOS, J. F.; FERNANDES, E. A.; COELHO, A. B. Crescimento econômico e emissão de CO₂ por combustíveis fósseis: uma análise da hipótese da curva de Kuznets ambiental. *Revista Análise Econômica*, Porto Alegre, ano 30, n. 57, p. 287-312, 2012.
- SCHMIDT, L.; HORTA, A.; PEREIRA, S. O desastre nuclear de Fukushima e os seus impactos no enquadramento midiático das tecnologias de fissão e fusão nuclear. *Revista Ambiente & Sociedade*, v. XVII, n. 4, p. 233-250, 2014.
- SHAARI, M. S.; HUSSAIN, N. E.; ABDULLAH, H., KAMIL, S. Relationship among Foreign Direct Investment, Economic Growth and CO₂ Emission: A Panel Data Analysis. *International Journal of Energy Economics and Policy*, v. 4, issue 4, p. 706-715, 2014.
- SIMAS, M.; PACCA, S. Energia eólica, geração de empregos e desenvolvimento sustentável. *Revista Estudos Avançados*, São Paulo, vol. 27, n. 77, p. 99-115, 2013.
- SIMAS, M.; PACCA, S. Assessing employment in renewable energy technologies: A case study for wind power in Brazil. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 31, p. 83-90, 2014.
- SILVA, C. (org.). *Elementos de administração*. Ponta Grossa: Atena, 2019. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/arquivos/ebooks/elementos-de-administracao>. Acesso em: 10 jul. 2019.
- SILVA, S.; SOARES, I.; PINHO, C. The Impact of Renewable Energy Sources on Economic Growth and CO₂ Emissions – a SVAR approach. *European Research Studies Journal*, v. XV, issue 4, p. 133-144, 2012.



STOLYAROVA, E. Carbon Dioxide Emissions, economic growth and energy mix: empirical evidence from 93 countries, *Ideas Workpaper*, n. 5433, EcoMod, 2013.

UNEP. United Nations Environment Programmer. *Green Jobs: Towards Decent Work in a Sustainable, Low-carbon World*, 2008. Disponível em: http://adapt.it/adapt-indice-a-z/wp-content/uploads/2013/08/unep_2008.pdf. Acesso em: 16 dez. 2016.

UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. *Kyoto Protocol Reference Manual. On accounting of emissions and assigned amount*. Germany, 2008. Disponível em: https://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf. Acesso em: 16 dez. 2016.

