

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

TRÊS ENSAIOS EM MACROECONOMIA, ENERGIA
E MEIO AMBIENTE

YURI CESAR DE LIMA E SILVA

Recife
2020

YURI CESAR DE LIMA E SILVA

TRÊS ENSAIOS EM MACROECONOMIA, ENERGIA
E MEIO AMBIENTE

ORIENTADOR: PROF. DR. MARCELO EDUARDO ALVES DA SILVA

Área de Concentração: Teoria Econômica
Subárea: Macroeconomia e Finanças

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito final para obtenção do grau de **Doutor em Economia**.

Recife
2020

Catálogo na Fonte
Bibliotecária Ângela de Fátima Correia Simões, CRB4-773

S586t Silva, Yuri Cesar de Lima e
Três ensaios em macroeconomia, energia e meio ambiente / Yuri Cesar
de Lima e Silva. - 2020.
96 folhas: il. 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Eduardo Alves da Silva.
Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco,
CCSA, 2020.
Inclui referências e apêndices.

1. Política ambiental ótima. 2. Choques energéticos. 3. Choques
ambientais. I. Silva, Marcelo Eduardo Alves da (Orientador). II. Título.

336 CDD (22. ed.) UFPE (CSA 2020 – 008)

YURI CESAR DE LIMA E SILVA

TRÊS ENSAIOS EM MACROECONOMIA, ENERGIA E MEIO AMBIENTE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito final para a obtenção do título de Doutor em Economia.

Aprovado em: 06/02/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Eduardo Alves da Silva
Orientador

Prof. Dr. Rafael da Silva Vasconcelos
Examinador Interno

Prof. Dr. Tiago Vanderlei de Vasconcelos Cavalcanti
Examinador Externo/Universidade de Cambridge

Prof. Dr. Cássio da Nobrega Besarria
Examinador Externo/UFPB

Prof. Dr. Edilean Kleber da Silva Bejarano Aragón
Examinador Externo/ UFPB

Agradecimentos

Agradeço à Deus por todas as oportunidades que a vida vem me proporcionando. Nos últimos anos me casei com uma esposa maravilhosa, fui pai da melhor filha do mundo, concluí meu mestrado, me tornei professor em uma Universidade Federal e agora estou finalizando mais um grande objetivo da minha vida que é concluir meu doutorado.

Agradeço à Deus por ter me concedido a graça de ser pai da Ivy Silva. Meiga, carinhosa, inteligente, linda e, acima de tudo, feliz. Obrigado filha, por todos os momentos que você vem me proporcionando. Te amo!

Agradeço, incondicionalmente, à Janayna Barbosa por estar comigo em todos os momentos, me apoiar em cada decisão difícil, chorar e rir junto comigo, além de me ajudar na correção de todos os textos que escrevi até hoje. Te agradeço por ser a incrível mãe para nosso maior tesouro. Me orgulho imensamente de ter te escolhido para ser minha companheira e mãe da nossa filha. Obrigado por tudo!

Agradeço à minha mãe por superar todas as dificuldades da vida e por ser meu exemplo. Foi graças a você que me tornei o que sou hoje. Obrigado por cada incentivo e por ter sempre colocado a educação em primeiro lugar. Agradeço à meu pai por me mostrar que a vida foi feita para ser vivida, por me ensinar a nunca ter medo de explorar o novo e por ter me proporcionado uma das maiores experiências da minha vida. Agradeço aos meus pais, acima de tudo, por deixarem claro que estariam do meu lado, para começar de novo, se tudo desse errado. Muito Obrigado!

Agradeço aos meus irmãos, Davi, Jade e Manu que em todos os momentos que puderam estar juntos me proporcionaram muita felicidade. Agradeço à meu irmão Andrei Silva por ser o meu melhor amigo. Por seguir meus passos e me ajudar nessa árdua jornada. Estamos juntos nessa vida desde sempre e pretendo que fiquemos assim. Obrigado por ter me ajudado nas discussões acadêmicas, mas, principalmente, pelo carinho do dia a dia.

Agradeço à todos os meus amigos e demais familiares por me proporcionarem momentos maravilhosos. Agradeço, em especial, à Dani, Bruno, Yaranny e Wellington pela amizade e hospitalidade que nos proporcionaram em Recife.

Agradeço à Marcelo, meu orientador, por todos os ensinamentos, por estar sempre disponível, por me fazer crescer como economista e por estar me gerando grandes oportunidades futuras. Agradeço aos membros da minha banca de qualificação por todas as importantes sugestões que fizeram meu trabalho evoluir. Agradeço à todos os meus professores do PIMES por todo o conhecimento que me passaram. Agradeço aos amigos, em especial Sávio e Cleyton, pela troca de conhecimentos e pela grande ajuda nos momentos difíceis. Por fim, agradeço respeitosamente ao Instituto Escolhas e a Universidade Federal de Roraima pelo apoio financeiro.

Resumo

Esta tese é composta por três ensaios sobre economia, energia e meio ambiente que utilizam aspectos metodológicos vinculados à macroeconomia moderna. O primeiro ensaio analisa os efeitos dos ciclos econômicos na adoção de uma política ambiental ampla ótima utilizando um modelo E-DSGE aumentado, que inclui um setor energético endógeno produtor de energia renovável e de energia não renovável. O segundo ensaio, utiliza um modelo E-DSGE de economia aberta, com um setor energético diversificado, para analisar os impactos dos seguintes choques energéticos: oferta energética, demanda por energia e preços internacionais de fontes energéticas comercializáveis no exterior. Por fim, o terceiro ensaio utiliza um modelo PVAR-GMM para analisar como os choques nas emissões de CO₂, de natureza local e global, afetam as economias dos trinta países que mais emitiram carbono no planeta. Os principais resultados mostram que as alíquotas implementadas pela política ambiental ampla são pró-cíclicas e que essa política atinge níveis de bem-estar superiores a outras políticas alternativas. Além disso, mostramos que na presença de choques nos preços internacionais da energia, os agentes optam por substituir uma parcela da fonte energética consumida e não reduzem o consumo total de energia. Mostramos também que choques nas emissões do resto do mundo fazem com que a atividade produtiva e o bem-estar sejam reduzidos. Ademais, mostramos que os choques nas emissões de carbono, local e global, reduzem o crescimento econômico. Por outro lado, os choques na atividade produtiva e no consumo energético geram aumentos nas emissões domésticas estrangeiras de CO₂ e os choques na abertura comercial reduzem as emissões estrangeiras.

Palavras-Chaves: Política ambiental ótima. Choques energéticos. Choques ambientais.

Classificação JEL: Q43, Q51, Q58, E32

Abstract

This thesis consists of three essays on economics, energy and environment which use methodological aspects connected to the modern macroeconomics. The first essay analyzes the effects of business cycles on the adoption of a broad optimal environmental policy using an augmented E-DSGE model that includes an endogenous sector that produces renewable energy and non-renewable energy. The second essay uses an E-DSGE model of open economy with a diversified energy sector to analyze the impact of energy shocks: energy supply, energy demand and international prices of tradable energy sources. Finally, the third essay uses a PVAR-GMM model to analyze how local and global CO₂ emission shocks affect the economies of the 30 most carbon-emitting countries on the planet. The optimal environmental tax rates (in Ramsey's sense) are procyclical and yield highest welfare compared to the alternatives. Besides that, it shows that in the presence of shocks in international energy prices, agents choose to replace a portion of the energy source consumed and do not reduce the total energy consumption. Moreover, the results show that local and global carbon shocks reduce economic growth. On the other hand, shocks in productive activity and energy consumption lead to increases in domestic emissions of CO₂.

Keywords: Optimal Environmental policy. Energy shocks. Environmental shocks.

JEL Code: Q43, Q51, Q58, E32

Lista de Figuras

1.1	Cyclic component of the emissions, GDP and non-renewable energy series in the Brazilian energy matrix between 1970 and 2016.	15
1.2	Structure of the model.	17
1.3	Responses to the productivity impulses of the renewable and non-renewable energy sectors	29
1.4	Response to the productivity impulses of the global TFP and final goods sector	30
1.5	Responses to the global TFP impulses for different environmental policies . . .	31
2.1	Respostas aos choques nos preços internacionais de energia	50
2.2	Respostas aos choques negativos na oferta de energia primária renovável	53
2.3	Respostas aos choques negativos na oferta doméstica de energia primária não renovável	55
2.4	Respostas aos choques domésticos na demanda por energia	57
2.5	Respostas aos choques nas alíquotas da política ambiental	58
2.6	Respostas ao choque das emissões do resto do mundo	59
3.1	Respostas do modelo com 30 países aos choques nas emissões de CO ₂ domésticas e do resto do mundo.	76
3.2	Respostas das emissões de carbono aos choques no crescimento econômico, no consumo energético e na abertura comercial no modelo com 30 países.	77
3.3	Funções de impulso-resposta das relações entre o crescimento econômico, o consumo energético e a abertura comercial no modelo de 30 países.	77
3.4	Funções de impulso-resposta dos choques nas emissões de CO ₂ domésticas e do resto do mundo nos modelos com 30, 20 e 10 países.	79
3.5	Respostas das emissões de carbono aos choques no crescimento econômico, no consumo energético e na abertura comercial nos modelos com 30, 20 e 10 países.	79
3.6	Funções de impulso-resposta das relações entre o crescimento econômico, o consumo energético e a abertura comercial nos modelos com 30, 20 e 10 países . . .	80
3.7	Respostas do crescimento econômico aos choques nas emissões de CO ₂ domésticas e do resto do mundo em modelos alternativos.	83
A1	Dados usados nas estimações.	85
A2	Condição de estabilidade do PVAR-GMM.	88

Lista de Tabelas

1.1 Parameters values	26
1.2 Optimal tax rates	27
1.3 Welfare analysis for different environmental policies	32
2.1 Valores dos parâmetros calibrados com dados da literatura	47
2.2 Valores dos parâmetros calibrados em consonância com os dados do Brasil	48
3.1 Países da amostra, ranqueados pelo nível das emissões de CO ₂ em 2014.	70
3.2 Estatísticas descritivas das variáveis de 1996 a 2014, por país.	71
3.3 Decomposição da variância	81
A1 Testes de raiz unitária para dados em painel - modelos sem tendência	86
A2 Testes de raiz unitária para dados em painel - modelos com tendência	87
A3 Critério de seleção das defasagens.	88

Sumário

Introdução	11
1 Optimal Environmental Policy and Business Cycles: An Analysis Using an E-DSGE Model	13
1.1 Introduction	13
1.2 Methodology	16
1.2.1 Model	16
1.2.1.1 Households	17
1.2.1.2 Environmental Structure	19
1.2.1.3 Production of Non-Energy Final Goods	20
1.2.1.4 Renewable Energy Production	22
1.2.1.5 Non-Renewable Energy Production	22
1.2.1.6 Government	23
1.2.1.7 Exogenous Processes	23
1.2.1.8 Market Equilibrium Conditions and Aggregations	23
1.2.2 Decentralized Competitive Equilibrium	24
1.2.3 Optimal Tax Policy - Ramsey Equilibrium	25
1.2.4 Calibration	25
1.3 Results	27
1.3.1 Optimal policy	27
1.3.2 Impulse Response Functions	28
1.3.2.1 Productivity Shocks	28
1.3.2.2 Alternative Environmental Policies	30
1.3.3 Welfare Analysis	31
1.4 Conclusion	33
2 Choques Energéticos e Ambientais em um Modelo E-DSGE	35
2.1 Introdução	35
2.2 Modelo	38
2.2.1 Famílias	39
2.2.2 Estrutura Ambiental	41

2.2.3	Setor Energético	42
2.2.3.1	Energia Primária	42
2.2.3.2	Refinarias	43
2.2.4	Setor de Bens Finais	44
2.2.5	Governo	45
2.2.6	Taxa de juros	45
2.2.7	Processos Exógenos	45
2.2.8	Condições de Equilíbrio de Mercado	46
2.3	Calibração	47
2.4	Resultados	49
2.4.1	Choques nos Preços Internacionais da Energia	49
2.4.2	Choques Negativos na Oferta Energética	52
2.4.2.1	Setor de Energia Primária Renovável	52
2.4.2.2	Setor de Energia Primária Não Renovável	54
2.4.3	Choques de Demanda Doméstica por Energia	56
2.4.4	Meio Ambiente	57
2.4.4.1	Choques na Política Ambiental	57
2.4.4.2	Choque nas Emissões do Resto do Mundo	59
2.5	Conclusão	59
3	Emissões de Carbono e Crescimento Econômico:	
	Quanto Mais Poluição, Pior?	62
3.1	Introdução	62
3.2	Revisão da Literatura	65
3.3	Descrição e Análise Preliminar dos Dados	69
3.4	Metodologia	72
3.4.1	Testes de Raiz Unitária para Dados em Painel	72
3.4.2	Abordagem PVAR-GMM	73
3.5	Resultados	75
3.5.1	Funções de Impulso-Resposta	75
3.5.1.1	Modelo Base: Os Trinta Países Mais Emissores do Mundo	75
3.5.1.2	Modelos com Amostras Restritas	78
3.5.2	Análise da Decomposição da Variância	80
3.5.3	Verificação de Robustez	82
3.6	Conclusão	83
	Apêndices	85
	Referências Bibliográficas	89

A relação entre a atividade produtiva, o consumo de combustíveis fósseis, as emissões de gases do efeito estufa, a degradação do meio ambiente e as mudanças climáticas extremas pode ser considerado um dos temas multidisciplinares mais centrais para toda uma geração de pesquisadores e proponentes de políticas públicas no mundo.

Esta tese busca contribuir com esse debate através de três ensaios sobre economia, energia e meio ambiente que utilizam modelos teóricos e técnicas vinculados à macroeconomia moderna. O primeiro ensaio, busca relacionar os ciclos econômicos e a introdução de uma política ambiental ótima em um modelo ambiental de equilíbrio geral dinâmico e estocástico (E-DSGE). O segundo ensaio, busca compreender os efeitos econômicos e ambientais de choques no setor energético em um modelo E-DSGE de economia aberta. E, o terceiro ensaio, estima um vetor auto-regressivo para dados em painel (PVAR) para analisar as relações entre crescimento econômico, consumo de energia e emissões de carbono em uma amostra que contempla os trinta países que mais emitem CO₂ no mundo.

No primeiro ensaio, analisamos quais os efeitos dos ciclos econômicos na adoção de uma política ambiental ampla ótima que considera, além dos impostos sobre as emissões, um conjunto completo de impostos e subsídios no setor energético. Para esse fim, desenvolvemos um modelo E-DSGE aumentado, incluindo um setor energético endógeno produtor de energia renovável e de energia não renovável. O modelo foi usado para encontrar as trajetórias ótimas das alíquotas da política ambiental. Além disso, analisamos o comportamento dinâmico das demais variáveis do modelo em resposta aos choques de produtividade no setor de bens finais não energéticos e no setor de produção de energia (renovável e não renovável). Por fim, analisamos os níveis de bem-estar para diferentes alternativas políticas e comparamos com a nossa proposta de política ambiental ampla. Os resultados mostram que, em resposta a choques de produtividade, as taxas de impostos sobre energia não renovável e emissões são pró-cíclicas. O mesmo vale para as taxas de subsídio ao uso de energia renovável. Além disso, mostramos que a política ambiental ampla atinge um nível de bem-estar superior, no sentido de Ramsey, quando

comparada às políticas que não incluem o conjunto completo de impostos e subsídios no setor energético.

No segundo ensaio, utilizamos um modelo E-DSGE de economia aberta, com um setor energético diversificado, para analisar os impactos econômicos e ambientais de choques energéticos diversos. Mostramos as respostas dos choques nos preços internacionais das fontes energéticas comercializáveis no exterior, dos choques negativos na oferta energética e dos choques na demanda por energia. Além disso, analisamos quais os impactos econômicos e ambientais de choques nas alíquotas da política ambiental e quais os impactos domésticos de um choque nas emissões do resto do mundo. Os resultados mostraram que os choques externos nos preços da energia aumentam o produto agregado, o nível de investimento e geram um superavit na balança comercial. Além disso, os agentes substituem uma parcela das fontes energéticas não renováveis por fontes energéticas renováveis, ao invés de reduzir o uso de energia, fazendo com que os níveis de emissão de carbono e de estoque de poluição diminuam. Por outro lado, mostramos que um choque nas emissões do resto do mundo reduzem de forma bastante intensa o PIB e o bem-estar social.

No terceiro ensaio, estimamos um PVAR para analisar as relações entre crescimento econômico, consumo total de energia, consumo de combustíveis fósseis, emissões domésticas de CO₂, emissões de CO₂ do resto do mundo e abertura comercial. Analisamos como os choques nas emissões de CO₂, de natureza local e global, afetam o crescimento econômico dos trinta países que mais emitem carbono no planeta. Utilizamos dados com periodicidade anual entre os anos de 1996 e 2014. Além disso, testamos a hipótese de que países que possuem níveis elevados de emissões de carbono são mais vulneráveis aos choques nas emissões. Os resultados mostram que os choques ambientais reduzem o crescimento econômico e, quando restringimos a amostra aos dez países mais emissores, a queda na atividade econômica é ainda mais intensa. Por outro lado, os choques na atividade produtiva e no consumo energético geram aumentos nas emissões domésticas e estrangeiras de CO₂ e os choques na abertura comercial reduzem as emissões estrangeiras.

Optimal Environmental Policy and Business Cycles: An Analysis Using an E-DSGE Model

1.1 Introduction

The increase in global warming and the accelerated degradation of the environment as a result of higher anthropogenic greenhouse gas (GHG) emissions have brought to the forefront of the international policy arena the need for policies to tackle this phenomenon. Typically, higher GHG emissions have been associated to the fact that economic agents do not internalize the effects of their consumption and production choices on GHG emissions, making decisions that are collectively inefficient. In such cases, government intervention can come into play to offset this market failure.¹ Yet the global nature of the problem demands global (and local) responses. International Climate Conferences is an example of such efforts where several countries have collectively established targets for reductions in GHG emissions.

Currently, in order to meet the emission reduction targets agreed at the International Climate Conferences, such as the Paris Agreement (COP-21)², most of the 167 signatory countries committed themselves to a migration strategy for a cleaner energy matrix, aiming to design policies that would lead to the substitution of energy sources, from fossil fuel burning sources to cleaner alternative renewable sources.³

Although the study of environmental problems is not new in economics, as partial

¹One possibility is the introduction of an environmental tax policy, such as an emissions tax, to reduce emissions (Heutel, 2012).

²The 21st Conference of the Parties (COP-21) is the latest step in the global effort to combat climate change. Targets linked to the Paris agreement seek to maintain a global temperature rise in this century below 2 degrees Celsius from pre-industrial levels and generate efforts to limit this rise by 1,5 degrees Celsius. To date, 167 countries have submitted national GHG reduction targets to the atmosphere.

³See Nationally Determined International Contributions - INDC on the site: <http://unfccc.int/focus/indc_portal/items/8766.php>.

equilibrium microeconomic models (Newell & Pizer, 2008; Babiker et al., 2005), input-output computable general equilibrium models (Viguier et al., 2003; Babiker et al., 2003) and economic growth models (Brock & Taylor, 2005) have been used for this purpose, only recently, the literature has started investigating the design, implementation and the effects of environmental policies on the business cycles. For this purpose, researchers have augmented traditional DSGE models to incorporate environmental concerns (Fischer & Springborn, 2011; Heutel, 2012; Angelopoulos et al., 2013; Annicchiarico & Dio, 2015; Leal et al., 2015; Niu et al., 2018).⁴

However, despite this initial effort, these models have not explicitly modeled the energy sector, disregarding that an emission mitigation policy could contain instruments that would induce the replacement of energy sources, from polluting sources to non-polluting ones. In this context, motivated by recent policy discussions, this paper attempts to fill this gap by analyzing, in an augmented Environmental DSGE model (E-DSGE) with an explicitly modeled energy sector, the business cycles effects of adopting a broad optimal environmental policy that considers, in addition to emissions taxes, a complete set of taxes and subsidies in the energy sector. This is the main contribution to the literature.

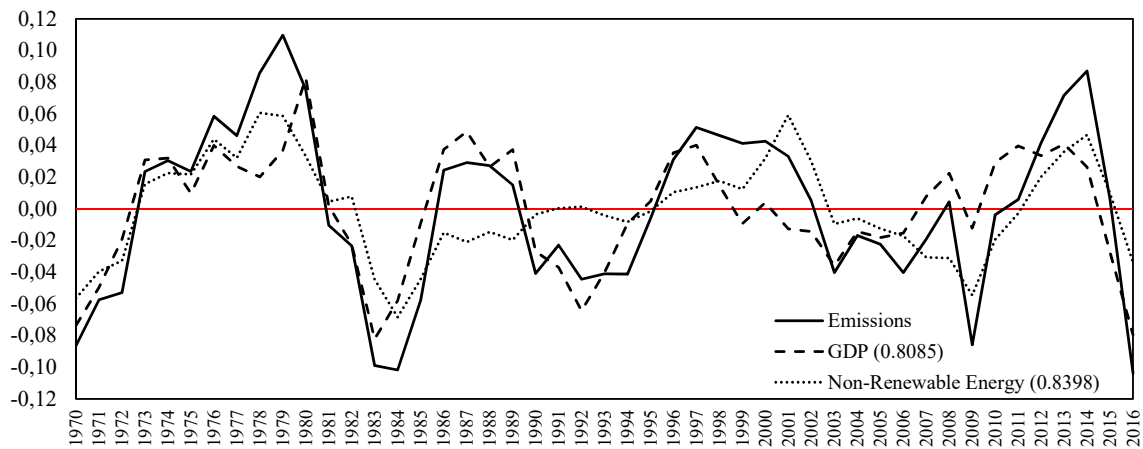
We develop an augmented E-DSGE model that includes: i) an energy sector that produces renewable and non-renewable energy, allowing agents to choose between them; ii) an environmental structure in which private agents consider the quality of the environment to be a public good that increases utility and affects the production process. However, they do not internalize the effects of their consumption and production choices on the quality of the environment; and (iii) a broad set of fiscal instruments in which the government levy taxes on emissions and on the consumption of non-renewable energy, and subsidizes the price of renewable energy.

We use Brazil as our model economy as the country has a diversified energy matrix, displaying both non-renewable and renewable sources. We use the model to compute the optimal fiscal and environmental policy rates that maximizes social welfare (in Ramsey's sense). We also assess the dynamic behavior of the model variables in response to productivity shocks in the non-energy and energy sectors. Finally, we implement a welfare analysis of different policy alternatives in the spirit of Schmitt-Grohé & Uribe (2007).

The results show that the broad environmental policy is welfare superior in Ramsey's sense to policies that do not include a full set of taxes and subsidies in the energy sector. In particular, under the broad fiscal and environmental policy, the economy exhibits higher levels of production and consumption, lower levels of emissions and pollution stocks, and higher levels of social welfare. Model simulations also show that, in the response to productivity shocks, tax rates on non-renewable energy and on emissions are pro-cyclical. The same is true for the subsidy rates on renewable energy usage. Therefore, these results highlight the importance of a broad environmental policy that considers, besides taxes on

⁴For a good summary of these early work in the area see Fischer & Heutel (2013).

Figure 1.1: Cyclic component of the emissions, GDP and non-renewable energy series in the Brazilian energy matrix between 1970 and 2016.



Source: Emissions are from the Greenhouse Gas Emission Estimate System (SEEG). The GDP is from the Time Series System of the Central Bank of Brazil and the non-renewable energy from the National Energy Balance of the Ministry of Mines and Energy of Brazil.

Note: 1) The Hodrick-Prescott (HP) filter was applied in the series to separate the trend components of the cyclic components. 2) The values in parentheses in the legend correspond to the correlation between the variable and the emissions (after the use of the HP filter).

emissions, a broad set of fiscal instruments in the energy sector.

This paper is related to three branches of the literature. The first is the literature dealing with environmental issues in the context of DSGE models (E-DSGE). The aim of this literature is to discuss the best environmental policy instruments. For instance, [Angelopoulos et al. \(2010\)](#) show that emissions taxes are welfare superior to alternatives tested (pollution permits and Kyoto-like numerical rules for emissions). On the other hand, [Fischer & Springborn \(2011\)](#) show that under intensity targets the economy exhibits higher levels of output, labor and capital. Besides, this policy does not lead to higher economic volatility or welfare costs that under the alternative of no policy. More recently, [Annicchiarico & Dio \(2015\)](#) use a new Keynesian model with nominal price rigidity to analyze the effects of adopting alternative environmental policies under real and nominal rigidity. They show a tax policy that focuses on emissions is welfare superior to a pollution permit policy as long as the degree of price rigidity is not too high. Otherwise, welfare tends to be greater under a permit policy.

The second branch focuses on understanding the relationship between optimal taxes and the business cycles. The aim is to assess whether an optimal emission tax should be pro-cyclical or counter-cyclical. Most papers find that the optimal emissions tax rate should be pro-cyclical ([Heutel, 2012](#); [Angelopoulos et al., 2013](#); [Leal et al., 2015](#)). An exception is [Lintunen & Vilmi \(2013\)](#) who find that, under certain circumstances, the optimal tax should be counter-cyclical.

Finally, there are papers that focus on aspects related to the energy sector in DSGE models ([Tumen et al., 2016](#); [Blazquez et al., 2017](#); [Atallaa et al., 2017](#); [Argentiero et al.,](#)

2018). However, the link between the literature on the energy sector and the environmental literature, discussed earlier, is still little explored. The first work to follow this path is [Dissou & Karnizova \(2016\)](#). Our paper differs from theirs along two main dimensions: first, CO_2 emissions, in our model, affect both the households' welfare and output production. Therefore, reducing emissions may increase welfare and aggregate production. This is relevant in designing the optimal tax policy. Second, we have a energy sector that features non-renewable and renewable energy production, which allows households and firms to choose their optimal mix of energy sources. Besides, this has implications for the optimal tax policy. As we show, the optimal policy features taxes on emissions and non-renewable energy consumption alongside subsidies in renewable energy consumption.

The remainder of this paper is structured as follows. In section 3.4, we describe the model, present the competitive equilibrium and the design of the optimal fiscal and environmental policy (Ramsey equilibrium), and discuss the parameters calibration. In section 1.3, we present and discuss the main results. Finally, in section 1.4, we present some final remarks.

1.2 Methodology

1.2.1 Model

The economy consists of households, firms and the government. Households consist of a continuum of identical agents, who live infinitely. Their utility function is composed of consumption of non-energy final goods, energy consumption (renewable and non-renewable), stock of environmental quality and leisure. Households consume, save, and supply labor. They own all firms.

There are two types of firms. Firms that produce a final non-energy good and firms that produce energy goods (renewable and non-renewable energy). To produce the final non-energy good, firms use capital, labor and energy (renewable and non-renewable) as inputs. In turn, to produce renewable and non-renewable energy, energy firms use only capital as inputs.

By using non-renewable energy, households and firms emit pollutants that harm the quality of the environment and cause damage to the production process. Therefore, the negative effects of pollution are twofold: i) reduces the utility of the households by lowering the environmental quality; and ii) lowers the production of the final good.

Private agents see the environment as a public good, yet they do not internalize the effects of their consumption and production decisions on it. In order to improve the economic result, the government imposes a broad environmental policy, charging taxes on non-renewable energy and emissions, and subsidizing the use of renewable energy.

In response to the environmental policy, firms invest in abatement technologies to

reduce emissions and hence lower tax payments. The abatement technology reduce the emission/output ratio for a given level of non-renewable energy use (primary source of pollution). In addition, households and firms can replace part of their "dirty" energy source with clean, non-polluting renewable energy. Figure 1.2 depicts the model structure.

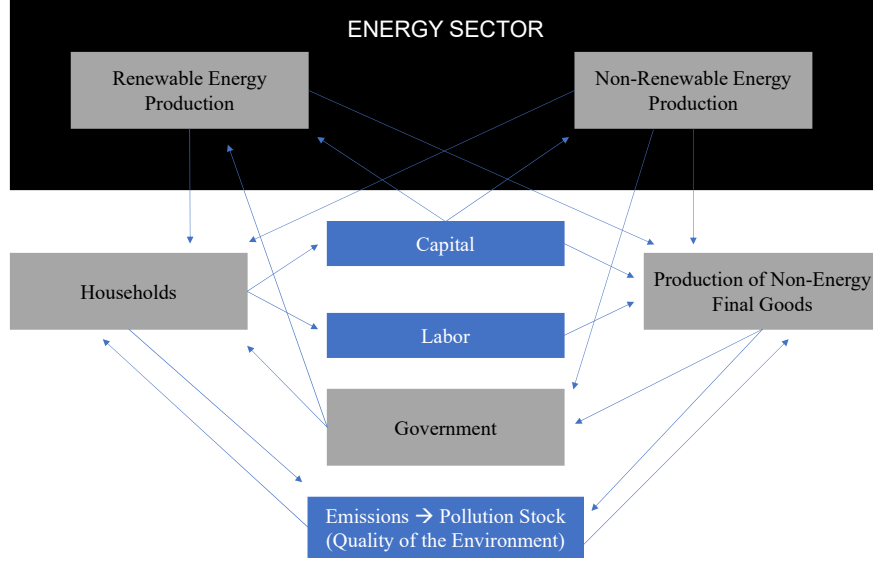


Figure 1.2: Structure of the model.

In this section, the competitive equilibrium of the model and the optimal tax policy proposal (Ramsey's problem) will be presented.

1.2.1.1 Households

There is a continuum of infinitely-lived households indexed by $j \in (0, 1)$. Each household maximizes an intertemporal utility subject to a budget constraint. The preference of households j is given by:

$$U = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left\{ \frac{1}{1-\varphi} \left[(Z_t) - l \frac{(L_t)^{1+\omega}}{1+\omega} \right]^{1-\varphi} + q \frac{(Q_{t-1})^{1-\eta}}{1-\eta} \right\} \quad (1.1)$$

where, $0 < \beta < 1$ is the subjective discount factor of the households, Z_t denotes aggregate consumption, Q_{t-1} is the quality of the environment at the end of the period $t-1$, $0 < l < 1$ and $0 < q < 1$ are preference parameters related to labor and to the quality of the environment. L_t denotes the labor supply and $\varphi > 0$, $\eta > 0$ and $\omega > 0$ are the inverse of the intertemporal substitution elasticities of consumption, the quality of the environment and hours worked.

The aggregate consumption Z_t is CES aggregator of energy consumption E_t^C and

consumption of non-energy final goods C_t , as follows:

$$Z_t = \left[(1 - s_C)(E_t^C)^{\frac{\theta_z - 1}{\theta_z}} + s_C(C_t)^{\frac{\theta_z - 1}{\theta_z}} \right]^{\frac{\theta_z}{\theta_z - 1}}$$

where θ_z is the intertemporal elasticity of substitution between energy consumption and consumption of non-energy final goods and $0 \leq s_C \leq 1$ indicates the share of spending on non-energy final goods in the basket of households consumption goods. E_t^C is a CES aggregator of the renewable energy consumption E_t^{RC} and the non-renewable energy consumption E_t^{NRC} :

$$E_t^C = \left[(1 - s_R)(E_t^{NRC})^{\frac{\theta_e - 1}{\theta_e}} + s_R(E_t^{RC})^{\frac{\theta_e - 1}{\theta_e}} \right]^{\frac{\theta_e}{\theta_e - 1}}$$

where θ_e is the intertemporal elasticity of substitution between renewable energy consumption and non-renewable energy consumption and $0 \leq s_R \leq 1$ indicates the share of renewable energy expenditures in the basket of households' energy consumption goods.

The representative household chooses consumption levels of final goods, renewable energy, non-renewable energy, labor supply, government bonds and capital investment to maximize (1.1) subject to the following budget constraint:

$$\begin{aligned} C_t + (1 - \vartheta_t^{RE})P_t^{RE}E_t^{RC} + (1 + \tau_t^{NRE})P_t^{NRE}E_t^{NRC} + I_t^Y + I_t^R + I_t^{NR} + (1 + r_{t-1}^B)B_{t-1} \\ = B_t + w_tL_t + r_t^YK_{t-1}^Y + r_t^RK_{t-1}^R + r_t^{NR}K_{t-1}^{NR} + T_t + \Pi_t \end{aligned} \quad (1.2)$$

where P_t^{RE} and P_t^{NRE} are the prices of renewable energy and non-renewable energy, in terms of the final good (*numeraire*). ϑ_t^{RE} and τ_t^{NRE} are the subsidy rate on P_t^{RE} and the tax rate on P_t^{NRE} . I_t^Y, I_t^R and I_t^{NR} denote physical capital investment in the non-energy final good sector, in the renewable energy sector and in the non-renewable energy sector. B_t is an one-period bonds issued by the government and r_{t-1}^B is the interest rate on those bonds, w_t is labor income (wages), K_{t-1}^Y, K_{t-1}^R and K_{t-1}^{NR} , are the stock of capital at the end of the period $t - 1$ and r_t^Y, r_t^R and r_t^{NR} , are capital rental rates for each of the 3 sectors. Finally, T_t are lump-sum transfers made by the government to households and Π_t are the profits distributed by firms $i = Y, R, NR$.

For each sector, capital evolves according to:

$$I_t^i = K_t^i - (1 - \delta)K_{t-1}^i + \frac{\Phi}{2}(K_t^i - K_{t-1}^i)^2 \quad (1.3)$$

where $i = Y, R, NR$ and the last term refers to the capital adjustment cost. $0 \leq \delta \leq 1$ is the capital depreciation rate and $\Phi > 0$ is a parameter governing the investment adjustment cost.

Therefore, the problem of households is to maximize the discounted intertemporal utility (1.1) subject to the budget constraint (1.2), the capital evolution law (1.3) and the No-Ponzi-Game Condition:

$$\lim_{j \rightarrow \infty} \frac{B_{t+j+1}}{\prod_{s=0}^j (1 + r_s^B)} \geq 0 \quad (1.4)$$

The equilibrium conditions for the choice of sequences $\{C_t, E_t^{RC}, E_t^{NRC}, L_t, B_t, K_t^Y, K_t^R, K_t^{NR}\}_{t=0}^\infty$ resulting from the maximization problem, are:

$$\lambda_t = \left[(Z_t) - l \frac{(L_t)^{1+\omega}}{1+\omega} \right]^{-\varphi} (s_C) \left(\frac{Z_t}{C_t} \right)^{\frac{1}{\theta_z}} \quad (1.5)$$

$$(1 + \tau_t^{NRE}) P_t^{NRE} = \frac{(1 - s_C)}{s_C} \left(\frac{C_t}{E_t^C} \right)^{\frac{1}{\theta_z}} (1 - s_R) \left(\frac{E_t^C}{E_t^{NRC}} \right)^{\frac{1}{\theta_e}} \quad (1.6)$$

$$(1 - \vartheta_t^{RE}) P_t^{RE} = \frac{(1 - s_C)}{s_C} \left(\frac{C_t}{E_t^C} \right)^{\frac{1}{\theta_z}} (s_R) \left(\frac{E_t^C}{E_t^{RC}} \right)^{\frac{1}{\theta_e}} \quad (1.7)$$

$$l(L_t)^\omega = w_t(s_C) \left(\frac{Z_t}{C_t} \right)^{\frac{1}{\theta_z}} \quad (1.8)$$

$$1 = \beta E_t \left[\left(\frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \right) (1 + r_t^B) \right] \quad (1.9)$$

$$1 + \Phi(K_t^i - K_{t-1}^i) = \beta E_t \left\{ \left(\frac{\lambda_{t+1}}{\lambda_t} \right) [r_{t+1}^i + (1 - \delta) + \Phi(K_{t+1}^i - K_t^i)] \right\} \quad (1.10)$$

for $i = Y, R, NR$. Where λ_t is the Lagrange multiplier associated with the budget constraint (1.2).

1.2.1.2 Environmental Structure

The domestic level of pollution is determined by domestic and foreign emissions. The latter captures, in reduced form, the idea that higher global pollution creates adverse effects to all countries. The use of non-renewable energy by both firms and households is the primary source of domestic emissions of pollutants. Pollution and the resulting environmental deterioration negatively affects the production of final goods (Heutel, 2012) and also lowers the quality of the local environment, directly affecting the agents' health and well-being (Angelopoulos et al., 2013).

Total domestic emissions (e_t) are given by the sum of the emissions generated in the production of non-energy final goods and consumption, as follows:

$$e_t = e_t^Y + e_t^C$$

where e_t^Y denotes emissions generated by final goods firms and e_t^C are emissions from

households' non-renewable energy consumption ⁵.

The model captures the idea that emissions are a byproduct of the production of goods, however, unlike Heutel (2012), which does not have an energy sector, emissions generated by the production of goods depend on the intensity of non-renewable energy use. Therefore, for the same level of production, emissions will be greater, the lower is the proportion of non-renewable energy used, as follows:

$$e_t^Y = (1 - \mu_t) \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} \quad (1.11)$$

where μ_t is the fraction that firms decide to reduce emissions, given the environmental policy and the cost of abatement, E_t^{RY} and E_t^{NRY} are the use of renewable and non-renewable energy in the production of non-energy final goods (Y_t) and $(1 - \gamma^Y)$ is the output elasticity of emissions in the final goods sector.

The emissions generated by non-renewable energy consumption by households (e_t^C) are given by:

$$e_t^C = (E_t^{NRC})^{1-\gamma^C} \quad (1.12)$$

where $(1 - \gamma^C)$ is the consumption elasticity of emissions. The evolution of pollution stock (X_t) at the end of period t is dictated by the following equation:

$$X_t = \phi_x X_{t-1} + e_t + e_t^{row} \quad (1.13)$$

where, $\phi_x \in (0, 1)$ measures the degree of persistence of pollution and e_t^{row} denotes emissions of the rest of the world.⁶ Finally, as indicated in (1.1), households value the quality of the environment. The evolution of the environment quality is given by:

$$Q_t = (1 - \phi_q) \bar{Q} + \phi_q Q_{t-1} - \gamma_x (\ln X_t - \ln X_{t-1}) \quad (1.14)$$

where, $\bar{Q}$ corresponds to the quality of the environment at the steady-state, $\phi_q \in (0, 1)$ measures the degree of persistence of the quality of the environment, $(\ln X_t - \ln X_{t-1})$ corresponds to the growth rate of the pollution stock, and $\gamma_x > 0$ governs the impact of the growth rate of the pollution stock on the quality of the environment.⁷

1.2.1.3 Production of Non-Energy Final Goods

The representative non-energy final goods problem is to choose the amount of capital (K_{t-1}^Y), labor (L_t), the fraction of emission reductions (μ_t), the amount of renewable (E_t^{RY}) and non-renewable energy (E_t^{NRY}), taking wages (w_t), the rental rate of capital

⁵Note that renewable energy can also be used as an input by non-energy final goods firms and consumed by the households, but in this case does not generate emissions.

⁶For simplicity, we assume e_t^{row} to be constant.

⁷For simplicity, it is assumed that $\gamma_x = 1$.

(r_t^Y) and renewable (P_t^{RE}) and non-renewable energy (P_t^{NRE}) prices as given. The profit function of the representative firm is:

$$\Pi_t^Y = Y_t - w_t L_t - r_t^Y K_{t-1}^Y - (1 - \vartheta_t^{RE}) P_t^{RE} E_t^{RY} - (1 - \tau_t^{NRE}) P_t^{NRE} E_t^{NRY} - \tau_t^e e_t^Y - AC_t^Y \quad (1.15)$$

where, τ_t^e is the tax rate charged on emissions.

In this configuration, revenues come exclusively from production and the costs are derived from the payment of tax on emissions, capital lease, payment of wages, purchase of energy and expenses with abatement technology, which will be described shortly.

Non-energy final goods are produced according to the technology:

$$Y_t = d(X) A_t^Y (L_t)^{\alpha_L} (E_t^{RY})^{\alpha_R} (E_t^{NRY})^{\alpha_{NR}} (K_{t-1}^Y)^{\alpha_K} \quad (1.16)$$

where, $d(X) = [1 - (d_2 X_t^2 + d_1 X_t + d_0)]$ represents a quadratic function of production damage from pollution, A_t^Y represents the total factor productivity in the non-energy final goods sector, α_K denotes the weight of capital in the production function, α_L , α_R and α_{NR} are the respective weights of labor, renewable energy and non-renewable energy in the production of non-energy final goods. The function displays constant returns to scale and therefore $\alpha_K + \alpha_L + \alpha_R + \alpha_{NR} = 1$.

In the model, as income increases and firms decide to increase the percentage of emission reductions (μ_t), more resources are spent on abatement technology (Nordhaus, 2008; Heutel, 2012). Therefore, the function that represents the cost with abatement technology is defined as:

$$AC_t^Y = Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \quad (1.17)$$

where, θ_1 measures the menu of existing technological alternatives and θ_2 shows the degree of non-linearity in costs for deeper emissions cuts. The equilibrium conditions resulting from the firm profit maximization problem are:

$$w_t L_t = \alpha_L Y_t - \tau_t^e (1 - \mu_t) (1 - \gamma^Y) \alpha_L \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} - \alpha_L Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \quad (1.18)$$

$$r_t^Y K_{t-1}^Y = \alpha_K Y_t - \tau_t^e (1 - \mu_t) (1 - \gamma^Y) \alpha_K \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} - \alpha_K Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \quad (1.19)$$

$$\begin{aligned} (1 - \vartheta_t^{RE}) P_t^{RE} E_t^{RY} &= \alpha_R Y_t + \tau_t^e (1 - \mu_t) Y_t^{1-\gamma^Y} \left[\frac{E_t^{NRY} E_t^{RY}}{(E_t^{NRY} + E_t^{RY})^2} \right] \\ &\quad - \tau_t^e (1 - \mu_t) (1 - \gamma^Y) \alpha_R \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} - \alpha_R Y_t \theta_1 \mu_t^{\theta_2} \end{aligned} \quad (1.20)$$

$$\begin{aligned}
(1 + \tau_t^{NRE})P_t^{NRE}E_t^{NRY} &= \alpha_{NR}Y_t + \tau_t^e(1 - \mu_t)Y_t^{1-\gamma^Y} \left[\frac{(E_t^{NRY})^2}{(E_t^{NRY} + E_t^{RY})^2} \right] \\
&\quad - \tau_t^e(1 - \mu_t)[(1 - \gamma^Y)\alpha_{NR} + 1] \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{1-\gamma^Y} - \alpha_{NR}Y_t\theta_1\mu_t^{\theta_2}
\end{aligned} \tag{1.21}$$

$$\tau_t^e \left(\frac{E_t^{NRY}}{E_t^{NRY} + E_t^{RY}} \right) Y_t^{-\gamma^Y} = \theta_1\theta_2\mu_t^{\theta_2-1} \tag{1.22}$$

1.2.1.4 Renewable Energy Production

Firms in the renewable energy sector rent capital (K_{t-1}^R) from households taking the rental rate of capital (r_t^R) as given, to maximize the following profit function:

$$\Pi_t^R = P_t^{RE}E_t^R - r_t^RK_{t-1}^R \tag{1.23}$$

The renewable production technology is given by:

$$E_t^R = A_t^RK_{t-1}^R \tag{1.24}$$

where, A_t^R denotes the total factor productivity in the renewable energy sector. From the solution of the firms problem we obtain the usual first order condition:

$$r_t^R = P_t^{RE}A_t^R \tag{1.25}$$

That is physical capital is employed until the marginal product of the last unit equals its unit price.

1.2.1.5 Non-Renewable Energy Production

Non-renewable energy firms also rent capital (K_{t-1}^{NR}) from households taking as given the rental rate of capital (r_t^{NR}) to maximize profits:

$$\Pi_t^{NR} = P_t^{NRE}E_t^{NR} - r_t^{NR}K_{t-1}^{NR} \tag{1.26}$$

The production technology used is identical to the firms in the renewable energy sector, as follows:

$$E_t^{NR} = A_t^{NR}K_{t-1}^{NR} \tag{1.27}$$

where, A_t^{NR} represents productivity in the non-renewable energy sector. From the solution

of the problem of firms, it is possible to obtain the usual condition:

$$r_t^{NR} = P_t^{NRE} A_t^{NR} \quad (1.28)$$

Capital is employed until the marginal product of the last unit equals its price.

1.2.1.6 Government

The government uses part of its revenue to subsidize the price of renewable energy and the rest transfers back to the households. Tax revenue comes from emissions taxes and taxes on the price of non-renewable energy. Besides, the government can issue one-period bonds, B_t . The government's budget constraint is given by:

$$T_t + \vartheta_t^{RE} P_t^{RE} (E_t^{RC} + E_t^{RY}) + (1 + r_{t-1}^B) B_{t-1} = B_t + \tau_t^{NRE} P_t^{NRE} (E_t^{NRC} + E_t^{NRY}) + \tau_t^e e_t^Y \quad (1.29)$$

The taxes and subsidy rates will be derived in the solution of the benevolent social planner problem (Ramsey's problem).

1.2.1.7 Exogenous Processes

The model contains three exogenous total factor productivity processes, one in each sector:

$$\ln A_t^i = \rho_{A(i)} \ln A_{t-1}^i + \varepsilon_t^i \quad (1.30)$$

where $\rho_{A(i)}$ governs the persistence of the process, and ε_t^i is an independent and identically distributed zero mean with variance σ^i process, where $i = Y, R, NR$.

1.2.1.8 Market Equilibrium Conditions and Aggregations

The market clearing condition in the non-energy final goods market requires:

$$Y_t = C_t + I_t^Y + I_t^R + I_t^{NR} + AC_t \quad (1.31)$$

The equilibrium conditions in the energy sector require that in both sectors (renewable and non-renewable energy) the households and firms demand for energy equals energy production:

$$E_t^R = E_t^{RC} + E_t^{RY} \quad (1.32)$$

$$E_t^{NR} = E_t^{NRC} + E_t^{NRY} \quad (1.33)$$

Aggregate investment is defined as:

$$I_t = I_t^Y + I_t^R + I_t^{NR} \quad (1.34)$$

And the aggregate capital stock:

$$K_t = K_t^Y + K_t^R + K_t^{NR} \quad (1.35)$$

Finally, total emissions are given as:

$$e_t = e_t^C + e_t^Y \quad (1.36)$$

Next, we describe the decentralized competitive equilibrium.

1.2.2 Decentralized Competitive Equilibrium

Given the stochastic processes ε_t^{AY} , ε_t^{AR} , ε_t^{ANR} and the initial conditions of A_0^Y , A_0^R , A_0^{NR} , Q_0 , X_0 , K_0^Y , K_0^R , K_0^{NR} , the equilibrium competitive is formed by a sequence of prices $\{w_t, r_t^B, r_t^Y, r_t^R, r_t^{NR}, P_t^{RE}, P_t^{NRE}\}_{t=0}^\infty$ and allocations $\{Y_t, C_t, E_t^R, E_t^{RC}, E_t^{RY}, E_t^{NR}, E_t^{NRC}, E_t^{NRY}, L_t, K_t^Y, K_t^R, K_t^{NR}, I_t^Y, I_t^R, I_t^{NR}, T_t, B_t, Q_t, X_t, e_t, e_t^C, e_t^Y, e_t^{row}, AC_t^Y, \mu_t, A_t^Y, A_t^R, A_t^{NR}\}_{t=0}^\infty$ such that:

1. Given the prices, the allocations $\{C_t, E_t^{RC}, E_t^{NRC}, L_t, K_t^Y, K_t^R, K_t^{NR}, I_t^Y, I_t^R, I_t^{NR}, B_t, Q_t, X_t, e_t^C, e_t^Y, e_t^{row}\}_{t=0}^\infty$ solves the problem of households.
2. Given the prices, the allocations $\{Y_t, E_t^{RY}, E_t^{NRY}, L_t, K_t^Y, e_t^Y, AC_t^Y, \mu_t\}_{t=0}^\infty$ solves the problem of firms producing non-energy final goods.
3. Given the prices, the allocations $\{E_t^R, K_t^R\}_{t=0}^\infty$ solves the problem of renewable energy producing firms.
4. Given the prices, the allocations $\{E_t^{NR}, K_t^{NR}\}_{t=0}^\infty$ solves the problem of non-renewable energy producing firms.
5. For each period of time, markets for non-energy final goods, renewable energy, non-renewable energy, labor and capital are in equilibrium. As labor and capital markets are already in equilibrium implicitly, only the equilibrium in the market for non-energy final goods, renewable energy and non-renewable energy, respectively, is as follows:

$$C_t + I_t^Y + I_t^R + I_t^{NR} + AC_t = [1 - (d_2 X_t^2 + d_1 X_t + d_0)] A_t^Y (L_t)^{\alpha_L} (E_t^{RY})^{\alpha_R} (E_t^{NRY})^{\alpha_{NR}} (K_{t-1}^Y)^{\alpha_K} \quad (1.37)$$

$$E_t^{RC} + E_t^{RY} = A_t^R K_{t-1}^R \quad (1.38)$$

$$E_t^{NRC} + E_t^{NRY} = A_t^{NR} K_{t-1}^{NR} \quad (1.39)$$

1.2.3 Optimal Tax Policy - Ramsey Equilibrium

In Ramsey's problem, the benevolent social planner defines government policy and feasible allocation that maximizes (1.1) considering the optimal choices of private agents (equations 1.5-1.10), the pollution evolution equation (1.13) and the quality of the environment (1.14). Thus, given the stochastic processes ε_t^{AY} , ε_t^{AR} , ε_t^{ANR} and the initial conditions of A_0^Y , A_0^R , A_0^{NR} , Q_0 , X_0 , K_0^Y , K_0^R , K_0^{NR} , Ramsey's problem is to choose the competitive equilibrium that maximizes the utility function (1.1)⁸. Therefore, the Ramsey competitive equilibrium is formed by a sequence of allocations $\{Y_t, C_t, E_t^R, E_t^{RC}, E_t^{RY}, E_t^{NR}, E_t^{NRC}, E_t^{NRY}, L_t, K_t^Y, K_t^R, K_t^{NR}, I_t^Y, I_t^R, I_t^{NR}, T_t, B_t, Q_t, X_t, e_t, e_t^C, e_t^Y, e_t^{row}, AC_t^Y, \mu_t, A_t^Y, A_t^R, A_t^{NR}\}_{t=0}^\infty$, a price sequence $\{w_t, r_t^B, r_t^Y, r_t^R, r_t^{NR}, P_t^{RE}, P_t^{NRE}\}_{t=0}^\infty$ and a government policy $\{T_t, B_t, \tau_t^{NRE}, \vartheta_t^{RE}, \tau_t^\epsilon\}_{t=0}^\infty$, such that:

1. Given the prices and government policy, the allocation solves the problem of households, firms of final goods and firms in the energy sector.
2. Given pricing and allocation, government policy satisfies the sequence of government budget constraints (1.29).
3. For each period of time, markets for non-energy final goods, renewable energy, non-renewable energy, labor and capital are in equilibrium.

1.2.4 Calibration

In defining the model parameter values, we follow two strategies: (i) we use values usually employed in the related literature and (ii) we calibrate the parameters to match long run values in the data.

In the first case, [Leal et al. \(2015\)](#) define the discount factor of households as $\beta = 0.98$, the inverse of the intertemporal substitution elasticity of consumption $\varphi = 2$, the degree of persistence of pollution $\phi_x = 0.9979$, the parameters of the mitigation cost function $\theta_1 = 0.0418$ and $\theta_2 = 2.8$ and the coefficients of the pollution damage function. The capital depreciation rate corresponds to $\delta = 0.025$, which gives an annual depreciation rate of 10%, a typical value in the literature.

We follow [Angelopoulos et al. \(2013\)](#) in defining the parameters related to the quality of the environment. For instance, the preference parameters that governs the elasticity of intertemporal substitution of the quality of environment is set to $\eta = 2$, while the relative weight of the environment quality in the households' utility is set to $q = 0.2$. The parameter that governs the persistence of the environmental quality is set to $\phi_q = 0.9$.

⁸We solve the Ramsey problem, finding the optimal policy rates, numerically as in [Economides et al. \(2008\)](#) and [Ljungqvist & Sargent \(2012\)](#). For details about the routine used in Dynare, see [Juillard \(2010\)](#).

Without loss of generality, the steady-state value of the environmental quality index is set to 1.

As for the parameters that governs the elasticity of substitution, we follow [Tumen et al. \(2016\)](#) and define the elasticity between energy and final goods to $\theta_z = 0.4$ and between renewable and non-renewable energy to $\theta_e = 0.5$. We follow [Souza-Sobrinho \(2011\)](#) and define the intertemporal elasticity of substitution of labor to $\omega = 2$. The relative weight of labor in the utility function is set to $l = 0.6$. Finally, the parameter that governs the persistence of total factor productivity shocks is set to 0.95. Table 1.1 presents that parameters values.

Table 1.1: Parameters values

Parameter	Definition	Value
β	Subjective discount factor of households	0.9800
φ	Inverse of the intertemporal substitution elasticity of consumption	2.0000
η	Inverse of the elasticity of intertemporal substitution of the environment	2.0000
ω	Inverse of the elasticity of intertemporal substitution of labor	2.0000
q	Relative weight of the environment quality in the households' utility	0.2000
l	relative weight of the labor in the households' utility	0.6000
s_C	Final goods consumption expenditure in the household consumption basket	0.9000
s_R	Renewable energy in the basket of energy goods	0.4400
θ_z	Substitution elasticity between energy and final goods	0.4000
θ_e	Substitution elasticity between renewable and non-renewable energy	0.5000
δ	Capital depreciation rate	0.0250
Φ	Parameter of the adjustment cost of the investment	10.000
α_L	Labor share in the final goods production function	0.5000
α_R	Renewable energy share in the final goods production function	0.0522
α_{NR}	Non-renewable energy share in the final goods production function	0.0678
ϕ_x	Degree of persistence of pollution	0.9979
γ_x	Elasticity of the quality of the environment with respect to pollution	1.0000
ϕ_q	Degree of persistence of the environmental quality	0.9000
$\bar{Q}$	Steady-state value of the environmental quality index	1.0000
$1 - \gamma^Y$	Elasticity of emissions of the final goods sector in relation to the product	1.0230
$1 - \gamma^C$	Elasticity of households' emissions in relation to non-renewable energy	1.0000
θ_1	Coefficient of the mitigation cost function	0.0418
θ_2	Exponent of the mitigation cost function	2.8000
d_0	Intercept of pollution damage function	-2.97E-03
d_1	Coefficient of pollution damage function	-2.16E-06
d_2	Coefficient of pollution damage function	9.26E-09
ρ_{AY}	Persistence of the productivity shock in the final goods sector	0.9500
ρ_{AR}	Persistence of the productivity shock in the renewable energy sector	0.9500
ρ_{ANR}	Persistence of the productivity shock in the non-renewable energy sector	0.9500

We calibrate the other parameters using data available for Brazil. For the share of the final consumption expenditure in the household consumption basket⁹, $s_C = 0.9$, and the share of renewable energy in the basket of energy goods¹⁰, $s_R = 0.44$, we use the data from the 2008-2009 Household Budget Survey (POF - Pesquisa de Orçamentos Familiares) of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE).

For the output elasticity of emissions in the final goods sector, we set to $\varepsilon_{e,Y} = (1 - \gamma^Y) = 1.0230$ from a linear regression of CO_2 emissions as a function of real GDP. The emissions and GDP data are in annual frequency and correspond to the period between

⁹The expenditures for electricity, domestic gas, urban transportation, gasoline, alcohol and other transportation expenses were used as a proportion of total expenses.

¹⁰Alcohol and electric energy expenditures were used as a proportion of expenditures on the energy basket (electricity, gas, gasoline and alcohol).

1971 and 2016. Gross CO_2 emissions are in tons and are available through the Greenhouse Gas Emission and Removal Estimates System¹¹. Real GDP data are in constant Reais of 2017, available through the Time Series System of the Central Bank of Brazil¹².

For simplicity, we define the elasticity of households' emissions relative to the use of non-renewable energy ($1 - \gamma^C$) to 1, as data on households' emissions are not available.

For the labor share ($\alpha_L = 0.5$) in the final goods production function we use data from the National Accounts of 2014 of IBGE, while for the share of renewable energy ($\alpha_R = 0.0522$) and non-renewable energy ($\alpha_{NR} = 0.0678$), we use the share of secondary energy in the intermediate consumption of GDP (0.12) coming from the National Accounts of 2014 and the share of renewable energy (0.435) and non-renewable energy (0.565) from the National Energy Balance of 2014 of the Ministry of Mines and Energy of Brazil.

1.3 Results

In this section, we first present the solution of the Ramsey's problem discussed in section 1.2.3. Then we present the Impulse Response Functions under the Ramsey policy to productivity shocks in the non-energy final goods sector and in the energy (renewable and non-renewable) sector. Finally, we discuss the results of the welfare analysis comparing the broad environmental policy (presence of the three tax instruments) with alternative policies, which have only one of the tax instruments in isolation, and with the alternative of no tax or subsidy.

1.3.1 Optimal policy

Table 1.2 presents the results from the solution of Ramsey's optimal problem. The results show that the optimal policy imposes positive tax rates on non-renewable energy price and emissions as well as a subsidy on the renewable energy price.

Table 1.2: Optimal tax rates

Variable	Definition	Value
ϑ^{RE}	Subsidy rate on renewable energy price	0.00593
τ^{NRE}	Tax rate on non-renewable energy price	0.02754
τ^e	Emission tax rate	0.00535

As the impact of pollution on production is greater than the cost of mitigating environmental policy, the government adopts a positive tax rate on emissions, imposing a level of mitigation greater than zero for firms ($\mu = 0.12655$), as in Heutel (2012) and Leal et al. (2015). On the other hand, as the use of nonrenewable energy by households and firms is generating a level of emissions that can impact more negatively the production and quality of the environment than increasing the level of welfare of the agents via consumption

¹¹Available in <http://plataforma.seeg.eco.br/total_emission>.

¹²Available in <<https://www3.bcb.gov.br/sgspub>>.

(directly or indirectly through final goods), the government imposes a positive tax rate on the price of this type of energy. Finally, in order for the environmental policy not to reduce significantly the level of consumption of energy and non-energy final goods, the government establishes a subsidy on prices of non-renewable energy, which can substitute the non-clean energy source.

1.3.2 Impulse Response Functions

1.3.2.1 Productivity Shocks

Figure 1.3 shows the responses of the main model variables to productivity shocks specific to the non-renewable energy (orange dashed line) and renewable energy (green solid line) sectors.

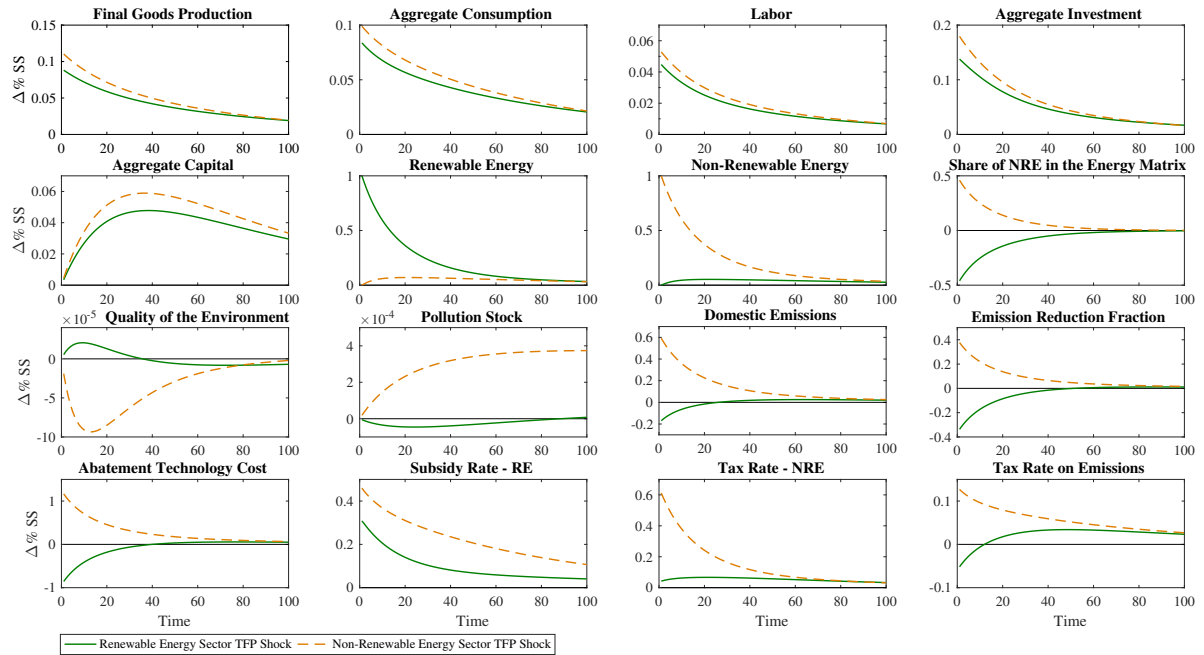
In response to 1% productivity shock in the non-renewable energy sector, the non-renewable energy production increases, while the relative price of non-renewable energy declines (the final good is the numeraire). In response to higher productivity in the non-renewable sector, firms raise their investment and consequently the capital stock in the next period, hence both aggregate investment and aggregate capital stock increase following the productivity shock. Moreover, final goods production and consumption increases. As real wages increases, households increase their labor supply.

Regarding the environmental variables, as the use of non-renewable energy increases, there is an increase in emissions of firms and households, causing the pollution stock to rise and the quality of the environment to decline. As a result, the government imposes raises taxes on emissions and on the price of non-renewable energy in order to offset the harmful effects of higher emissions/pollution on production and on the quality of the environment. In response to government policy, firms increase their level of mitigation, which together with increased production of final goods, increases the expenses with abatement technology. Finally, the government imposes a subsidy on the price of renewable energy, helping to increase the levels of this type of energy, however, not strong enough to make the share of non-renewable energy in the energy matrix cease to increase.

The responses of final goods production, aggregate consumption, labor, aggregate investment and capital stock are all positive in response to productivity shocks in the renewable energy sector. This shock also leads to a decline in the relative price of renewable energy, raising the use of this source of energy in the energy matrix.

As a result of higher renewable use, domestic CO_2 emissions decline as well as the pollution stock, which improves the quality of the environment. This set of positive environmental results causes the impact of pollution on production and the quality of the environment to become low enough for the government to reduce the tax rate on emissions. As a result, firms reduce their level of mitigation and, even with the increase in the production of final goods, the cost with abatement technology reduces. In addition, despite good environmental results, the government keeps its policy of leading the economy

Figure 1.3: Responses to the productivity impulses of the renewable and non-renewable energy sectors



Notes: RE = Renewable Energy; NRE = Non-Renewable Energy; $\Delta\% \text{ SS}$ = Percentage Variation of Steady-State. This figure presents the Impulse Response Functions (IRFs) to a 1% productivity shock. The green solid line displays the IRFs to a productivity shock in the renewable sector under the optimal environmental policy. The orange dashed line represents the IRFs to a productivity shock in the non-renewable non-energy sector under the optimal policy.

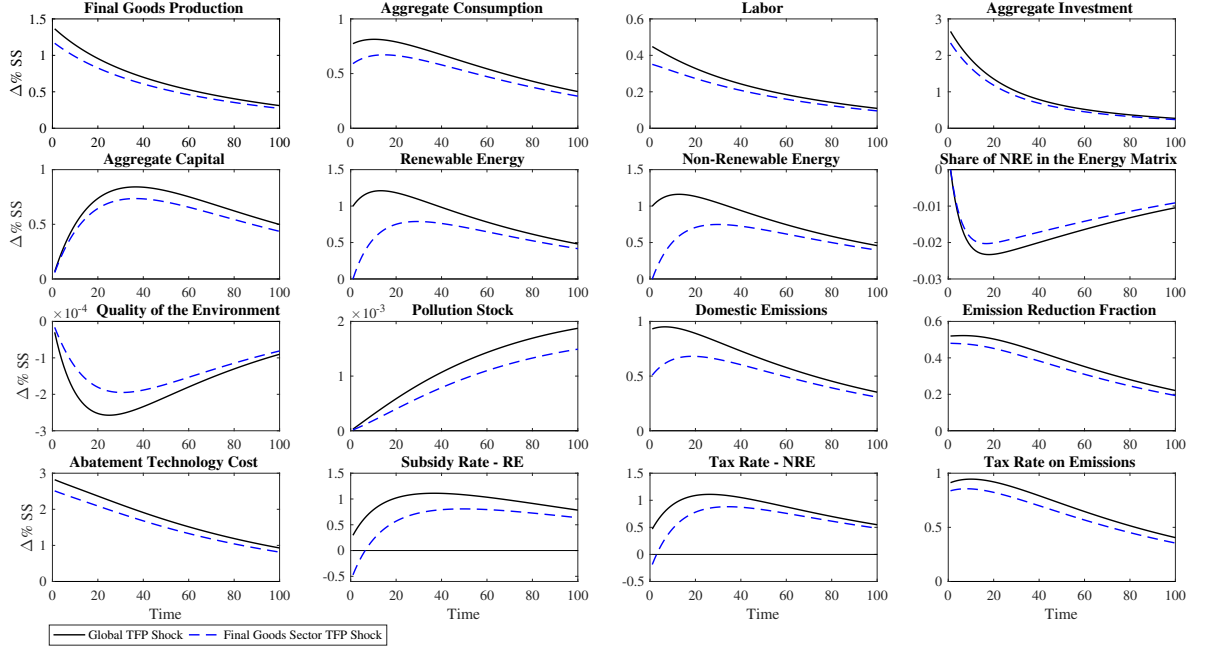
to a “cleaner” energy matrix. Therefore, the tax rate on the price of non-renewable energy and the subsidy on the price of renewable energy increases in response to productivity shocks in the renewable sector. Although, these increases are significantly lower than those following a shock in the non-renewable energy sector.

Figure 1.4 shows the responses to a 1% productivity shocks in the final goods sector (blue dashed line) and an overall productivity shock (black solid line).

As the final goods sector represents a large part of the economy ($\sim 85\%$ of GDP), the responses of the variables to the global productivity shock largely follow the same patterns of the responses to the sector specific productivity shock. Following a productivity shock in the final goods sector (or a global productivity shock), final goods output, aggregate consumption, labor, aggregate investment and aggregate capital stock all increase. The responses are virtually the same when there is a global productivity shock.

As productivity in the final goods sector raises output and consumption, there is an increase in households and final goods firms use of renewable and non-renewable energy, but the increase is slightly higher towards the use of renewable energy, raising its share in the energy matrix. Despite the increase in the use of renewable energy, higher final good output, consumption and non-renewable energy production raise domestic CO_2 emissions, increasing the pollution stock, which deteriorates the quality of the environment. As a result of higher emissions, the government raises the tax rate on emissions. The tax rate

Figure 1.4: Response to the productivity impulses of the global TFP and final goods sector



Notes: RE = Renewable Energy; NRE = Non-Renewable Energy; $\Delta\% \text{ SS}$ = Percentage Variation of Steady-State. This figure presents the Impulse Response Functions (IRFs) to a 1% productivity shock. The black solid line displays the IRFs to a global productivity shock under the optimal environmental policy. The blue dashed line represents the IRFs to a productivity shock in the final goods non-energy sector.

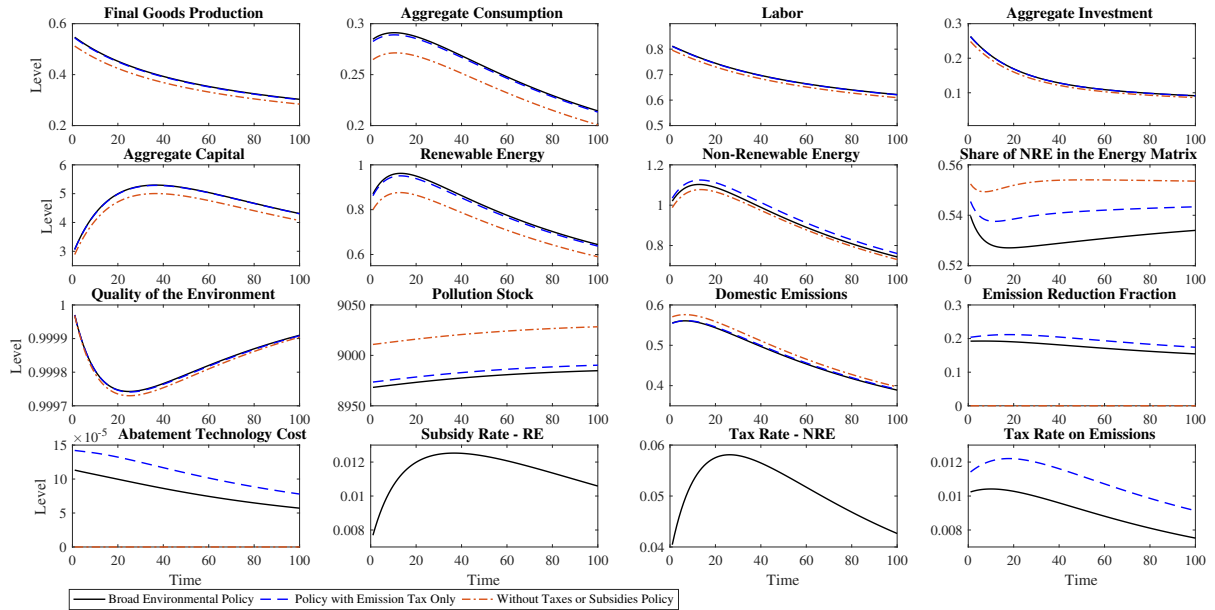
on non-renewable energy first declines and then increases as the use of this source of energy increases. A similar behavior occurs in the subsidy rate on the renewable energy. It first declines and then increases, which helps to raise the share of renewable energy in the domestic energy matrix.

1.3.2.2 Alternative Environmental Policies

In this section, we present the dynamic responses of the main model variables to a global productivity under two policy alternatives: one that includes only emissions tax and the other when no environmental policy is in place. The responses are compared with the broad environmental policy (our baseline model). Under the emissions tax only, we set the tax and subsidy rates in the energy sector to zero and the emission tax rate as in the baseline model. On the other hand, under the no environmental policy alternative, we set all environmental policy rates to zero. Figure 1.5 presents the results under the two policy alternatives along with our baseline model. The black solid line displays our baseline broad environmental policy, while the blue dashed line represents the responses under the emissions tax rate only alternative. Finally, the red dotted line denotes the responses under the non-environmental policy alternative.

The results show that, in response to a global productivity shock, under the three alternative policies, final goods output, aggregate consumption, labor, investment and capital stock display similar responses (all increase). However, under the non-environmental pol-

Figure 1.5: Responses to the global TFP impulses for different environmental policies



Note: RE = Renewable Energy and NRE = Non-Renewable Energy. This figure presents the Impulse Response Function to a 1% productivity shock in all sectors. The black solid line displays our baseline broad environmental policy (optimal policy). The blue dashed line represents the responses under the emissions tax rate only alternative. The red dotted line denotes the responses under the non-environmental policy alternative.

icy case, the responses of these variables are smaller in magnitude. In addition, in the absence of environmental policy, firms do not have incentives to mitigate emissions and, therefore, do not spend anything with abatement technology. In this way, even using a lower level of non-renewable energy, the economy generates more emissions than in other cases, thus presenting higher levels of pollution and lower levels of environmental quality.

On the other hand, in the case of the policy that only uses the tax on the emissions, economic results are observed very similar to those portrayed in the case of the broad environmental policy. But then, in the energy sector, the more restricted environmental policy is compatible with a higher level of non-renewable energy and a lower level of renewable energy when compared to the broad environmental policy, this is due to the fact that there is no incentive capable of leading the energy matrix toward “cleaner” sources. Thus, when one observes the environmental question, it can be seen that in the case of restricted policy, even if firms spend more on abatement technology and present higher levels of mitigation, emission levels are higher, generating higher levels of pollution and a slight drop in the quality of the environment.

1.3.3 Welfare Analysis

In this section, we evaluate the welfare results of five different environmental policy alternatives. The first one refers to the broad environmental policy proposal, which has the three tax instruments discussed previously (optimal Ramsey policy). This case will serve as the baseline policy. In the second policy, the government only adopts the emission

tax; in the third, only the tax on the price of non-renewable energy; in the fourth, only the subsidy on the price of renewable energy; and, lastly, in the latter, the government does not use any of the previous taxes or subsidies.

Comparative evaluation consists of computing the loss of welfare of alternative environmental policies relative to the broad environmental policy (Schmitt-Grohé & Uribe, 2007). To do so, consider that the broad environmental policy is denoted by w and that the alternative policy is denoted by a . We define the welfare associated with Ramsey's equilibrium, relative to the broad policy in period 0 as:

$$V_0^w = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U \left[Z(C_t^w, E_t^w), Q_{t-1}^w, L_t^w \right]$$

where, C_t^w , E_t^w , Q_{t-1}^w and L_t^w denote respectively the consumption of final goods, energy consumption, quality of the environment and hours in the case of the broad policy.

Similarly, the conditional welfare associated with the alternative policy as:

$$V_0^a = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U \left[Z(C_t^a, E_t^a), Q_{t-1}^a, L_t^a \right]$$

where, C_t^a , E_t^a , Q_{t-1}^a and L_t^a denote respectively the consumption of final goods, energy consumption, quality of the environment and hours worked in the case of the alternative policy.

Finally, define λ as the welfare cost of an alternative policy distinct from the optimal environmental policy. Therefore, λ is defined as the fraction of consumption of final goods that a household would be willing to give up with the adoption of broad policy to be as well under alternative policy as it would be under the optimal policy. Thus, the implicit formal definition of λ is:

$$V_0^a = E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t U \left[Z((1 - \lambda)C_t^w, E_t^w), Q_{t-1}^w, L_t^w \right]$$

In addition, we compute the mean values of final goods consumption, pollution stock, and emissions for 100 periods after the occurrence of a global productivity shock. Table 1.3 presents the results.

Table 1.3: Welfare analysis for different environmental policies

Environmental Policy	$100 \times \lambda$	Average Consumption	$\Delta\%$	Average Pollution	$\Delta\%$	Average Emissions	$\Delta\%$
Optimal policy	-	0.2534	-	8978.41	-	0.4770	-
Emission tax only	0.55	0.2518	-0.6667	8983.76	0.0596	0.4791	0.4302
Only with tax on P^{NRE}	4.15	0.2415	-4.6925	9006.64	0.3144	0.4845	1.5645
Only with subsidy on P^{RE}	5.58	0.2373	-6.3666	9021.24	0.4770	0.4884	2.3894
Without taxes or subsidies	5.71	0.2369	-6.5332	9021.55	0.4805	0.4896	2.6322

Nota: $\Delta\%$ = Percentage change of the average of the variable in the case of the alternative policy in comparison to the average in the case of the broad policy.

The results demonstrate that the broad (optimal) environmental policy achieves higher

levels of welfare than all other policy alternatives. The policy that uses only an emissions tax is the one that presents results closer to the Ramsey optimal policy. Under this alternative, households would be willing to forego approximately 0.55% of their final goods consumption under the optimal policy to be as well as it would be in the case of the policy that uses only emissions taxes. In addition, it can be seen that the average consumption is slightly lower than 0.6% in the case of alternative policy in the presence of a global productivity shock. Besides the levels of pollution and emissions are slightly higher (0.06% in pollution stock and approximately 0.43% in emissions). The other policies present worse results in terms of welfare and in the levels of consumption, pollution and emissions. The alternative where the government does not use any taxes or subsidies is the worst alternative. Households would forgo more than 5.7% of the consumption of final goods so that they are as well in the policy without taxes as they would be under the optimal policy. Moreover, average consumption would be lower by 6.5%, while pollution stock would be higher by 0.48% and emissions by 2.6%.

Altogether these results highlight the importance of designing a broad environmental(fiscal) policy that includes in addition to taxes on emissions, a full set of taxes and subsidies in the energy sector.

1.4 Conclusion

In this paper, we discuss the effects of the adoption of a broad optimal environmental policy, which considers, in addition to taxes on emissions, a full set of taxes and subsidies in the energy sector, on the business cycles. For this purpose, we develop an environmental dynamic stochastic general equilibrium (E-DSGE) model augmented to include an energy sector featuring non-renewable and renewable endogenous energy production. We use the model to find the optimal trajectories of the environmental policy instruments and analyze the dynamic behavior of the model variables in response to productivity shocks in the energy (renewable and non-renewable) and non-energy sectors. Finally, we perform a welfare analysis of different policy alternatives.

First, we show that in the optimal environmental policy, tax and subsidy rates are positive and pro-cyclical, except for the tax on emissions in the presence of a productivity shock in the renewable energy sector. Second, under the optimal policy, productivity shocks in the final goods sector and in the renewable energy sector reduce the use of non-renewable energy. Therefore, having access to alternative sources of (renewable) energy allows households and firms to replace non-renewable (polluting) energy sources for renewable (cleaner) energy sources. Finally, under the broad(optimal) policy, households achieve higher levels of consumption and welfare. Besides, the optimal policy leads to lower levels of emissions and pollution stock, and higher levels of environmental quality. Again this is possible as they have access to alternative sources of energy.

To the best of our knowledge, this is the first paper to use an E-DSGE model featuring

endogenous energy production (non-renewable and renewable) to discuss the effects of the adoption of a comprehensive optimal environmental policy on the business cycles. As we have shown, this is important for assessing the business cycles and the welfare effects of government policies, according to recent discussions at international climate conferences. In addition, it highlights the environmental consequences of adopting or not an optimal and comprehensive environmental (fiscal) policy.

Choques Energéticos e Ambientais em um Modelo E-DSGE

2.1 Introdução

No início do nosso século foram observadas novas elevações nos preços do petróleo, tão bruscas quanto as ocorridas na década de 1970¹, mas com causas e consequências completamente diferentes² (Kilian, 2014). Consequentemente, a literatura econômica formatou uma grande agenda de pesquisa ao redor deste tema, com o objetivo entender quais os efeitos dos choques do petróleo nas economias de diferentes países, utilizando metodologias empíricas (Peersman & Robays, 2012; Kilian & Murphy, 2012; Cunado et al., 2015) e teóricas (Medina & Soto, 2005; Bodenstein et al., 2012; Forni et al., 2015; Huynh, 2016).

Mais recentemente, problemas de natureza ambiental também passaram a fazer parte do leque de questões investigadas por estudos energéticos. Desde então, a ligação entre as dimensões ambiental e energética vem ganhando força e muitos autores passaram a considerá-la em seus trabalhos. Os principais objetivos desses estudos são entender como choques energéticos e políticas ambientais afetam o meio ambiente e as principais variáveis macroeconômicas dos países estudados (Tumen et al., 2016; Blazquez et al., 2017; Argentiero et al., 2018; Niu et al., 2018).

Na prática, o que se observa é que alguns países têm buscando desenhar políticas que induzam a substituição de fontes energéticas fósseis por fontes renováveis mais limpas, buscando reduzir os efeitos negativos das emissões de gases poluentes. Tal fato fez com que

¹De acordo com os dados do *U.S. Energy Information Administration (EIA)*, no primeiro choque do petróleo (1972-1974), os preços reais cresceram 229,67%. No segundo choque (1977-1981), os preços reais cresceram 70,25%. Enquanto que a elevação real dos preços do petróleo no início deste século (2001-2008) foi de 246,20%.

²Os choques nos preços do petróleo da década de 1970 tiveram origem com o processo de restrição de oferta guiado pelos países da Organização dos Países Produtores de Petróleo (OPEP). Por outro lado, de acordo com Kilian (2009), grande parte das flutuações nos preços do petróleo da década de 2000 podem ser explicadas por choques de demanda.

outras fontes de energia, além do petróleo, passassem a ter mais relevância na composição das matrizes energéticas pelo mundo, fazendo com que o comportamento dos preços dessas novas possibilidades energéticas tenham também que ser considerados. Entretanto, a maior parte dos modelos que estudam os choques no preço da energia consideram o setor energético com apenas uma fonte, normalmente o petróleo.

Este estudo analisa os impactos econômicos e ambientais dos choques nos preços internacionais de diferentes fontes energéticas e não apenas do petróleo. Para isso, utilizamos um modelo ambiental de equilíbrio geral dinâmico e estocástico (E-DSGE) de economia aberta com um setor energético diversificado. Para efeitos comparativos, calibramos um modelo que considera apenas o petróleo como fonte energética e confrontamos esses resultados com os encontrados na nossa proposta, que possui o setor energético diversificado.

Ademais, como exercício complementar, analisamos outros dois tipos choques energéticos padrões na literatura, os choques negativos na oferta energética e os choques na demanda doméstica por energia. Além disso, analisamos como choques nas alíquotas da política ambiental e nas emissões geradas por outros países afetam as variáveis investigadas.

Calibramos o modelo com os dados do Brasil. Nesse país, o percentual de petróleo na matriz energética vem se reduzindo ao longo dos anos. No início da década de 1970, esse combustível fóssil correspondia a mais de 50% da oferta interna de energia e atingiu seu menor valor (36,5%) em 2016. Entretanto, a substituição do petróleo na matriz energética não foi realizada por outra fonte de igual importância, mas sim, pelo surgimento de uma espécie de portfólio energético composto por várias fontes de energia renováveis e não renováveis. O portfólio energético do Brasil possui quatro fontes que se destacam e que, em conjunto, correspondem por cerca de 79% da oferta interna de energia do país, são elas: o petróleo e seus derivados (36,5%), os derivados da cana-de-açúcar (17,5%), a energia hidráulica (12,6%) e o gás natural (12,3%)³.

No nosso modelo, consideramos duas premissas em relação aos preços das fontes energéticas: 1) no caso em que a energia possui relação com o mercado externo, consideramos que os preços são dados exogenamente. Nestes casos, consideramos que os choques domésticos não possuem intensidade suficiente para influenciar o mercado energético internacional, mas que os preços praticados nesse mercado podem ser responsáveis por uma parcela significativa das flutuações da economia doméstica; 2) no caso em que o setor externo não tem influência na produção da fonte energética, reconhecemos que os preços são endógenos em relação aos agregados macroeconômicos domésticos, como já vem sendo utilizado em grande parte dos modelos que tratam dos choques energéticos em economias grandes (Forni et al., 2015; Huynh, 2016)

Nossos resultados mostram que os choques nos preços internacionais da energia aumentam o produto agregado, o nível de investimento e geram um superavit na balança

³Os dados são do Balanço Energético Nacional do Ministério de Minas e Energia do Brasil de 2016.

comercial. Além disso, esse tipo de choque leva à substituição de combustíveis fósseis por energia renovável, fazendo com que os níveis de emissão de carbono e de estoque de poluição diminuam. Ademais, quando comparamos os resultados do modelo com o setor energético diversificado com os resultados do modelo mais restrito (com uma única fonte energética), observamos que, como não há possibilidade de substituir a fonte energética no modelo restrito, a economia é atingida de forma muito mais incisiva, provocando uma variabilidade bem mais intensa nas respostas de todas as variáveis analisadas.

Além disso, mostramos que os choques negativos de oferta energética são economicamente recessivos e geram mais poluição ambiental quando os preços das energias primárias renováveis aumentam e menos poluição quando são os preços dos combustíveis fósseis que sobem. Ademais, mostramos que os choques na demanda por energia geram aumento no produto agregado quando são provenientes do setor de bens *tradables* e redução do produto quando são provenientes do setor de bens *nontradable*. Mas, em ambos os casos, fazem a economia utilizar mais combustíveis fósseis e geram aumento nas emissões de carbono.

Esse artigo está relacionado com dois ramos da literatura. O primeiro é a literatura que estuda os impactos dos choques energéticos utilizando modelos DSGE. Um exemplo é o estudo de [Medina & Soto \(2005\)](#) que analisa como a política monetária e outras variáveis macroeconômicas reagem a um choque no preço do petróleo. Por outro lado, [Bodenstein et al. \(2012\)](#) mostram como o Banco Central americano reage à choques no preço do petróleo que são proveniente de fontes distintas. Outro exemplo é o trabalho de [Forni et al. \(2015\)](#), que analisa o impacto dos choques de petróleo nas variáveis macroeconômicas da área do Euro usando um modelo DSGE de dois países. Mais recentemente, [Huynh \(2016\)](#) analisou os mecanismos de transmissão e as características de diferentes fontes de choques nos preços da energia em termos de impacto no ciclo econômico.

O segundo ramo utiliza modelos E-DSGE para estudar as relações entre a economia, o setor energético e o meio ambiente. Entretanto, os objetivos dessa literatura não são completamente convergentes. O trabalho de [Tumen et al. \(2016\)](#), por exemplo, analisa como impostos sobre o uso de combustíveis fósseis e sobre emissões de carbono afetam a economia de um país que armazena petróleo de forma especulativa. Por outro lado, o trabalho de [Blazquez et al. \(2017\)](#) analisa os impactos dos choques energéticos no ciclo econômico e nas emissões de carbono de uma economia importadora de energia. Mais recentemente, [Argentiero et al. \(2018\)](#) avaliaram a eficácia de políticas ambientais que induzem o uso de energias renováveis. Enquanto que [Niu et al. \(2018\)](#) analisaram o impacto de políticas fiscais ambientais nas emissões de carbono e na substituição de combustíveis fósseis por fontes limpas.

A ligação entre esses dois ramos da literatura ainda é bastante escassa. Este estudo contribui com a tarefa de juntar essas ideias ao analisar os impactos econômicos e ambientais de choques nos preços de diversas fontes energéticas, sem se restringir a um modelo

que possui apenas o petróleo como fonte energética. Com isso, ampliamos o nosso entendimento sobre os efeitos dos choques energéticos das novas fontes que passaram a ter importância nas matrizes energéticas de vários países nos últimos anos. Além disso, desenvolvemos um modelo capaz de mostrar como choques ambientais impactam a economia e o bem-estar dos agentes.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: na próxima seção, apresentamos o modelo. Na seguinte, discutimos as estratégias de calibração dos parâmetros. Na quarta seção, realizamos a apresentação e análise dos resultados. Na última seção, expomos as conclusões.

2.2 Modelo

Construímos um modelo ambiental, dinâmico e estocástico de equilíbrio geral (E-DSGE) para uma pequena economia aberta com um setor energético diversificado. O modelo é composto por famílias, firmas de bens finais, firmas do setor energético, governo, estrutura ambiental e setor externo.

As famílias consomem (bens finais não energéticos e energia), poupam, ofertam trabalho, além de serem proprietárias das firmas. O setor produtor de bens finais não energéticos é composto por dois tipos de firmas, as que além de ofertarem seus produtos no mercado doméstico, transacionam com o mercado internacional (*tradables*) e as que transacionam apenas no mercado doméstico (*nontradables*).

Por sua vez, o setor energético é composto por quatro setores produtores de energia primária (hidráulica, derivada da cana-de-açúcar, petróleo e gás natural) e duas refinarias que transformam essa energia primária em energia final (renovável e não renovável) própria para ser utilizada pelas firmas de bens finais e pelas famílias. O subsetor de energia primária não renovável (petróleo e gás natural) está conectado ao mercado internacional, estando sujeito a choques nos preços dessas *commodities* energéticas.

Consideramos que, ao utilizarem energia não renovável, as famílias e firmas emitem gases poluentes que prejudicam a qualidade do meio ambiente e causam danos à produção de bens. Com o objetivo de melhorar o resultado econômico, o governo impõe uma política ambiental, cobrando impostos sobre emissões e utilização de energia não renovável e concedendo subsídios à utilização de energia renovável. Os agentes buscam otimizar suas escolhas em resposta à política do governo investindo na geração de tecnologias de abatimento, capazes de reduzir a relação emissão/produto para um dado nível de utilização de energia não renovável (fonte primária da poluição).

2.2.1 Famílias

A economia é habitada por um grande número de famílias que consomem uma cesta de bens, Z_t , composta pela cesta de consumo de bens finais não energéticos (C_t) e pela cesta de consumo de energia (E_t^C), de acordo com o seguinte agregador com elasticidade de substituição constante (CES):

$$Z_t = \left[(1 - s_C)(E_t^C)^{\frac{\theta_z - 1}{\theta_z}} + s_C(C_t)^{\frac{\theta_z - 1}{\theta_z}} \right]^{\frac{\theta_z}{\theta_z - 1}}$$

onde θ_z é a elasticidade de substituição intertemporal entre a cesta de consumo de energia e a cesta de consumo de bens finais não energéticos e s_C indica a parcela de gastos com a cesta de bens finais não energéticos no consumo das famílias.

A cesta de bens finais não energéticos é composta por bens negociáveis no comércio internacional (*tradables*), C_t^T , e bens não negociáveis no comércio internacional (*nontradables*), C_t^{NT} , de acordo com:

$$C_t = \left[(1 - s_T)(C_t^{NT})^{\frac{\theta_c - 1}{\theta_c}} + s_T(C_t^T)^{\frac{\theta_c - 1}{\theta_c}} \right]^{\frac{\theta_c}{\theta_c - 1}}$$

onde θ_c é a elasticidade de substituição intertemporal entre o consumo de bens *tradables* e o consumo de bens *nontradables* e s_T indica a parcela de gastos com bens *tradables* na cesta de bens finais não energéticos das famílias.

A cesta energética é composta por consumo de energia renovável (E_t^{RC}) e consumo de energia não renovável (E_t^{NRC}), de acordo com:

$$E_t^C = \left[(1 - s_R)(E_t^{NRC})^{\frac{\theta_e - 1}{\theta_e}} + s_R(E_t^{RC})^{\frac{\theta_e - 1}{\theta_e}} \right]^{\frac{\theta_e}{\theta_e - 1}}$$

onde θ_e é a elasticidade de substituição intertemporal entre o consumo de energia renovável e o consumo de energia não renovável e s_R indica a parcela de gastos com energia renovável na cesta de bens energéticos das famílias.

A preferência da família representativa é dada por:

$$E_0 \sum_{t=0}^{\infty} \beta^t \left\{ \frac{[Z_t - H(L_t^T, L_t^{NT})]^{1-\varphi}}{1 - \varphi} + q \frac{(Q_{t-1})^{1-\omega}}{1 - \omega} \right\} \quad (2.1)$$

onde, β é o fator de desconto subjetivo das famílias; Z_t é a cesta agregada de consumo, discutida anteriormente; Q_{t-1} é a qualidade do meio ambiente no final do período $t - 1$; q é o peso dado à qualidade do meio ambiente relativo aos outros fatores que compõem a

utilidade das famílias; φ e ω são coeficientes de aversão ao risco; e, $H(L_t^T, L_t^{NT})$ é:

$$H(L_t^T, L_t^{NT}) = l \frac{(L_t^T)^{1-\psi^T}}{1-\psi^T} + l \frac{(L_t^{NT})^{1-\psi^{NT}}}{1-\psi^{NT}}$$

em que, L_t^T , L_t^{NT} são as ofertas de horas de trabalho que as famílias disponibilizam, respectivamente, para os setores de *tradable* e *nontradable*; enquanto que, l é o peso dado ao tempo de lazer na utilidade das famílias, considerando que as famílias são dotadas de uma unidade de tempo que pode ser usado para trabalho ou lazer. Enquanto que ψ^T , ψ^{NT} são as elasticidades Frisch da oferta de trabalho para os respectivos setores listados anteriormente.

Assim, a família representativa escolhe os níveis de consumo de bens finais não energéticos, energia, oferta de trabalho, endividamento e investimento em capital para maximizar (2.1) sujeito à seguinte restrição orçamentária:

$$\begin{aligned} C_t^T + P_t^{NT} C_t^{NT} + (1 - \vartheta_t^{ER}) P_t^{ER} E_t^{RC} + (1 + \tau_t^{ENR}) P_t^{ENR} E_t^{NRC} + \sum_j I_t^j + (1 + r_{t-1}^D) D_{t-1} \\ = D_t + \sum_i (w_t^i L_t^i) + \sum_j (r_t^j K_{t-1}^j) + P_t^O O_t^Y + P_t^N N_t^Y + T_t + \Pi_t \end{aligned} \quad (2.2)$$

para $i = T, NT$, que são os setores *tradable* e *nontradable*; e $j = T, NT, H, S$, que além desses, inclui os setores de energia primária hidráulica e derivada da cana-de-açúcar, respectivamente.

As variáveis P_t^{NT} , P_t^{ER} e P_t^{ENR} representam, respectivamente, os preços reais dos bens *nontradables*, da energia renovável e da energia não renovável, considerando que os preços dos bens *tradables* são o numerário da economia. Por sua vez, ϑ_t^{ER} e τ_t^{ENR} são as alíquotas de subsídio sobre P_t^{ER} e imposto sobre P_t^{ENR} , respectivamente. Já, I_t^j é o montante de investimento em capital do setor j . Por sua vez, D_t é endividamento em títulos internacionais e r_{t-1}^D , é a taxa de juros enfrentada pela economia doméstica nos mercados financeiros internacionais, w_t^i é a renda proveniente do trabalho no setor i , K_{t-1}^j é o estoque de capital no fim do período $t-1$ no setor j , r_t^j são as rendas do capital para o setor j . Já P_t^O e P_t^N são os preços do petróleo e do gás natural, enquanto que O_t^Y e N_t^Y são as dotações domésticas destas fontes energéticas. Por fim, T_t e Π_t são, respectivamente, as transferências *lump-sum* feitas pelo governo para as famílias e os lucros distribuídos pelas diversas firmas da economia aos seus acionistas.

A evolução do capital está sujeita a um custo de ajustamento quadrático, de acordo com:

$$I_t^j = K_t^j - (1 - \delta) K_{t-1}^j + \frac{\Phi}{2} (K_t^j - K_{t-1}^j)^2 \quad (2.3)$$

Onde, δ é a taxa de depreciação do capital e Φ é um parâmetro que captura o custo de

ajustamento.

Portanto, o problema das famílias consiste em maximizar a utilidade intertemporal descontada (2.1) sujeito à restrição orçamentária (2.2) e a lei de evolução do capital (2.3).

2.2.2 Estrutura Ambiental

A estrutura ambiental do modelo obedece a seguinte lógica: a utilização de energia não renovável, tanto pelas firmas como pelas famílias, é a fonte primária de emissões domésticas de poluentes⁴. Esta, por sua vez, é gerada tanto pelas emissões domésticas quanto pelas emissões provenientes de outros países.

No modelo, a poluição gera danos à produção dos bens finais (Heutel, 2012) e também reduz a qualidade do meio ambiente local, afetando diretamente a saúde dos agentes. Esse efeito é refletido pela redução da utilidade das famílias (Angelopoulos et al., 2013).

As emissões domésticas totais (e_t) são dadas pela soma das emissões geradas no consumo das famílias (e_t^C) e na produção de bens finais não energéticos dos setores *tradable* (e_t^T) e *nontradable* (e_t^{NT}), como segue:

$$e_t = e_t^C + e_t^T + e_t^{NT}$$

As emissões geradas pelo consumo de energia não renovável pelas famílias (e_t^C) são dadas por:

$$e_t^C = (E_t^{NRC})^{1-\gamma^C} \quad (2.4)$$

onde $(1 - \gamma^C)$ é a elasticidade das emissões provenientes do consumo em relação à energia não renovável consumida pelas famílias.

Pelo lado das firmas, o modelo captura a ideia de que as emissões são um subproduto da produção de bens, que depende diretamente da intensidade do uso de energia não renovável. Portanto, para um mesmo nível de produção, as emissões serão tanto maiores quanto maior for, proporcionalmente, o uso de energia não renovável, como segue:

$$e_t^i = (1 - \mu_i) \left(\frac{E_t^{NRi}}{E_t^{NRi} + E_t^{Ri}} \right) (Y_t^i)^{1-\gamma^i} \quad (2.5)$$

onde, μ_t^i é a fração que as firmas decidem reduzir das emissões, dados a política ambiental e o custo de abatimento; E_t^{Ri} e E_t^{NRi} são, respectivamente, a utilização de energia renovável e não renovável na produção de bens finais não energéticos (Y_t^i); e, $(1 - \gamma^i)$ é a elasticidade das emissões provenientes da produção de bens finais em relação ao produto. Em todos os casos o subscrito $i = T, NT$ define que a informação é válida para os setores *tradable* e *nontradable*.

⁴Note que as firmas produtoras de bens finais e as famílias também podem utilizar energia renovável, que não gera emissões.

Por sua vez, a evolução do estoque de poluição (X_t) no final do período t é ditada pela seguinte equação:

$$X_t = \phi_x X_{t-1} + e_t + e_t^{row} \quad (2.6)$$

onde, ϕ_x mensura o grau de persistência da poluição e e_t^{row} denota as emissões do resto do mundo.

Por fim, como indicado na equação (2.1), a utilidade dos agentes é afetada pela qualidade do meio ambiente disponível no início de cada período. À despeito da sua importância, nós assumimos uma forma reduzida para descrever sua evolução ao longo do tempo, conforme a seguir:

$$Q_t = (1 - \phi_q) \bar{Q} + \phi_q Q_{t-1} - \gamma_x (\ln X_t - \ln X_{t-1}) \quad (2.7)$$

onde, $\bar{Q}$ corresponde à qualidade do meio ambiente no estado estacionário; o parâmetro ϕ_q mede o grau de persistência da qualidade do meio-ambiente; $(\ln X_t - \ln X_{t-1})$ corresponde à taxa de crescimento do estoque de poluição; e, γ_x denota a elasticidade da qualidade do meio ambiente com respeito ao crescimento do estoque de poluição.

2.2.3 Setor Energético

O setor energético é composto por quatro subsetores produtores de energia primária e duas refinarias que transformam essa energia primária em energia final. Uma das refinarias produz energia renovável, empacotando as energias primárias renováveis, que são a energia hidráulica e a energia derivada da cana-de-açúcar, enquanto que a segunda refinaria produz energia não renovável, utilizando para isso petróleo e gás natural, que podem ser comprados no mercado doméstico ou importadas de outros países.

2.2.3.1 Energia Primária

As produções de energia hidráulica (H_t) e de energia derivada da cana-de-açúcar (S_t) são realizadas apenas domesticamente, e, por simplificação, utilizam apenas capital como insumo. As funções de produção utilizadas são lineares e idênticas, como pode ser visto a seguir:

$$H_t = A_t^H K_{t-1}^H \quad (2.8)$$

$$S_t^Y = A_t^S K_{t-1}^S \quad (2.9)$$

Onde A_t^H e A_t^S representam choques estacionários de eficiência do capital.

Por outro lado, as produções domésticas de petróleo (O_t^Y) e do gás natural (N_t^Y) são dadas através de dotações pertencentes às famílias. Essas fontes energéticas podem ser utilizadas domesticamente nas refinarias de energia não renováveis ou podem ser ex-

portadas para outros países. Além disso, quando as produções domésticas dessas fontes primárias não forem suficientes, as refinarias podem importar tais fontes de outros países. Portanto, as balanças comerciais destas duas *commodities* energéticas são dadas por:

$$TB_t^O = P_t^O(O_t^Y - O_t^H) \quad (2.10)$$

$$TB_t^N = P_t^N(N_t^Y - N_t^H) \quad (2.11)$$

onde, TB_t^O e TB_t^N são os resultados das balanças comerciais do petróleo e do gás natural, respectivamente; P_t^O e P_t^N são seu preços; e, O_t^H e N_t^H são as utilizações domésticas dessas fontes realizadas pelas refinarias de energia não renováveis.

2.2.3.2 Refinarias

As refinarias utilizam uma tecnologia de produção CES para mesclar as energias primárias com o objetivo de produzir as energias renováveis e não renováveis utilizadas pelas famílias e firmas de bens finais não energéticos. As refinarias que produzem energia renovável utilizam a energia hidráulica e a energia derivada da cana-de-açúcar como insumos de produção, como segue:

$$E_t^R = \left[(1 - s_H)(N_t)^{\frac{\theta_{ER}-1}{\theta_{ER}}} + s_H(H_t)^{\frac{\theta_{ER}-1}{\theta_{ER}}} \right]^{\frac{\theta_{ER}}{\theta_{ER}-1}} \quad (2.12)$$

onde, s_H e θ_{ER} correspondem, respectivamente, a parcela de energia hidráulica na produção de energia renovável e a elasticidade de substituição entre as energias primárias hidráulica e derivada da cana-de-açúcar.

Portanto, o problema das refinarias produtoras de energia renovável consiste em escolher os níveis de insumo (energias hidráulica e derivada da cana-de-açúcar), restritas pela função de produção, para maximizar a função de lucro, descrita a seguir:

$$\Pi_t^R = P_t^{ER} E_t^R - P_t^H H_t - P_t^S S_t \quad (2.13)$$

Onde, P_t^H e P_t^S são os preços das energias primárias hidráulica e derivada da cana-de-açúcar, respectivamente.

Por outro lado, as refinarias que produzem energia não renovável utilizam petróleo e gás natural:

$$E_t^{NR} = \left[(1 - s_O)(S_t)^{\frac{\theta_{ENR}-1}{\theta_{ENR}}} + s_O(O_t)^{\frac{\theta_{ENR}-1}{\theta_{ENR}}} \right]^{\frac{\theta_{ENR}}{\theta_{ENR}-1}} \quad (2.14)$$

onde, s_O é a parcela de petróleo na produção de energia renovável e θ_{ENR} é a elasticidade de substituição entre o petróleo e o gás natural.

Portanto, as refinarias produtoras de energia não renovável escolhem os níveis de

petróleo e gás natural, restritas pela tecnologia de produção, para maximizar a seguinte função de lucro:

$$\Pi_t^{NR} = P_t^{ENR} E_t^{NR} - P_t^O O_t^H - P_t^N N_t^H \quad (2.15)$$

2.2.4 Setor de Bens Finais

O setor de bens finais é composto por dois tipos de firmas: as firmas *tradables*, que produzem bens comercializáveis no mercado internacional e domesticamente; e, as firmas *nontradables*, que produzem apenas para o mercado doméstico. Em ambos os casos utilizam capital, trabalho e energia como insumos de produção.

Os bens finais *tradables* e *nontradables* são produzidos respeitando a seguinte tecnologia de produção Cobb-Douglas, respectivamente:

$$Y_t^i = d(x_t) A_t^i (L_t^i)^{\alpha_{Li}} (E_t^{Ri})^{\alpha_{Ri}} (E_t^{NRi})^{\alpha_{NRi}} (K_{t-1}^i)^{\alpha_{Ki}} \quad (2.16)$$

para $i = T, NT$, setores *tradables* e *nontradables*, respectivamente. Logo, $d(x_t) = [1 - (d_2 X_t^2 + d_1 X_t + d_0)]$ representa a função de dano à produção proveniente da poluição⁵; A_t^i representa a produtividade total dos fatores dos setores i ; enquanto que, α_{Li} , α_{Ri} , α_{NRi} e α_{Ki} são, respectivamente, os pesos do trabalho, da energia renovável, da energia não renovável e do capital na produção de bens finais nos setores i . A função de produção exibe retornos constantes a escala.

O problema das firmas do setor de bens finais é um pouco mais complexo que o das firmas do setor energético, pois, além de escolherem os níveis dos insumos trabalho, energia renovável, energia não renovável e capital, dados os seus respectivos preços, devem decidir qual o nível de emissões que pretendem reduzir (μ_t^i), dados a política ambiental do governo e a seguinte função de custo de abatimento:

$$AC_t^i = Y_t^i \theta_1 (\mu_t^i)^{\theta_2} \quad (2.17)$$

onde, θ_1 mede o menu de alternativas tecnológicas existentes e θ_2 mostra o grau de não linearidade nos custos para cortes de emissões mais profundos. Esta função é retirada de Nordhaus (2008).

Portanto, as firmas buscam definir o nível de redução das emissões e os níveis de cada um dos insumos que maximizam a seguinte função lucro:

$$\Pi_t^i = Y_t^i - w_t^i L_t^i - r_t^i K_{t-1}^i - (1 - \vartheta_t^{ER}) P_t^{ER} E_t^{Ri} - (1 - \tau_t^{ENR}) P_t^{ENR} E_t^{NRi} - \tau_t^e e_t^i - AC_t^i \quad (2.18)$$

onde, w_t^i , r_t^i , P_t^{ER} e P_t^{ENR} são os preços dos insumos trabalho, capital, energia renovável e

⁵A função dano à produção segue Heutel (2012).

energia não renovável, respectivamente; e, ϑ_t^{ER} , τ_t^{ENR} e τ_t^e são as alíquotas da política ambiental do governo, respectivamente, subsídio sobre o preço da energia renovável, imposto sobre o preço da energia não renovável e imposto sobre as emissões.

2.2.5 Governo

O governo utiliza parte da sua receita para financiar seu fluxo exógeno de gastos $\{G_t\}_{t=0}^\infty$, parte para subsidiar o preço da energia renovável e o restante transfere de volta para as famílias. No nosso modelo, a receita tributária é proveniente dos impostos sobre emissões e sobre o preço da energia não renovável. Portanto, a restrição orçamentária do governo é dada por:

$$G_t + T_t + \vartheta_t^{ER} P_t^{ER} (E_t^{RC} + E_t^{RT} + E_t^{RNT}) = \tau_t^{ENR} P_t^{ENR} (E_t^{NRC} + E_t^{NRT} + E_t^{NRNT}) + \tau_t^e (e_t^T + e_t^{NT}) \quad (2.19)$$

Por simplicidade, o governo opera com o orçamento equilibrado em todo o tempo.

2.2.6 Taxa de juros

Como em [Schmitt-Grohé & Uribe \(2003\)](#), a taxa de juros que a economia doméstica enfrenta no mercado internacional é dada por:

$$r_t^D = r^* + \Omega [\exp^{(D_t - D_{ss})} - 1] \quad (2.20)$$

onde r^* denota a taxa de juros internacional livre de risco; Ω é um parâmetro que mede a sensibilidade da taxa de juros aos desvios do endividamento do país (D_t) do seu nível de estado estacionário, D_{ss} .

2.2.7 Processos Exógenos

O modelo contém choques exógenos de produtividade total dos fatores nas firmas dos setores *tradable* e *notradable* e nos setores produtores de energia primária hidráulica e derivada da cana-de-açúcar. Todas essas variáveis assumem a forma de um processo autorregressivo log-linear, como segue:

$$\ln A_t^j = \rho_{A(j)} \ln A_{t-1}^j + \varepsilon_t^j \quad (2.21)$$

para $j = T, NT, H, S$. Onde, ε_t^j é um choque com distribuição idêntica e independente e com variância $\rho_{A(j)}$.

Além disso, são considerados processos exógenos as dotações e os preços do petróleo e do gás natural, as emissões do resto do mundo, as alíquotas da política ambiental e os gastos governamentais, que seguem, respectivamente, os seguintes processos autorregressivos log-lineares:

$$\ln O_t^Y = (1 - \rho_{OY}) \ln O_{ss}^Y + \rho_{OY} \ln O_{t-1}^Y + \varepsilon_t^{OY} \quad (2.22)$$

$$\ln P_t^O = (1 - \rho_{PO}) \ln P_{ss}^O + \rho_{PO} \ln P_{t-1}^O + \varepsilon_t^{PO} \quad (2.23)$$

$$\ln N_t^Y = (1 - \rho_{NY}) \ln N_{ss}^Y + \rho_{NY} \ln N_{t-1}^Y + \varepsilon_t^{NY} \quad (2.24)$$

$$\ln P_t^N = (1 - \rho_{PN}) \ln P_{ss}^N + \rho_{PN} \ln P_{t-1}^N + \varepsilon_t^{PN} \quad (2.25)$$

$$\ln e_t^{row} = (1 - \rho_{erow}) \ln e_{ss}^{row} + \rho_{erow} \ln e_{t-1}^{row} + \varepsilon_t^{erow} \quad (2.26)$$

$$\ln \vartheta_t^{ER} = (1 - \rho_{\vartheta}) \ln \vartheta_{ss}^{ER} + \rho_{\vartheta} \ln \vartheta_{t-1}^{ER} + \varepsilon_t^{\vartheta} \quad (2.27)$$

$$\ln \tau_t^{ENR} = (1 - \rho_{\tau}) \ln \tau_{ss}^{ENR} + \rho_{\tau} \ln \tau_{t-1}^{ENR} + \varepsilon_t^{\tau} \quad (2.28)$$

$$\ln \tau_t^e = (1 - \rho_{\tau e}) \ln \tau_{ss}^e + \rho_{\tau e} \ln \tau_{t-1}^e + \varepsilon_t^{\tau e} \quad (2.29)$$

$$\ln G_t = (1 - \rho_G) \ln G_{ss} + \rho_G \ln G_{t-1} + \varepsilon_t^G \quad (2.30)$$

Onde, ε_t^m é um choque com distribuição idêntica e independente, com variância ρ_m , com $m = OY, PO, NY,$

$PN, erow, \vartheta, \tau, \tau e, G$. Enquanto que o subscrito ss é utilizado para definir os respectivos valores das variáveis no estado estacionário.

2.2.8 Condições de Equilíbrio de Mercado

As condições de equilíbrio de mercado necessárias para o fechamento do modelo são:

- Setor *nontradable*:

$$Y_t^{NT} = C_t^{NT} \quad (2.31)$$

- Setor *tradable*:

$$Y_t^T = C_t^T + \sum_i I_t^i + G_t + TB_t^T \quad (2.32)$$

- Setor de energia renovável:

$$E_t^R = E_t^{RC} + E_t^{RT} + E_t^{RNT} \quad (2.33)$$

- Setor de energia não renovável:

$$E_t^{NR} = E_t^{NRC} + E_t^{NRT} + E_t^{NRNT} \quad (2.34)$$

- Setor externo:

$$TB_t = TB_t^T + TB_t^O + TB_t^S \quad (2.35)$$

A balança de transações correntes é definida como:

$$TB_t - r_{t-1}^D = -(D_t - D_{t-1}) \quad (2.36)$$

onde, TB_t é balança comercial total do país, que no modelo consiste na soma das balanças comerciais do petróleo, do gás natural e dos bens finais *tradables*.

2.3 Calibração

Para definir os parâmetros do modelo, nós utilizamos duas estratégias. Na primeira, adotamos valores usualmente utilizados na literatura relacionada. Esses valores podem ser visualizados na Tabela 2.1. A segunda estratégia consiste em calibrar o modelo para que este fique em consonância com os dados da economia brasileira. A Tabela 2.2 apresenta os parâmetros calibrados, suas descrições e valores utilizados neste artigo.

Tabela 2.1: Valores dos parâmetros calibrados com dados da literatura

Parâmetro	Valor	Definição	Fonte
φ	2	Coefficiente de aversão ao risco	Leal et al. (2015)
ω	2	Coefficiente de aversão ao risco (meio ambiente)	Angelopoulos et al. (2013)
q	0.4	Peso de Q na utilidade	Angelopoulos et al. (2013)
θ_z	0.4	Elast. de subst. entre energia e consumo	Tumen et al. (2016)
θ_c	0.5	Elast. de subst. entre tradables e nontradables	Akinci (2011)
θ_e	0.5	Elast. de subst. entre energia renovável e não renovável	Tumen et al. (2016)
δ	0.025	Taxa de depreciação do capital	Leal et al. (2015)
ϕ_x	0.9979	Grau de persistência da poluição	Leal et al. (2015)
ϕ_q	0.9	Grau de persistência da qualidade do meio ambiente	Angelopoulos et al. (2013)
$\overline{Q}$	1	Índice de qualidade do meio ambiente no estado estacionário	Angelopoulos et al. (2013)
θ_1	0.0418	Coefficiente da função de custo de mitigação	Leal et al. (2015)
θ_2	2.8	Expoente da função de custo de mitigação	Leal et al. (2015)
d_0	-2.97E-03	Intercepto da função de dano da poluição	Leal et al. (2015)
d_1	-2.16E-06	Coefficiente da função de dano da poluição	Leal et al. (2015)
d_2	9.26E-09	Coefficiente da função de dano da poluição	Leal et al. (2015)
ϑ_{ss}^{ER}	0.00593	Alíquota do subsídio sobre o preço da energia renovável	Silva & Silva (2019)
τ_{ss}^{ENR}	0.02754	Alíquota do imposto sobre o preço da energia não renovável	Silva & Silva (2019)
τ_{ss}^e	0.00535	Alíquota do imposto sobre emissões	Silva & Silva (2019)

No segundo caso, buscamos produzir momentos teóricos dos agregados do modelo que reproduzissem, tanto quanto possível, os momentos empíricos calculados dos dados agregados do Brasil. Buscamos calibrar as seguintes relações: o valor das energias primárias não renováveis produzidas domesticamente em relação ao PIB [$(P^O O^Y + P^N N^Y)/Y = 0.1556$], o valor das energias primárias renováveis em relação ao PIB [$(P^H H + P^S S)/Y = 0.1446$], a dependência externa do petróleo [$(O^H - O^Y)/O^H = -0.2204$], a dependência externa do

Tabela 2.2: Valores dos parâmetros calibrados em consonância com os dados do Brasil

Parâmetro	Definição	Valor
β	Fator de desconto subjetivo das famílias	0.9636
ψ^i	Elasticidades Frisch	2
l	Peso de L^T e L^{NT} na utilidade	2.5
s_C	Gastos com bens finais na cesta de consumo	0.9
s_T	Gastos com tradables na cesta de bens finais	0.4
s_R	Gastos com energia renovável na cesta de energia	0.5
s_H	Uso de energia hidráulica na refinaria renovável	0.6
s_O	Uso de petróleo na refinaria não renovável	0.85
θ_{ER}	Elast. de subst. entre energia hidráulica e derivada da cana	0.5
θ_{ENR}	Elast. de subst. entre petróleo e gás natural	0.5
Φ	Parâmetro do custo de ajustamento do investimento	4
α_L^i	Part. do trabalho na produção de bens finais	0.5
α_R^i	Part. da energia renovável na produção de bens finais	0.0522
α_{NR}^i	Part. da energia não renovável na produção de bens finais	0.0678
γ_x	Elasticidade da qual. do meio ambiente em relação ao estoque de poluição	1
γ^i	Elasticidade das emissões do setor de bens finais em relação ao produto	-0.023
γ^C	Elasticidade das emissões das famílias em relação a energia não renovável	0
D_{ss}	Nível de endividamento no estado estacionário	0.238
r_{ss}^D	Taxa de juros internacional	0.0378
Ω	Parâmetro do componente doméstico do spread da taxa de juros	1
O_{ss}^Y	Dotação de petróleo no estado estacionário	0.235
P_{ss}^O	Preço do petróleo no mercado internacional	0.5
N_{ss}^Y	Dotação do gás natural no estado estacionário	0.04
P_{ss}^N	Preço do gás natural no mercado internacional	0.77
e_{ss}^{row}	Emissões do resto do mundo no estado estacionário	12.0529
G_{ss}	Gastos do governo no estado estacionário	0.12
ρ	Persistência dos choques	0.95
ϑ_{ss}^{ER}	Alíquota do subsídio sobre o preço da energia renovável	0.00593
τ_{ss}^{ENR}	Alíquota do imposto sobre o preço da energia não renovável	0.02754
τ_{ss}^e	Alíquota do imposto sobre emissões	0.00535

gás natural $[(N^H - N^Y)/N^H = 0.3478]^6$ e o valor da energia não renovável na produção total do setor energético $[(P^H H + P^S S)/(P^H H + P^S S + P^O O^H + P^N O^N) = 0.4465]$.

Além disso, calibramos as elasticidades de Frisch e o peso do trabalho na função utilidade buscando valores compatíveis com a oferta de trabalho das famílias no Brasil. Buscamos atingir um valor no estado estacionário para $L^i \simeq 0.34$ que corresponde a aproximadamente 40 horas semanais.

Utilizamos os dados da Pesquisa de Orçamentos Familiares (POF) para definir os valores das proporções de gastos com bens finais (s_C) e gastos com energia renovável (s_R); e, os dados do Banco Mundial (*World Development Report* de 1991) para definir as proporções de gastos com *tradables* (s_T).

Como não encontramos dados para as elasticidade de substituição entre as fontes primárias de energia (θ_{ER} e θ_{ENR}) utilizamos o valor de θ_e encontrado em [Tumen et al. \(2016\)](#).

Utilizamos os dados das Contas Nacionais do Brasil para calibrar os valores dos pesos do trabalho (α_L), da energia renovável (α_R) e da energia não renovável (α_{NR}) na produção de bens finais nos setores *tradable* e *nontradable*.

Nós calibramos a taxa de juros enfrentada pelo país com relação a dívida externa

⁶De acordo com os dados do [BEN \(2017\)](#), o Brasil vem se comportando nos últimos anos como um exportador líquido de Petróleo e como um importador líquido de gás natural. Buscamos calibrar o modelo para contemplar essas relações com o comércio internacional.

(r_{ss}^D) em 3.78%, de acordo com os dados do Banco Mundial e, utilizamos esse valor, para calibrar o desconto das famílias ($\beta = 1/(1 + r_{ss}^D)$). Também utilizamos essa fonte para calibrar o valor da dívida externa no estado estacionário (D_{ss}), onde buscamos atingir a proporção da balança comercial com relação ao PIB em torno de 1,5%.

Por sua vez, o valor utilizado das elasticidades das emissões do setor de bens finais em relação ao produto foi calculado através de uma regressão linear das emissões de CO_2 com relação ao PIB do Brasil. Por fim, o valor do parâmetro G_{ss} buscou refletir que no Brasil cerca de 15% do PIB vem dos gastos governamentais⁷.

2.4 Resultados

Nesta seção, analisamos como os choques nos preços internacionais das fontes energéticas afetam as principais variáveis macroeconômicas e ambientais do nosso modelo. Além disso, comparamos os resultados do nosso modelo, que possui o setor energético diversificado, com os resultados de um modelo alternativo restrito, que possui apenas uma fonte energética.

Como resultado adicional, analisamos os efeitos de mais dois tipos de choques nos preços das fontes energéticas. No primeiro caso, simulamos choques negativos de oferta de energia, tanto nas energias primárias renováveis quanto nas não renováveis. No segundo caso, simulamos choques de demanda por energia, através de choques na produtividade dos setores de bens finais não energéticos⁸.

Além disso, analisamos como choques nas alíquotas da política ambiental afetam as principais variáveis macroeconômicas e, por fim, verificamos os efeitos dos choques nas emissões do resto do mundo nas variáveis agregadas domésticas. Em todos os casos, utilizamos funções de impulso-resposta para realizar as análises.

2.4.1 Choques nos Preços Internacionais da Energia

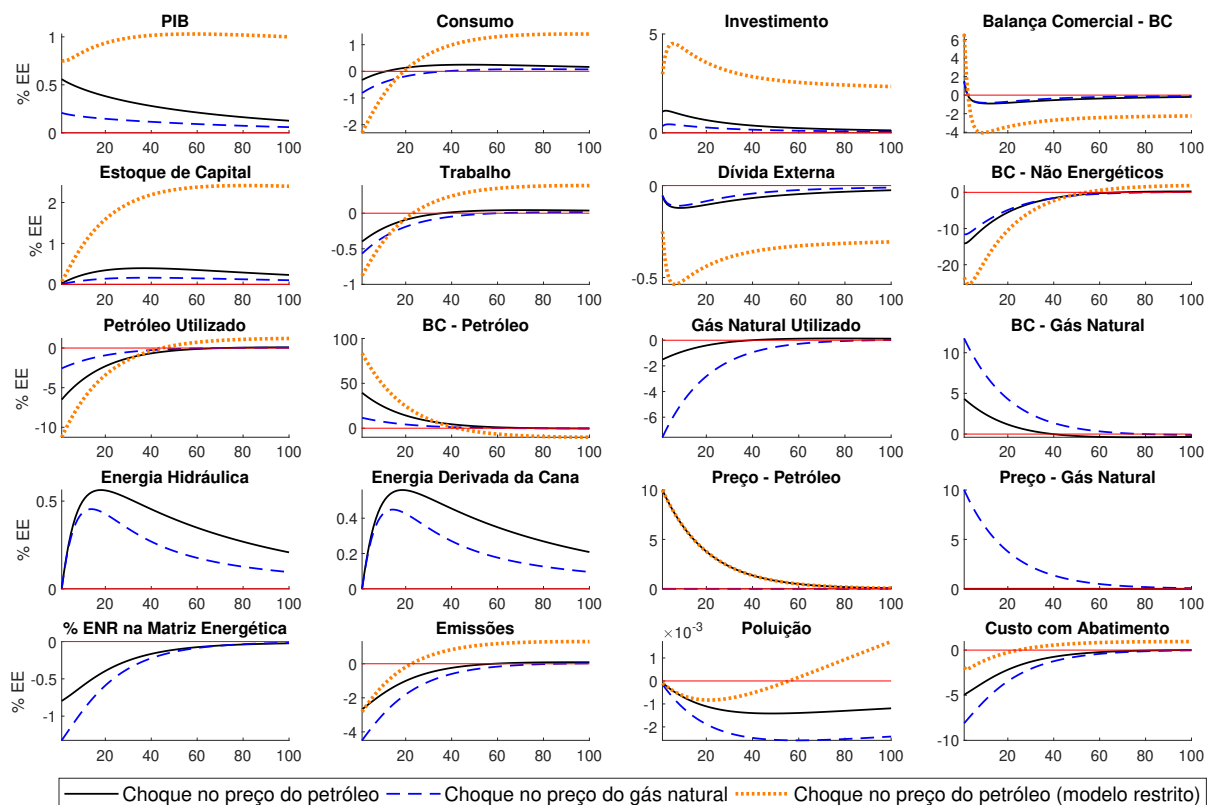
A Figura 2.1 mostra as respostas das variáveis macroeconômicas agregadas, das variáveis do setor energético e das variáveis ambientais aos choques exógenos nos preços internacionais da energia. Como explicado anteriormente, utilizamos dois modelos alternativos, um deles é o nosso modelo base, que possui um setor energético diversificado, e o outro é um modelo restrito, que contém uma única fonte energética (petróleo), mas que mantém todas as demais estruturas do modelo base inalteradas. No modelo base, simu-

⁷Média dos gastos do governo como proporção do PIB entre os anos de 1960 e 2018 de acordo com os dados do Banco Mundial.

⁸Os choques de demanda na literatura dos vetores auto-regressivos são provenientes de choques no PIB do mundo (ou dos Estados Unidos) (Kilian & Murphy, 2012; Peersman & Robays, 2012). Aqui, não estamos tratando desse tipo de choque, apenas estamos simulando uma situação onde a demanda por energia é aumentada por um choque de produtividade em um setor que usa a energia como insumo de produção.

lamos choques nos preços do petróleo, que são representados por linhas sólidas pretas e choques nos preços do gás natural, representados por linhas pontilhadas azuis. No modelo restrito, os choques nos preços do petróleo são representados por linhas pontilhadas laranjas. Para manter o poder de comparação das magnitudes dos resultados, calibramos os choques para provocar um aumento de 10% nos preços internacionais de cada uma das fontes energéticas.

Figura 2.1: Respostas aos choques nos preços internacionais de energia



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em resposta a um choque no preço internacional do petróleo (linhas sólidas pretas), a um choque no preço internacional do gás natural (linhas tracejadas em azul), ambos no modelo com o setor energético diversificado, e a um choque no preço internacional do petróleo, no modelo com o setor energético restrito (linhas pontilhadas em laranja). Os choques são calibrados para provocar um aumento de 10% nos preços de cada uma das fontes energéticas citadas. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

Os resultados do modelo base mostram que um choque no preço do petróleo (ou no preço do gás natural) gera um aumento nos custos de produção das refinarias de energia não renovável e, consequentemente, um aumento nos custos de produção das firmas que produzem bens finais não energéticos, gerando uma redução no consumo das famílias. Essas refinarias empacotam petróleo e gás natural e produzem energia final. Dessa forma, independentemente se o choque é no preço do petróleo ou do gás natural, observamos uma redução na utilização doméstica das duas fontes primárias não renováveis, entretanto, como o petróleo tem mais peso na composição da matriz energética, os impactos deste serão sempre mais intensos.

Por outro lado, como estamos no modelo com o setor energético diversificado, as famílias e as firmas de bens finais não energéticos podem substituir parte da energia final não renovável, que agora está mais cara (em termos relativos), por energia renovável, estimulando as refinarias produtoras desse tipo de energia final e, conseqüentemente, estimulando a produção de energia primária hidráulica e derivada da cana. Essa substituição energética reduz o impacto negativo que os preços mais elevados da energia não renovável gera no consumo das famílias, na produção de bens finais não energéticos e, conseqüentemente, no mercado de trabalho, mas não o anulam.

Ademais, como no nosso modelo a produção de petróleo e gás natural se dá exogenamente (ambos são dotações), a redução do uso doméstico do petróleo passará a ser exportada para outros países, fazendo com que as receitas com exportações aumentem, e a redução do uso doméstico de gás natural reduzirá as importações dessa fonte energética, aumentando ainda mais as receitas provenientes do comércio internacional, que são utilizadas para reduzir a dívida externa e realizar novos investimentos, aumentando o estoque de capital.

Com relação ao meio ambiente, a redução na produção de bens finais não energéticos (visível pela redução do consumo e aumento das importações de bens não energéticos) e a substituição energética em direção a uma energia mais limpa, são responsáveis por reduzir as emissões de carbono, o estoque de poluição e, conseqüentemente, os gastos com tecnologia de abatimento.

Quando comparamos esses resultados com os do modelo restrito, percebemos que a não possibilidade de substituir a fonte energética afetada por um aumento de preço exógeno, atinge a economia de forma muito mais incisiva. Percebemos que os impactos negativos na utilização de petróleo (-10%), no consumo (-2%) e no mercado de trabalho (-0,8%) são muito maiores que no caso do modelo base (-6%, -0,2% e -0,4%, respectivamente). Entretanto, como a redução de petróleo é maior, as receitas com exportação também são mais intensas, assim como a redução na dívida externa e o aumento no investimento, gerando um aumento do PIB muito maior (1%) que a observada no modelo base (0,5%). Além disso, percebemos que as respostas ambientais são piores nesse modelo, haja vista que a utilização de petróleo como única fonte energética inviabiliza a substituição da matriz energética por fontes mais limpas, fazendo com que o aumento da produção seja rapidamente transformado em mais emissões, mais poluição e mais gastos com tecnologia de abatimento. De uma forma geral, percebemos que o choque no preço do petróleo no modelo restrito provocou uma variabilidade bem mais intensa nas respostas de todas as variáveis analisadas.

2.4.2 Choques Negativos na Oferta Energética

Os choques negativos na oferta energética são caracterizados por algum tipo de crise no fornecimento de energia, fazendo com que o preço da energia aumente. No nosso caso, simulamos dois tipos diferentes de redução na oferta energética, são eles: 1) choques negativos na produtividade dos setores de energia primária renovável; e, 2) choques negativos na dotação das energias primárias não renováveis.

2.4.2.1 Setor de Energia Primária Renovável

Nesta seção, analisamos os impactos econômicos de choques negativos nas produtividades das firmas produtoras de energia hidráulica e derivada da cana-de-açúcar. Para facilitar a análise, calibramos os choques para provocar um aumento de 10% nos preços das respectivas fontes energéticas. Na Figura 2.2 apresentamos as respostas do choque de produtividade das firmas produtoras de energia hidráulica pelas linhas sólidas pretas e do choque de produtividade das firmas produtoras de energia derivada da cana-de-açúcar pelas linhas tracejadas em azul.

Observamos que, independente da fonte energética impulsionada, as respostas seguem sempre a mesma direção, uma vez que as firmas do setor de energia primária renovável são modeladas de forma similar. Assim, a diferença na magnitude dos efeitos é proveniente apenas do tamanho do setor na economia.

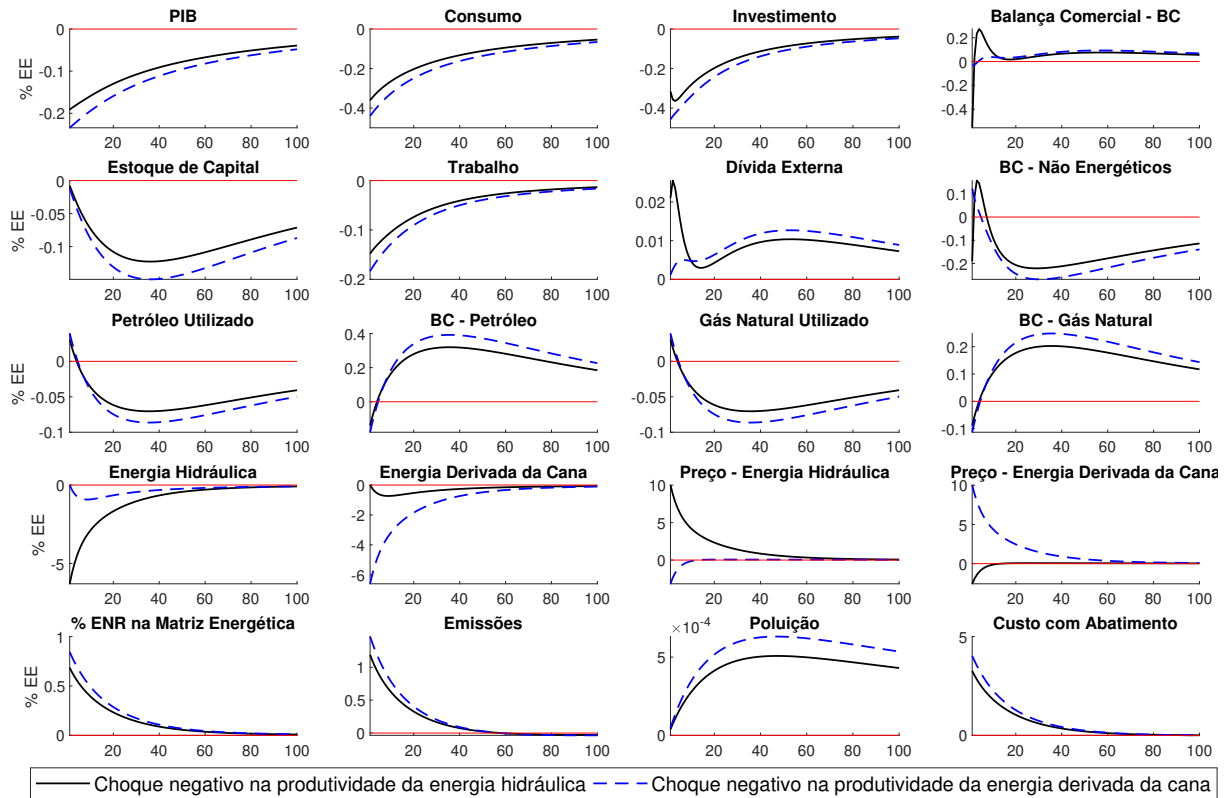
Como as energias primárias não têm ligação com o comércio internacional, um choque de oferta negativo, que gere aumento nos seus preços, produz um aumento no custo de produção das refinarias de energia renovável e, conseqüentemente, da energia final e dos bens finais da economia, na medida em que as energias hidráulica e derivada da cana-de-açúcar são produzidas apenas domesticamente.

Mais especificamente, observamos na Figura 2.2 que um aumento de 10% nos preços das energias primárias renováveis, geram um efeito recessivo que faz com que o PIB reduza em torno de 0.2% no momento do choque, além de reduzir os níveis de consumo, estoque de capital e oferta de trabalho.

Além disso, percebemos que, para se obter um aumento de 10% nos preços dessas fontes energéticas, foi necessário reduzir a oferta energética, da respectiva fonte, em cerca de 6%, o que explicita a característica inelasticidade do setor energético. No modelo de [Huynh \(2016\)](#), que é desenhado com apenas um tipo de firma produtora de energia, um choque de oferta negativo, que aumenta o preço da energia em 10%, gera uma queda de aproximadamente 1% no PIB e uma redução na oferta energética de aproximadamente 0.9%.

A diferença na magnitude dos resultados pode ser explicado pelo fato de estarmos utilizando um modelo com um setor energético diversificado, existindo a possibilidade de substituição da fonte energética utilizada pelos agentes na economia. Assim, o nosso

Figura 2.2: Respostas aos choques negativos na oferta de energia primária renovável



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque negativo na produtividade das firmas produtoras de energia hidráulica (linhas sólidas pretas) e a um choque negativo na produtividade das firmas produtoras de energia derivada da cana-de-açúcar (linhas tracejadas em azul). Os choques são calibrados para provocar um aumento de 10% nos preços das respectivas fontes energéticas. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

modelo permite que, mesmo com uma redução maior na oferta energética afetada pelo aumento de preços, a instabilidade causada na economia seja menor quando comparada aos resultados de um modelo com apenas uma fonte energética como o de [Huynh \(2016\)](#).

Portanto, diversificar as fontes energéticas pode ser uma maneira de proteger a economia doméstica contra choques adversos no setor energético (algo que ocorreu nos choques do petróleo nos anos 70, por exemplo).

Podemos verificar o fato anterior, ao observarmos que a utilização doméstica de petróleo e gás natural aumenta no momento do choque (substituição da fonte energética), mesmo que posteriormente o efeito recessivo na economia faça com que esse uso caia. Além disso, verificamos que, como os preços das fontes primárias não renováveis são exógenos e não são impactados pelo choque, uma maior utilização destes tipos de energia tem que ser abastecida pelo mercado externo. Assim, no primeiro momento, o aumento da utilização doméstica induz a importação de gás natural e a redução da exportação de petróleo e, posteriormente, quando o uso é reduzido a valores inferiores ao estado estacionário, o petróleo e o gás natural produzidos domesticamente, que são dotações fixas, passam a gerar mais receitas para o país.

Também observamos que a compensação dessa movimentação de moeda estrangeira é realizada pela variação na balança comercial dos bens finais não energéticos que se movem em sentido contrário ao das balanças comerciais das duas fontes energéticas comercializáveis no mercado internacional, ou seja, a maior (menor) renda gerada pelo comércio energético tendem a aumentar (diminuem) as importações (exportações) de bens finais não energéticos. Entretanto, é importante observar que como a energia hidráulica tem maior peso na economia, um choque nos seus preços gera um aumento na dívida externa no curto prazo maior que a gerada na presença de um choque nos preços da energia derivada da cana.

Com relação aos aspectos ambientais, observamos que existem duas forças que trabalham em sentidos opostos. Por um lado, observamos uma redução significativa na produção de bens finais não energéticos, ajudando a reduzir as emissões. Por outro, temos uma mudança na estrutura energética que aumenta a proporção de energia não renovável na matriz (mais combustíveis fósseis e menos energia renovável), gerando mais emissões para um dado nível de produção. Como a substituição energética (7%) é mais forte que a queda no consumo de bens finais (-0,4%), temos um aumento das emissões de carbono, no estoque de poluição e, conseqüentemente, nos custos com tecnologia de abatimento.

2.4.2.2 Setor de Energia Primária Não Renovável

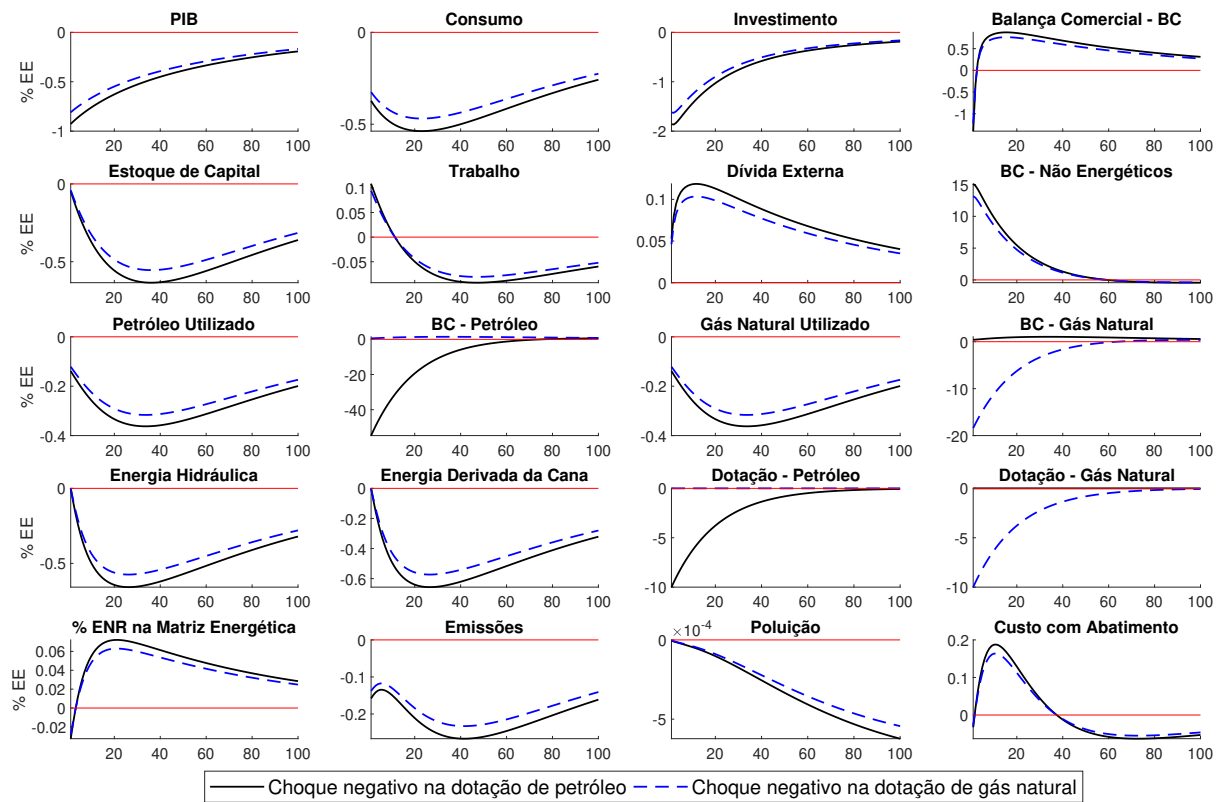
Nesta seção, analisamos os impactos econômicos de choques negativos nas dotações de petróleo e gás natural. Como consideramos que os choques domésticos não possuem magnitude suficiente para influenciar os preços das fontes energéticas comercializadas no mercado internacional, desenhamos o modelo para que estes choques não afetem os preços destas fontes. Assim, calibramos os choques para provocar uma queda de 10% nas dotações das respectivas fontes energéticas, não impactando os preços da energia não renovável. Na Figura 2.3 apresentamos as respostas dos choques na dotação de petróleo pelas linhas sólidas pretas e na dotação de gás natural pelas linhas tracejadas em azul.

Como no caso anterior, a diferença na magnitude dos efeitos dos choques é proveniente apenas do tamanho do setor na economia. Portanto, analisamos o choque de forma genérica.

A primeira coisa que chama a atenção é o fato desse choque produzir efeitos bastante similares, no que diz respeito a direção, aos choques produzidos anteriormente. Entretanto, existem algumas diferenças a serem consideradas.

A primeira delas é que, diferentemente do caso anterior, um choque negativo na oferta (queda nas dotações) das energias primárias não renováveis não gera um aumento imediato no custo de produção das refinarias, pois o choque não afeta os preços dessas fontes energéticas (que são dados exogenamente). Assim, a demanda por esse tipo de energia é sustentada, mas a parcela da energia doméstica que sofreu a queda tem que ser substituída por energia importada de outros países, gerando uma queda na balança comercial da

Figura 2.3: Respostas aos choques negativos na oferta doméstica de energia primária não renovável



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque negativo na dotação de petróleo (linhas sólidas pretas) e a um choque negativo na dotação de gás natural (linhas tracejadas em azul). Os choques são calibrados para provocar uma queda de 10% nas dotações das respectivas fontes energéticas. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

energia afetada pelo choque.

o PIB caía significativamente (-1%), reduzindo a demanda total por energia. Para compensar a queda na renda, as famílias aumentam a oferta de trabalho, além de reduzir os níveis de consumo e investimento. Além disso, observamos que a dívida externa do país cresce, também devido aos problemas no setor externo. Por outro lado, como o impacto no setor de energia primária não renovável acontece primeiro, percebemos que, no curto prazo, existe uma redução de combustíveis fósseis da matriz energética, mas que é rapidamente invertida, uma vez que os preços da energia renovável reagem ao choque de oferta negativo e os preços da energia não renovável ficam inalterados. Entretanto, as variações na matriz energética são bem pequenas (entre -0,02% e 0,06%).

Uma outra diferença, com relação ao choque estudado na seção anterior, diz respeito às respostas das variáveis ambientais. Neste caso, como relatado anteriormente, o efeito negativo no consumo de bens finais (-0,5%) é ajudado pelo efeito negativo, no curto prazo, observado na substituição energética (-0,02%). Com isso, as emissões e o estoque de poluição caem. Entretanto, o custo com tecnologia de abatimento só cai no curtíssimo prazo, voltando a subir com o aumento da proporção de combustíveis fósseis na matriz

energética.

2.4.3 Choques de Demanda Doméstica por Energia

Nesta seção, analisamos os impactos econômicos e ambientais de choques de demanda doméstica por energia. Neste caso, o choque atua como uma força econômica positiva inesperada, gerando um estímulo à produção doméstica. Isto pode compensar os efeitos negativos do aumento dos preços da energia. Para simular esta situação, utilizamos choques de produtividade nos setores não energéticos (*tradable* e *nontradable*). Como os preços das fontes não renováveis são exógenos, nós calibramos os choques para provocar um aumento de 10% nos preços da energia final renovável. Na Figura 2.4 apresentamos as respostas aos choques na produtividade do setor *tradable* pelas linhas sólidas pretas e do setor *nontradable* pelas linhas tracejadas em azul.

Um choque na produtividade do setor produtor de bens finais irá gerar um aumento na demanda por insumos (capital, trabalho e energia) e irá aumentar a produção desse setor. A maior demanda por insumos faz com que o preço da energia renovável aumente, mas o preço da energia não renovável se mantém constante, já que é dado exogenamente.

Assim, ocorre uma substituição para a fonte não renovável, que se tornou relativamente mais barata. Mas, como produção doméstica (dotação) de energia não renovável também não se altera, a substituição energética tem que se dá via importação de mais combustíveis fósseis. Para compensar essa importação energética, o país passa a exportar mais bens finais não energéticos (*tradables*).

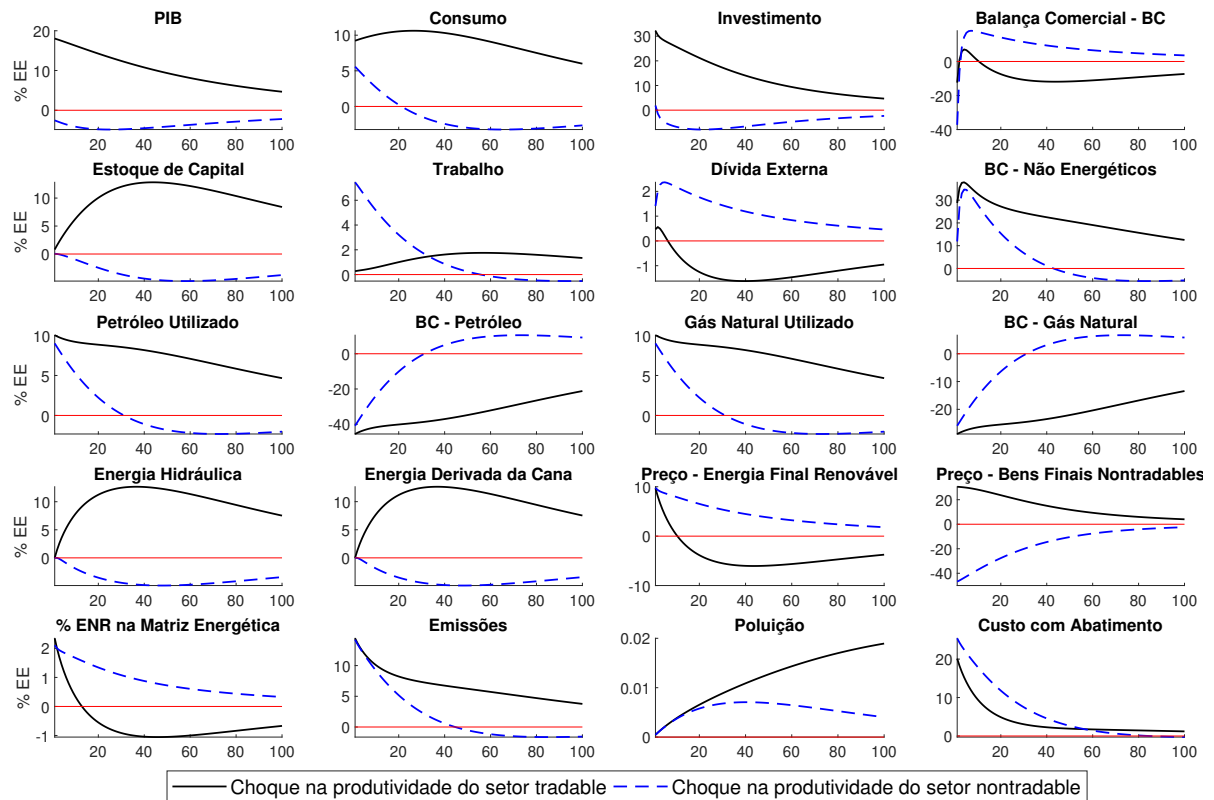
No caso do choque no setor de *tradables*, essa exportação passa a ser fruto do próprio crescimento do setor. Mas, no caso do choque no setor de *nontradables*, parte das importações energéticas devem ser financiadas com aumento da dívida externa.

Portanto, no caso do choque do setor *tradables*, a receita proveniente das exportações estimula ainda mais o consumo, o investimento e a produção, transbordando esses efeitos para os demais setores da economia. Mas no caso do choque no setor *nontradables*, como o estímulo produtivo não gera receitas vinculadas ao comércio internacional, o efeito não transborda para os outros setores e, mesmo com o aumento da produção de bens *nontradables* temos uma queda na produção agregada, uma vez que os investimentos nos outros setores caem e a balança comercial se torna muito negativa no curto prazo.

Com relação aos impactos ao meio ambiente, observamos que nos dois casos existem efeitos adversos. Além da substituição de energia renovável por combustíveis fósseis, temos um aumento na produção dos setores poluidores (bens finais não energéticos). Isso faz com que as emissões e o estoque de poluição subam. Entretanto, percebemos que reduzem de forma mais rápida no caso do choque de produtividade no setor *nontradables*, exatamente por não conseguir transbordar os efeitos produtivos para os demais setores da economia. Por fim, percebemos que o custo com tecnologia de abatimento sobe mais no

caso do choque de produtividade no setor *nontradables* pois, neste caso, o percentual de energia não renovável na matriz energética demora mais a cair, graças aos investimentos reduzidos no setor de energia renovável.

Figura 2.4: Respostas aos choques domésticos na demanda por energia



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque na produtividade do setor *tradable* (linhas sólidas pretas) e a um choque na produtividade do setor *nontradable* (linhas tracejadas em azul). Os choques são calibrados para provocar um aumento de 10% nos preços da energia final renovável. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

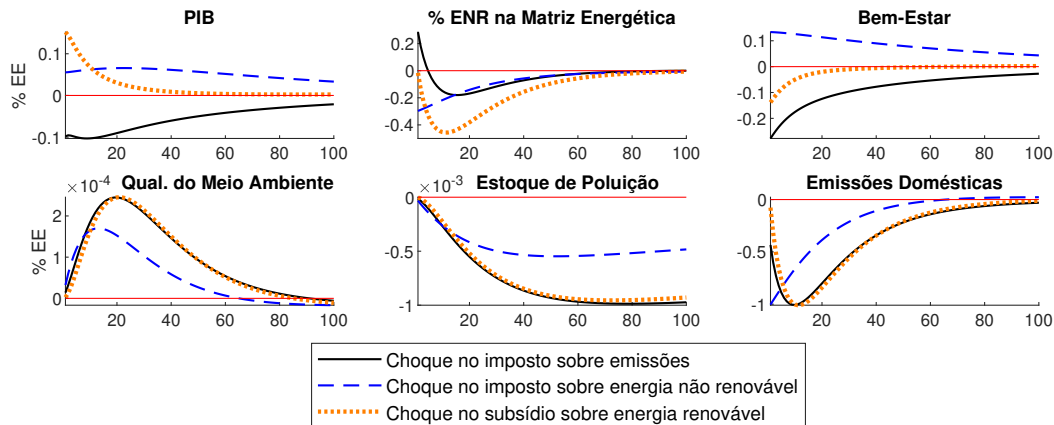
2.4.4 Meio Ambiente

Nesta seção, analisaremos quais os impactos econômicos e ambientais de choques nas alíquotas da política ambiental e quais os impactos domésticos em um choque nas emissões do resto do mundo.

2.4.4.1 Choques na Política Ambiental

Analisamos os choques nas três alíquotas da política ambiental do governo. Neste caso, os choques foram calibrados para provocar uma queda de 1% nas emissões domésticas. Na Figura 2.5, apresentamos as respostas ao choque na alíquota do imposto sobre essas emissões pelas linhas sólidas pretas, ao choque na alíquota do imposto sobre o preço da energia não renovável pelas linhas tracejadas em azul e na alíquota do subsídio sobre o preço da energia renovável pelas linhas pontilhadas em laranja.

Figura 2.5: Respostas aos choques nas alíquotas da política ambiental



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque na alíquota do imposto sobre essas emissões (linhas sólidas pretas), a um choque na alíquota do imposto sobre o preço da energia não renovável (linhas tracejadas em azul) e a um choque na alíquota do subsídio sobre o preço da energia renovável (linhas pontilhadas em laranja). Os choques são calibrados para provocar uma queda de 1% nas emissões domésticas. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

Os resultados encontrados mostram que do ponto de vista ambiental o imposto sobre emissões atinge os melhores resultados no que diz respeito à queda no estoque de poluição e melhora da qualidade do meio ambiente, mesmo sem reduzir a proporção de energia não renovável na matriz ambiental no curto prazo. Entretanto, os impactos na economia e no bem-estar das famílias são relativamente inferiores aos conseguidos quando os choques vêm das alíquotas de política ambiental ligadas ao setor energético.

Percebemos que os resultados ambientais gerados por um choque na alíquota do subsídio sobre os preços da energia renovável são bastante próximos dos resultados obtidos pelo choque do imposto sobre emissões. Porém, do ponto de vista econômico observamos que este choque gera um aumento de 0.15% do PIB e é neste caso que se observa a maior redução na proporção de energia não renovável. Além disso, percebemos que existe uma queda no nível de bem-estar social⁹, mas o resultado relativo a essa variável é melhor que o gerado pelo choque no imposto sobre emissões.

Por fim, percebemos que o choque no imposto sobre o preço da energia não renovável tem resultados inferiores aos atingidos pelos gerados nos choques discutidos anteriormente na perspectiva ambiental, além de não gerar um crescimento tão grande do PIB quanto o conseguido pelo choque no subsídio sobre o preço da energia renovável. Porém, este foi o único choque que conseguiu gerar resultados positivos na variação do bem-estar.

Além disso, é importante notar que os choques nas alíquotas de impostos/subsídios vinculados aos preços do setor energético induzem uma substituição mais profunda das fontes energéticas na direção de uma matriz mais limpa, não exigindo uma queda tão acentuada da produção como ocorre no caso do imposto sobre emissões.

⁹O bem-estar foi calculado recursivamente utilizando a seguinte função valor: $V_t = U_t + \beta V_{t+1}$.

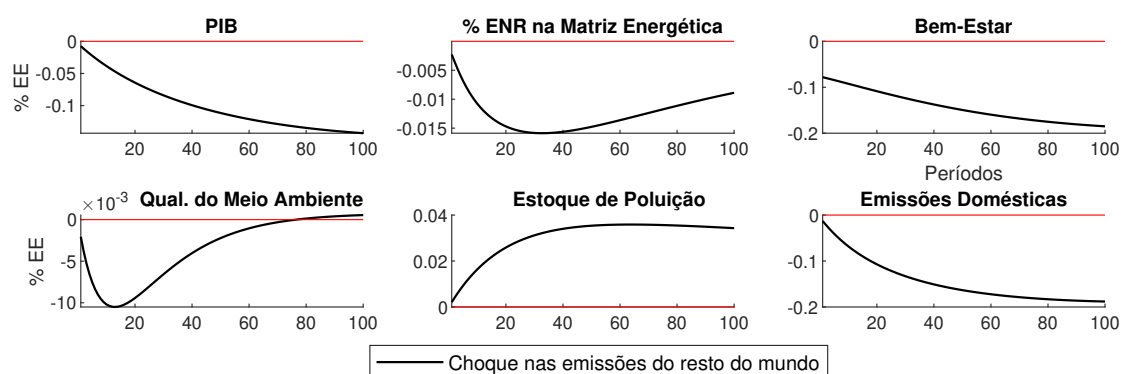
Portanto, os resultados mostram que cada uma das ferramentas de política ambiental possuem seus benefícios e fragilidades. Mas, se usadas em conjunto podem trazer resultados interessantes para a economia e para a redução dos problemas ambientais.

2.4.4.2 Choque nas Emissões do Resto do Mundo

Por fim, analisamos o choque nas emissões do resto do mundo. Neste caso, calibramos os choques para provocar um aumento de 1% nas emissões do resto do mundo.

Na Figura 2.6, mostramos que um choque nas emissões do resto do mundo ao aumentar o estoque de poluição e reduzir a qualidade do meio ambiente, faz com que o PIB e o bem-estar social sejam reduzidos e que os atores substituam a energia não renovável por energia renovável, reduzindo assim as emissões domésticas e amenizando o efeito do aumento da emissão internacional.

Figura 2.6: Respostas ao choque das emissões do resto do mundo



Nota: A figura mostra as funções de impulso resposta das variáveis selecionadas em respostas a um choque nas emissões do resto do mundo (linhas sólidas pretas). O choque é calibrado para provocar uma queda de 1% nas emissões do resto do mundo. As respostas estão em desvios percentuais dos níveis do estado estacionário (% EE).

Esse resultado é importante, pois o Brasil responde por apenas 1,5% das emissões internacionais¹⁰ e pode ter sua qualidade ambiental fortemente afetada pelas nações vizinhas. Com a solicitação de saída dos Estados Unidos do Acordo de Paris, muitos países podem se sentir compelidos a também não respeitarem o acordo e com isso podemos não conseguir reduzir os atuais níveis de emissões internacionais, fazendo com que nações como o Brasil sofram severas consequências.

2.5 Conclusão

Neste artigo, analisamos os impactos econômicos e ambientais de choques nos preços de diferentes fontes energéticas. Além disso, comparamos os resultados de um modelo com um setor energético diversificado com os resultados de um modelo que utiliza apenas o petróleo como fonte energética. Ademais, analisamos quais os principais impactos

¹⁰Dados de 2014 do Banco Mundial.

econômicos e energéticos dos choques nas alíquotas da política ambiental e nas emissões do resto do mundo. Particularmente, calibramos um modelo E-DSGE de economia aberta e com um setor energético diversificado, utilizando os dados da economia brasileira.

Nossos resultados mostraram que os choques nos preços internacionais da energia (petróleo e gás natural) ao aumentar os custos de produção das refinarias e das firmas de bens finais, desestimulam o consumo e a oferta de trabalho. Entretanto, o produto agregado doméstico aumenta, puxado pelo aumento das receitas de exportação provenientes do comércio energético e pela realização de mais investimentos na economia. Além disso, como o preço da energia renovável fica relativamente mais barata, as famílias substituem uma parcela das fontes energéticas não renováveis por fontes energéticas renováveis, ajudando a reduzir as emissões e o estoque de poluição. Por fim, quando comparamos os resultados do modelo com o setor energético diversificado com os resultados do modelo mais restrito (com uma única fonte energética), observamos que, como não há possibilidade de substituir a fonte energética afetada por um aumento de preço exógeno, a economia é atingida de forma muito mais incisiva, provocando uma variabilidade bem mais intensa nas respostas de todas as variáveis analisadas.

Além disso, mostramos que choques negativos de oferta energética reduzem produto, consumo, investimento e estoque de capital. Mas, quando os choques atingem o setor de energia renovável, mais combustíveis fósseis são utilizados e os níveis de emissões e estoque de poluição aumentam e quando atingem o setor de energia não renovável ocorre o inverso.

Por outro lado, mostramos que os resultados dos choques de demanda doméstica por energia são contraditórios e dependem do setor atingido. Se por um lado, o produto agregado da economia sobe quando o choque é proveniente do setor de bens finais *tradable*, por outro, reduz quando o choque provém das firmas do setor *nontradable*. Isso acontece porque quando do choque vem do setor *tradable* ocorre um efeito transbordamento, uma vez que a receita proveniente das exportações estimula os níveis de consumo, investimento e produção dos demais setores da economia. Ademais, mostramos que os choques de demanda por energia aumentam a utilização de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, as emissões de carbono.

Com relação aos choques nas alíquotas da política ambiental, mostramos que um choque no imposto sobre emissões reduz com maior intensidade a poluição que as alternativas concorrentes; que um choque no subsídio sobre energia renovável gera maior aumento no produto agregado e uma forte redução no consumo de combustíveis fósseis; e, que um choque no imposto sobre energia não renovável melhora o bem-estar social.

Por fim, mostramos que um choque nas emissões do resto do mundo ao aumentar o estoque de poluição e reduzir a qualidade do meio ambiente, faz com que o PIB e o bem-estar social sejam drasticamente reduzidos.

Nosso trabalho é o primeiro a analisar os choques nos preços de diferentes fontes

energéticas utilizando um modelo E-DSGE de economia aberta, que permite verificar os impactos econômicos e ambientais conjuntamente. A utilização de um modelo que possibilita a substituição energética pelos agentes econômicos aprofunda a análise sobre os impactos dos choques energéticos sobre a economia e possibilita novos resultados sobre como esses choques afetam o meio ambiente. Além disso, mostramos, pela primeira vez na literatura, que os resultados do modelo com o setor energético diversificado reduz a variabilidade das respostas quando comparado com o modelo que possui apenas o petróleo como fonte energética disponível.

Emissões de Carbono e Crescimento Econômico: Quanto Mais Poluição, Pior?

3.1 Introdução

Desde o final da década de 1980, os cientistas climáticos passaram a alertar os líderes mundiais sobre as ameaças do aquecimento global e das consequentes mudanças climáticas que poderiam afetar o mundo nos próximos anos. Entretanto, foi apenas em meados da década de 1990 que os relatórios científicos das principais Conferências Climáticas Internacionais passaram a sugerir que os problemas climáticos poderiam estar ligados diretamente à ação humana (IPCC, 1995)¹. Atualmente, já é bem aceito que uma das principais causas do aquecimento global é a crescente concentração dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera terrestre e que as principais fontes de emissões antropogênicas desses gases são a atividade econômica e o uso de energia (IPCC, 2014).

Por outro lado, os níveis de emissões de CO₂ no mundo estão bastante concentrados em uma pequena quantidade de países. Dados do Banco Mundial mostram que o grupo dos trinta países que mais poluíram a atmosfera mundial em 2014 foram responsáveis por cerca de 83% das emissões antropogênicas do planeta. Entretanto, nem todos esses países iniciaram grandes esforços para solucionar o problema das suas emissões domésticas e os dados não demonstram uma reversão na direção da tendência das emissões mundiais. Alguns estudos já começam a relacionar o aumento das emissões de carbono com problemas relacionados a saúde humana e a segurança alimentar (IPCC, 2018; Smith & Myers, 2019).

Este estudo examina como os aumentos nas emissões de carbono impactam o cres-

¹A investigação científica sobre os processos climáticos não é tão recente. Em 1896, o químico sueco Svante Arrhenius apontou que a queima de combustíveis fósseis produziria dióxido de carbono e, além disso, mostrou uma relação entre o aumento de CO₂ na atmosfera e o aumento da temperatura da terra.

cimento econômico nos trinta países que mais emitem CO₂ no mundo². Para isso, estimamos um vetor autorregressivo para dados em painel (PVAR), que foi desenvolvido originalmente por [Holtz-Eakin et al. \(1988\)](#), e analisamos as relações entre crescimento econômico, consumo total de energia, consumo de combustíveis fósseis, emissões domésticas de CO₂, emissões estrangeiras de CO₂ e abertura comercial. Além disso, testamos se os países que possuem maiores níveis de emissões são mais ou menos afetados por choques nas emissões de carbono. Para isso, examinamos, além da amostra completa com os trinta países, mais duas sub-amostras que restringe a quantidade de países aos vinte e aos dez maiores emissores de CO₂ do planeta.

Existem poucos estudos na área que utilizam a metodologia PVAR e esta possui certas vantagens em relação a outros métodos utilizados em estudos relacionados. As principais vantagens desse método foram sumarizadas por [Antonakakis et al. \(2017\)](#) e estão, em primeiro lugar, no fato de tratar todas as variáveis como potencialmente endógenas, podendo explicitar assim todos os efeitos de *feedback* entre as variáveis utilizadas. Em segundo lugar, é bastante útil utilizar uma estrutura mais flexível como o PVAR quando existem poucas informações teóricas sobre as relações entre as variáveis para ajudar no processo de especificação do modelo. Em terceiro lugar, a utilização das funções de impulso-resposta e da análise da decomposição da variância ajudam a captar defasagem nos efeitos que não poderiam ser captados em metodologias que não considerassem o processo dinâmico. E, por fim, o PVAR tem a excelente vantagem de poder ser empregada com séries de dados mais curtas, em decorrência do ganho de eficiência obtida pela dimensão transversal.

Nossos resultados mostram que, em todos os casos analisados e independente de serem domésticos ou globais, os choques nas emissões de carbono são responsáveis por queda na atividade econômica. Além disso, quando restringimos a amostra para os dez maiores emissores de CO₂ percebemos que esses efeitos se intensificam. Por outro lado, os choques na atividade produtiva e no consumo energético geram aumentos nas emissões domésticas e estrangeiras de CO₂ e os choques na abertura comercial reduzem as emissões estrangeiras.

A literatura econômica e ambiental que vem estudando os vínculos causais entre o crescimento econômico, o consumo de energia e as emissões de carbono sempre esteve mais focada na compreensão dos determinantes das emissões do que no exame de como as emissões podem impactar o crescimento econômico. Estes estudos, em sua grande maioria, objetivam propor políticas de mitigação das emissões sem prejudicar intensamente o crescimento dos países. Entretanto, o tempo para que essas ações sejam colocadas em prática pode estar se esgotando e considerar como os choques nas emissões de CO₂ afetam o crescimento econômico pode ajudar a apontar novos caminhos para as políticas públicas

²[Nordhaus \(2007\)](#) mostrou que o aumento das emissões de carbono afetam as possibilidades de produção da economia. Os modelos E-DSGE já utilizam essa informação e inserem uma função de dano à produção vinculada ao aumento da poluição nas funções de produção das firmas ([Heutel, 2012](#)).

ambientais.

Os estudos aplicados nessa área podem ser divididos em basicamente quatro grandes grupos. O primeiro deles teve início com o trabalho de Kraft & Kraft (1978) e a preocupação era estudar as relações causais entre o crescimento econômico e o consumo de energia. São exemplos recentes de estudos nessa área: Ozcan & Ozturk (2019), Aydin (2019) e Benkraiem et al. (2019). O segundo grupo tem Grossman & Krueger (1991) como ponto de partida e se concentrou no entendimento da relação entre a atividade econômica e as emissões de CO₂, podemos citar Chen et al. (2019), Destec & Sarkodie (2019) e Lau et al. (2019) como estudos recentes que seguiram esse caminho. O estudo de Antweiler et al. (2001) constrói as bases para o terceiro grupo, que se dedica a estudar as relações entre a abertura comercial e as emissões de CO₂, são exemplos de estudos recentes nessa área Kim et al. (2019) e Kolcava et al. (2019). Por fim, e só mais recentemente, um quarto grupo passou a buscar entender essas relações através de estruturas metodológicas unificadas (Antonakakis et al., 2017; Acheampong, 2018; Kahia et al., 2019; Ozcan et al., 2019; Koengkan et al., 2019; Charfeddine & Kahia, 2019).

Entretanto, o principal fato que liga esses grupos são os resultados conflitantes. As possíveis causas dessa falta de homogeneidade repousam no fato dos estudos contemplarem amostras com diferentes países, períodos de tempo distintos e metodologias variadas. Além disso, são constatados problemas de vies de variáveis omitidas e utilização de metodologias estáticas para analisar um problema com característica estritamente dinâmica (Antonakakis et al., 2017)

Este estudo, contribui com essa literatura ao estimar PVAR com o intuito de analisar como os choques nas emissões de carbono, de natureza local e global, podem afetar as economias dos países estudados. Para isso, consideramos, pela primeira vez na literatura da área, uma amostra composta com os trinta maiores emissores mundiais de CO₂, permitindo que pudéssemos concentrar nossa análise nos países que possuem níveis elevados de emissões e que, por essa razão, devem possuir um maior estoque de poluição ambiental. A periodicidade dos dados é anual e compreende o período entre 1996 e 2014. Este recorte temporal foi escolhido pois é o período onde temos informações completas sobre todos os trinta países que compõem a amostra na base de dados utilizada no estudo³.

Uma outra contribuição importante do nosso estudo é a introdução dos choques das emissões dos outros países nas economias domésticas, através da variável emissões do resto do mundo. Isto é compatível com o fato de que as mudanças climáticas são essencialmente um problema de natureza global, já que são consequência da concentração mundial de GEE. Entretanto, o que percebemos é que a literatura aplicada vem esquecendo de considerar que a qualidade do meio ambiente de um país é determinada não apenas pelas suas emissões domésticas, mas também, pelas emissões dos outros países do

³Utilizamos a *World Development Indicators*, base de dados mantida pelo Banco Mundial. Disponível em: <https://data.worldbank.org>.

mundo, mesmo que os trabalhos que utilizam modelos teóricos E-DSGE⁴ já considerem esse fato nas suas análises (Heutel, 2012; Annicchiarico & Dio, 2015; Leal et al., 2015; Silva & Silva, 2019). A ideia por trás disso é que se apenas um país decidir reduzir seu fluxo de emissões, terá um impacto possivelmente pequeno na concentração global de GEE. Por outro lado, o que este artigo vem propor é que os impactos econômicos domésticos proveniente de choques nas emissões do resto do mundo podem ser significativos, principalmente em uma amostra de países que já estão no topo da lista dos grandes poluidores mundiais a algum tempo.

Além das emissões do resto do mundo, introduzimos no nosso modelo a abertura comercial e o consumo de combustíveis fósseis como fazem alguns estudos recentes (Acheampong, 2018; Antonakakis et al., 2017; Kahia et al., 2019). A incorporação dessas três variáveis no nosso modelo busca reduzir o problema de viés de variáveis omitidas encontrado em estudos anteriores, que utilizam apenas o crescimento econômico, o consumo total de energia e as emissões domésticas para estimar os modelos.

A introdução do consumo de combustíveis fósseis no modelo busca captar o efeito que essas fontes energéticas podem ter tanto na atividade econômica quanto nas questões ambientais. Por outro lado, a introdução da abertura comercial busca captar os efeitos que o comércio internacional pode ter sobre as emissões de CO₂. Dois canais são discutidos na literatura, o primeiro deles explica como aumentos na produção provenientes da abertura comercial geram aumentos nas emissões domésticas. O segundo está relacionado aos efeitos provenientes de regulamentos ambientais mais rigorosos no ambiente internacional (que nos mercados domésticos), que impulsionam o emprego de métodos de produção mais respeitadores do meio ambiente e que são implementados à medida que a demanda por um ambiente melhor é exigido pelos agentes econômicos (Managi et al., 2009).

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: Na segunda seção, será realizada uma breve revisão da literatura. Na seção seguinte, a amostra será caracterizada e será realizada uma análise preliminar dos dados. Na terceira seção, serão apresentados os aspectos metodológicos do trabalho. Já na quarta seção, expomos e discutimos os resultados. E, por fim, a última seção apresenta as conclusões do artigo.

3.2 Revisão da Literatura

Como relatado anteriormente, a literatura que estuda as relações entre crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO₂ pode ser dividida em quatro grandes grupos. No entanto, pela grande quantidade de pesquisas existentes na área, iremos focar no grupo que estuda estas variáveis de forma integrada, dando ênfase aos estudos recentes que utilizam a metodologia PVAR para analisar essa relação. Entretanto, mostraremos

⁴Modelos Ambientais de Equilíbrio Geral, Dinâmicos e Estocásticos, no inglês: *Environmental-Dynamic Stochastic General Equilibrium Models*.

inicialmente as principais teses defendidas pelos outros três grupos.

O primeiro deles é o grupo que estuda de forma isolada a relação entre crescimento econômico e consumo de energia. Para estes autores, quando o consumo de energia causa o crescimento econômico e o contrário não é verificado, estamos diante da hipótese do crescimento. Neste caso, políticas que buscam reduzir o consumo de energia, com o objetivo de proteger o meio ambiente, deterioram o processo de crescimento econômico e devem ser evitadas, são exemplos de estudos que identificaram essa hipótese [Streimikiene & Kasperowicz \(2016\)](#), [Magazzino \(2017\)](#) e [Gozgor et al. \(2018\)](#). Já quando a causalidade vem do crescimento econômico para o consumo de energia, estamos diante da hipótese da conservação. Neste caso, as políticas ambientais que estimulam a redução do consumo energético poderão ser implementadas sem afetar negativamente o processo de crescimento econômico. São exemplos de estudos que encontraram estes resultados [Mahmoodi \(2017\)](#), [Armeanu et al. \(2017\)](#) e [Saad & Taleb \(2018\)](#). Por outro lado, quando a causalidade é bidirecional, estamos diante da hipótese do *feedback* e neste caso é sugerido precaução nas políticas ambientais, uma vez que o crescimento econômico pode ser afetado. Os seguintes estudos apontaram para essa hipótese: [Koçak & Sarkgünesi \(2017\)](#), [Menegaki et al. \(2017\)](#) e [Shahbaz et al. \(2018\)](#). Por fim, a hipótese da neutralidade está relacionada a não causalidade entre o crescimento econômico e o consumo de energia. Neste caso, a redução na utilização da energia não irá afetar a atividade econômica. Os estudos de [Smiech & Papiez \(2014\)](#) e [Ozcan & Ozturk \(2019\)](#) corroboram com essa última hipótese. Além disso, ainda existem vários outros trabalhos que encontram resultados mistos nas suas análises ([Marinaş et al., 2018](#); [Halicioglu & Ketenci, 2018](#); [Tugcu & Topcu, 2018](#))⁵.

O segundo grupo se concentrou na relação entre a atividade econômica e as emissões de CO₂. O estudo seminal de [Grossman & Krueger \(1991\)](#) dá início a uma grande quantidade de estudos relacionados. Neste grupo, a principal hipótese testada é a curva ambiental de Kuznets, que sugere que o crescimento econômico só causa problemas ao meio ambiente em suas etapas iniciais. Posteriormente, o aumento da renda per capita da população, em conjunto com maiores níveis educacionais, levaria a um processo de redução da degradação ambiental. Isso geraria uma curva na forma de um “U invertido” quando os dados das emissões fossem plotados junto com os da atividade econômica. Entretanto, aqui também temos muitos estudos conflitantes. São exemplos de estudos recentes que corroboram com a tese da curva de Kuznets, [Sinha & Sen \(2016\)](#), [Apergis et al. \(2017\)](#), [Sapkota & Bastola \(2017\)](#) e [Zhang et al. \(2017\)](#) e de estudos que não encontraram evidências dessa hipótese, [Neve & Hamaide \(2017\)](#), [Pal & Mitra \(2017\)](#), [Rehman & Rashid \(2017\)](#) e [Zoundi \(2017\)](#)⁶.

O estudo de [Grossman & Krueger \(1991\)](#) também foi responsável por inciar as discussões do terceiro grupo. Esses autores sugerem que existem pelo menos três canais que fazem com que a abertura comercial impacte o meio ambiente. O primeiro canal indica

⁵Para um bom resumo dessa literatura ver [Papieza et al. \(2019\)](#).

⁶Para uma extensa revisão dessa literatura ver [Shahbaz & Sinha \(2019\)](#).

que o aumento do comércio gera aumento na poluição à medida que a produção se expande devido ao próprio aumento no acesso a novos mercados. O segundo canal sugere que a abertura comercial reduz a poluição ambiental à medida que surgem novas tecnologias e os processos produtivos mais poluidores são substituídos por processos mais limpos, melhorando a qualidade ambiental. Por outro lado, o terceiro canal sugere que o processo de abertura comercial proporciona um deslocamento das empresas mais poluidoras para países com regulamentos ambientais mais fracos, aumentando a poluição global. Assim como nesses caminhos teóricos, os resultados dos estudos empíricos mostram que a abertura comercial pode melhorar (Managi et al., 2009; Ling et al., 2015; Kim et al., 2019) ou piorar (Bombardini & Li, 2016; Shahbaz et al., 2017; Kolcava et al., 2019) a qualidade do meio ambiente⁷.

Com relação ao quarto grupo, que estuda crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO₂ de forma integrada, podemos afirmar que várias metodologias já foram empregadas para esse fim (Zhu et al., 2016; Dogan & Ozturk, 2016; Dogan & Ozturk; Bhat-tacharya et al., 2017; Ahmad & Du, 2017)⁸. Mas, a partir daqui, como já mencionamos anteriormente, iremos concentrar nossa análise nos resultados dos estudos que utilizaram a metodologia PVAR para estudar a relação entre essas três variáveis.

O estudo de Antonakakis et al. (2017) utiliza uma amostra de 106 países classificados por diferentes grupos de renda, no período entre 1971 e 2011, com o duplo objetivo de investigar a relação causal entre crescimento econômico e consumo de energia e testar a hipótese da curva ambiental de Kuznets. Para tal, os autores estimaram diferentes modelos PVAR para diferentes fontes energéticas. As variáveis utilizadas foram: crescimento econômico, emissões de CO₂, consumo total de energia e consumo dos principais componentes da matriz energética (eletricidade, petróleo, energias renováveis, gás natural e carvão). Os resultados desse estudo apontaram para uma relação causal bidirecional entre o crescimento econômico e o consumo total de energia, sustentando a hipótese do *feedback*. Por outro lado, não foram observadas evidências favoráveis a uma curva de Kuznets ambiental em formato de "U invertido", como discutido anteriormente. Mas, o que se observou foi que, em todos os grupos de renda, um aumento no crescimento econômico aumentou as emissões de CO₂. Por fim, os resultados das funções de impulso resposta mostraram que choques nas emissões de CO₂ estão vinculados a variações positivas no crescimento econômico.

O estudo de Acheampong (2018) utilizou uma amostra com 116 países, entre os períodos de 1990 e 2014, classificando-os em cinco diferentes regiões (Mundo; África Subsaariana; Meio Leste e Norte da África; costa do pacífico da Ásia; América Latina e Caribe). O autor estima cinco PVARs, sendo um para cada uma das regiões, utilizando as seguintes

⁷O trabalho de Ho & Iyke (2019) faz um bom resumo dessa literatura.

⁸Os trabalhos de Antonakakis et al. (2017) e Kahia et al. (2019) fazem um bom resumo da literatura recente.

variáveis: crescimento econômico, consumo total de energia, emissões CO₂ e abertura comercial. Os resultados mostraram que o consumo total de energia causa o crescimento econômico, mas que essa relação é negativa. Uma exceção foi a África Subsariana em que essa relação de causalidade é positiva, sustentando, neste caso, a hipótese do crescimento. Por outro lado, os resultados desse estudo sugerem evidências da curva de Kuznets ambiental nos modelos com os dados mundiais e com os dados da África Subsariana. Com relação a abertura comercial, o estudo mostra que um maior comércio internacional está relacionado a uma redução nas emissões de carbono. Por fim, o autor demonstra que os choques nas emissões de CO₂ estão relacionados a aumentos no crescimento econômico, como no caso anterior.

O estudo de [Kahia et al. \(2019\)](#) utiliza uma amostra bem mais restrita que a dos estudos discutidos anteriormente, são estudados apenas 12 países do Meio Leste e Norte da África, no período entre 1980 e 2012. Neste estudo, os autores utilizam as variáveis crescimento econômico, consumo de energia renovável, emissões de CO₂, abertura comercial e investimento direto estrangeiro para estimar o PVAR. Os resultados apontam para uma bicausalidade entre o crescimento econômico e o consumo de energia renovável, sustentando uma hipótese de *feedback* um pouco distinta da discutida anteriormente. Neste caso, aumentos na utilização de energias renováveis gerariam um maior nível de crescimento econômico, mas sem degradar o meio ambiente, já que estaria utilizando fontes energéticas “limpas”. Em contrapartida, este estudo não buscou testar a hipótese da curva ambiental de Kuznets, mas os resultados sugerem que choques de crescimento econômico estão relacionados a uma maior degradação ambiental. Por outro lado, choques no consumo de energias renováveis, na abertura comercial e no investimento direto estrangeiro estão relacionados a redução nas emissões de CO₂.

Por sua vez, [Ozcan et al. \(2019\)](#) estima um PVAR considerando uma amostra de 35 países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) com dados de 2000 a 2014. Estes autores utilizam três diferentes indicadores ambientais além do crescimento econômico e do consumo de energia, são eles: um indicador de pegada ecológica, um índice de performance ambiental e as emissões de CO₂. Os resultados mostram existe uma relação bidirecional entre o crescimento econômico e o consumo de energia, o que sustenta a hipótese do *feedback*. Por outro lado, tanto o crescimento econômico quanto o consumo de energia causam os três indicadores ambientais. Além disso, os autores apontam evidências contrárias a curva ambiental de Kuznets. Por fim, os resultados mostram que choques ambientais no indicador de pegada ambiental e nas emissões de CO₂ geram aumentos no crescimento econômico, enquanto que choques no índice de performance ambiental não possuem efeitos estatisticamente significativos no crescimento econômico.

O estudo de [Koengkan et al. \(2019\)](#) estima um PVAR para analisar quatro países da Comunidade Andina (Bolívia, Colômbia, Equador e Peru) no período entre 1971 e

2014. O modelo é estimado utilizando apenas as três variáveis clássicas, crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO₂. Os resultados apontam para uma relação bidirecional entre o crescimento econômico e o consumo de energia, sustentando a hipótese do *feedback*. A relação entre o crescimento econômico e as emissões também é bidirecional, mas choques no crescimento econômico elevam as emissões, enquanto que choques ambientais estão relacionados a redução no crescimento econômico.

Por fim, Charfeddine & Kahia (2019) estudam vinte e quatro países do Meio Leste e Norte da África entre os anos de 1980 e 2015. As autoras estimam um PVAR com as seguintes variáveis: crescimento econômico, tamanho da força de trabalho, estoque de capital, percentual de energia renovável no consumo total de energia e um indicador de desenvolvimento financeiro. Os resultados mostram que a energia renovável causa o crescimento econômico e que, portanto, existem bons incentivos para investimentos nessas fontes energéticas. Neste caso, o crescimento impulsionado por fontes renováveis “limpas” gerariam menores problemas de degradação ambiental. Por outro lado, o estudo mostra que choques na energia renovável geram queda nas emissões de CO₂ e que choque no crescimento econômico aumentam essas emissões. Além disso, o estudo constatou que o desenvolvimento financeiro não tem impacto estatisticamente significativo na degradação ambiental. Por fim, também não foi observado impactos significativos o crescimento econômico na presença de choques ambientais.

Portanto, podemos considerar que a literatura que estuda as relações entre crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO₂ de forma integrada, utilizando a metodologia PVAR, possui uma certa convergência no que se refere aos principais questionamentos da área. No que diz respeito a relação entre o crescimento econômico e o consumo de energia, a maioria dos estudos aponta para a hipótese do *feedback*, mas existem estudos que sugerem a hipótese do crescimento. No que diz respeito a curva ambiental de Kuznets, apenas um dos estudos encontrou evidências favoráveis a esse fato, em todos os outros, choques no crescimento econômico estão vinculados a aumentos nas emissões de CO₂. Além disso, os estudos sugerem que a abertura comercial gera redução nas emissões de carbono. Por fim, observamos que em apenas um dos estudos os choques nas emissões de CO₂ geraram redução no crescimento econômico (Koengkan et al., 2019). Em todos os demais, choques nas variáveis ambientais originaram aumentos no crescimento econômico.

3.3 Descrição e Análise Preliminar dos Dados

Os dados utilizados neste estudo foram coletados no *World Development Indicators*, base de dados mantida pelo Banco Mundial⁹. Selecionamos e ranqueamos os trinta países que mais emitiram CO₂ no planeta em 2014, como pode ser visualizado na Tabela 3.1. Neste período, esses países foram responsáveis por cerca de 83% de todas as emissões

⁹Disponível em: <https://data.worldbank.org>.

de CO₂ do mundo. Porém, é importante observar que os três países mais poluentes foram responsáveis por quase 50% das emissões de CO₂ do planeta, demonstrando que o problema das emissões está bastante concentrado em uma pequena quantidade de países.

Tabela 3.1: Países da amostra, ranqueados pelo nível das emissões de CO₂ em 2014.

Rank	Países	Emissões (Gt)	% emissões no mundo	% acumul.	Rank	Países	Emissões (Gt)	% emissões no mundo	% acumul.
1	China	10.2919	28.48	28.48	16	Austrália	0.3613	1.00	73.45
2	Estados Unidos	5.2543	14.54	43.02	17	Turquia	0.3460	0.96	74.41
3	Índia	2.2384	6.19	49.21	18	Itália	0.3204	0.89	75.29
4	Rússia	1.7053	4.72	53.93	19	Tailândia	0.3162	0.88	76.17
5	Japão	1.2140	3.36	57.29	20	França	0.3033	0.84	77.01
6	Alemanha	0.7199	1.99	59.28	21	Polônia	0.2857	0.79	77.80
7	Irã	0.6495	1.80	61.08	22	Cazaquistão	0.2483	0.69	78.49
8	Arábia Saudita	0.6010	1.66	62.74	23	Malásia	0.2428	0.67	79.16
9	Coreia do Sul	0.5872	1.62	64.37	24	Espanha	0.2340	0.65	79.81
10	Canadá	0.5372	1.49	65.85	25	Ucrânia	0.2273	0.63	80.44
11	Brasil	0.5298	1.47	67.32	26	Argentina	0.2040	0.56	81.00
12	África do Sul	0.4898	1.36	68.68	27	Egito	0.2019	0.56	81.56
13	México	0.4803	1.33	70.00	28	Venezuela	0.1852	0.51	82.07
14	Indonésia	0.4642	1.28	71.29	29	Iraque	0.1684	0.47	82.54
15	Reino Unido	0.4198	1.16	72.45	30	Holanda	0.1673	0.46	83.00

Nota: Para a formulação do Ranque das emissões foram usados apenas os dados de 2014.

Os dados utilizados possuem periodicidade anual e abrangem o período entre 1996 e 2014. A seleção do período se deve à disponibilidade dos dados para todos os trinta países estudados. As variáveis utilizadas foram: o produto interno bruto real (PIB), o consumo total de energia (CTE), o consumo de combustíveis fósseis (CCF), as emissões de CO₂ domésticas (EDM), as emissões de CO₂ do resto do mundo¹⁰ (ERM) e um indicador de abertura comercial¹¹ (AC), os dados podem ser visualizados na Figura A1 (no Apêndice).

As estatísticas descritivas dos dados utilizados estão disponibilizadas na Tabela 3.2. Como as variáveis estão em primeira diferença do logaritmo natural (dln), podemos analisá-las como taxas médias de crescimento do período (1996-2014). O primeiro fato que chama a atenção é que a China e a Índia, que em conjunto são responsáveis por quase 35% das emissões do mundo, possuem taxas médias de crescimento do PIB, do consumo total de energia e do consumo de combustíveis fósseis bastante elevadas quando comparadas com a maioria dos demais países, fazendo com que eles tenham taxas médias de crescimento das emissões domésticas acima de 5%, as maiores da amostra.

Por outro lado, um grupo de oito países europeus conseguiram ter taxas médias de crescimento das emissões domésticas negativas, entretanto com taxas médias de crescimento do PIB bem mais modestas. Porém, o que fica claro é que existe uma possível relação entre a redução do consumo médio de combustíveis fósseis e a redução das emissões domésticas de todos esses países, com exceção da Espanha que conseguiu reduzir as emissões mesmo com crescimento positivo do consumo total de energia e do consumo de combustíveis fósseis.

Além disso, levando em consideração o ranqueamento demonstrado na Tabela 3.1, computamos as estatísticas descritiva para os grupos dos dez, vinte e trinta maiores emis-

¹⁰Emissões do mundo menos as emissões domésticas de cada um dos países.

¹¹Exportações mais importações como percentual do PIB.

Tabela 3.2: Estatísticas descritivas das variáveis de 1996 a 2014, por país.

Rank	Países	Estatísticas	dln.PIB	dln.CTE	dln.CCF	dln.EDM	dln.ERM	d.AC
1	China	Média	0.0910	0.0564	0.0623	0.0595	0.0142	0.0057
		Desv.Pad.	0.0162	0.0405	0.0472	0.0547	0.0147	0.0490
2	Estados Unidos	Média	0.0244	0.0037	0.0022	0.0012	0.0287	0.0040
		Desv.Pad.	0.0175	0.0207	0.0231	0.0250	0.0213	0.0191
3	Índia	Média	0.0623	0.0420	0.0528	0.0534	0.0222	0.0137
		Desv.Pad.	0.0173	0.0189	0.0266	0.0351	0.0188	0.0377
4	Rússia	Média	0.0344	0.0058	0.0057	0.0023	0.0250	-0.0039
		Desv.Pad.	0.0476	0.0315	0.0332	0.0373	0.0171	0.0484
5	Japão	Média	0.0082	-0.0059	0.0019	0.0013	0.0247	0.0110
		Desv.Pad.	0.0206	0.0304	0.0304	0.0336	0.0176	0.0304
6	Alemanha	Média	0.0133	-0.0050	-0.0089	-0.0096	0.0246	0.0215
		Desv.Pad.	0.0216	0.0316	0.0333	0.0330	0.0175	0.0417
7	Irã	Média	0.0298	0.0448	0.0447	0.0456	0.0234	0.0050
		Desv.Pad.	0.0371	0.0454	0.0460	0.0551	0.0178	0.0378
8	Arábia Saudita	Média	0.0328	0.0488	0.0487	0.0494	0.0234	0.0082
		Desv.Pad.	0.0396	0.0532	0.0543	0.1052	0.0175	0.0552
9	Coreia do Sul	Média	0.0432	0.0325	0.0296	0.0236	0.0237	0.0224
		Desv.Pad.	0.0340	0.0438	0.0531	0.0615	0.0175	0.0841
10	Canadá	Média	0.0253	0.0095	0.0099	0.0073	0.0240	-0.0027
		Desv.Pad.	0.0174	0.0204	0.0251	0.0271	0.0176	0.0331
10 países mais emissores		Média	0.0365	0.0233	0.0249	0.0234	0.0234	0.0085
		Desv.Pad.	0.0366	0.0414	0.0451	0.0565	0.0177	0.0464
11	Brasil	Média	0.0295	0.0333	0.0375	0.0378	0.0235	0.0041
		Desv.Pad.	0.0208	0.0270	0.0428	0.0436	0.0175	0.0221
12	África do Sul	Média	0.0303	0.0185	0.0188	0.0159	0.0238	0.0110
		Desv.Pad.	0.0168	0.0349	0.0405	0.0535	0.0175	0.0580
13	México	Média	0.0271	0.0187	0.0211	0.0193	0.0238	0.0098
		Desv.Pad.	0.0280	0.0273	0.0286	0.0298	0.0175	0.0348
14	Indonésia	Média	0.0404	0.0286	0.0332	0.0381	0.0235	-0.0031
		Desv.Pad.	0.0459	0.0301	0.0441	0.1338	0.0172	0.1347
15	Reino Unido	Média	0.0214	-0.0099	-0.0129	-0.0131	0.0243	0.0042
		Desv.Pad.	0.0184	0.0328	0.0412	0.0431	0.0175	0.0248
16	Austrália	Média	0.0328	0.0158	0.0156	0.0131	0.0238	0.0025
		Desv.Pad.	0.0089	0.0210	0.0267	0.0283	0.0177	0.0228
17	Turquia	Média	0.0460	0.0358	0.0400	0.0368	0.0236	0.0038
		Desv.Pad.	0.0479	0.0449	0.0497	0.0519	0.0174	0.0504
18	Itália	Média	0.0048	-0.0043	-0.0131	-0.0155	0.0242	0.0052
		Desv.Pad.	0.0209	0.0306	0.0376	0.0387	0.0174	0.0342
19	Tailândia	Média	0.0316	0.0409	0.0435	0.0355	0.0236	0.0221
		Desv.Pad.	0.0384	0.0442	0.0489	0.0505	0.0175	0.0943
20	França	Média	0.0163	0.0012	-0.0065	-0.0074	0.0241	0.0089
		Desv.Pad.	0.0152	0.0270	0.0389	0.0423	0.0176	0.0282
20 países mais emissores		Média	0.0322	0.0206	0.0213	0.0197	0.0236	0.0077
		Desv.Pad.	0.0339	0.0389	0.0450	0.0589	0.0174	0.0537
21	Polônia	Média	0.0396	-0.0030	-0.0060	-0.0098	0.0241	0.0263
		Desv.Pad.	0.0167	0.0342	0.0353	0.0379	0.0173	0.0382
22	Cazaquistão	Média	0.0598	0.0202	0.0212	0.0202	0.0237	-0.0092
		Desv.Pad.	0.0395	0.1007	0.1018	0.0976	0.0171	0.0960
23	Malásia	Média	0.0470	0.0502	0.0522	0.0366	0.0236	-0.0283
		Desv.Pad.	0.0387	0.0553	0.0589	0.0694	0.0173	0.1035
24	Espanha	Média	0.0198	0.0067	0.0011	-0.0017	0.0239	0.0096
		Desv.Pad.	0.0264	0.0400	0.0554	0.0608	0.0175	0.0360
25	Ucrânia	Média	0.0162	-0.0230	-0.0312	-0.0355	0.0244	0.0018
		Desv.Pad.	0.0702	0.0633	0.0745	0.0867	0.0171	0.0964
26	Argentina	Média	0.0267	0.0248	0.0252	0.0246	0.0237	0.0045
		Desv.Pad.	0.0615	0.0360	0.0451	0.0565	0.0173	0.0512
27	Egito	Média	0.0442	0.0398	0.0421	0.0393	0.0236	-0.0070
		Desv.Pad.	0.0168	0.0488	0.0479	0.0651	0.0174	0.0587
28	Venezuela	Média	0.0218	0.0237	0.0238	0.0173	0.0237	0.0004
		Desv.Pad.	0.0668	0.0669	0.0770	0.1076	0.0177	0.0598
29	Iraque	Média	0.0719	0.0204	0.0184	0.0430	0.0236	0.0412
		Desv.Pad.	0.1617	0.1370	0.1375	0.1707	0.0174	0.2912
30	Holanda	Média	0.0192	-0.0007	-0.0032	-0.0034	0.0239	0.0222
		Desv.Pad.	0.0218	0.0344	0.0382	0.0285	0.0175	0.0674
30 países mais emissores		Média	0.0337	0.0190	0.1898	0.0175	0.0237	0.0072
		DP	0.0477	0.0517	0.0571	0.0701	0.0172	0.0786

Nota: As estatísticas foram calculadas com as variáveis em primeira diferença do logaritmo natural (dln), com exceção do indicador de abertura comercial que está apenas em primeira diferença (d). Esse foi o padrão adotado na estimação dos modelos.

sores e percebemos que quanto mais restringimos a amostra maiores são as taxas médias de crescimento do consumo de combustíveis fósseis e das emissões domésticas. Portanto, além dos níveis de emissões estarem bastante concentrados nos países do topo do ranking, percebemos que elas continuam crescendo a uma taxa média superior a dos demais países. As taxas médias de crescimento das emissões foram de 2,34%, 1,97% e 1,75% nos grupos dos 10, 20 e 30 maiores emissores, respectivamente.

3.4 Metodologia

3.4.1 Testes de Raiz Unitária para Dados em Paineis

Analizamos a estacionariedade dos nossos dados utilizando os testes de raiz unitária para dados em painel de [Levin et al. \(2002\)](#), [Harris & Tzavalis \(1999\)](#), [Breitung \(2000\)](#), [Im et al. \(2003\)](#) e [Hadri \(2000\)](#). Para a discussão destes testes, considere a seguinte especificação, descrita em [Baltagi \(2008\)](#):

$$\Delta Y_{i,t} = \rho_i Y_{i,t-1} + \sum_{L=1}^{p_i} \phi_{i,L} \Delta Y_{i,t-1} + \varepsilon_{i,t} \quad (3.1)$$

onde, Δ é o operador de diferença, $Y_{i,t}$ é um vetor que contém as variáveis que serão testadas e ρ_i é o parâmetro de persistência do modelo. Assumimos que quando $\rho_i = 0$ o processo $\{Y_{i,t}\}$ tem uma raiz unitária em i e, alternativamente, quando $\rho_i < 0$ o processo $\{Y_{i,t}\}$ é estacionário.

Os testes de [Levin et al. \(2002\)](#), [Harris & Tzavalis \(1999\)](#) e [Breitung \(2000\)](#) assumem como hipótese nula que os parâmetros de persistência são idênticos e iguais a zero ($\rho_i = 0$) e, como hipótese alternativa, que $\rho_i < 0$ e iguais para todo i . A diferença entre estes testes é que [Harris & Tzavalis \(1999\)](#) consideram o número de períodos (T) fixo, sendo ideal para testar séries mais curtas em T e [Breitung \(2000\)](#) pode ser utilizado para séries com tamanho mais modestos tanto em T quanto em N.

Entretanto, uma limitação destes testes é a suposição de que todos os painéis possuem o mesmo valor para ρ_i . O teste [Im et al. \(2003\)](#) soluciona este problema ao relaxar esse pressuposto e assumir que cada painel tenha seu próprio ρ_i . Portanto, o teste assume como hipótese nula que todos os painéis possuem raiz unitária ($\rho_i = 0, \forall i$) e, como hipótese alternativa, que existe algum painel estacionário ($\rho_i < 0$).

Além disso, os testes anteriores necessitam de evidências contrárias muito fortes para a rejeição da hipótese nula (não estacionariedade). Portanto, para ajudar na tomada de decisão iremos utilizar o teste LM de [Hadri \(2000\)](#), que inverte as hipóteses discutidas anteriormente e assume, como hipótese nula, que todos os painéis são estacionários ($\rho_i < 0, \forall i$) e, como hipótese alternativa, que pelo menos um painel contém raiz unitária ($\rho_i = 0$).

Os testes de raiz unitária foram executados tanto em nível como em primeira diferença

dos logaritmos naturais¹². Os resultados dos modelos sem tendência foram reportados na Tabela A1 e os modelos com tendência na Tabela A2. Temos indicações que os processos são estacionários em primeira diferença e possuem raiz unitária em nível.

Além disso, uma inspeção visual das variáveis, mostradas na Figura A1, sugere que os dados possuem uma tendência temporal que é eliminada quando os dados estão em primeira diferença.

3.4.2 Abordagem PVAR-GMM

Construímos um PVAR seguindo o desenvolvimento original de [Holtz-Eakin et al. \(1988\)](#). Para a escolha do número de defasagens do modelo, seguimos as escolhas ótimas sugeridas pelo procedimento de [Andrews & Lu \(2001\)](#), que podem ser observadas na Tabela A3. Portanto, podemos representar nosso modelo de acordo com o seguinte processo dinâmico de primeira ordem:

$$Y_{i,t} = A_1 Y_{i,t-1} + \delta_i + \mu_t + \varepsilon_{i,t} \quad (3.2)$$

com $i = 1, \dots, 30$ e $t = 1996, \dots, 2014$, onde A_1 é o vetor de coeficientes autorregressivos e $Y_{i,t}$ é o vetor que contém as primeiras diferenças (d) do logaritmo natural (ln) das seguintes variáveis: produto interno bruto (dln.PIB_{*i,t*}), consumo total de energia (dln.CTE_{*i,t*}), consumo de combustíveis fósseis (dln.CCF_{*i,t*}), emissões domésticas (dln.EDM_{*i,t*}), emissões do resto do mundo (dln.ERM_{*i,t*}) e abertura comercial (d.AC_{*i,t*}). Por outro lado, δ_i representa o vetor de efeitos fixos não observáveis que são invariantes no tempo¹³, μ_t representa os efeitos não observáveis do tempo e $\varepsilon_{i,t}$ é o vetor de erros aleatórios que possui as seguintes características: $E(\varepsilon_{i,t}) = 0$, $E(\varepsilon_{i,t}\varepsilon_{i,t}) = \Sigma_\varepsilon$ (sendo Σ_ε uma matriz não singular) e $E(\varepsilon_{i,s}\varepsilon_{i,t}) = 0$ para todo $t \neq s$.

Entretanto, como em qualquer modelo que inclua defasagens nas variáveis dependentes, os efeitos fixos são correlacionados com os regressores e a correção pelo processo de diferenciação da média em uma estimação por mínimos quadrados ordinários (MQO) levaria a coeficientes inconsistentes e tendenciosos ([Love & Zicchino, 2006](#)). Para solucionar esse problema, utilizamos o “procedimento de Helmet” sugerido por [Arellano & Bover \(1995\)](#), que consiste em realizar a seguinte transformação para eliminar os efeitos fixos individuais:

$$y_{i,t}^* = (y_{i,t} - \bar{y}_{i,t}) \sqrt{\frac{T_{i,t}}{T_{i,t} + 1}} \quad (3.3)$$

onde, $T_{i,t}$ é o número de observações futuras disponíveis do país i no tempo t e $\bar{y}_{i,t}$ é a

¹²Com exceção da abertura comercial, que preferimos não utilizar o logaritmo natural por ser uma variável que expressa um valor percentual.

¹³Os efeitos fixos capturam quaisquer diferenças entre países que são invariantes no tempo (por exemplo, clima, tamanho territorial, tamanho da população, etc.)

média de $y_{i,t}$. Após a transformação podemos utilizar as variáveis defasadas originais como instrumento para estimar o modelo pelo método generalizado dos momentos (GMM), uma vez que as variáveis originais são ortogonais às variáveis transformadas. No nosso caso, utilizamos o número de instrumentos igual ao número de regressores, o que torna nosso modelo “exatamente identificado”. Assim, podemos considerar que nosso PVAR-GMM é numericamente equivalente a um sistema de equações simultâneas de mínimos quadrados em dois estágios (MQ2E) (Love & Zicchino, 2006).

O processo de identificação do modelo foi baseado na decomposição de Cholesky, que impõe uma restrição à estrutura de variância-covariância dos resíduos para que Σ_ϵ assuma a forma de uma matriz triangular inferior, garantindo que os choques sejam ortogonais. Portanto, as variáveis deverão ser ordenadas por grau de exogeneidade, uma vez que as variáveis incluídas no início do vetor irão afetar as próximas variáveis contemporaneamente e com defasagens, mas só serão afetadas pelas defasagens das variáveis seguintes, e assim sucessivamente, fazendo com que a última variável seja a mais endógena do sistema e afete as demais apenas com defasagens.

Considerando a relação entre as três variáveis clássicas do modelo (crescimento econômico, consumo de energia e emissões de CO₂), assumimos que o crescimento econômico só é afetado contemporaneamente por si próprio, enquanto o consumo de energia é afetado contemporaneamente pelo crescimento econômico e por ele mesmo e as emissões de CO₂ pelas duas variáveis anteriores e por si própria, como sugerido pela literatura (Antonakakis et al., 2017; Acheampong, 2018; Ozcan & Ozturk, 2019; Koengkan et al., 2019). Essa ordenação parece ser plausível uma vez que a poluição ambiental e o consumo de energia atuais não afetam o crescimento econômico atual, mas afetam o crescimento econômico futuro. Por outro lado, faz sentido considerar que o consumo de energia atual afete as emissões atuais, mas que a poluição atual não afete o consumo de energia atual.

Entretanto, nós não utilizamos exatamente essas três variáveis no nosso modelo. Em primeiro lugar, dividimos o consumo de energia em consumo total de energia (CTE) e consumo de combustíveis fósseis (CCF) e consideramos a última variável mais endógena, pois o consumo de combustíveis fósseis afeta necessariamente o consumo total de energia, mas o contrário não é sempre verdadeiro, uma vez que o aumento no consumo total de energia pode ser causado pelo aumento do consumo de energias renováveis, por exemplo. Essa divisão busca captar o efeito que as fontes energéticas mais poluentes podem ter tanto na atividade econômica quanto nas questões ambientais. Em segundo lugar, dividimos as emissões de CO₂ em emissões domésticas (EDM) e emissões do resto do mundo (ERM) e consideramos a última variável mais endógena, uma vez que é mais aceitável que as emissões domésticas afetem contemporaneamente as emissões globais do que o contrário. Por fim, inserimos a abertura comercial (AC) como a variável mais endógena do modelo, seguindo (Acheampong, 2018), dessa forma, restringimos os efeitos contemporâneos dessa variável apenas a si própria e deixamos que os choques nas demais variáveis lhes afetem

contemporaneamente. Assim, utilizamos a seguinte ordenação para o nosso vetor de variáveis: $Y_{i,t} = [\text{dln.PIB}_{i,t}, \text{dln.CTE}_{i,t}, \text{dln.CCF}_{i,t}, \text{dln.EDM}_{i,t}, \text{dln.ERM}_{i,t}, \text{d.AC}_{i,t}]'$.

A rotina de estimação do modelo, a geração das funções de impulso-resposta e a decomposição da variância seguem [Holtz-Eakin et al. \(1988\)](#) e [Love & Zicchino \(2006\)](#)¹⁴.

3.5 Resultados

Nesta seção, reportamos os resultados das funções de impulso-resposta e da análise da decomposição da variância relativos ao modelo PVAR-GMM. Como relatado anteriormente, estimamos modelos para os trinta, vinte e dez países mais emissores do mundo¹⁵. Em todos os casos, utilizamos apenas uma ordem de defasagem, seguindo os critérios de seleção disponíveis na Tabela A3. Além disso, utilizamos todas as variáveis em primeira diferença, considerando os testes de raiz unitária disponíveis na Tabela A1 e testamos as condições de estabilidade dos modelos, de acordo com o apresentado na Figura A2.

3.5.1 Funções de Impulso-Resposta

Nesta seção, reportamos os resultados das funções de impulso-resposta para os três modelos estimados. O modelo com trinta países será o modelo base e será utilizado como ponto de comparação para os outros modelos. No caso das figuras que mostram apenas o modelo base, realizamos simulações de Monte Carlo com 1.000 iterações para gerar os intervalos de confiança de 95% para as funções de impulso-resposta. Por outro lado, as figuras em que comparamos os modelos, mostram apenas as respostas aos choques sem intervalo de confiança, para que os gráficos não fiquem visualmente poluídos. Além disso, discutiremos apenas aos resultados vinculados aos três objetivos que seguem: i) analisar como os choques nas emissões de carbono afetam as demais variáveis do modelo; ii) analisar como as emissões de CO₂ são afetadas pelos choques de cada uma das demais variáveis do modelo; e, iii) analisar como os choques no crescimento econômico afetam o consumo total de energia, o consumo de combustíveis fósseis, a abertura comercial e vice-versa.

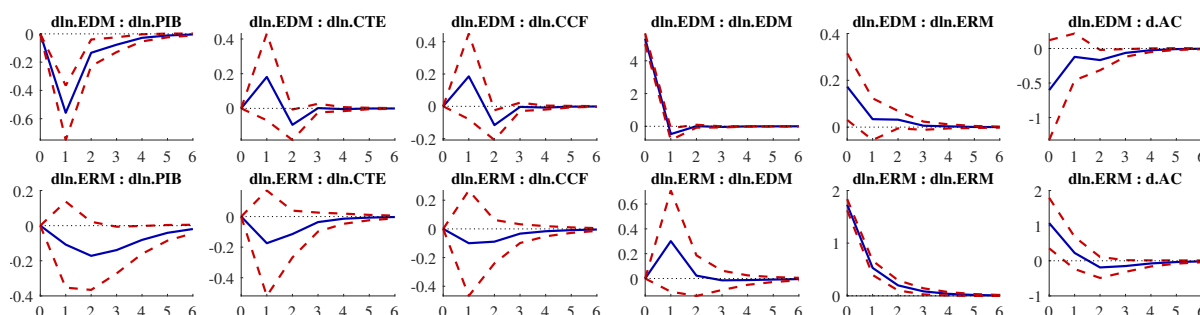
3.5.1.1 Modelo Base: Os Trinta Países Mais Emissores do Mundo

A Figura 3.1 mostra os resultados vinculados ao primeiro objetivo relatado anteriormente. Observamos que os choques nas emissões de carbono, independentemente se domésticos ou do resto do mundo, são responsáveis por efeitos negativos e estatisticamente significativos no crescimento econômico. Entretanto, o choque nas emissões do

¹⁴Os intervalos de confiança das funções de impulso-resposta foram calculados através de 1.000 simulações de Monte Carlo.

¹⁵Como exercício de robustez, estimamos o modelo com as variáveis em nível. Os resultados não satisfizeram as condições de estabilidade e por isso não serão apresentados.

Figura 3.1: Respostas do modelo com 30 países aos choques nas emissões de CO₂ domésticas e do resto do mundo.



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas do crescimento econômico, do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis, das emissões de CO₂ domésticas, das emissões de CO₂ do resto do mundo e da abertura comercial a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ domésticas. A segunda linha são as respostas das mesmas variáveis a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ do resto do mundo. As linhas em azul são as respostas das variáveis ao referido choque e as linhas tracejadas em vermelho são o intervalo de confiança de 95%.

resto do mundo possui um efeito defasado no crescimento econômico que só passa a ser estatisticamente significativos três anos após o choque. Isto parece fazer sentido pois as emissões de outros países vão para a atmosfera e demora um certo tempo até exercer seus efeitos em outros países.

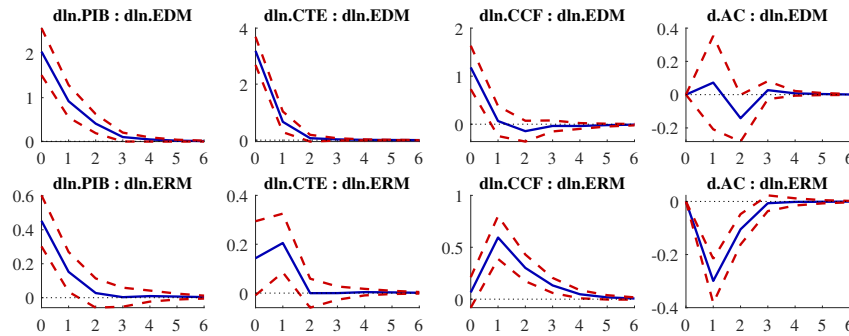
Por outro lado, o choque nas emissões domésticas de carbono não afetam no curto prazo, com significância estatística, o consumo de energia total, o consumo de combustíveis fósseis e a abertura comercial, mas fazem as emissões de CO₂ do resto do mundo subirem. Além disso, os resultados mostram que o choque nas emissões de carbono do resto do mundo, além de afetar o crescimento econômico, gera aumento no indicador de abertura comercial. Uma possível explicação para esse fato é que como os problemas ambientais geram queda no crescimento econômico, a manutenção dos níveis de consumo dos países afetados passam a estar mais dependentes do comércio com outros países, uma vez que os desastres ambientais não prejudicam os países de forma homogênea.

A Figura 3.2 mostra os resultados para o segundo objetivo discutido anteriormente, que são os efeitos das emissões domésticas e do resto do mundo aos choques no crescimento econômico, no consumo total de energia, no consumo de combustíveis fósseis e na abertura comercial.

Nossos resultados mostram que tanto o choque no crescimento econômico quanto os dois choques energéticos geram aumentos nas emissões de carbono domésticas e do resto do mundo, como esperado. Além disso, percebemos que os choques afetam as emissões domésticas com muito mais intensidade do que as emissões do resto do mundo, o que também parece fazer sentido. Por outro lado, o choque na abertura comercial não possui efeito estatisticamente significativo nas emissões domésticas, mas reduzem as emissões do resto do mundo. Esse último efeito pode ser explicado por possíveis regulamentos ambientais mais rigorosos no ambiente internacional após um aumento nas emissões de carbono global, fazendo com que sejam considerados o emprego de métodos de produção

mais respeitadores do meio ambiente. De acordo com [Managi et al. \(2009\)](#), essas medidas são implementados quando a demanda por um ambiente melhor passa a ser exigido pelos agentes econômicos.

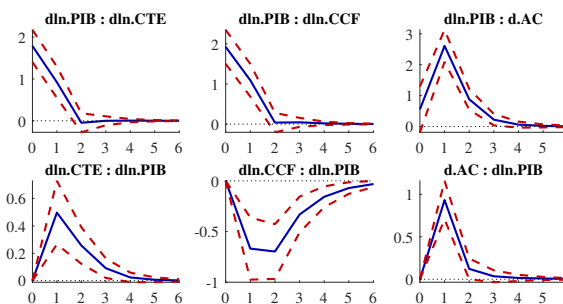
Figura 3.2: Respostas das emissões de carbono aos choques no crescimento econômico, no consumo energético e na abertura comercial no modelo com 30 países.



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas das emissões de CO₂ domésticas aos choques no crescimento econômico, no consumo total de energia, no consumo de combustíveis fósseis, nas emissões de CO₂ domésticas, nas emissões de CO₂ do resto do mundo e na abertura comercial. A segunda linha são as respostas das emissões de CO₂ do resto do mundo aos choques listados acima. As linhas em azul são as respostas das variáveis ao referido choque e as linhas tracejadas em vermelho são o intervalo de confiança de 95%.

Por fim, a Figura 3.3 mostra os resultados relativos ao terceiro objetivo discutido anteriormente, que se refere a relação entre o crescimento econômico, o consumo energético e a abertura comercial. Assim, na primeira linha da figura, mostramos como o choque no crescimento econômico afeta o consumo energético e a abertura comercial e, na segunda linha, mostramos como os choques dessas variáveis afetam o crescimento econômico.

Figura 3.3: Funções de impulso-resposta das relações entre o crescimento econômico, o consumo energético e a abertura comercial no modelo de 30 países.



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas das emissões de CO₂ domésticas aos choques no crescimento econômico, no consumo total de energia, no consumo de combustíveis fósseis, nas emissões de CO₂ domésticas, nas emissões de CO₂ do resto do mundo e na abertura comercial. A segunda linha são as respostas das emissões de CO₂ do resto do mundo aos choques listados acima. As linhas em azul são as respostas das variáveis ao referido choque e as linhas tracejadas em vermelho são o intervalo de confiança de 95%.

Os resultados mostram que um choque no crescimento econômico exige um aumento no consumo de energia. Além disso, percebemos que praticamente todo o aumento energético necessário é suprido com combustíveis fósseis, uma vez que o consumo total de energia sobe na mesma magnitude do crescimento no consumo de combustíveis fósseis. Por outro lado, percebemos que um aumento no crescimento econômico também gera um aumento

na abertura comercial, mostrando que um choque no crescimento econômico gera um crescimento no comércio internacional maior que o aumento no crescimento do PIB.

Por fim, mostramos que enquanto um choque no consumo total de energia gera um aumento no crescimento econômico, um choque no consumo de combustíveis fósseis, ao fazer com que a matriz energética seja mais dependente de fontes sujas, reduz o crescimento econômico possivelmente por gerar mais emissões de carbono. Por outro lado, como já esperado, o aumento do comércio internacional gera aumento no crescimento econômico.

3.5.1.2 Modelos com Amostras Restritas

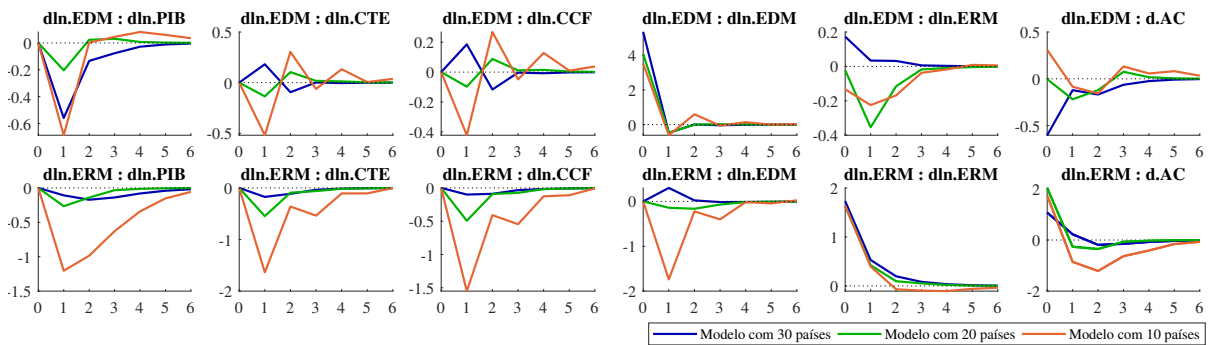
Nesta seção, analisaremos de forma comparativa os resultados dos modelos com trinta, vinte e dez países. Neste exercício buscamos observar, principalmente, se ao restringir a amostra para um grupo de países que possuem maiores níveis de emissão de carbono teríamos maior impacto na redução do crescimento econômico. Isso mostraria que quanto mais poluição, mais os choques de emissões afetariam as economias domésticas desses países. Como explicado anteriormente, para que os gráficos não fiquem muito poluídos, não mostraremos os intervalos de confiança das funções de impulso-resposta.

Na Figura 3.4 mostramos os efeitos dos choques nas emissões de carbono domésticas e do resto do mundo nos modelos com trinta, vinte e dez países. Com relação ao choque nas emissões domésticas, percebemos que os efeitos negativos sobre o crescimento econômico são consistentes em todos os modelos, mas um pouco mais intensos no caso do modelo com dez países. Por outro lado, os demais efeitos são bastante inconsistentes. Em todos esses casos, as respostas mudam entre o positivo e o negativo para pelo menos um dos modelos. Observamos que, mesmo no caso da resposta das emissões do resto do mundo, ocorreu uma inversão nos resultados dos modelos que são estimados com as amostras mais restritas. Mas, neste caso, a queda nas emissões do resto do mundo pode estar vinculada ao efeito recessivo da economia, uma vez que o efeito é mais forte um ano após o choque acontecer, quando a queda no crescimento econômico também é mais intensa.

Por outro lado, quando os choques são provenientes das emissões do resto do mundo, as respostas são bastante intensificadas para os modelos com amostras mais restritas, principalmente no modelo com apenas dez países. Neste último, os resultados mostram que os efeitos recessivos são grandes o suficiente para que o consumo energético seja reduzido, assim como as emissões domésticas. Duas lições importantes podem ser tiradas desse resultado, a primeira é que quanto mais poluição, maior a recessão. E, a segunda é que os efeitos provenientes das emissões do resto do mundo são importantes e devem passar a ser considerados nos modelos que estudam a relação entre crescimento econômico, consumo de energia e emissões de carbono. Além disso, percebemos que o efeito sobre a abertura comercial é consistente em todos os modelos, corroborando com a análise feita na seção anterior.

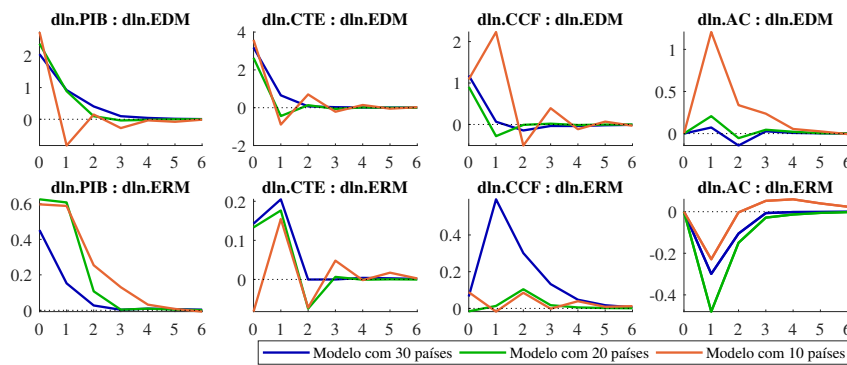
Por sua vez, a Figura 3.5 mostra as respostas das emissões de carbono domésticas

Figura 3.4: Funções de impulso-resposta dos choques nas emissões de CO₂ domésticas e do resto do mundo nos modelos com 30, 20 e 10 países.



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas do crescimento econômico, do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ domésticas. A segunda linha são as respostas das mesmas variáveis a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ do resto do mundo. As linhas em azul são as respostas para o modelo com 30 países, as linhas em verde são as respostas para o modelo com 20 países e as linhas laranjas são as respostas para o modelo com 10 países.

Figura 3.5: Respostas das emissões de carbono aos choques no crescimento econômico, no consumo energético e na abertura comercial nos modelos com 30, 20 e 10 países.

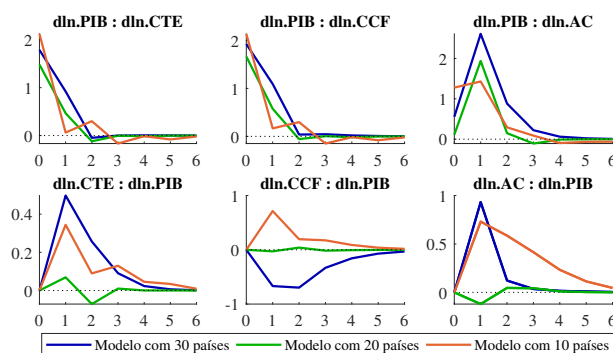


Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas das emissões de CO₂ domésticas aos choques de um desvio padrão do crescimento econômico, do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial. A segunda linha são as respostas das emissões de CO₂ do resto do mundo aos choques de um desvio padrão das mesmas variáveis anteriores. As linhas em azul são as respostas para o modelo com 30 países, as linhas em verde são as respostas para o modelo com 20 países e as linhas laranjas são as respostas para o modelo com 10 países.

e do resto do mundo aos choques no crescimento econômico, no consumo total de energia, no consumo de combustíveis fósseis e na abertura comercial nos modelos com trinta, vinte e dez países. Observamos que, independente do modelo, os choques no crescimento econômico e nos consumos de energia (total e de combustíveis fósseis) geram efeitos positivos nas emissões de CO₂ domésticas e do resto do mundo. Além disso, observamos que o choque na abertura comercial também gera um aumento nas emissões de carbono domésticas apenas no modelo com a amostra de dez países, nos outros casos parecem não ser estatisticamente diferentes de zero. Este resultado mostra que um aumento na abertura comercial pode deslocar a produção para países que utilizam técnicas produtivas mais sujas, aumentando o crescimento das emissões domésticas. Por outro lado, os choques na abertura comercial foram responsáveis por efeitos consistentemente negativos nas emissões do resto do mundo, corroborando com o resultado analisado anteriormente.

Por fim, a Figura 3.6 mostra a relação entre o crescimento econômico, o consumo

Figura 3.6: Funções de impulso-resposta das relações entre o crescimento econômico, o consumo energético e a abertura comercial nos modelos com 30, 20 e 10 países



Nota: A primeira linha contém os gráficos com as respostas do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial a um choque de um desvio padrão do crescimento econômico. A segunda linha são as respostas do crescimento econômico aos choques de um desvio padrão do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial. As linhas em azul são as respostas para o modelo com 30 países, as linhas em verde são as respostas para o modelo com 20 países e as linhas laranjas são as respostas para o modelo com 10 países.

de energia (total e de combustíveis fósseis) e a abertura comercial para os modelos com trinta, vinte e dez países. A primeira linha da figura mostra as respostas do consumo total de energia, do consumo de combustíveis fósseis e da abertura comercial aos choques no crescimento econômico e a segunda linha mostra as respostas do crescimento econômico aos choques nessas variáveis.

Os resultados são bastante consistentes com relação ao choque do crescimento econômico. Em todos os casos, os aumentos possuem valores bem próximos do modelo com trinta países. Por outro lado, quando observamos como o crescimento econômico responde aos choques, percebemos uma certa inconsistência, principalmente no caso do modelo com vinte países, onde tanto os choques energéticos quanto o choque na abertura comercial praticamente não afetam o crescimento econômico. Por outro lado, quando observamos o modelo com dez países, percebemos que os choques no consumo total de energia e na abertura comercial são consistentes com os apresentados no modelo com trinta países, mas possui efeito contrário ao modelo base quando o choque é proveniente do consumo de combustíveis fósseis. Portanto, os dez países mais emissores do mundo parecem possuir certo incentivo a utilização de energia suja.

3.5.2 Análise da Decomposição da Variância

Nesta seção, apresentamos a decomposição da variância para os três modelos estimados anteriormente. Os resultados são apresentados na Tabela 3.3, com estimativas separadas em intervalos de dois períodos e abrangendo um horizonte de previsão total de seis períodos.

De acordo com as estimativas, quanto mais restrita a amostra, maior o percentual de explicação das emissões nas variações do crescimento econômico. Os resultados mostram que, no modelo com trinta países, as emissões domésticas são responsáveis por aproxi-

Tabela 3.3: Decomposição da variância

Resposta da variável	Horizonte de previsão	Variáveis impulsionadas					
		dln.PIB	dln.CTE	dln.CCF	dln.EDM	dln.ERM	d.AC
Modelo com os 30 países mais emissores							
dln.PIB	2	0.9245	0.0099	0.0179	0.0125	0.0005	0.0348
	4	0.9003	0.0121	0.0393	0.0126	0.0023	0.0334
	6	0.8990	0.0121	0.0403	0.0127	0.0026	0.0333
dln.CTE	2	0.1606	0.7663	0.0184	0.0013	0.0012	0.0522
	4	0.1605	0.7653	0.0185	0.0017	0.0018	0.0522
	6	0.1605	0.7653	0.0186	0.0017	0.0018	0.0522
dln.CCF	2	0.1640	0.7346	0.0609	0.0012	0.0003	0.0390
	4	0.1638	0.7336	0.0610	0.0016	0.0006	0.0393
	6	0.1638	0.7335	0.0611	0.0016	0.0006	0.0393
dln.EDM	2	0.1102	0.2302	0.0305	0.6270	0.0020	0.0001
	4	0.1135	0.2292	0.0308	0.6239	0.0020	0.0006
	6	0.1135	0.2292	0.0308	0.6239	0.0020	0.0006
dln.ERM	2	0.0564	0.0154	0.0884	0.0077	0.8100	0.0222
	4	0.0543	0.0148	0.1106	0.0076	0.7887	0.0239
	6	0.0543	0.0148	0.1111	0.0076	0.7883	0.0239
d.AC	2	0.0818	0.0328	0.0494	0.0043	0.0138	0.8179
	4	0.0896	0.0334	0.0547	0.0046	0.0142	0.8035
	6	0.0896	0.0334	0.0549	0.0046	0.0143	0.8032
Modelo com os 20 países mais emissores							
dln.PIB	2	0.9845	0.0006	0.0001	0.0049	0.0083	0.0017
	4	0.9807	0.0012	0.0003	0.0050	0.0106	0.0022
	6	0.9807	0.0012	0.0003	0.0050	0.0107	0.0022
dln.CTE	2	0.1951	0.7716	0.0075	0.0015	0.0242	0.0002
	4	0.1947	0.7683	0.0080	0.0024	0.0250	0.0016
	6	0.1947	0.7682	0.0081	0.0024	0.0251	0.0016
dln.CCF	2	0.1890	0.6850	0.1087	0.0006	0.0148	0.0018
	4	0.1880	0.6840	0.1089	0.0010	0.0156	0.0025
	6	0.1880	0.6840	0.1089	0.0011	0.0156	0.0025
dln.EDM	2	0.2061	0.2270	0.0287	0.5362	0.0006	0.0014
	4	0.2060	0.2272	0.0286	0.5350	0.0016	0.0015
	6	0.2060	0.2272	0.0286	0.5350	0.0016	0.0015
dln.ERM	2	0.1910	0.0123	0.0001	0.0315	0.7072	0.0579
	4	0.1902	0.0134	0.0029	0.0343	0.6967	0.0625
	6	0.1902	0.0134	0.0029	0.0343	0.6967	0.0625
d.AC	2	0.1034	0.0236	0.0078	0.0013	0.1162	0.7477
	4	0.1033	0.0265	0.0085	0.0019	0.1186	0.7411
	6	0.1033	0.0265	0.0085	0.0019	0.1186	0.7411
Modelo com os 10 países mais emissores							
dln.PIB	2	0.7934	0.0079	0.0342	0.0316	0.0971	0.0358
	4	0.7032	0.0084	0.0339	0.0278	0.1651	0.0615
	6	0.6940	0.0085	0.0340	0.0280	0.1709	0.0646
dln.CTE	2	0.1894	0.5893	0.0744	0.0113	0.1125	0.0231
	4	0.1803	0.5740	0.0805	0.0143	0.1206	0.0304
	6	0.1797	0.5728	0.0808	0.0149	0.1209	0.0309
dln.CCF	2	0.1898	0.5535	0.1255	0.0074	0.0993	0.0244
	4	0.1811	0.5403	0.1258	0.0097	0.1104	0.0326
	6	0.1806	0.5391	0.1257	0.0103	0.1110	0.0333
dln.EDM	2	0.1821	0.3014	0.1357	0.2820	0.0667	0.0321
	4	0.1773	0.3014	0.1393	0.2789	0.0686	0.0345
	6	0.1771	0.3014	0.1395	0.2789	0.0685	0.0345
dln.ERM	2	0.1899	0.0083	0.0022	0.0184	0.7671	0.0141
	4	0.2040	0.0099	0.0040	0.0255	0.7422	0.0143
	6	0.2031	0.0099	0.0044	0.0254	0.7416	0.0156
d.AC	2	0.1339	0.0488	0.0109	0.0037	0.1373	0.6653
	4	0.1231	0.0463	0.0216	0.0047	0.1841	0.6202
	6	0.1222	0.0459	0.0222	0.0050	0.1884	0.6163

Nota: Percentual (em valores unitários) de variação nas variáveis da primeira coluna que são explicadas pelas variáveis da linha superior da tabela para 2, 4 e 6 períodos a frente.

madamente 1,3% das variações no crescimento econômico e as emissões estrangeiras por menos de 1%, enquanto que no modelo com dez países esses percentuais sobem, respectivamente, para 2,8% e para 17% no horizonte de seis anos. Além disso, descobrimos que a abertura comercial é responsável por 3% e 6% da variação do crescimento econômico e

que o consumo de combustíveis fósseis por 4% e 3%, nos modelos com trinta e dez países respectivamente. No modelo com vinte países apenas as emissões do resto do mundo contribui com mais de 1% da das variações no crescimento econômico.

Com relação as variações no consumo de energia, observamos que o crescimento econômico é responsável por 16%, 19% e 18% das variações tanto do consumo total de energia quanto do consumo de combustíveis fósseis. Também percebemos que, no modelo com trinta países, a abertura comercial foi uma importante variável na explicação da variação energética, sendo responsável por 5% da variação do consumo total de energia e por 3% da variação do consumo de combustíveis fósseis. Além disso, chama a atenção o fato de que, no modelo com vinte países, as emissões do resto do mundo foram responsáveis por aproximadamente 2% das variações do consumo total de energia e por aproximadamente 1% das variações do consumo de combustíveis fósseis e que, no modelo com dez países, esses valores subiram dez pontos percentuais.

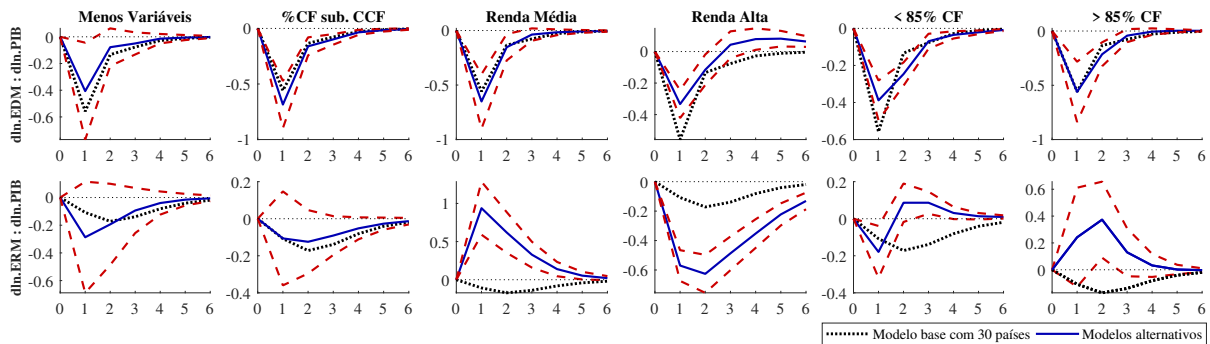
Já no que diz respeito as variações nas emissões, observamos que o crescimento econômico foi responsável por explicar aproximadamente 11%, 21% e 17% das variações das emissões domésticas e aproximadamente 5%, 19% e 20% das emissões do resto do mundo, nos modelos com trinta, vinte e dez países respectivamente. Além disso, observamos que a abertura comercial explica 2%, 6% e 2% das variações nas emissões do resto do mundo, que o consumo total de energia explica 22%, 23% e 30% das variações das emissões domésticas e que o consumo de combustíveis fósseis explica 3%, 3% e 13% dessas últimas variações, nos modelos com trinta, vinte e dez países, respectivamente.

Por fim, constatamos que o crescimento econômico explica 8%, 10% e 12% das variações na abertura comercial, que o consumo de energia (total e combustíveis fósseis) explica 9%, 3% e 7% dessa variação e que as emissões do resto do mundo são responsáveis por explicar 1%, 11% e 18%, nos modelos com trinta, vinte e dez países respectivamente.

3.5.3 Verificação de Robustez

Nesta seção, utilizamos funções de impulso-resposta para mostrar como o crescimento econômico é afetado pelos choques das emissões domésticas e do resto do mundo para seis diferentes especificações do nosso modelo, com o objetivo de analisar a robustez dos nossos resultados. No primeiro, estimamos o modelo apenas quatro variáveis: Crescimento econômico, Consumo total de energia, emissões domésticas e emissões do resto do mundo. No segundo, substituímos a variáveis consumo de combustíveis fósseis pela variável percentual de combustíveis fósseis na composição da matriz energética. No terceiro e quarto caso, separamos nossa amostra entre os países com renda média e renda alta, respectivamente. Por fim, nos dois últimos casos, separamos os países entre os que possuem menos de 85% de combustíveis fósseis na matriz energética e os que possuem mais que esse valor. Os resultados são mostrados na Figura 3.7.

Figura 3.7: Respostas do crescimento econômico aos choques nas emissões de CO₂ domésticas e do resto do mundo em modelos alternativos.



Nota: A primeira linha contém os gráficos das respostas do crescimento econômico a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ domésticas. A segunda linha são as respostas do crescimento econômico a um choque de um desvio padrão nas emissões de CO₂ do resto do mundo. A primeira coluna corresponde ao modelo que contém apenas as seguintes variáveis: [PIB, CTE, EDM, ERM]. A segunda coluna corresponde ao modelo que substitui a variável CCF pelo percentual de combustíveis fósseis na matriz energética do país (% CF). As duas próximas colunas mostram modelos que utilizam países de renda média e alta, respectivamente. A quinta coluna mostra o modelo que utiliza apenas os países que possuem menos de 85% de combustíveis fósseis na composição da matriz energética e, a sexta coluna, os países que contêm mais de 85% de combustíveis fósseis na matriz energética. As linhas em azul são as respostas das variáveis ao referido choque e as linhas tracejadas em vermelho são o intervalo de confiança de 95%.

Observamos que os resultados são bastante robustos para os choques nas emissões domésticas. Em todos os modelos estimados os resultados mostram uma queda do crescimento econômico próxima de 0,5%. Esses resultados se aproximam muito dos resultados encontrados no modelo básico com os trinta países.

Por outro lado, os resultados provenientes dos choques nas emissões do resto do mundo não são tão consistentes. Observamos que nos dois primeiros casos, apesar da resposta ser próxima do modelo padrão, não são estatisticamente significativas. Além disso, nos casos dos modelos com países de renda média e com países que possuem mais que 85% de combustíveis fósseis na matriz energética, existe uma inversão no efeito.

3.6 Conclusão

Neste artigo, investigamos a relação dinâmica entre crescimento econômico, consumo total de energia, consumo de combustíveis fósseis, emissões de CO₂ (domésticas e do resto do mundo) e abertura comercial. Para isso, utilizamos um vetor autorregressivo para dados em painel (PVAR), estimado pelo método generalizado dos momentos (GMM), para uma amostra com os trinta países que mais emitiram carbono no mundo em 2014. Analisamos, pela primeira vez na literatura, como choques ambientais, de natureza local e global, podem afetar as economias dos países estudados. Além disso, analisamos as questões clássicas pertinentes as relações entre o crescimento econômico e o consumo de energia e entre o crescimento econômico e as emissões de CO₂, que são recorrentes na literatura.

Nossos resultados mostram que, em todos os casos analisados, os choques nas emissões de CO₂ reduzem o crescimento econômico. Além disso, quando restringimos nossa amostra

aos dez países mais emissores, a queda na atividade econômica é mais intensa que nos demais casos, mostrando que maiores níveis de emissões podem estar associados a uma pior qualidade do meio ambiente e, conseqüentemente, a uma maior vulnerabilidade econômica a esse tipo de choque. Por outro lado, observamos que os impactos na atividade econômica são maiores e/ou mais prolongados quando os choques ambientais são provenientes de um aumento nas emissões do resto do mundo, em comparação aos resultados provenientes dos choques ambientais domésticos, mostrando a importância de considerar essa variável nesse tipo de análise, o que não vem ocorrendo na literatura até o momento.

Além disso, as funções de impulso-resposta mostraram, de forma consistente, que os choques no crescimento econômico e no consumo de energia aumentam as emissões, como já era esperado, e que os choques na abertura comercial reduzem as emissões do resto do mundo, mostrando que os países com maior abertura comercial podem estar mais engajados em fazer com que o mundo reduza suas emissões de carbono.

Portanto, este estudo contribui com a literatura ao propor uma análise dos choques ambientais domésticos e estrangeiros em uma amostra com os trinta maiores emissores de carbono do mundo, o que ainda não tinha sido realizado até o momento. Além disso, somos os primeiros a considerar os efeitos das emissões do resto do mundo na análise dos impactos econômicos e energéticos domésticos em um modelo PVAR-GMM. Por fim, contribuimos com mais evidências sobre as questões clássicas recorrentemente discutidas na literatura que analisa as relações entre o crescimento econômico, o consumo energético e a degradação ambiental.

Apêndices

Figura A1: Dados usados nas estimações.

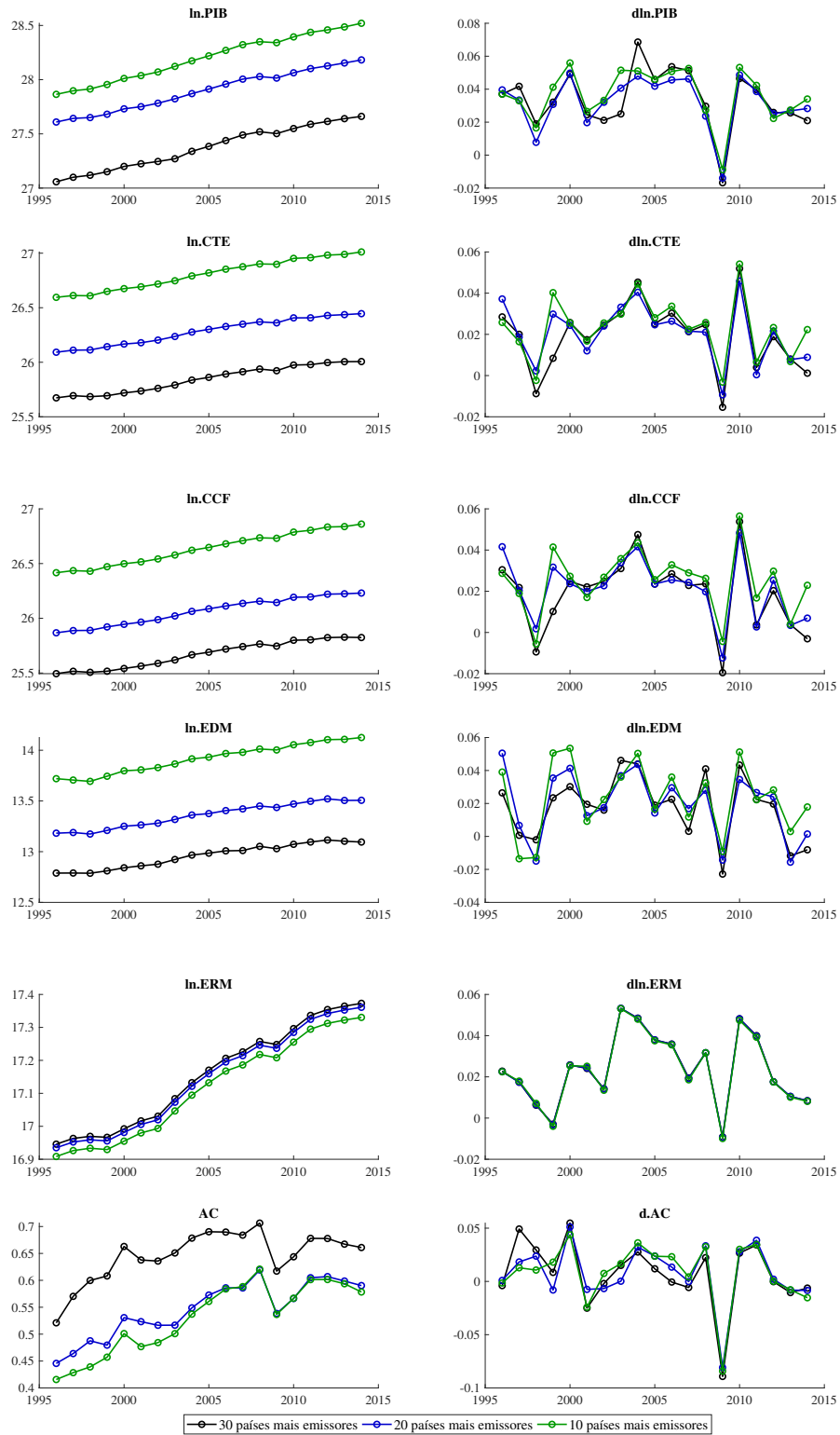


Tabela A1: Testes de raiz unitária para dados em painel - modelos sem tendência

Variáveis em nível		ln.PIB	ln.CTE	ln.CCF	ln.EDM	ln.ERM	AC
30 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-2.9786	-0.0694	-0.3028	-0.4731	0.0472	-4.4125
	p-valor	0.0014	0.4723	0.3810	0.3181	0.5188	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.9737	0.9700	0.9687	0.9497	0.9996	0.7655
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	0.9998	1.0000	0.0014
Breitung	lambda	11.8064	7.5097	7.1332	5.3493	14.4929	-0.1163
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.4537
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.1477	-0.8714	-0.7960	-0.9622	-0.0379	-1.5313
	p-valor	0.9967	1.0000	1.0000	0.9998	1.0000	0.3861
Hadri LM	z	57.7582	55.1500	54.6686	53.3571	60.5162	30.2067
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-2.0121	0.3770	0.0476	0.0611	-0.0294	-3.8427
	p-valor	0.0221	0.6469	0.5190	0.5244	0.4883	0.0001
Harris-Tzavalis	rho	0.9921	0.9871	0.9853	0.9650	0.9997	0.8100
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	0.9995	1.0000	0.1243
Breitung	lambda	10.2459	7.2533	6.8354	5.1890	11.7754	-0.2469
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.4025
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.0099	-0.7237	-0.6601	-0.8712	-0.0501	-1.5425
	p-valor	0.9981	1.0000	1.0000	0.9998	1.0000	0.3600
Hadri LM	z	48.4152	47.8598	47.3470	45.8486	49.4026	34.3117
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-0.9260	0.1736	-1.2873	-1.6128	-0.2081	-2.2094
	p-valor	0.1772	0.5689	0.3436	0.2981	0.4176	0.0136
Harris-Tzavalis	rho	0.9903	0.9969	0.9948	0.9833	0.9990	0.8860
	p-valor	0.9979	0.9986	0.9984	0.9967	0.9988	0.7684
Breitung	lambda	7.3443	5.4252	4.9905	3.8202	8.2079	0.2959
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	1.0000	0.6163
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-0.8870	-0.5588	-0.8491	-1.0546	-0.1122	-1.1306
	p-valor	0.9916	0.9998	0.9941	0.9577	1.0000	0.8669
Hadri LM	z	34.5045	34.2765	34.2665	33.3972	34.9173	26.6134
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Primeira diferença		dln.PIB	dln.CTE	dln.CCF	dln.EDM	dln.ERM	d.AC
30 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-8.7839	-8.9941	-8.7067	-9.2291	-5.7654	-12.276
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.0839	-0.0145	-0.0236	-0.0476	0.1843	-0.0031
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-9.6378	-9.7604	-10.1735	-10.1514	-14.1567	-13.1333
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.4321	-4.8203	-4.7694	-4.4319	-3.3850	-4.4696
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	-0.1864	3.0096	2.9623	-0.5123	-0.3667	1.6153
	p-valor	0.5739	0.0013	0.0015	0.6958	0.6431	0.0531
20 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-7.9890	-7.6444	-7.2534	-7.0896	-4.6830	-9.7884
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.1286	-0.1377	-0.1111	-0.0795	0.1818	-0.1937
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-8.9797	-7.6747	-8.2737	-8.1996	-11.5519	-10.9681
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.6059	-4.8675	-4.8283	-4.4914	-3.4141	-4.6152
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	1.7052	0.5755	0.9829	-0.8236	-0.2411	-2.4442
	p-valor	0.0441	0.2825	0.1628	0.7949	0.5952	0.9927
10 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-6.1795	-9.4922	-9.6757	-9.7292	-3.3425	-5.7836
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.1205	-0.2049	-0.1727	-0.0872	0.1756	0.0086
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-6.1562	-6.1402	-6.3696	-6.8365	-8.1591	-7.4584
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.6473	-5.0960	-5.0862	-4.5083	-3.4950	-4.1074
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	0.5446	-0.1124	-0.5392	-1.0859	-0.1137	-0.8548
	p-valor	0.2930	0.5448	0.7051	0.8612	0.5453	0.8037

Nota: No teste Hadri LM: hipótese nula: painéis são estacionários; hipótese alternativa: painéis contém raiz unitária. Em todos os demais testes: hipótese nula: painéis contém raiz unitária; hipótese alternativa: painéis são estacionários

Tabela A2: Testes de raiz unitária para dados em painel - modelos com tendência

Variáveis em nível		ln.PIB	ln.CTE	ln.CCF	ln.EDM	ln.ERM	AC
30 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-6.3350	-2.7610	-2.2099	-3.6658	-4.3403	-8.7299
	p-valor	0.0000	0.0029	0.0136	0.0001	0.0000	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.9944	0.9967	0.9972	0.9969	1.0008	0.9680
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Breitung	lambda	2.4242	1.6426	1.9499	1.8166	-0.9919	-1.9937
	p-valor	0.9923	0.9498	0.9744	0.9654	0.1606	0.0231
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.7110	-2.0995	-2.0524	-2.0788	-1.8424	-2.3087
	p-valor	0.1361	0.0019	0.0044	0.0013	0.0030	0.0000
Hadri LM	z	19.2209	27.8178	28.3066	17.6637	12.2458	18.3080
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-5.5443	-2.4940	-1.9713	-2.8747	-3.4817	-5.8187
	p-valor	0.0000	0.0063	0.0243	0.0020	0.0002	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.9965	0.9963	0.9971	0.9980	1.0013	0.9825
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Breitung	lambda	1.3802	0.9902	1.3521	1.8831	-0.8142	-2.0854
	p-valor	0.9162	0.8390	0.9118	0.9702	0.2078	0.0185
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.7857	-2.1168	-2.0663	-2.0110	-1.8492	-2.4204
	p-valor	0.1069	0.0045	0.0103	0.0186	0.0118	0.0000
Hadri LM	z	20.1195	19.4237	20.3259	14.6326	10.1331	13.2073
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-3.5516	-3.3111	-3.6064	-4.3743	-2.3548	-3.0197
	p-valor	0.0002	0.0005	0.0002	0.0000	0.0093	0.0013
Harris-Tzavalis	rho	0.9967	0.9950	0.9962	0.9977	1.0017	0.9789
	p-valor	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Breitung	lambda	0.2618	-0.5936	-0.9111	-0.7691	-0.5591	-0.3213
	p-valor	0.6032	0.2764	0.1811	0.2209	0.2880	0.3740
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-1.9097	-2.5214	-2.6325	-2.5898	-1.8483	-1.9674
	p-valor	0.0786	0.0012	0.0004	0.0006	0.0561	0.0445
Hadri LM	z	14.3121	12.0041	10.8173	9.0680	7.4344	12.6738
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Primeira diferença		dln.PIB	dln.CTE	dln.CCF	dln.EDM	dln.ERM	d.AC
30 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-8.8194	-8.7143	-8.8467	-9.3953	-3.7696	-11.0791
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.2174	0.1346	0.1392	0.0574	0.1965	0.0207
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-8.1782	-9.6744	-9.4218	-9.0077	-9.8891	-11.6760
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.6020	-5.2464	-5.2030	-4.7229	-3.2725	-4.4141
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	2.8455	1.0569	1.0438	-0.0332	9.0516	1.4257
	p-valor	0.0022	0.0015	0.1483	0.5132	0.0000	0.0770
20 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-7.8023	-7.0481	-7.1883	-7.6241	-3.0431	-8.6422
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0012	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.3818	0.1549	0.1655	0.0642	0.1997	-0.1664
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-7.9919	-7.7789	-7.6302	-7.3425	-8.0557	-9.2971
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.8282	-5.3870	-5.3685	-4.8913	-3.3057	-4.5190
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	1.8908	-0.4683	-0.0554	-0.5259	7.4264	-1.8980
	p-valor	0.0293	0.6802	0.5221	0.7005	0.0000	0.9711
10 países mais emissores							
Levin-Lin-Chu	t-ajust.	-5.4063	-4.1735	-10.3153	-4.5827	-7.9438	-5.2241
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0148	0.0000
Harris-Tzavalis	rho	0.4631	0.1551	0.1726	0.0835	0.2098	0.0458
	p-valor	0.0049	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Breitung	lambda	-5.2022	-4.8793	-4.7081	-4.3458	-5.6985	-5.6787
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Im-Pesaran-Shin	t-bar	-3.7306	-5.3883	-5.2543	-4.5745	-3.3970	-4.0213
	p-valor	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Hadri LM	z	2.1178	0.5695	0.8931	0.1806	5.2272	1.0922
	p-valor	0.0171	0.2845	0.1859	0.4283	0.0000	0.1374

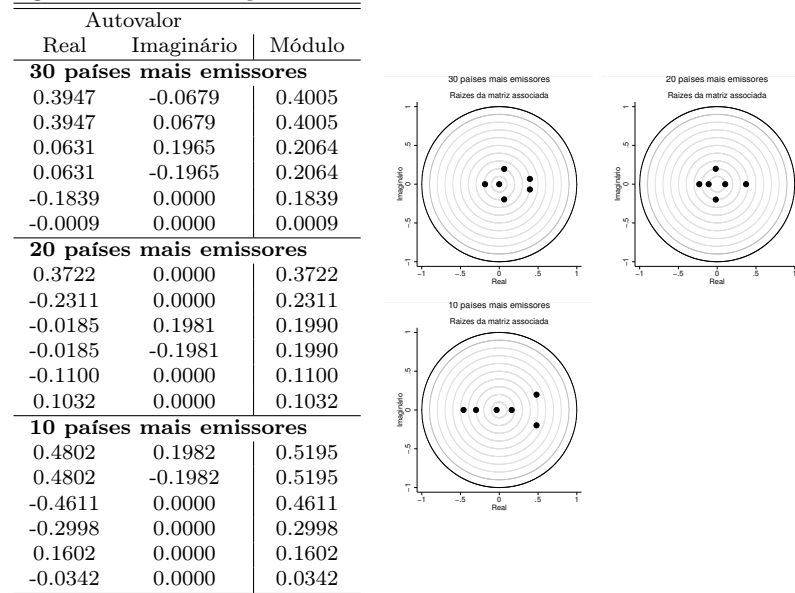
Nota: No teste Hadri LM: hipótese nula: painéis são estacionários; hipótese alternativa: painéis contém raiz unitária. Em todos os demais testes: hipótese nula: painéis contém raiz unitária; hipótese alternativa: painéis são estacionários

Tabela A3: Critério de seleção das defasagens.

Defasagens	CD	J	J p-valor	MBIC	MAIC	MQIC
30 países mais emissores						
1	1.0000	277.3718	0.0000	-849.35*	-82.62	-382.90*
2	1.0000	202.2661	0.0010	-699.11	-85.73*	-325.95
3	-0.3891	149.5923	0.0050	-526.44	-66.4	-246.57
20 países mais emissores						
1	1.0000	220.2148	0.0220	-836.76*	-139.78*	-417.06*
2	1.0000	183.1158	0.0153	-662.46	-104.88	-326.7
3	0.6311	155.4550	0.0019	-478.73	-60.54	-226.91
10 países mais emissores						
1	1.0000	149.5695	0.9524	-780.09*	-210.43*	-441.50*
2	1.0000	109.7903	0.9847	-633.93	-178.2	-363.06
3	-0.2696	70.0716	0.9982	-487.72	-145.92	-284.57

Nota: * indica as defasagens selecionadas pelos critérios adotados.

Figura A2: Condição de estabilidade do PVAR-GMM.



Nota: Todos os autovalores estão dentro do círculo unitário. Portanto, todos os modelos PVAR-GMM satisfazem a condição de estabilidade.

References

Referências Bibliográficas

- Acheampong, A. (2018). Economic growth, CO₂ emissions and energy consumption: What causes what and where? *Energy Economics*, 74, 677–692.
- Ahmad, N. & Du, L. (2017). Effects of energy production and CO₂ emissions on economic growth in Iran: ARDL approach. *Energy*, 123, 521–537.
- Akinci, O. (2011). A note on the estimation of the atemporal elasticity of substitution between tradable and nontradable goods. *Manuscript, Columbia University*.
- Andrews, D. & Lu, B. (2001). Consistent model and moment selection procedures for GMM estimation with application to dynamic panel data models. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 101, 123–164.
- Angelopoulos, K., Economides, G., & Philippopoulos, A. (2010). What is the best environmental policy? taxes, permits and rules under economic and environmental uncertainty. *CESifo Working Paper*, 2980, 1–31.
- Angelopoulos, K., Economides, G., & Philippopoulos, A. (2013). First-and second-best allocations under economic and environmental uncertainty. *International Tax and Public Finance*, 20, 360–280.
- Annicchiarico, B. & Dio, F. (2015). Environmental policy and macroeconomic dynamics in a new keynesian model. *Journal of Environmental Economics and Management*, 69, 1–21.
- Antonakakis, N., Chatziantoniou, I., & Filis, G. (2017). Energy consumption, CO₂ emissions, and economic growth: An ethical dilemma. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 808–824.
- Antweiler, W., Copeland, B., & Taylor, M. (2001). Is free trade good for the environment? *The American Economic Review*, 91, 877–908.
- Apergis, N., Christou, C., & Gupta, R. (2017). Are there environmental Kuznets curves for US state-level CO₂ emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 551–558.

- Arellano, M. & Bover, O. (1995). Another look at the instrumental variable estimation of error components model. *Journal of Econometrics*, 68, 29–51.
- Argentiero, A., Bollino, C., Micheli, S., & Zopounidis, C. (2018). Renewable energy sources policies in a bayesian DSGE model. *Renewable Energy*, 120, 60–68.
- Armeanu, D., Vintilă, G., & Ș., G. (2017). Does renewable energy drive sustainable economic growth? multivariate panel data evidence for EU-28 countries. *Energies*, 10.
- Atallaa, T., Blazqueza, J., Hunta, L., & Manzano, B. (2017). Prices versus policy: An analysis of the drivers of the primary fossil fuel mix. *Energy Policy*, 106, 536–546.
- Aydin, M. (2019). Renewable and non-renewable electricity consumption–economic growth nexus: Evidence from OECD countries. *Renewable Energy*, 136, 599–606.
- Babiker, M., Reilly, J., & Jacoby, H. (2003). The Kyoto protocol and developing countries. *Energy Policy*, 28, 525–538.
- Babiker, M., Reilly, J., & Jacoby, H. (2005). Does uncertainty justify intensity emission caps. *Resource and Energy Economics*, 27, 343–353.
- Baltagi, B. (2008). *Econometric Analysis of Panel Data*. New York: Wiley.
- BEN (2017). *Balanço Energético Nacional (BEN)*. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>: Acesso: out/2018.
- Benkraiem, R., Lahiani, A., Miloudi, A., & Shahbaz, M. (2019). The asymmetric role of shadow economy in the energy-growth nexus in Bolivia. *Energy Policy*, 125, 405–417.
- Bhattacharya, M., Churchill, S., & Paramati, S. (2017). The dynamic impact of renewable energy and institutions on economic output and CO₂ emissions across regions. *Renew Energy*, 111, 157–167.
- Blazquez, J., Martin-Moreno, J., Perez, R., & Ruiz, J. (2017). Fossil fuel price shocks and co₂ emissions: the case of Spain. *The Energy Journal*, 38, 161–176.
- Bodenstein, M., Guerrieri, L., & Kilian, L. (2012). Monetary policy responses to oil price fluctuations. *International Monetary Fund Economic Review*, 60, 470–504.
- Bombardini, M. & Li, B. (2016). Trade, pollution and mortality in China. *National Bureau of Economic Research*.
- Breitung, J. (2000). The local power of some unit root tests for panel data. In B. Baltagi (Ed.), *Advances in Econometrics, Volume 15: Nonstationary Panels, Panel Cointegration, and Dynamic Panels* (pp. 161–178). Amsterdam: JAI Press.
- Brock, W. & Taylor, M. S. (2005). Economic growth and the environment: A review of theory and empirics (chapter 28). In P. Aghion & S. Durlauf (Eds.), *Handbook of Economic Growth* (pp. 1749–1821). Elsevier B.V.
- Charfeddine, L. & Kahia, M. (2019). Impact of renewable energy consumption and financial development on CO₂ emissions and economic growth in the MENA region: A panel vector autoregressive (PVAR) analysis. *Renewable Energy*, 139, 198–213.

- Chen, X., Huang, B., & Lin, C. (2019). Environmental awareness and environmental Kuznets curve. *Economic Modelling*, 77, 2–11.
- Cunado, J., Jo, S., & Gracia, F. P. (2015). Macroeconomic impacts of oil price shocks in Asian economies. *Energy Policy*, 86, 867–879.
- Destec, M. & Sarkodie, S. (2019). Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: The role of energy and financial development. *Science of The Total Environment*, 650, 2483–2489.
- Dissou, Y. & Karnizova, L. (2016). Emissions cap or emissions tax? a multi-sector business cycle analysis. *Journal of Environmental Economics and Management*, 79, 169–188.
- Dogan, E. & Ozturk, I. The influence of renewable and non-renewable energy consumption and real income on CO₂ emissions in the USA: evidence from structural break tests. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 10846–10854.
- Economides, G., Philippopoulos, A., & Vassilatos, V. (2008). The primal versus the dual approach to the optimal ramsey tax problem.
- Fischer, C. & Heutel, G. (2013). Environmental macroeconomics: environmental policy, business cycles, and directed technical change. *Annual Review of Resource Economics*, 5, 197–210.
- Fischer, C. & Springborn, M. (2011). Emissions targets and the real business cycle: intensity target versus caps or taxes. *Journal of Environmental Economics and Management*, 62, 352–366.
- Forni, L., Gerali, A., Notarpietro, A., & Pisani, M. (2015). Euro area, oil and global shocks: An empirical model-based analysis. *Journal of Macroeconomics*, 46, 295–314.
- Gozgor, G., Lau, C., & Lu, Z. (2018). Energy consumption and economic growth: new evidence from the OECD countries. *Energy*, 153, 27–34.
- Grossman, G. & Krueger, A. (1991). Environmental impacts of a North American free trade agreement. *National Bureau of Economic Research - NBER*, N° 3914.
- Hadri, K. (2000). Testing for stationarity in heterogeneous panel data. *Econometrics Journal*, 3, 148–161.
- Halicioglu, F. & Ketenci, N. (2018). Output, renewable and non-renewable energy production, and international trade: evidence from EU-15 countries. *Energy*, 159, 995–1002.
- Harris, R. & Tzavalis, E. (1999). Inference for unit roots in dynamic panels where the time dimension is fixed. *Journal of Econometrics*, 91, 201–226.
- Heutel, G. (2012). How should environmental policy respond to business cycle? optimal policy under persistent productivity shocks. *Review of Economic Dynamics*, 15, 244–264.
- Ho, S. & Iyke, B. (2019). Trade openness and carbon emissions: Evidence from Central and Eastern european countries. *Review of Economics*, 70, 41–67.

- Holtz-Eakin, D., Newey, W., & Rosen, H. (1988). Estimating vector autoregressions with panel data. *Econometrica*, 56, 1371–1395.
- Huynh, B. T. (2016). macroeconomic effects of energy price shocks on the business cycle. *Macroeconomic Dynamics*, 20, 623–642.
- Im, K., Pesaran, M., & Shin, Y. (2003). Testing for unit roots in heterogeneous panels. *Journal of Econometrics*, 115, 53–74.
- IPCC (1995). Ipcc second assessment – climate change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ipcc-second-assessment-full-report/>>. Acessado em: 10 de novembro de 2019.
- IPCC (2014). Climate change 2014, synthesis report, summary for policymakers. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf>. Acessado em: 10 de novembro de 2019.
- IPCC (2018). Global warming of 1.5c. an ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5c above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/sr15/download/>>. Acessado em: 05 de setembro de 2019.
- Juillard, M. (2010). Report on computing optimal policy. *Final Report Summary - MONFISPOL*.
- Kahia, M., Jebli, M., & Belloumi, M. (2019). Analysis of the impact of renewable energy consumption and economic growth on carbon dioxide emissions in 12 MENA countries. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 871–885.
- Kilian, L. (2009). Not all oil price shocks are alike: Disentangling demand and supply shocks in the crude oil market. *The American Economic Review*, 99(3), 1053–1069.
- Kilian, L. (2014). Oil price shocks: Causes and consequences. *Annual Review of Resource Economics*, 6(1), 133–158.
- Kilian, L. & Murphy, D. P. (2012). Why agnostic sign restrictions are not enough: Understanding the dynamics of oil market VAR models. *Journal of the European Economic Association*, 10(5), 1166–1188.
- Kim, D., Suen, Y., & Lin, S. (2019). Carbon dioxide emissions and trade: Evidence from disaggregate trade data. *Energy Economics*, 78, 13–28.
- Koengkan, M., Losekann, L., & Fuinhas, J. (2019). The relationship between economic growth, consumption of energy, and environmental degradation: renewed evidence from Andean community nations. *Environment Systems and Decisions*, 39, 95–107.
- Kolcava, D., Nguyen, Q., & Bernauer, T. (2019). Does trade liberalization lead to environmental burden shifting in the global economy? *Ecological Economics*, 163, 98–112.
- Koçak, E. & Sarkgünesi, A. (2017). The renewable energy and economic growth nexus in Black Sea and Balkan countries. *Energy Policy*, 100, 51–57.

- Kraft, J. & Kraft, A. (1978). On the relationship between energy and GNP. *The Journal of Energy and Development*, 3, 401–403.
- Lau, L., Choong, C., NG, C., Liew, F., & Ching, C. (2019). Is nuclear energy clean? revisit of environmental Kuznets curve hypothesis in OECD countries. *Economic Modelling*, 77, 12–20.
- Leal, R., Ely, R., Uhr, J., & Uhr, D. (2015). Ciclos econômicos e emissão de CO_2 no brasil: uma análise dinâmica para políticas ambientais ótimas. *Revista Brasileira de Economia*, 69, 53–73.
- Levin, A., Lin, C., & Chu, C. (2002). Unit root tests in panel data: Asymptotic and finite-sample properties. *Journal of Econometrics*, 108, 1–24.
- Ling, C., Ahmed, K., Muhamad, R., & Shahbaz, M. (2015). Decomposing the trade environment nexus for Malaysia: What do the technique, scale, composition, and comparative advantage effect indicate? *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 20131–20142.
- Lintunen, J. & Vilmi, L. (2013). On optimal emission control - taxes, substitution and business cycles. *Bank of Finland Research (Discussion Papers)*, 24, 1–30.
- Ljungqvist, L. & Sargent, T. (2012). *Recursive macroeconomic theory* (3rd. ed.). Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology - MIT Press.
- Love, I. & Zicchino, L. (2006). Financial development and dynamic investment behavior: Evidence from panel VAR. *The Quarterly Review of Economics and Finance*, 46, 190–210.
- Magazzino, C. (2017). Renewable energy consumption-economic growth nexus in Italy. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7, 119–127.
- Mahmoodi, M. (2017). The relationship between economic growth, renewable energy, and CO_2 emissions: evidence from panel data approach. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 7, 96–102.
- Managi, S., Hibiki, A., & Tsurumi, T. (2009). Does trade openness improve environmental quality? *Journal of Environmental Economics and Management*, 58, 346–363.
- Marinaş, M., Dinu, M., Socol, A., & Socol, C. (2018). Renewable energy consumption and economic growth. causality relationship in Central and Eastern European countries. *PLoS One*, 13.
- Medina, J. P. & Soto, C. (2005). Oil shocks and monetary policy in an estimated DSGE model for a small open economy. *Working Paper. Central Bank of Chile*, 353.
- Menegaki, A., Marques, A., & Fuinhas, J. (2017). Redefining the energy-growth nexus with an index for sustainable economic welfare in Europe. *Energy*, 141, 1254–1268.
- Neve, M. & Hamaide, B. (2017). Environmental Kuznets curve with adjusted net savings as a trade-off between environment and development. *Australian Economic Papers*, 56, 39–58.

- Newell, R. & Pizer, W. (2008). Indexed regulation. *National Bureau of Economic Research*.
- Niu, T., Yao, X., Shao, S., Li, D., & Wang, W. (2018). Environmental tax shocks and carbon emissions: An estimated DSGE model. *Structural Change and Economic Dynamics, In Press*.
- Nordhaus, W. D. (2007). A review of the stern review on the economics of climate change. *Journal of Economic Literature*, 45, 686–702.
- Nordhaus, W. D. A. (2008). *A question of balance: weighing the options on global warming policies*. New Haven, USA: Yale University Press.
- Ozcan, B. & Ozturk, I. (2019). Renewable energy consumption-economic growth nexus in emerging countries: A bootstrap panel causality test. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 30–37.
- Ozcan, B., Tzeremes, P., & Tzeremes, N. (2019). Energy consumption, economic growth and environmental degradation in OECD countries. *Economic Modelling, In Press*.
- Pal, D. & Mitra, S. (2017). The environmental Kuznets curve for carbon dioxide in India and China: growth and pollution at crossroad. *Journal of Policy Modeling*, 39, 371–385.
- Papieza, M., Smiecha, S., & Frodyma, K. (2019). Effects of renewable energy sector development on electricity consumption – growth nexus in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113.
- Peersman, G. & Robays, I. V. (2012). Cross-country differences in the effects of oil shocks. *Energy Economics*, 34, 1532–1547.
- Rehman, M. & Rashid, M. (2017). Energy consumption to environmental degradation, the growth appetite in SAARC nations. *Renewable Energy*, 111, 284–294.
- Saad, W. & Taleb, A. (2018). The causal relationship between renewable energy consumption and economic growth: evidence from Europe. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20, 1–10.
- Sapkota, P. & Bastola, U. (2017). Foreign direct investment, income, and environmental pollution in developing countries: panel data analysis of Latin America. *Energy Economics*, 64, 206–212.
- Schmitt-Grohé, S. & Uribe, M. (2003). Closing small open economy models. *NBER Working Paper Series*, 9270, 1–21.
- Schmitt-Grohé, S. & Uribe, M. (2007). Optimal simple and implementable monetary and fiscal rules. *Journal of Monetary Economics*, 54, 1702–1725.
- Shahbaz, M., S., N., Ahmed, K., & Hammoudeh, S. (2017). Trade openness–carbon emissions nexus: The importance of turning points of trade openness for country panels. *Energy Economics*, 61, 221–232.
- Shahbaz, M., Shahzad, S., Alam, S., & Apergis, N. (2018). Globalisation, economic growth and energy consumption in the BRICS region: the importance of asymmetries. *The Journal of International Trade Economic Development*, 27, 985–1009.

- Shahbaz, M. & Sinha, A. (2019). Environmental Kuznets curve for CO₂ emissions: a literature survey. *Journal of Economic Studies*, 40, 106–168.
- Silva, Y. & Silva, M. (2019). Optimal environmental policy and business cycles: An analysis using an E-DSGE model. *Working Paper. Encontro Brasileiro de Econometria*, 41^o.
- Sinha, A. & Sen, S. (2016). Atmospheric consequences of trade and human development: a case of BRIC countries. *Atmospheric Pollution Research*, 7, 980–989.
- Smiech, S. & Papiez, M. (2014). Energy consumption and economic growth in the light of meeting the targets of energy policy in the EU: the bootstrap panel granger causality approach. *Energy Policy*, 71, 118–29.
- Smith, M. & Myers, S. (2019). Global health implications of nutrient changes in rice under high atmospheric carbon dioxide. *GeoHealth*, 3, 190–200.
- Souza-Sobrinho, N. (2011). The role of interest rates in the brazilian business cycles. *Revista Brasileira de Economia*, 65, 315–336.
- Streimikiene, D. & Kasperowicz, R. (2016). Review of economic growth and energy consumption: a panel cointegration analysis for EU countries. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 59, 1545–1549.
- Tugcu, C. & Topcu, M. (2018). Total, renewable and non-renewable energy consumption and economic growth: revisiting the issue with an asymmetric point of view. *Energy*, 152, 64–74.
- Tumen, S., Unalms, D., Unalms, I., & Unsal, D. (2016). Taxing fossil fuels under speculative storage. *Energy Economics*, 53, 64–75.
- Viguier, L., Babiker, M., & Reilly, J. (2003). The costs of the Kyoto protocol in the european union. *Energy Policy*, 31, 393–483.
- Zhang, S., Liu, X., & Bae, J. (2017). Does trade openness affect CO₂ emissions: evidence from ten newly industrialized countries? *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 17616–17625.
- Zhu, H., Duan, L., Guo, Y., & Yu, K. (2016). The effects of fdi, economic growth and energy consumption on carbon emissions in ASEAN-5: evidence from panel quantile regression. *Economic Modelling*, 58, 237–248.
- Zoundi, Z. (2017). CO₂ emissions, renewable energy and the environmental Kuznets curve, a panel cointegration approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 1067–1075.