

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

MURILO MAZZOTTI SILVESTRINI

**IMPACTOS ECONÔMICOS GLOBAIS DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES
DE EFEITO ESTUFA**

Sorocaba
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

MURILO MAZZOTTI SILVESTRINI

**IMPACTOS ECONÔMICOS GLOBAIS DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES
DE EFEITO ESTUFA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada, para obtenção do título de mestre em Economia.

Orientação: Prof. Dr. Alexandre Lopes Gomes

Sorocaba
2018

Mazzotti Silvestrini, Murilo

Impactos econômicos globais da redução das emissões de gases do efeito estufa / Murilo Mazzotti Silvestrini. -- 2018.

63 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Alexandre Lopes Gomes

Banca examinadora: Rosane Nunes de Faria, Fernando Salgueiro Perobelli

Bibliografia

1. Emissões de gases do efeito estufa. 2. Acordos Internacionais. 3. Insumo-Produto e Programação Linear. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Secretaria Geral de Informática (SIn).

DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

Bibliotecário(a) Responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano – CRB/8 6979

MURILO MAZZOTTI SILVESTRINI

**IMPACTOS ECONÔMICOS DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE SOBRE
ECONOMIAS GLOBAIS**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia do Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de mestre em Economia, Área de Concentração: Economia Aplicada.
Sorocaba, 20 de agosto de 2018**

Orientador (a)

Prof. (a) Dr. (a) Alexandre Lopes Gomes
Departamento de Economia da UFSCar

Examinadores (as):

Prof. (a) Dr. (a) Rosane Nunes de Faria
Departamento de Economia da UFSCar

Prof. (a) Dr. (a) Fernando Salgueiro Perobelli
Universidade Federal de Juiz de Fora

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação aos meus amados pais, Lucélia e Angelo, e a todos que buscam desenvolver o ensino e pesquisa em nosso país.

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente aos meus pais, Lucélia e Angelo, e minha irmã, Laura, obrigado pelo carinho, apoio e muitas alegrias.

À Luisa, pelo apoio, companheirismo e muitas alegrias ao longo desses anos.

Ao meu orientador, Professor Alexandre Lopes Gomes, pela amizade, pelos ensinamentos, confiança e todo apoio e dedicação no desenvolvimento desse trabalho.

À Professora Rosane Nunes de Faria e ao Professor Fernando Salgueiro Perobelli, por suas contribuições para o aperfeiçoamento desse trabalho.

Aos Professores do Departamento de Economia da Universidade Federal de São Carlos, pelo auxílio e dedicação aos alunos e pelos ensinamentos compartilhados.

Aos funcionários da UFSCar, em especial a Manoela, pelo suporte e dedicação ao trabalho.

Aos meus colegas e amigos da turma de Mestrado em Economia Aplicada 2016, pela amizade e por compartilharem os momentos de alegria e dificuldades.

À Universidade Federal de São Carlos, pela excelência do ensino e pela oportunidade do ensino gratuito e de qualidade.

À CAPES, pelo auxílio financeiro que tornou possível a realização desse trabalho.

Aos meus amigos de Santa Cruz das Palmeiras e de Lavras, pela amizade e pelo apoio nos momentos difíceis.

À todos os Professores e Pesquisadores que tive a oportunidade de conhecer ao longo desses anos, pelo apoio, amizade e dedicação no ensino e pesquisa em nosso país.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Muito obrigado!

RESUMO

SILVESTRINI, Murilo Mazzotti. Impactos econômicos da redução das emissões de GEE sobre economias globais. 2018. 63f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2018.

O presente trabalho tem como objetivo simular reduções das emissões globais de gases do efeito estufa (GEE) visando analisar o comportamento das emissões e do valor bruto de produção (VBP) de 40 países frente à meta global de mitigação das emissões, identificando aqueles que apresentam maior impacto econômico. A metodologia desse trabalho se baseia no uso de Programação Linear e Insumo-Produto na matriz Multi Regional com emissões de GEE, sendo os dados utilizados provenientes das tabelas da WIOD e representam 40 países compostos por 35 setores para o ano de 2009. Foram modelados três diferentes cenários: o cenário pessimista, o cenário moderado e o cenário otimista, com redução de 10%, 30% e 50% das emissões globais de GEE, respectivamente. Os resultados revelaram as maiores reduções das emissões na China, Índia, Rússia e Brasil, os quais apresentaram maior redução do VBP. Estados Unidos e Japão, mesmo apresentando alta porcentagem de redução das emissões, principalmente no cenário otimista, tiveram menor impacto econômico devido a sua estrutura econômica. Já países europeus, como Alemanha, Reino Unido e França, apresentaram pouca redução das emissões e do VBP. Além disso, os cenários modificaram a composição global das emissões e do VBP, havendo o aumento da parcela das emissões de GEE para os países europeus, além do aumento da participação no VBP global. Conclui-se que a redução das emissões diante de uma meta global de mitigação dos GEE é maior nos países mais intensivos em emissões, ocasionando o maior impacto econômico, devido principalmente pela estrutura de produção dos setores econômicos baseada em tecnologias com maior intensidade de emissões.

Palavras-chave: Emissões de GEE. Acordos internacionais. Matriz Multi-Regional de Insumo-Produto. Programação Linear.

ABSTRACT

The purpose of this work is to simulate reductions in global greenhouse gas emissions (GHG) to analyze the behavior of emissions and gross production value (GVP) of 40 countries considering the global emission mitigation target, identifying those that present greater economic impact. The methodology of this work is based on the use of Linear Programming and Input-Output in the Multi Regional matrix with GHG emissions, and the data used are from the WIOD tables which represents 40 countries composed by 35 sectors for the year 2009. Three different scenarios were modeled: the pessimistic scenario, the moderate scenario and the optimistic scenario, with reduction of 10%, 30% and 50% of the global GHG emissions, respectively. The results showed the greatest emission reductions in China, India, Russia and Brazil, which also showed the greatest decrease in VBP. The United States and Japan, despite of presenting a high percentage of emission reductions, especially in the optimistic scenario, had a lower economic impact due to their economic structure. European countries, such as Germany, the United Kingdom and France, showed little reduction in emissions and VBP. Furthermore, the scenarios modified the overall composition of emissions and VBP, with the share of GHG emissions increasing in European countries, in addition to the increase of their participation in global VBP. The conclusion is that the reduction of emissions in the face of a global GHG mitigation goal is greater in the most emission-intensive countries, causing the greatest economic impact, mainly due to the production structure of the economic sectors based on higher emission technologies.

Keywords: GHG emissions. International agreements. Input-Output. Linear Programming.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Emissões de CO ₂ eq dos países que compõe a matriz da WIOD em 2009..... | 30 |
| Figura 2 - Participação dos países com maior nível de emissões em relação ao total..... | 30 |
| Figura 3 - Coeficiente de intensidade de emissões de CO ₂ eq em 2009..... | 31 |
| Figura 4 - Variação das emissões de GEE após imposição de meta de redução de 10% nas emissões globais | 33 |
| Figura 5 - Variação dos VBP após imposição de meta de redução de 10% na emissão global | 34 |
| Figura 6 - Variação das emissões de GEE após imposição de meta de redução 30% nas emissões globais | 35 |
| Figura 7 - Variação dos VBP após imposição de meta de redução de 30% na emissão global | 36 |
| Figura 8 - Variação das emissões de GEE após imposição de meta de redução de 50% nas emissões globais | 37 |
| Figura 9 - Variação dos VBP após imposição de meta de redução de 50% na emissão global | 38 |
| Figura 10 - Participação das regiões nas emissões após redução de 10, 30 e 50% das emissões globais..... | 41 |
| Figura 11 - Participação das regiões no VBP global após redução de 10, 30 e 50% nas emissões globais | 43 |
| Figura 12 - Participação dos maiores emissores de 2009 nas emissões globais após redução de 10, 30 e 50% | 44 |
| Figura 13 - Participação dos maiores emissores de 2009 no VBP global após redução de 10, 30 e 50% | 45 |

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupos dos países no banco de dados da WIOD, segundo distribuição regional ...22

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--------|---|
| BRICS | Conjuntos de países formado por Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul |
| COP | Conferências das Partes |
| GTAP | Sigla em inglês para <i>Global Trade Analysis Project</i> |
| IPCC | Sigla em inglês para <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> |
| NAMA | Sigla em inglês para <i>Nationally Appropriate Mitigation Actions</i> |
| OBE | Sigla em inglês para <i>Office of Business Economics</i> |
| OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| UNEP | Sigla em inglês para <i>United Nations Environment Programme</i> |
| UNFCCC | Sigla em inglês para <i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i> |
| WIOD | Sigla em inglês para <i>World Input-Output Database</i> |
| WMO | Sigla em inglês para <i>World Meteorological Organization</i> |

Sumário

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MITIGAÇÃO DOS GEE | 15 |
| 2.2 INSUMO-PRODUTO E EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA | 18 |
| 3 METODOLOGIA..... | 21 |
| 3.1 BASE DE DADOS | 22 |
| 3.2 INSUMO-PRODUTO, PROGRAMAÇÃO LINEAR E EMISSÕES DE CO ₂ eq..... | 24 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 29 |
| 4.1 COEFICIENTE DE INTENSIDADE DE EMISSÕES DE CO ₂ eq..... | 31 |
| 4.2 IMPACTO ECONÔMICO DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE..... | 32 |
| 5 CONCLUSÃO..... | 48 |
| 6 BIBLIOGRAFIA | 51 |
| ANEXOS | 60 |

1 INTRODUÇÃO

O processo de mudanças climáticas globais é considerado uma questão de grande relevância no século XXI, sendo uma das mais sérias externalidades negativas devido à gravidade dos danos que podem trazer (WORLD ECONOMIC FORUM, 2007). Entre as causas do fenômeno, segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC na sigla em inglês), encontra-se o aumento das concentrações dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente como resultado de atividades econômicas, como a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra (IPCC, 2014).

Desde a década de 1980, há movimentações internacionais que buscam a compreensão e o desenvolvimento do debate sobre as emissões, com participação efetiva de pesquisadores na publicação de relatórios para analisar as causas e as consequências do fenômeno. Com efeito, um conjunto de acordos internacionais tem sido estabelecido para a apresentação de propostas e metas de redução da poluição. Em 2015, o Acordo de Paris avaliou que o aumento da temperatura média global deve estar abaixo dos 2° C, comparado aos níveis pré-industriais, até 2100 para que os danos das mudanças climática sejam minimizados. Diante disso, os países que assinaram o acordo se propuseram a buscar esforços para limitar o aumento da temperatura global (PARIS AGREEMENT, 2015).

Para que o aumento da temperatura se estabilize abaixo de 2°C, o IPCC apontou a necessidade de limitar a concentração de CO₂eq (dióxido de carbono equivalente) na atmosfera em até 450 ppm (partes por milhão). Para isso, a emissão global de GEE durante o século XXI não deve ultrapassar, em média, cerca de 18 Gt CO₂eq /ano (bilhões de toneladas de GEE expressos em CO₂eq por ano) (IPCC, 2014).

Segundo dados da Word Input-Output Database (WIOD), projeto financiado pela Comissão Europeia, a emissão global de CO₂eq em 2009¹ foi de 35,8 Gt CO₂eq (WIOD, 2018). Este montante é praticamente o dobro do volume estipulado pelo IPCC para o período.

Dessa forma, observa-se que a necessidade de reduzir as emissões globais para limitar as mudanças climáticas é significativa. Os países precisam estabelecer metas ambiciosas de mitigação dos GEE e estruturar suas economias para uma produção com baixa poluição. Diante

¹ Os dados referentes as emissões de GEE da WIOD estão disponíveis para o ano de 2009. Optou-se pela sua utilização devido a disponibilidade dos valores de emissões para os setores econômicos e países que representam, aproximadamente, 78% da emissão global em 2009. Além disso, a disponibilidade e padronização dos dados para 35 setores de 40 países mais o Restante do Mundo permitiu o desenvolvimento do modelo e análises propostas na pesquisa.

desse cenário e a meta global de redução das emissões de GEE, quanto cada país precisaria reduzir suas emissões? E qual o impacto dessa redução na economia?

Segundo dados da WIOD, em 2009 a China foi o país que mais emitiu GEE, seguida dos Estados Unidos e Índia. Países denominados emergentes, como Rússia e Brasil, e importantes economias, como Japão e Alemanha, também se encontram entre os maiores emissores (WIOD, 2018). Assim, a redução das emissões desses países seria o suficiente para reduzir a emissão global a níveis sustentáveis?

Ademais, como debatido na literatura, a mitigação dos GEE está relacionada a redução da produção de determinados setores econômicos, impactando diretamente o valor bruto de produção (VBP) do país (HRISTU-VARSAKELIS *et al.*, 2009; SAN CRISTÓBAL, 2010; PASCUAL-GONZÁLEZ *et al.*, 2016). Além disso, os países possuem relações comerciais com diversos outros países, importando e exportando, além de mercadorias, emissões de GEE (SUH & HUPPES, 2001; WIEBE *et al.*, 2012; ARTO & DIETZENBACHER, 2014; VALE, PEROBELLI & CHIMELI, 2017). Assim, pode se colocar a seguinte pergunta: esses países, que apresentam maiores volumes de emissões, sofreriam maior impacto em relação aos demais?

São diversas as questões levantadas e agentes envolvidos quando o foco é a mitigação global dos GEE. Uma ferramenta que permite obter respostas para estas questões é a metodologia de Programação Linear (PL) associada a uma matriz Insumo-Produto Multi-Regional (MRIO), ponderada com as emissões de GEE (expressa em emissões CO₂eq). A matriz MRIO de emissões de GEE quantifica o CO₂eq emitido pelos setores de cada país e sua relação com os demais setores e países. A PL permite impor restrições à matriz MRIO, possibilitando simular cenários de metas de redução da emissão global.

Diante dessa discussão, a presente pesquisa propõe simular reduções das emissões globais de GEE, utilizando a metodologia de PL e IP na MRIO com emissões de GEE. O objetivo é analisar a redução de cada país frente a meta global de mitigação das emissões e identificar quais apresentam maior redução. Além disso, analisar o comportamento do VBP de cada país diante das reduções das emissões, identificando aqueles que apresentam maior impacto econômico.

Com isso, busca-se analisar se a redução das emissões de determinados países seria suficiente para alcançar uma meta de redução global de mitigação dos GEE e a relação entre a redução das emissões e da produção econômica dos países. Assim, contribuir com o debate e auxiliar em acordos internacionais e na formulação de políticas públicas voltadas para o combate as mudanças climáticas.

Além deste capítulo introdutório, este trabalho está dividido em mais seis capítulos. O segundo descreve as mudanças climáticas e mitigação dos GEE, apresentando os principais estudos sobre o tema. Posteriormente, é realizada uma revisão bibliográfica, discutindo os trabalhos que utilizam a metodologia de Insumo-Produto associada as emissões de GEE e Programação Linear. No capítulo 4, é apresentado o tratamento dos dados e a descrição do método utilizado na pesquisa. Em seguida são descritos e analisados os principais resultados do trabalho, com o capítulo seguinte apresentando as conclusões da pesquisa. O último capítulo é destinado as referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E MITIGAÇÃO DOS GEE

Em 2007, o *World Economic Forum* (2007), destacou que as mudanças climáticas é um dos maiores desafios do século XXI, com consequências que podem impactar não somente o meio ambiente, mas também o comércio e a paz mundial. Para combater o fenômeno e diminuir os impactos a curto e, principalmente, a longo prazo, surge a necessidade da cooperação imediata entre os países.

Na busca em entender as mudanças climáticas, estudos são desenvolvidos para investigar as causas e efeitos desse fenômeno e as consequências para a sociedade. Entre os estudos, encontram-se o impacto na biodiversidade (MARENGO, 2007; NOBRE, SAMPAIO & SALAZAR, 2007), no bem-estar nas cidades (RIBEIRO, 2010), na qualidade de vida das populações residentes em zonas costeiras (NICOLODI & PETERMANN, 2010), na saúde das pessoas (PATZ et al., 2005; MCMICHAEL, WOODRUFF & HALES, 2006) e na produção de alimentos (FISCHER et al., 2005; SCHMIDHUBER & TUBIELLO, 2007). Além disso, há diversos impactos ambientais, tais como o aumento da temperatura, chuvas mais frequentes e extremas, resultando em estiagens e inundações, furacões cada vez mais intensos em determinadas regiões e a elevação no nível do mar (PARRY et al., 2007).

Entre as causas do fenômeno, o aumento das concentrações dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, principalmente como resultado de atividades econômicas, como a queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra, é considerado como um intensificador do efeito estufa natural e consequentemente das mudanças climáticas. Como parte desse processo, cerca da metade das emissões antropogênicas² cumulativas de CO₂ entre 1750 e 2011 ocorreram

² Emissões de gases poluentes causadas pelas atividades humanas.

nos últimos 40 anos, sendo que entre 2000 a 2010, as emissões anuais cresceram em média 2,2%. Mesmo com a crise econômica global de 2007/2008 reduzindo o volume de GEE, nessa década, as emissões foram as maiores na história da humanidade (IPCC, 2014).

A complexidade das emissões de GEE perpassa pela variedade de gases, sendo o dióxido de carbono (CO_2) o principal deles e emitido principalmente pelo uso de combustíveis fósseis, desmatamentos e queimadas. Outros gases também contribuem de maneira importante para a intensificação do aquecimento global. Em ordem de relevância, o metano (CH_4), notadamente emitido pela fermentação entérica dos ruminantes e pela produção de lixo e esgoto; óxidos de nitrogênio (NO_x), emitido pela agropecuária e processos industriais; clorofluorcarbonos (*CFCs*), hidrofluorcarbonos (*HFCs*), perfluorcarbonetos (*PFCs*), e hexafluoreto de enxofre (SF_6), emitidos por uma variedade de processos industriais (IPCC, 2014).

Os GEE podem permanecer na atmosfera por décadas, como o CH_4 , séculos, como o CO_2 , ou até por milênios, como os *PFCs*. Assim, o longo tempo de permanência na atmosfera significa que as emissões do passado influenciam o clima atual e, dessa forma, as emissões atuais terão efeito para as próximas gerações. Com isso, gerir as emissões de GEE no curto prazo, buscando minimizar os riscos das mudanças climáticas, são ações que trazem benefícios para diferentes gerações ao longo do tempo (NORDHAUS, 2006).

Segundo Dowlatabadi e Morgan (1993) há quatro alternativas para buscar minimizar os impactos das mudanças climáticas: (i) reduzir as emissões de GEE; (ii) adaptar-se o quanto antes às mudanças climáticas; (iii) experimentar ações para o controle do clima; e (iv) evoluir em pesquisas para melhor compreender o comportamento do clima e suas influências. Reduzir as emissões de GEE é considerada a alternativa mais viável frente ao desafio de controle das mudanças climáticas, sendo pauta em encontros e acordos internacionais desde meados da década de 1980.

O mais recente encontro foi realizado na 21ª sessão anual da Conferência das Partes, a COP-21, onde realizou-se o primeiro acordo universal para combate das mudanças climáticas, o Acordo de Paris. Entre os principais objetivos traçados estão: (i) manter o aumento da temperatura média global abaixo dos 2°C acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais, reconhecendo que isso reduziria significativamente os riscos e impactos das mudanças climáticas; (ii) aumentar a capacidade de adaptar-se aos impactos adversos das mudanças climáticas e fomentar a resiliência ao clima e o desenvolvimento de baixas emissões de gases de efeito estufa, de uma

forma que não ameace a produção de alimentos; (iii) promover fluxos financeiros consistentes com um caminho de baixas emissões de gases de efeito estufa e de desenvolvimento resiliente ao clima (PARIS AGREEMENT, 2015).

Para cumprir os objetivos, compromissos foram definidos no Acordo de Paris. Entre eles, os países participantes, denominados Partes, devem enviar a *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) um documento descrevendo as metas de mitigação dos gases do efeito estufa que se comprometem a alcançar dentro do prazo estabelecido no Acordo de Paris. Segundo dados oficiais, até dia 4 de abril de 2016, a comissão recebeu 161 *Nationally Determined Contributions* NDC, comunicadas por 189 Partes, o que representa a participação de mais de 96% (UNFCCC, 2016).

Algumas Partes incluíram metas de mitigação em toda a economia, com as reduções de emissões expressas abaixo do nível em um ano base especificado. Outras contêm em seu NDC objetivos absolutos que não estão vinculados a um ano base, mas estabelecem um limite absoluto máximo total de emissões (por exemplo, neutralidade de carbono por uma data futura). Por outro lado, várias Partes incluíram metas relativas para reduzir as emissões abaixo do nível de “*business as usual*” (BAU), seja para toda a economia ou para setores específicos (UNFCCC, 2016). Dessa forma, há uma heterogeneidade entre as propostas enviadas pelos países a UNFCCC.³

Entretanto, segundo relatório da *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2017), as propostas enviadas a UNFCCC não são suficientes para alcançar as metas traçadas no Acordo de Paris. De acordo com a UNEP, o cumprimento de todas as propostas dos países representaria apenas cerca de um terço das reduções de emissões necessárias para chegar a meta estabelecida em Paris (UNEP, 2017). Além da crítica levantada pela UNEP, estudos foram publicados questionando o Acordo de Paris e suas metas de mitigação dos GEE (e.g. ROGELJ et al., 2016; CLÉMENÇON, 2016; SCHLEUSSNER et al., 2016).

Em relação a necessidade de mitigação dos GEE, segundo o quinto relatório da avaliação do IPCC, AR5⁴, o atraso na redução das emissões pode comprometer o objetivo de frear o aquecimento global, dificultando a permanência dentro da meta de 2°C estabelecida no Acordo de Paris. Os modelos do AR5 mostram que, para limitar o aumento de temperatura a

³ As propostas de redução das emissões de GEE dos países presentes no banco de dados da WIOD são apresentadas no Anexo III.

⁴ Segundo Esparta e Moreira (2002), os relatórios do IPCC fornecem o suporte científico para as decisões tomadas no âmbito da UNFCCC

2°C, as emissões globais deverão cair, em relação aos níveis de 2010, 39% até 2030 e 72% até 2050 (IPCC, 2014).

Diante do relatório, identifica-se um dos principais desafios para conter as mudanças climáticas. Para que o aumento da temperatura se estabilize abaixo de 2°C, o IPCC (2014) aponta a necessidade de limitar a concentração de CO₂eq na atmosfera em até 450 ppm. Para isso, a emissão global de GEE durante o século XXI não deve ultrapassar, em média, cerca de 18 Gt CO₂eq /ano. Considerando que, segundo dados da WIOD (2018), a emissão global de GEE em 2009 foi de 35,8 Gt CO₂eq, em um cenário mais rigoroso, otimista em termos de redução das emissões e cumprimento da meta de “controle” da temperatura global, é necessário reduzir 50% da emissão global para que seja mantida a meta estabelecida dentro do Acordo de Paris.

2.2 INSUMO-PRODUTO E EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA⁵

Com a crescente atenção às questões envolvendo mudanças climáticas e emissões de GEE, estudos foram destinados a avaliar e investigar as causas e efeito das emissões no contexto econômico. Para isso, a metodologia Insumo-Produto tornou-se importante ferramenta para desenvolvimento das pesquisas e no auxílio para elaboração de políticas públicas (GAY & PROOPS, 1993; WYCKOFF & ROOP, 1994; GALE, 1995; HAWDON & PEARSON, 1995; DE CARA & JAYET, 2000).

A metodologia Insumo-Produto pode partir de uma abordagem individual de um único país, matriz Inter-Setorial de Insumo-Produto, ou num contexto global, analisando a interação entre países, matriz Multi-Regional de Insumo-Produto (MRIO). Na abordagem inter-setorial, são analisadas as emissões de GEE de um país, identificando os setores mais poluentes. Como exemplos, há estudo sobre o Brasil (e.g. HILGEMBERG & GUILHOTO, 2006; CARVALHO & PEROBELLI, 2009), Índia (DAS & PAUL, 2014), China (ZHANG, 2009), Estados Unidos (BIN & DOWLATABADI, 2005; KUCUKVAR, EGILMEZ & TATARI, 2014) e Japão (NANSAI, MORIGUCHI & TOHNO, 2003).

Já o modelo MRIO permite explorar temas relacionados ao comércio internacional, como, por exemplo, a intensidade energética das importações (BATTJES et al., 1998), os fluxos de recursos naturais (PROOPS et al., 1999) e o consumo dos países através da balança

⁵ A metodologia Insumo-Produto é deveras difundida da forma que a revisão não será exaustiva, mas contribuirá para entender a evolução e possibilidades da análise de emissões tomando por base os modelos IP.

comercial física (GILJUM & HUBACEK, 2001)⁶. Além disso, com modelo MRIO é possível analisar o comércio entre os países e as emissões de GEE, permitindo investigar o fluxo das emissões nas importações e exportações e identificar os países com maior volume de emissões de GEE. Nessa área, encontram-se os trabalhos, por exemplo, de Tiwaree e Imura (1994), Davis e Caldeira (2010), Peters *et al.* (2011) e Zapparoli *et al.* (2018).

Ahmad e Wychkoff (2003) utilizando uma matriz de 41 países, contendo os 24 responsáveis por 80% das emissões globais de CO₂ em 1995, mostraram que os países da OCDE⁷ foram os principais responsáveis pelas emissões relacionadas à produção, com a maior parte sendo atribuída aos Estados Unidos, Japão, Alemanha, França e Itália. Além disso, a maior saída líquida de emissões incorporadas nas exportações para os países da OCDE é oriunda da China e, em menor medida, da Rússia. Trabalhos nessa linha trazem a discussão sobre a atribuição da responsabilidade pelas emissões.

Nesse contexto, Wiebe *et al.* (2012) questionaram a forma como a “culpa” pelas emissões são empregadas para os países, enfatizando as diferenças entre os países desenvolvidos e as economias emergentes e países menos desenvolvidos. A crítica fundamenta-se na parcela significativa do aumento das emissões produzidas nas economias emergentes e nos países menos desenvolvidos devido à demanda de exportação, ou seja, as emissões desses países são geradas na produção de bens de exportação. Para os autores, no comércio internacional, as emissões incorporadas e o resultante comércio implícito de carbono também devem ser considerados na alocação de emissões para os países.

Dessa forma, analisando o comércio internacional e emissões, os autores concluíram que as importações líquidas de CO₂ dos países da OCDE aumentaram 80% entre 1995 e 2005. Enquanto isso, as exportações líquidas de países não membros da OCDE⁸ para países da OCDE aumentaram de 18% em 1995 para 24% em 2005 das emissões totais de CO₂, sendo os três maiores exportadores a China, Rússia e a Índia.

Na mesma linha de pensamento, Arto e Dietzenbacher (2014) observaram uma mudança na resposta à pergunta "Quem emite?" para "Para quem é emitido?", com a primeira questão sendo respondida pelas emissões nacionais de um país e a segunda levando o

⁶ No estudo, comparando com o modelo IP tradicional (matriz monetária de Insumo-Produto), os autores desenvolveram uma matriz física de IP - PIOT (*Physical Input-Output Table*).

⁷ Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, composta, em 2017, por 35 países membros (Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, Chile, República Checa, Dinamarca, Estônia, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Coreia, Letônia, Luxemburgo, México, Países Baixos, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, República Eslovaca, Eslovênia, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido, Estados Unidos).

⁸ No estudo, países não membros da OCDE são a África do Sul, Argentina, Brasil, China, Índia e Rússia.

consumidor final como ponto de partida e incluindo todas as emissões envolvidas na produção de bens e serviços consumidos. Assim, com base nos resultados do trabalho desenvolvido, os autores chegaram à conclusão que as mudanças nas economias emergentes (Brasil, Rússia, Índia, Indonésia e China) causaram 44% do crescimento das emissões de CO₂ entre 1995 a 2008, sendo que 15% foram causadas pelo aumento da demanda dos outros países pelos produtos dos emergentes.

Em outro estudo, Vale, Perobelli e Chimeli (2017), com base nas matrizes MRIO da WIOD, investigaram as relações comerciais entre duas regiões do mundo, Norte e Sul, e as emissões nelas incorporadas. Os autores sugeriram que a região Norte assim como a Sul tornaram-se menos estimulantes da poluição (efeito técnico) ao longo dos anos de 1995 a 2009 e, em contraste com a literatura que não leva em consideração a interdependência entre regiões e setores, encontraram relações para a hipótese de que a região Sul se especializou em atividades relativamente mais intensivas em poluição (efeito de composição).

Diante do exposto, a metodologia MRIO com emissões de GEE é uma ferramenta adequada para identificar e mensurar as emissões num âmbito global. Os trabalhos não se limitam aos descritos, havendo uma significativa difusão de estudos (e.g. WEBER & MATTHEWS, 2008; ZHANG, PENG & SUN, 2015). Ademais, diferentes bancos de dados são utilizados nas pesquisas para a estruturação do modelo MRIO, como a WIOD (e.g. VALE, PEROBELLI E CHIMELI, 2017), EORA⁹ (e.g. LENZEN et al., 2013), EXIOBASE¹⁰ (e.g. TUKKER et al., 2013), GTAP¹¹ (e.g. PETERS et al., 2011) e OECD¹² (e.g. NAKANO et al., 2009).

Os modelos de Insumo-Produto e emissões de GEE também podem ser utilizados para simular cenários de políticas ambientais, tais como a implementação de tributos sobre as emissões ou a redução dos GEE. Dessa forma, permite expandir, além das possibilidades da metodologia, a compreensão do impacto de políticas de mitigação dos GEE sobre as economias. Um dos métodos utilizados é incorporar a Programação Linear (PL) a metodologia Insumo-Produto (PL-IP).

O emprego das duas metodologias juntas pode ser utilizado para diversos fins de pesquisa em matrizes regionais, assim como em MRIO (e.g. BRINK & MCCARL, 1977; HARRIS & REA, 1984; CANNING & WANG; 2005; ZHU et al., 2009; PRATT, 2009; KIM

⁹ Disponível em: <http://worldmrio.com>

¹⁰ Disponível em: <https://www.exiobase.eu>

¹¹ Disponível em: <https://www.gtap.agecon.purdue.edu/databases>

¹² Disponível em: <https://data.oecd.org>

et al., 2012). Entre as possibilidades de pesquisa, como mencionado por Vogstad (2009), estão os temas envolvendo a análise econômica e o meio ambiente.

Exemplos dessa abordagem podem ser encontrados em estudos desenvolvidos em economias isoladas, analisando questões envolvendo as emissões de GEE em um único país. Nesse contexto, incluem trabalhos, por exemplo, direcionados para a Coreia do Sul (CHO, 1999), Taiwan (HSU & CHOU, 2000), Portugal (OLIVEIRA & ANTUNES, 2000), Grécia (HRISTU-VARSAKELIS et al., 2009; 2012), Espanha (SAN CRISTÓBAL, 2010), Japão (LIN, 2011), China (MI et al., 2015; CHANG, 2015) e Brasil (DE SOUZA, RIBEIRO E PEROBELLI, 2016)

Por outro lado, conforme Pascual-González *et al.* (2016), as obras que utilizam matrizes de insumo-produto para apenas um país se concentram na otimização de economias únicas (sem considerar as transações econômicas internacionais). Este escopo estreito pode levar a soluções sub ótimas, uma vez que negligencia os laços econômicos internacionais entre países e como as mudanças em uma economia podem afetar as outras regiões.

Dessa forma, apresentando uma ferramenta de apoio a decisões cujo objetivo seja minimizar o impacto ambiental em uma escala macroeconômica global, os autores integraram a PL e os modelos MRIO dentro de uma estrutura unificada para identificar setores-chave que contribuem marginalmente para a riqueza de uma economia e para o impacto ambiental total. Ao aplicarem o modelo à economia dos EUA para minimizar as emissões de CO₂, concluíram que as emissões do país norte americano baseadas no consumo são maiores em comparação a produção, evidenciando que parte do impacto causado pelo país foi mascarado pelo deslocamento das tarefas de fabricação para outros países.

A maioria das emissões estavam associadas a outros setores que utilizam os resultados dos anteriores para produzir bens finais (ou seja, as emissões são originadas em um setor, mas a responsabilidade correspondente deve ser compartilhada com outros setores). Quanto à distribuição espacial das emissões, os autores comprovaram que o comércio de emissões foi maior com a China, Canadá, Rússia, Japão, México e a Grã-Bretanha.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a base de dados e a metodologia que foram utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente são apresentados a origem e a estrutura dos dados, descrevendo os setores e países que compõe a matriz de insumo-produto. Em seguida, são discutidos os principais conceitos referentes a teoria insumo-produto e sua estrutura de dados.

Posteriormente, é descrito o procedimento de incorporação das emissões de GEE na estrutura insumo-produto e assim, apresenta-se os principais conceitos sobre Programação Linear para na última parte descrever a utilização dos modelos de insumo-produto e programação linear e definir os cenários simulados.

3.1 BASE DE DADOS

A matriz insumo-produto utilizada na pesquisa foi coletada do Banco de Dados Mundial de Insumo-Produto, conhecida internacionalmente como WIOD (*World Input-Output Database*)¹³. Este banco de dados foi construído a partir de informações oficiais de contas nacionais, estatísticas do comércio internacional e compreende um conjunto de tabelas de fluxos monetários para 40 países¹⁴ mais o Restante do Mundo no período de 1995 a 2014, composta por 35 setores¹⁵. Além disso, fornece informações de caráter ambiental, como utilização de terra e água, uso de energia e sobre as emissões de gases do efeito estufa oriundos de diferentes poluentes (DIETZENBACHER et al., 2013; TIMMER et al., 2012).

Os dados relacionados as emissões de gases poluentes, ao contrário das matrizes de insumo-produto, estão disponíveis para o período de 1995 a 2009. Portanto, neste trabalho foram utilizados os dados da matriz insumo-produto para o ano de 2009, em função da disponibilidade das informações de emissões de gases poluentes. Os países que compõem o banco de dados, com suas respectivas siglas, estão apresentados no Anexo I.

No entanto, com o objetivo de conduzir a discussão dos resultados para uma análise regional, em termos globais, após a modelagem IP-PL e a simulação dos cenários, foi realizada uma agregação dos países que compõem o banco de dados, de acordo com o continente no qual cada país está inserido, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Grupos dos países no banco de dados da WIOD, segundo distribuição regional

| Grupos | Países | | | | |
|---------------|--------------------|------------------|-------------------|--------------------|-----------------------------|
| | Áustria (AUT) | Bélgica (BEL) | Bulgária (BGR) | Chipre (CYP) | República Checa (CZE) |
| Europa | Dinamarca (DNK) | Espanha (ESP) | Estónia (EST) | Finlândia (FIN) | França (FRA) |
| | Alemanha (DEU) | Grécia (GRC) | Hungria (HUN) | Irlanda (IRL) | Itália (ITA) |

¹³ O banco de dados completo está disponível em: <http://www.wiod.org/database/wiots13>. Para uma descrição mais detalhada do banco de dados da WIOD, ver Dietzenbacher et al. (2013) e Timmer et al. (2012).

¹⁴ Anexo I

¹⁵ Anexo II

| | | | | | |
|-------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| | Letônia (LVA) | Lituânia (LTU) | Luxemburgo (LUX) | Malta (MLT) | Países Baixos (NLD) |
| | Polônia (POL) | Portugal (PRT) | Romênia (ROU) | Eslováquia (SVK) | Eslovênia (SVN) |
| | Suécia (SWE) | Turquia (TUR) | Reino Unido (GBR) | | |
| Europa-Ásia | Rússia (RUS) | | | | |
| Ásia | China (CHN) | Japão (JPN) | Índia (IND) | Indonésia (IDN) | Taiwan (TWN) |
| | Coréia (KOR) | | | | |
| Oceania | Austrália (AUS) | | | | |
| América do Norte | Canadá (CAN) | México (MEX) | Estados Unidos (USA) | | |
| América do Sul | Brasil (BRA) | | | | |
| Restante do Mundo | Restante do Mundo (RWO)* | | | | |

Fonte: Adaptado pelo autor a partir dos dados da WIOD (2017).

* A categoria corresponde a todos os países não especificados pela WIOD.

Em relação aos dados dos GEE, a base de dados WIOD apenas fornece informações para as emissões do CO₂, CH₄ e N₂O, devido a dados faltantes relacionados ao SF₆, CFCs e HFCs¹⁶. Entretanto, Genty *et al.* (2012) afirma que os últimos três gases geram um impacto pouco significativo no aquecimento global, permitindo, assim, que a pesquisa possa ser desenvolvida utilizando os três primeiros gases, não havendo o comprometimento das análises a serem realizadas. Os gases são convertidos para GWP (sigla em inglês para Potencial de Aquecimento Global) a partir de fatores específicos para cada gás e após a soma das conversões, é calculado o CO₂eq. Baseado no Relatório 5 (AR5) do IPCC (2014), os fatores de conversão para os gases são: 1 para o CO₂, 28 para o CH₄ e 265 para o N₂O. Dessa forma, o cálculo do dióxido de carbono equivalente é:

$$CO_2eq = 1 \cdot CO_2 + 28 \cdot CH_4 + 265 \cdot N_2O \quad (1)$$

Por fim, os dados coletados das emissões dos 35 setores para os 40 países mais o Restando do Mundo são convertidos e somados, resultando no CO₂eq. Os cálculos, assim como

¹⁶ O banco de dados é público e está disponível em <http://www.wiod.org/database/eas13>

a modelagem e análise dos modelos e resultados, foram realizados no software R, a partir do R Studio¹⁷ e no Excel, utilizando a Macro Open Solver¹⁸ para Programação Linear.

3.2 INSUMO-PRODUTO, PROGRAMAÇÃO LINEAR E EMISSÕES DE CO₂eq

Miller e Blair (2009) apresentam o conceito geral de análise de insumo-produto, bem como inúmeras aplicações específicas, como a abordagem de mercadoria por indústria em modelos de IP, agregação de setores e países, em matrizes multi-regionais, análise ambiental e matrizes híbridas de insumo-produto.

Matematicamente, o modelo IP, em inglês *Input-Output*, é composto por um sistema de equações lineares onde a produção de cada setor $i = (1, \dots, n)$ é resultado da soma de um conjunto de insumos (input) provenientes dos outros setores que compõe a economia, gerando dessa forma determinada quantidade de produto (output) (MILLER & BLAIR, 2009; DE SOUZA, RIBEIRO e PEROBELLI, 2016).

No modelo de Insumo-Produto Multi-Regional - *Multi-Regional Input-Output* (MRIO) - o dimensionamento da matriz aumenta consideravelmente, adicionando além das trocas inter-setoriais internas do país, as trocas entre países e, assim, entre os setores de diferentes países. Considerando um modelo contendo p regiões, onde cada região (país) é dividida em n setores, no modelo MRIO a produção total de cada setor para cada região, ou seja, o valor bruto de produção setorial, assume, assim como a demanda final, a forma de um vetor coluna de np elementos (MILLER & BLAIR, 2009). O modelo MRIO pode ser representado como:

$$X = (I - A)^{-1} \cdot Y \rightarrow X = B \cdot Y \quad (2)$$

Onde a matriz B corresponde a inversa de Leontief com dimensão $np \times np$; X é um vetor $np \times 1$ indicando a produção de cada setor, ou seja, o valor bruto de produção (VBP) de cada setor de cada país; e Y é um vetor $np \times 1$ que indica a demanda final de cada setor de cada país. Uma suposição básica nos modelos MRIO é considerar que as trocas inter-setoriais do país e entre os países fluem do setor i para j , dessa forma a matriz A é a matriz de coeficientes técnicos com dimensão $np \times np$. Os coeficientes técnicos são calculados para cada setor em relação ao setor da sua região de origem e aos setores das outras regiões.

$$a_{ij}^{rr'} = \frac{z_{ij}^{rr'}}{x_j^{rr'}} \quad (3)$$

¹⁷ Para maiores informações: <https://www.rstudio.com>

¹⁸ Para maiores informações: <https://opensolver.org>

Onde z é o consumo intermediário do setor i do país r em relação ao setor j do país r' . A matriz A contém sub-matrizes p^2 (cada uma denotada como $A^{rr'}$) de n^2 elementos definidos como coeficientes técnicos e denotados como $a_{ij}^{rr'}$. No modelo MRIO, os coeficientes técnicos são divididos em dois tipos: se $r = r'$, são classificados como coeficientes intra-regionais; se $r \neq r'$, coeficientes inter-regionais. Para a presente pesquisa, foi utilizada uma matriz MRIO de dimensão 1435x1435, composta por 40 países mais o Restante do Mundo, com cada país sendo composto por 35 setores econômicos.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11}^{11} & \cdots & a_{1j}^{1r'} & \cdots & a_{1\ 1435}^{1\ 41} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{i1}^{r1} & \cdots & a_{ij}^{rr'} & \cdots & a_{i\ 1435}^{r\ 41} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{1435\ 1}^{41\ 1} & \cdots & a_{1435\ j}^{41\ r'} & \cdots & a_{1435\ 1435}^{41\ 41} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Definido os conceitos básicos da modelo MRIO e as matrizes de VBP, demanda final e coeficientes técnicos, é necessário definir o cálculo das emissões de CO₂eq para os setores de cada país.

A modelagem das emissões de CO₂eq com matrizes de insumo-produto baseia-se na metodologia apresentada no estudo de Wiebe *et al.* (2012) para mensurar a quantidade, origem e destino das emissões, utilizada em diversos trabalhos, para quantificar as emissões e identificar os emissores (e.g. PETERS & HERTWICH, 2006; SU & ANG, 2014; VALE, PEROBELLI & CHIMELI, 2017) e nos estudos com modelos IP-PL, pelo uso dos coeficientes de intensidade de emissões, para simular cenários de restrição das emissões (e.g. HRISTU-VARSAKELIS *et al.*, 2009; SAN CRISTÓBAL, 2010; DE SOUZA, RIBEIRO & PEROBELLI, 2016).

Partindo do conceito de que as emissões de CO₂eq de um setor equivalem à quantidade de emissões que o setor emite para viabilizar sua produção, a metodologia baseia-se nos coeficientes de intensidade de emissões de CO₂eq (ci 's). O ci corresponde a quantidade de CO₂eq embutido em uma unidade monetária de produto de cada setor, sendo calculados como a razão entre a emissão de CO₂eq e VBP do setor i . No caso do modelo MRIO, o ci é calculado para cada setor i do país p , expresso como:

$$ci_i^p = \frac{Em_i^p}{VBP_i^p} \quad (5)$$

Dessa forma, foram calculados 1435 ci . Calculados os coeficientes, é construída uma matriz \hat{C} onde a diagonal é composta pelos valores dos ci e os outros demais elementos iguais a zero.

$$\hat{C} = \begin{bmatrix} ci_1^1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & ci_{1435}^{41} \end{bmatrix} \quad (6)$$

No modelo de programação linear, a matriz \hat{C} foi utilizada para formular a restrição ambiental. O modelo de programação linear baseia-se na elaboração de uma função objetivo e nas restrições que a função está sujeita. De acordo com Lachtermacher (2007), a função-objetivo representa uma forma de valoração do desempenho obtido por mudanças pontuais em um conjunto de variáveis de decisão, as quais coordenam a operação do sistema. As restrições, por sua vez, também são representações matemáticas, impondo limites operacionais ao modelo.

Para o uso da programação linear na resolução de problemas, Labadie (2004) destaca como vantagens: a habilidade para ajustar e resolver problemas de grandes dimensões, atinge valores ótimos globais, teoria da dualidade bem desenvolvida para a análise de sensibilidade e a existência de pacotes computacionais prontos para resolução de problemas (e.g. Solver Excel; GAMS). O modelo de otimização é representado como:

$$\text{Otimizar } Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (7)$$

Sujeito a (s. a.):

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, \geq \text{ ou } = t_1 \quad (8)$$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, \geq \text{ ou } = t_2 \quad (9)$$

⋮

$$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq, \geq \text{ ou } = t_m \quad (10)$$

As funções f e g são definidas como:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 \dots + c_nx_n \quad (11)$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 \dots + a_{in}x_n, \forall i = 1, \dots, m \quad (12)$$

Onde:

n : número de variáveis;

m : número de restrições;

i : índice de uma determinada restrição;

c_i : coeficiente da variável x_i da função objetivo;

a_{i1} : coeficientes da variável x_i da j -ésima restrição.

Conforme descrito por Lachtermacher (2007), no problema de programação linear padrão, a otimização de uma função está em minimizar ou maximizar a função objetivo, sujeito

as restrições compostas por inequações ou igualdades. Os modelos de IP-PL voltados para analisar as questões das restrições das emissões de gases poluentes concentram-se em dois problemas: (i) maximizar o valor bruto de produção total (VBP); (ii) minimizar os impactos ambientais, ou seja, minimizar as emissões totais de GEE.

Na presente pesquisa foi utilizado o modelo (i), maximizar o VBP global, onde a função objetivo é maximizar o somatório dos valores de x sujeita a restrições econômicas, atender aos valores da demanda final, e restrição ambientais, valores permitidos de emissões por setor ou por país. Dessa forma, diante do modelo de programação linear e a estrutura dos dados de insumo-produto, o modelo da pesquisa foi desenvolvido como:

$$\text{Max VBP}_T = x_1 + x_2 \dots + x_{1435} \quad (13)$$

s. a.:

$$\left. \begin{aligned} (1 - a_{11})x_1 - a_{12}x_2 - \dots - a_{1j}x_j - \dots + a_{1435}x_{1435} &\leq y_1 \\ -a_{21}x_1 + (1 - a_{22})x_2 - \dots - a_{2j}x_j - \dots - a_{2435}x_{1435} &\leq y_2 \\ &\vdots \\ -a_{i1}x_1 - a_{i2}x_2 - \dots - a_{ij}x_j \dots - (1 - a_{ij})x_j &\leq y_j \\ &\vdots \\ -a_{14351}x_1 - a_{14352}x_2 - \dots - (1 - a_{14351435})x_{1435} &\leq y_{1435} \end{aligned} \right\} \text{Restrição} \quad (14)$$

Economica

$$\left. \begin{aligned} c_1x_1 + c_{12}x_2 + \dots + c_1x_j + \dots + c_1x_{1435} &\leq t_1 \\ c_2x_1 + c_2x_2 + \dots + c_2x_j + \dots + c_2x_{1435} &\leq t_2 \\ &\vdots \\ c_jx_1 + c_jx_2 + \dots + c_jx_j &\leq t_j \\ &\vdots \\ c_{1435}x_1 + \dots + c_{1435}x_j + \dots + c_{1435}x_{1435} &\leq t_{1435} \end{aligned} \right\} \text{Restrição} \quad (15)$$

Ambiental

$$x_1, x_2, \dots, x_{1435} \geq 0 \} \text{não - negativo} \quad (16)$$

Onde:

x_j : valor bruto de produção do setor j ;

y_j : demanda final do setor j ;

a_{ij} : coeficiente técnico do setor i em relação ao setor j ;

c_j : coeficientes de intensidade de emissões de CO_2eq do setor j ;

t_j : meta de emissões do setor j . Este alvo pode ser definido de forma variada para cada setor j , ou pode ser definido como um objetivo de redução para as emissões globais do país (no último caso, a restrição ambiental pode ser reduzida a $\sum_{j=1}^n c_j x_j \leq \sum_{j=1}^n t_j$).

Na forma matricial, expressamos como:

$$\text{Max VBP}_T = [1 \quad 1 \quad \dots \quad 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{1435} \end{bmatrix} \quad (17)$$

s. a.:

$$\begin{bmatrix} (1 - a_{11}) & -a_{12} & \dots & -a_{1\ 1435} \\ -a_{21} & (1 - a_{22}) & \dots & -a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{1435\ 1} & -a_{1435\ 2} & \dots & (1 - a_{1435\ 1435}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{1435} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{1435} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} ci_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & ci_{1435} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{1435} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_{1435} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{1435} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (20)$$

De maneira igual a:

$$Max\ VBP_T = \tau^T \cdot X \quad (21)$$

s. a.:

$$(I - A)X \leq Y \quad (22)$$

$$\hat{C}X \leq T \quad (23)$$

$$X \geq 0 \quad (24)$$

A equação 22 refere-se à restrição econômica que diz respeito a demanda final, impondo que os valores da produção setorial final não devem ultrapassar a demanda final. A restrição foi definida como “menor ou igual” pois no modelo há um limite de emissão de GEE por setor, havendo, como consequência, uma redução da oferta de bens. Dessa forma, não há uma demanda mínima a ser atendida, permitindo liberdade na variação dos VBP e um bloqueio de um setor sobressair a outro, ou seja, um setor aumentar sua produção além da sua demanda final por conta da diminuição da produção de outros setores devido à restrição das emissões.

A restrição ambiental, equação 23, refere-se aos limites de emissões dos GEE por setor, país ou global. Conforme apresentado no Capítulo 2, há uma dúvida em relação a eficiência das propostas enviadas pelos países para a redução dos GEE. De acordo com relatório da UNEP (2017) e outros estudos (e.g. ROGELJ et al., 2016; CLÉMENÇON, 2016; SCHLEUSSNER et al., 2016) mesmo o cumprimento de todas as propostas encaminhadas a UNFCCC, não será possível alcançar o objetivo de manter o aquecimento global abaixo dos 2°C.

Segundo o IPCC (2017), para manter a temperatura global dentro da meta estabelecida no Acordo de Paris a média anual ideal de emissão global de GEE é de 18 Gt CO₂eq. Como em

2009, segundo os dados da WIOD (2018), a emissão global foi de 35,6 Gt CO₂eq, foram estabelecidos os seguintes cenários:

- (i) Pessimista: redução de 10% nas emissões globais;
- (ii) Moderado: redução de 30% nas emissões globais;
- (iii) Otimista: redução de 50% nas emissões globais.

O cenário (iii) é o ideal segundo a meta estabelecida, porém é o mais rigoroso e o que pode trazer maior impacto econômico aos países. Dessa forma, simular três diferentes cenários de redução da emissão global permitiu estudar o comportamento dos países frente a mitigação dos GEE e analisar alternativas para uma redução progressiva das emissões. Entre as restrições utilizadas no modelo IP-PL desta pesquisa, não foi definida nenhuma que limite a quantidade que cada país pode reduzir das suas emissões. Procura-se, dessa forma, permitir analisar quais países estão sujeitos a maior redução em suas emissões para determinada meta global.

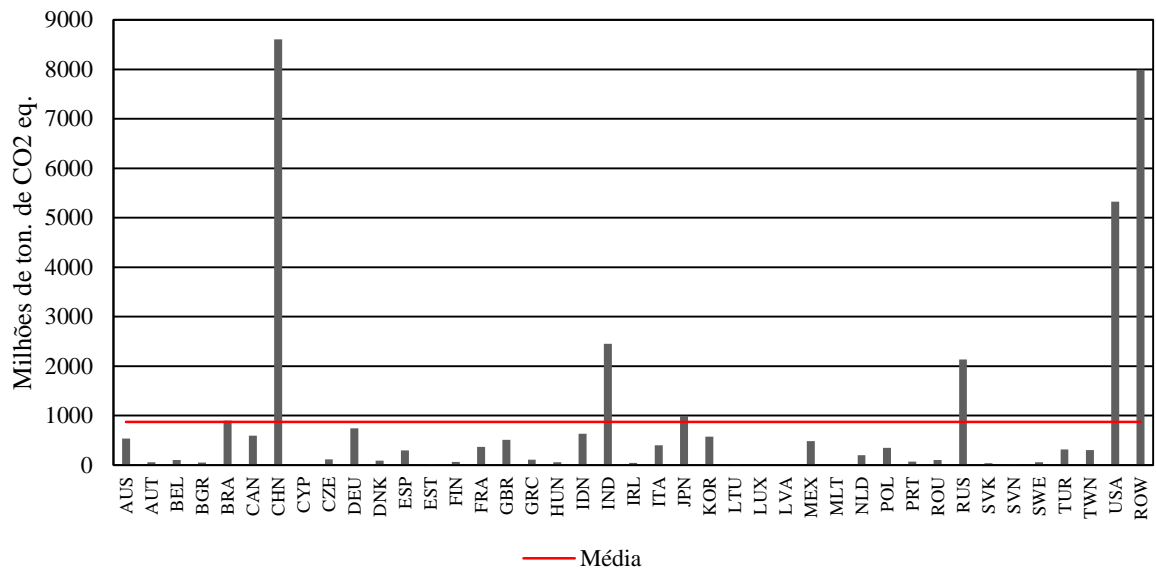
A terceira restrição, equação 24, diz respeito a não-negatividade, de tal modo que os VBP não podem assumir valores não-negativos em nenhum dos setores. A não-negatividade é uma das restrições-chave de um modelo de programação linear (LACHTERMACHER, 2007). Dessa maneira, definidos os parâmetros e restrições do modelo IP-PL, foram realizadas as simulações dos três diferentes cenários e apresentados a seguir os principais resultados e análises.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo os dados da WIOD, as emissões globais de CO₂eq foram de aproximadamente 35,6 Gton. Como apresentado pelo IPCC (2014), cerca da metade das emissões antropogênicas cumulativas de CO₂ entre 1750 e 2011 ocorreram nos últimos 40 anos, sendo que entre 2000 a 2010, as emissões anuais cresceram em média 2,2%. Embora a crise econômica global de 2007/2008 tenha reduzido o volume de GEE, nessa década, as emissões foram as maiores na história da humanidade.

A Figura 1 apresenta as emissões de CO₂eq para os 40 países mais um grupo de países denominado “Restante do Mundo” (ROW) que compõem o banco de dados da WIOD. A linha vermelha representa a média de emissões dos países, aproximadamente 873,27 milhões de toneladas de CO₂eq. Entre os países com emissões acima da média, além da variável Restante do Mundo (ROW), encontram-se a China (CHN), Estados Unidos (USA), Índia (IND), Rússia (RUS), Japão (JPN) e Brasil (BRA). A Alemanha (DEU) é o país europeu com maior volume de emissões, próximo do valor médio.

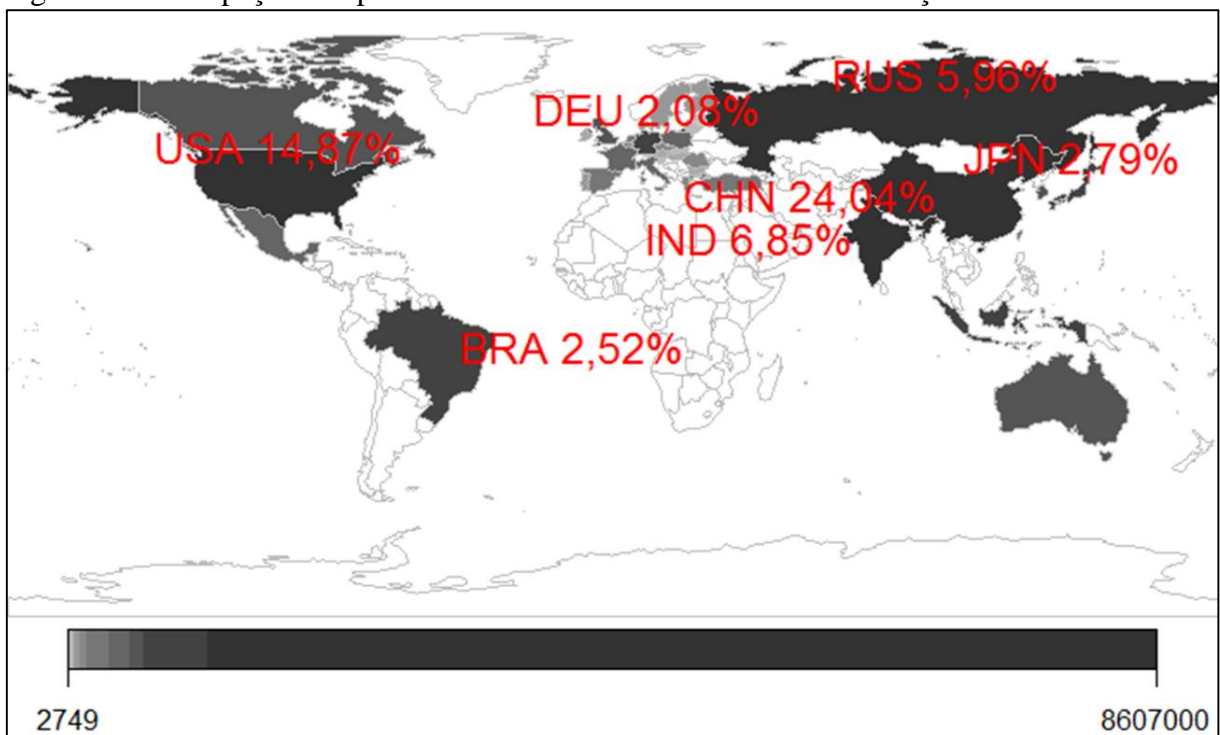
Figura 1 - Emissões de CO₂eq dos países que compõe a matriz da WIOD em 2009



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

Os 40 países presentes no banco de dados da WIOD representavam, aproximadamente, 78% da emissão global em 2009. A Figura 2 apresenta a participação dos sete países com maior parcela na emissão global de CO₂eq em 2009.

Figura 2 - Participação dos países com maior nível de emissões em relação ao total



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

*Nota: Alemanha (DEU), Brasil (BRA), China (CHN), Estados Unidos (USA), Índia (IND), Japão (JPN), Rússia (RUS)

** A unidade dos valores referentes as emissões de CO₂eq é Gigatonelada

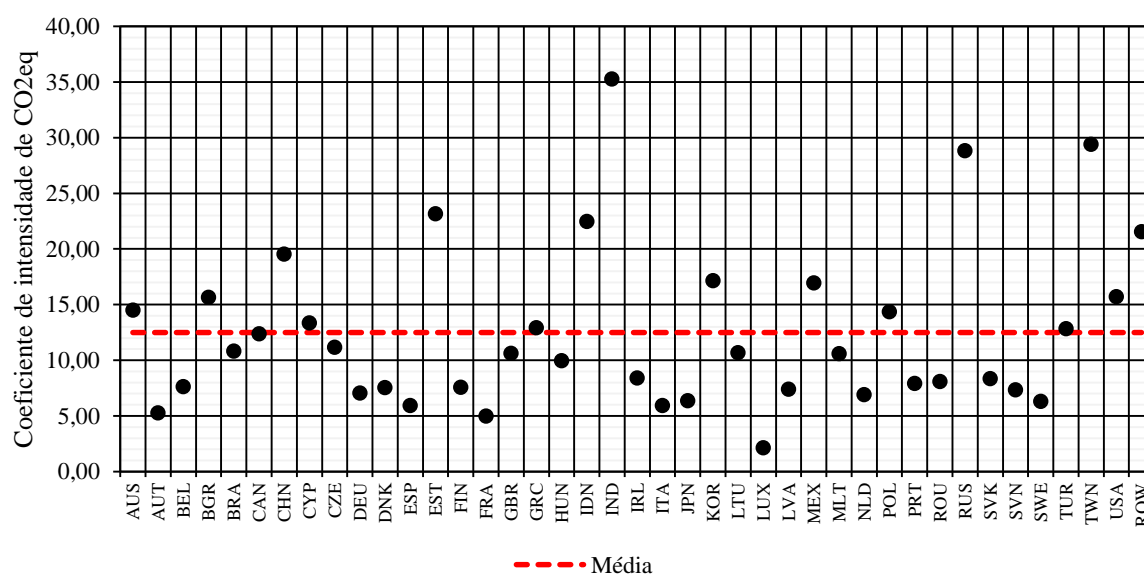
Os sete países destacados na Figura 2 representavam 59,11% da emissão global. A China (CHN), país com maior volume de emissões, foi responsável por 24,04% do montante, parcela consideravelmente maior que os Estados Unidos (USA), segundo país com maior participação, 14,97%. Em seguida encontravam-se a Índia, Rússia, Japão, Brasil e Alemanha. Vale registrar que este grupo dos sete maiores emissores de GEE em 2009 é composto pelas quatro maiores economias, Estados Unidos, Japão e Alemanha, e os principais países emergentes Brasil, China, Índia e Rússia.

4.1 COEFICIENTE DE INTENSIDADE DE EMISSÕES DE CO₂eq

Os coeficientes de intensidade de emissões de CO₂eq (*ci*) representam a quantidade de CO₂eq emitido em relação ao VBP para cada setor do país. Conforme Vale, Perobelli e Chimeli (2017), por meio do *ci*, é possível analisar a intensidade de poluição de cada país.

A Figura 3 apresenta os coeficientes de intensidade de emissões para os 40 países e o grupo “Restante do Mundo” (ROW) que compõem a matriz MRIO da WIOD, e ainda destaca a média dos coeficientes. A Índia (IND), país entre os maiores emissores de CO₂eq em 2009, teve o maior coeficiente (35,28), ou seja, foi o país com maior intensidade de emissões na sua produção econômica. Em seguida, encontra-se Taiwan (TWN), com coeficiente de 29,41, país que não apresentou volume elevado de emissões absolutas em 2009 em comparação aos demais, porém o alto valor do coeficiente revela a intensidade de poluição da sua economia.

Figura 3 - Coeficiente de intensidade de emissões de CO₂eq em 2009



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

Acima da média ainda aparecem alguns países entre os maiores emissores de GEE, como Rússia (RUS), China (CHN) e Estados Unidos (USA). Os dois últimos, embora tenham apresentado os maiores valores de VBP, ainda possuem alto coeficiente, denotando a alta intensidade de emissões. Além deles, a exemplo de Taiwan (TWN), encontravam-se países com volume baixo de emissões, porém altamente intensivos, como Estônia (EST), Indonésia (IDN), Coreia do Sul (KOR), México (MEX), Bulgária (BGR) e Polônia (POL).

O Japão (JPN), país entre os maiores volumes de emissões de GEE em 2009, apresentou baixo valor no coeficiente (6,37), localizando-se abaixo da média (12,48). Isto mostra a baixa intensidade de emissões da economia japonesa em relação aos demais países com alto valor bruto de produção.

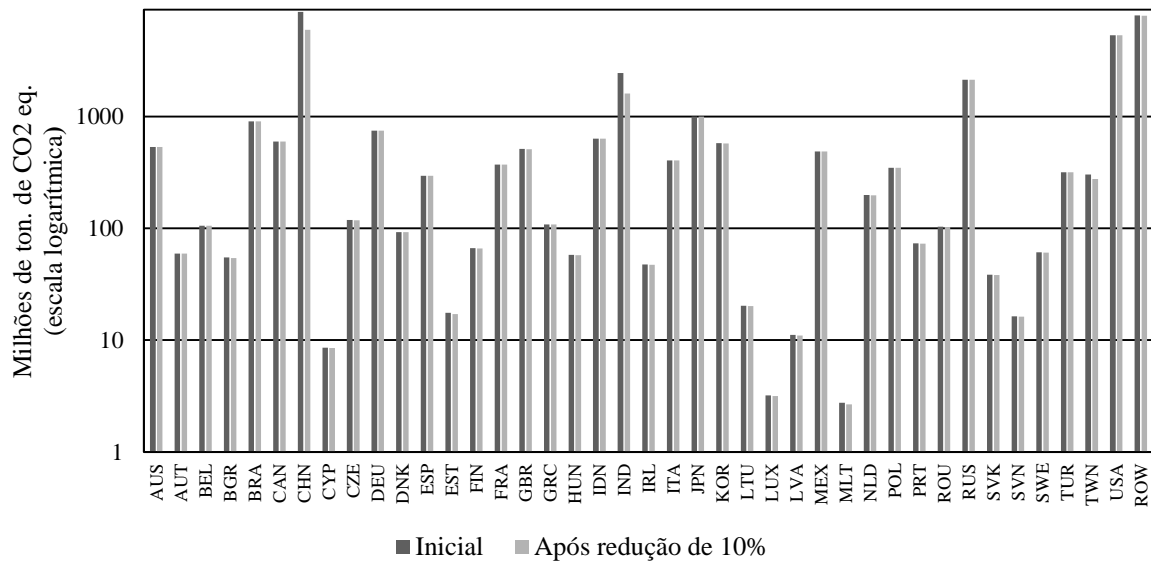
Em relação aos países europeus, a maioria encontrava-se abaixo da média, principalmente grandes economias do continente, como a Alemanha (DEU), Reino Unido (GBR) e França (FRA). O menor coeficiente, 2,17, pertence Luxemburgo (LUX), país com baixo volume de emissões de GEE e valor bruto de produção.

4.2 IMPACTO ECONÔMICO DA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE

O primeiro cenário simulou a redução de 10% nas emissões globais de GEE, reduzindo o volume de emissões de 35,8 Gt CO₂eq para 32,2 Gt CO₂eq. Para alcançar esta meta, a redução necessária em dois países se destaca entre os 40 países analisados. A Índia (IND) apresentou redução de 34,82% e a China (CHN) redução de 30,87% nas emissões de CO₂eq. Taiwan (TWN) apresentou a terceira maior redução no nível das emissões, 9,09%. Com a redução no nível de emissões destes 3 países, os demais apresentaram reduções de magnitude menor que 5% para que a meta do cenário pessimista seja cumprida.

Portanto, países que emitiram grandes quantidades de CO₂eq em 2009, como Estados Unidos (USA), Rússia (RUS) e Alemanha (DEU), precisariam reduzir suas emissões em apenas 0,04%, 0,25% e 0,1%, respectivamente, para atender a restrição imposta de 10% neste primeiro cenário. A variação das emissões de cada país pode ser observada na Figura 4, que representa as emissões em 2009 (inicial) e após a simulação da redução de 10% nas emissões globais.

Figura 4 - Variação das emissões de GEE após imposição de meta de redução de 10% nas emissões globais



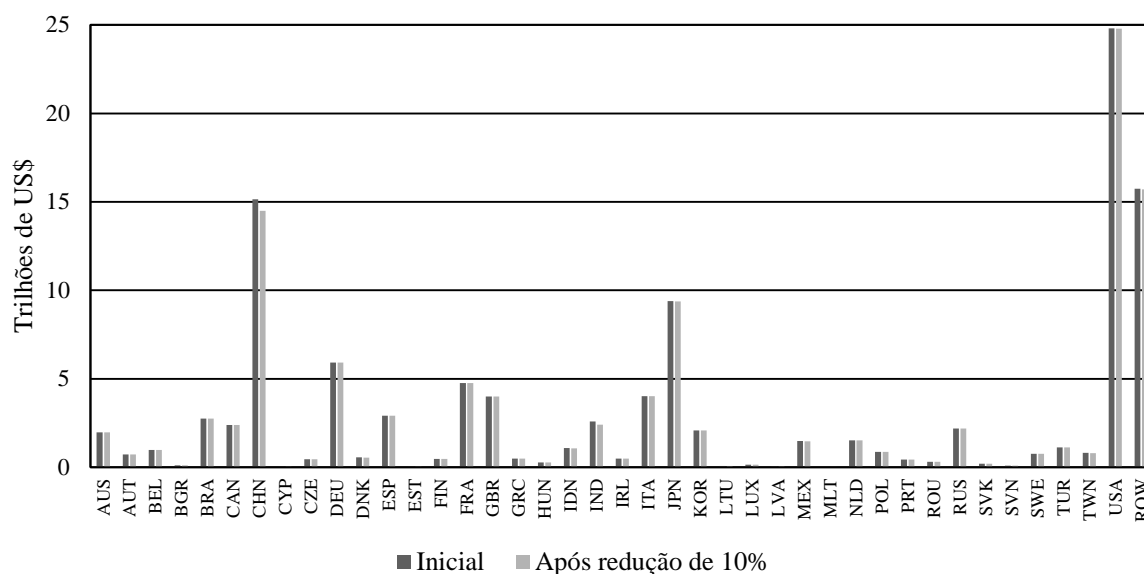
Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

O Brasil encontra-se entre os países com baixa necessidade de redução no nível de emissões, da ordem de 0,12%. Entre os países europeus, as maiores reduções foram observadas em Malta (MLT), 3,20%, Estônia (EST), 2,46%, e Luxemburgo (LUX), 1,26%. A maior magnitude de redução nos três países está associada aos coeficientes de intensidade de emissões, onde é alta a proporção Emissões de CO₂eq/VBP, ou seja, houve um alto volume relativo de emissões na produção econômica do país.

Outro indicador analisado após a simulação das restrições na emissão global é a variação do VBP¹⁹. Conforme representado na Figura 5, Índia (IND) e China (CHN) apresentaram as maiores quedas no VBP, 9,68% e 4,62%, respectivamente. Taiwan (TWN), que apresentou redução relativamente menor do que seus vizinhos asiáticos, com queda de 1,08%, encontra-se também entre os países que sofreriam maior redução em seu VBP. Os países europeus que apresentaram maiores reduções nas emissões, também sofreriam maiores impactos econômicos, de modo que os VBP de Malta (MLT) e Estônia (EST) apresentaram quedas da ordem de 2,2% e 1,53%, respectivamente.

¹⁹ Uma limitação do modelo PL-IP é sua estática comparativa e relação linear entre as variáveis, assim pressupõe a tecnologia empregada na economia constante para o determinado ano. Dessa forma, a única maneira de um setor, conseqüentemente um país, reduzir sua emissão é reduzindo seu VBP e não, por exemplo, a utilização de tecnologias que emitem menos GEE.

Figura 5 - Variação dos VBP após imposição de meta de redução de 10% na emissão global



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

O Brasil (BRA) e a Rússia (RUS) foram os países que apresentaram os reduzidos níveis de impacto, com o VBP variando negativamente em 0,07% e 0,17%, respectivamente. Variações pouco significativas também foram observadas em importantes economias globais, como os Estados Unidos, Japão (JPN), Alemanha (DEU) e França (FRA), com reduções de 0,03%, 0,11%, 0,1% e 0,06%, respectivamente. Entre as principais economias europeias, a maior queda no VBP ocorreu no Reino Unido (GBR), com redução no VBP de 0,29%.

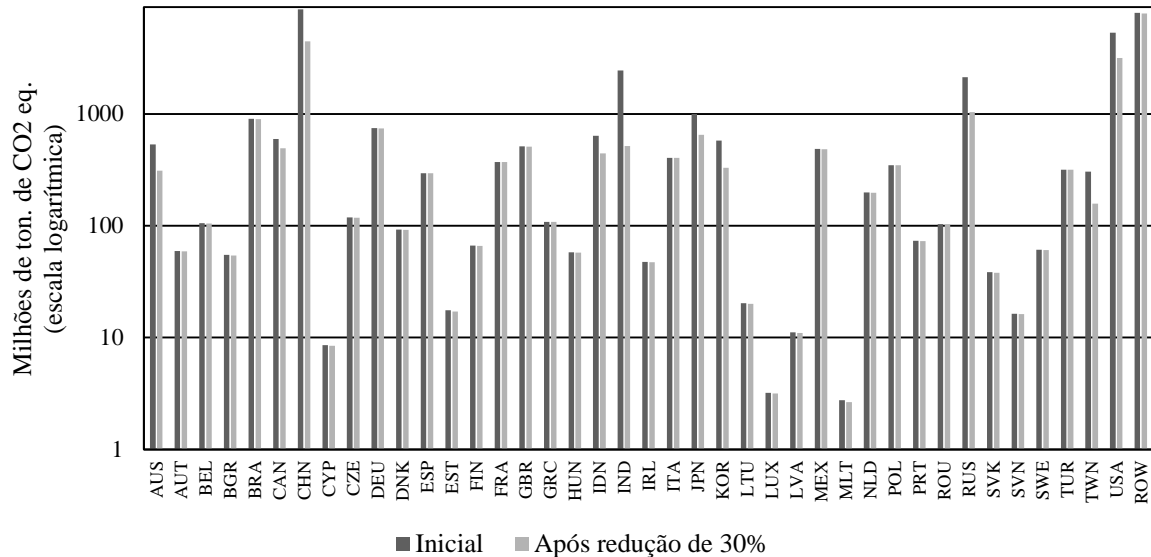
O segundo cenário foi tratado como um cenário moderado e impôs uma meta de reduzir 30% das emissões globais de GEE. Dessa forma, após a simulação de redução, as emissões globais deveriam ser no máximo de 25,1 Gt CO₂eq. Nesse cenário, há uma maior exigência de mitigação por parte da Índia (IND), onde o país deveria diminuir 78,99% no seu nível de emissões. A China (CHN) novamente tem papel de destaque, com uma necessidade de redução de 48,45%. Por outro lado, a Rússia (RUS), que assumia menor responsabilidade no primeiro cenário, neste apresentou redução das emissões em 51,39%.

Aspecto semelhante foi observado no Japão (JPN), país com volume alto de emissões em 2009, mas com menor responsabilidade no primeiro cenário, em termos de necessidade de redução no nível de emissões. No cenário moderado, o país teria que reduzir o nível de emissões na ordem de 34,96%. Já os Estados Unidos (USA), no cenário moderado, apresentou elevado nível de exigência em seu nível de mitigação, com redução de 40,57%.

Por outro lado, países como o Brasil (BRA) e a Alemanha (DEU), que estavam entre os maiores poluidores em 2009, apresentaram pequena redução das emissões, 0,38% e 0,29%,

respectivamente. A Figura 6 apresenta as emissões em 2009 e após a simulação da redução de 30% nas emissões globais.

Figura 6 - Variação das emissões de GEE após imposição de meta de redução 30% nas emissões globais

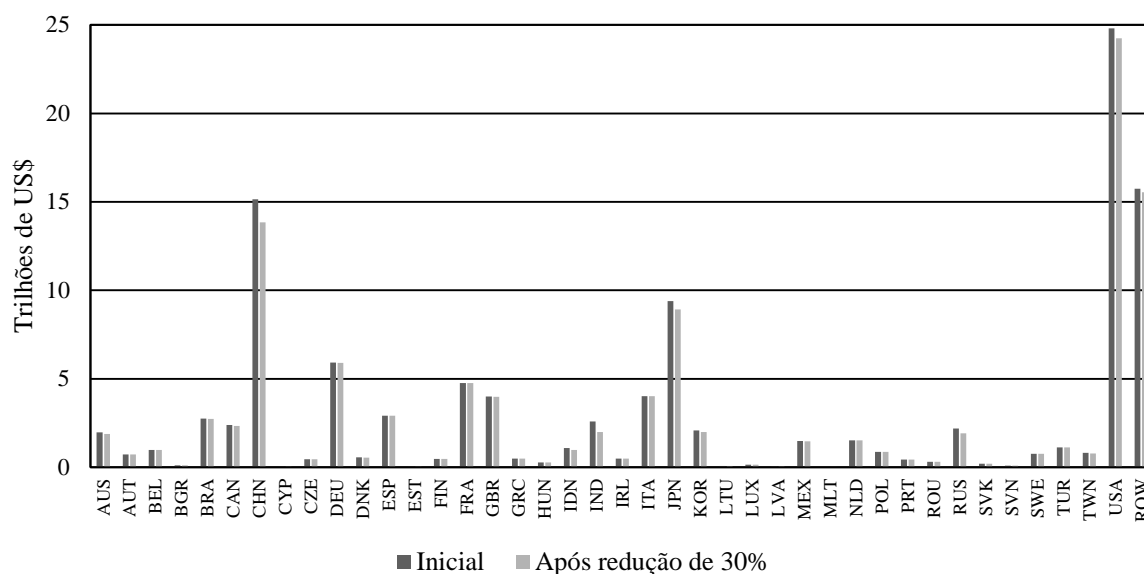


Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

Na medida em que a restrição no nível das emissões aumenta, os níveis de VBP dos países sofreriam maior impacto, principalmente nos quais a responsabilidade pela mitigação dos GEE foi maior. Assim, o impacto econômico de maior magnitude ocorreu na Índia (IND), com redução no VBP de 23,07%, seguida da Rússia (RUS), com queda de 12,58%. Em comparação, China (CHN), Japão (JPN) e Estados Unidos (USA) sofreram redução menor, 8,6%, 4,99% e 1,86%, respectivamente. Nesse cenário, o Brasil apresentou redução no VBP na ordem de 0,24%.

Entre os países europeus, assim como no cenário pessimista, o maior impacto foi observado em Malta (MLT) e Estônia (EST), com reduções de 2,44% e 1,88%, respectivamente. Alemanha (DEU), França (FRA) e Reino Unido (GBR), principais economias europeias, apresentariam menores reduções em comparação aos demais países, com queda de 0,29%, 0,15% e 0,42%, respectivamente. O impacto nos valores brutos de produção dos países após a redução de 30% das emissões globais de GEE está apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Variação dos VBP após imposição de meta de redução de 30% na emissão global



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

Indonésia (IDN) e Coreia do Sul (KOR) apresentariam significativa queda no VBP, após a restrição no nível de emissões, com reduções da ordem de 10,01% e 4,34%, respectivamente. Na América do Norte, o Canadá (CAN) teria redução na produção econômica de 2,71%, valor superior em comparação ao cenário anterior, onde impacto econômico nos Estados Unidos foi menor.

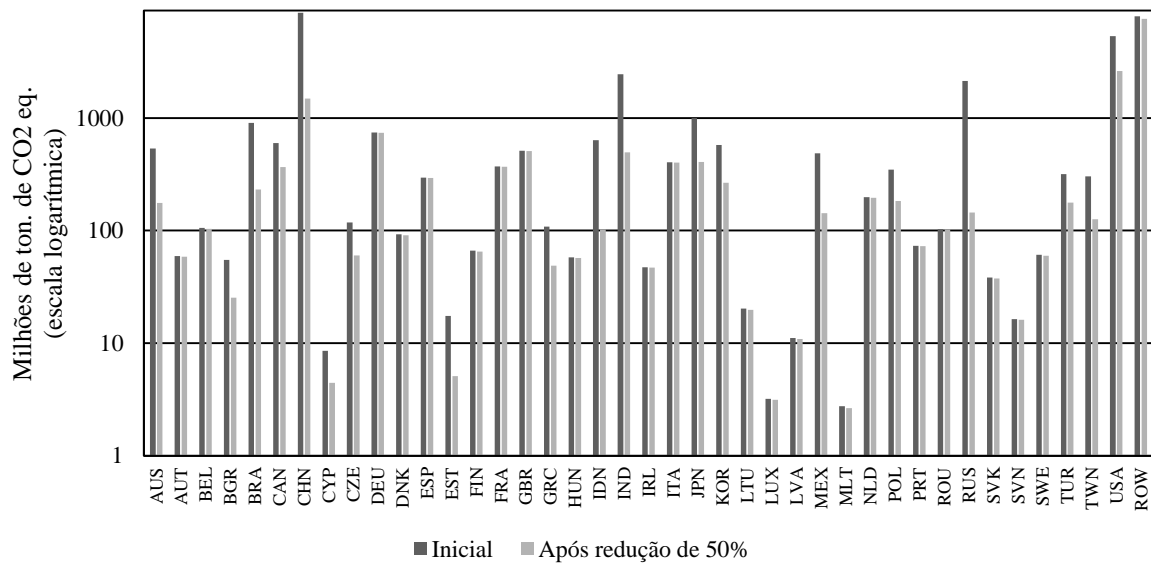
O cenário otimista, terceira simulação realizada, é o cenário que se aproxima da real necessidade de redução das emissões globais para manter o nível sustentável de emissões anuais e, assim, a temperatura global não subir 2°C, como previsto pelo relatório da IPCC. Dessa forma, a meta de redução no cenário otimista foi de 50%, onde as emissões globais de 35,8 Gt CO₂eq em 2009 foram reduzidas para 17,9 Gt CO₂eq.

Neste cenário destacou-se o maior nível de redução nos países com alto valor no coeficiente de intensidade de emissões e categorizados como economias emergentes que compõe o BRIC²⁰. A Rússia (RUS) foi o país que apresentou a maior redução no nível de emissões, 93,23%, seguida da Indonésia (IDN), 83,87%, China (CHN), 82,66% e Índia (IND), 79,82%. Nos cenários pessimista e moderado, o Brasil (BRA) apresentou pequena redução no nível das suas emissões, entretanto no cenário otimista foi o quinto país com maior redução, 74,28%. Mesmo com coeficiente de intensidade de emissões abaixo da média, o Brasil estava entre os países com maior volume emitido em 2009.

²⁰ BRIC é composto pelo Brasil, Rússia, Índia e China. O termo BRICS foi oficializado em 2011 com a admissão da África do Sul. Os dados para esse país não estão disponíveis pela WIOD, limitando o presente trabalho aos quatro países.

O Japão (JPN), com coeficiente abaixo da média e entre os maiores emissores de GEE em 2009, apresentou redução na ordem de 59,19%, enquanto os Estados Unidos (USA), redução de 50,97%. A Figura 8 apresenta as emissões em 2009 e após a simulação da redução de 50% nas emissões globais.

Figura 8 - Variação das emissões de GEE após imposição de meta de redução de 50% nas emissões globais



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

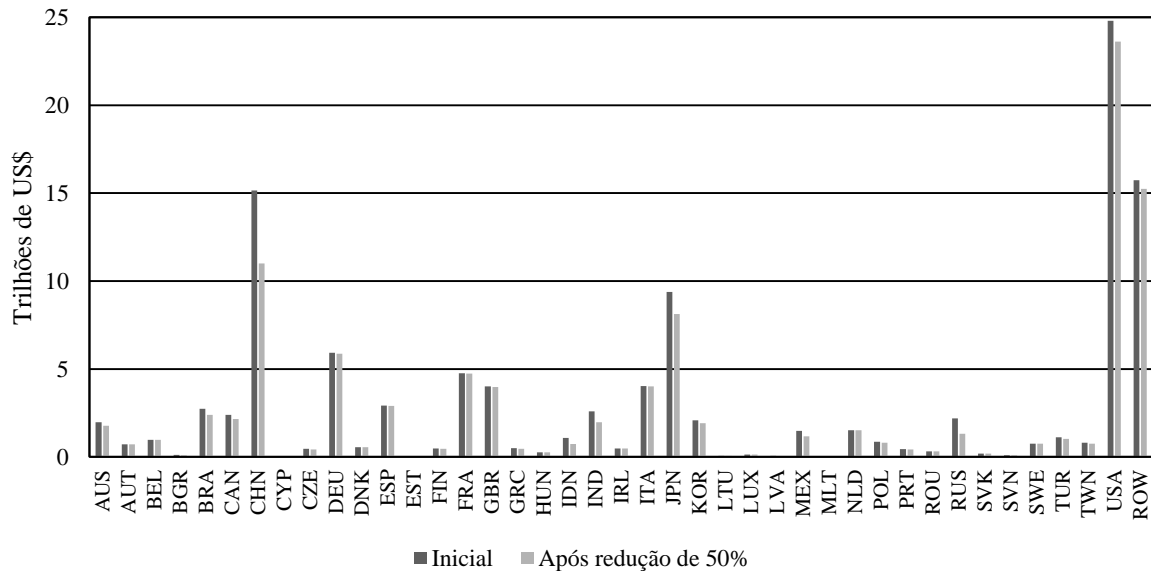
Os países com alto coeficiente, porém baixo volume de emissões em comparação com os demais, apresentariam elevada redução no volume de CO₂eq. Foi o caso da Estônia (EST) e Taiwan (TWN), com redução na ordem de 70,89% e 58,35%, respectivamente. Entre os países europeus, as maiores reduções, além da Estônia (EST), foram da Grécia (GRC), 55,04%, e Bulgária (BGR), 53,67%. A Alemanha, país com o sétimo maior volume emitido em 2009, precisaria reduzir apenas 1,04% no nível das emissões. Outras potências europeias, como Reino Unido (GBR) e França (FRA), também apresentaram baixa redução, 0,85% e 0,65%, respectivamente.

A escala de redução no nível das emissões de GEE dos países para alcançar o volume necessário de emissão global, impactou diretamente as respectivas economias. A Figura 9 apresenta a variação dos VBP de todos os países analisados no cenário otimista. A Rússia (RUS), com redução de 40,12% no VBP, foi o país que sofreria maior impacto econômico no cenário otimista.

Dessa forma, países com maior necessidade de redução nas emissões, sofreriam maior impacto econômico. A Indonésia (IDN), apresentou redução no VBP na ordem de 32,48%, a China (CHN) redução de 27,44% e Índia (IND), 24,02%. Já os Estados Unidos apresentaram

redução no VBP na ordem de 4,8%, enquanto o Japão (JPN), terceira maior economia em 2009, sofreu redução de 13,45%.

Figura 9 - Variação dos VBP após imposição de meta de redução de 50% na emissão global



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

O impacto econômico no Brasil (BRA) foi da ordem de 13,07% de redução no VBP. Na Europa, os maiores impactos concentraram-se nos países com maior coeficiente de intensidade de emissões, conseqüentemente aqueles que teriam maior redução no volume das suas emissões. A Estônia (EST) e a Bulgária (BGR) sofreriam as maiores reduções no bloco europeu, 8,88% e 8,11%, respectivamente. Por outro lado, países com os maiores valores de VBP teriam redução menor que 1%. É o caso da Alemanha (DEU), Reino Unido (GBR) e França (FRA) que teriam redução de 0,9%, 0,77%, 0,48% no VBP, respectivamente. O menor impacto econômico foi na Espanha (ESP), com redução de apenas 0,31% no VBP.

Diante dos três cenários, em especial o cenário otimista, foi observada a maior atribuição da responsabilidade por reduzir as emissões aos países mais intensivos em emissões. Com isso, os países emergentes e econômicas expressivas no contexto global, como Estados Unidos e Japão, sofreriam um maior impacto econômico, enquanto Alemanha, Reino Unido e França, não apresentariam grau elevado de redução das suas emissões e, assim, menor impacto econômico.

Em relação a China, como identificado por Tiwaree e Imura (1994) e posteriormente por Zhang (2009), há duas características importantes dos setores relacionados ao fornecimento de energia: são altamente poluentes e importantes economicamente para o país. Dessa forma, ao impor uma redução das emissões na China, setores mais intensivos em emissões teriam uma maior penalidade, reduzindo sua produção. O estudo de Mi *et al.* (2015), específico para a

cidade de Beijing (capital da China), e Chang (2015), utilizando uma matriz IP nacional da China, observaram relação semelhante entre a intensidade de poluição e setores-chaves da economia chinesa. Diante disso, uma política de mitigação de GEE estaria diretamente relacionado a importantes setores econômicos do país, ocasionando um maior impacto no VBP da China.

Aspecto semelhante foi observado na Índia, como analisado por Das e Paul (2014), onde a alta intensidade de poluição está relacionada aos setores de energia, sendo estes setores-chave para a economia indiana. Assim, da mesma forma como na China, a maior atribuição da redução da emissão global denota um maior impacto na economia do país. Essa constatação também foi observada para a Rússia, país que apresentou o maior impacto econômico no cenário otimista. Como descrito por Zapparoli *et al.* (2018), a Rússia apresenta o setor de fornecimento de energia como mais intensivo em poluição. Assim, como setor-chave para a economia do país (DE VRIES *et al.*, 2012), a redução das emissões resultaria no efeito direto em um dos principais setores econômicos e, assim, causando o grau elevado do impacto econômico.

No Brasil foi observada característica semelhante, porém não em relação aos setores que fornecem energia, mais a relação entre o setor-chave para a economia e a intensidade de emissões. Como observado por De Souza, Ribeiro e Perobelli (2016), uma política de mitigação dos GEE no país teria maior impacto no setor agropecuário. Dessa forma, a redução das emissões impactaria diretamente o principal setor econômico do país. Em relação ao fornecimento de energia, como discutido por Feijó e Júnior (2009), a matriz energética brasileira é menos intensiva em carvão e petróleo em relação aos outros países, sendo uma vantagem para o país reduzir emissões relacionadas aos setores energéticos.

Em relação aos países com alto desempenho econômico e com elevado grau de redução das emissões, como Estados Unidos e Japão, apresentariam um impacto econômico menor. A principal diferença pode estar relacionada a intensidade de emissões dos setores. Estados Unidos e Japão, mesmo contento setores energéticos intensos em emissões, apresentaram os setores relacionados a tecnologia, comércio e serviços como os principais em relação a produção econômica. Assim, as reduções das emissões nos dois países não estariam direcionadas aos setores-chaves da economia dos respectivos países.

Na Europa, a responsabilidade por reduzir as emissões foi direcionada para pequenas economias, como Estônia e Malta, em relação as potências econômicas do bloco, como Alemanha, Reino Unido e França. Essa característica, como discutido anteriormente, está

relacionada a intensidade de emissões de CO₂eq. dos setores produtivos das respectivas economias.

Diante disso, entende-se a importância em averiguar a tecnologia produtiva empregada pelos países. A frente de uma política global de mitigação dos GEE, o país que utiliza meios mais limpos de produção, com menor emissão de GEE, sofreria menor impacto econômico. Entretanto, em vista da discussão sobre a maior atribuição da redução das emissões e o impacto econômicos relacionados a especificação produtiva de cada país, torna-se importante agregar a discussão as relações comerciais. Como discutido por Battjes *et al.* (1998), Proops *et al.* (1999) e Giljum e Hubacek (2001), há uma intensa troca de produtos entre os países, com exportações e importações de diferentes recursos energéticos e naturais, provenientes de fontes intensas em emissões. Com isso, como debatido por Davis e Caldeira (2010), Peters *et al.* (2011), Wiebe *et al.* (2012), Arto e Dietzenbacher (2014) e Vale, Perobelli e Chimeli (2017), é necessário observar a devida responsabilidade atribuída pelas emissões de GEE.

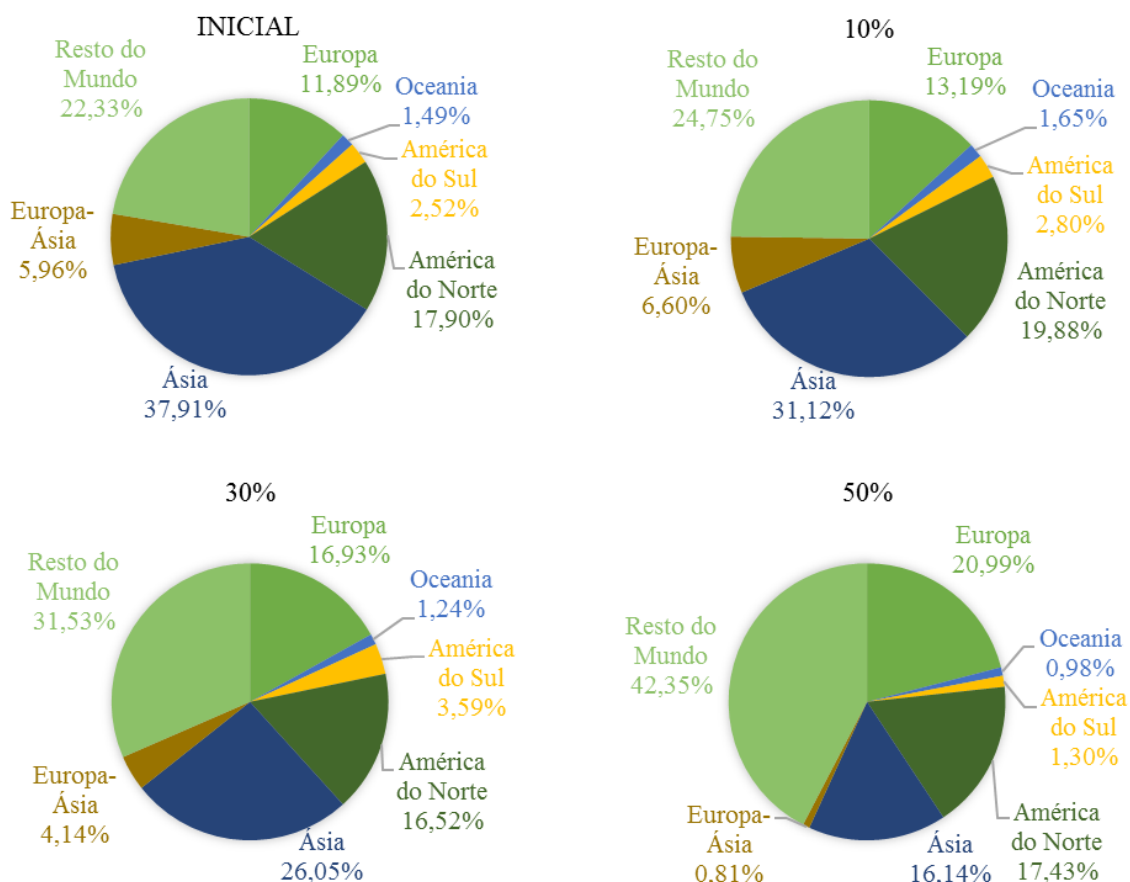
Em comum, estes estudos concluem o direcionamento das atividades com maior intensidade de emissões aos países emergentes. De modo que, além de aumentarem suas emissões, a estrutura econômica dos países torna-se mais dependente dos setores intensos em emissões. Assim, ao exportarem os produtos oriundos desses setores, transferem as emissões dos consumidores para si. A exemplo, no estudo de Pascual-González *et al.* (2016), ao analisarem as emissões dos Estados Unidos, os autores concluíram que as emissões do país baseadas no consumo são maiores em comparação a produção, evidenciando que parte do impacto causado pelo país foi mascarado pelo deslocamento das tarefas de fabricação para outros países.

Em acordos internacionais, pode haver uma maior motivação em aderir a políticas de mitigação dos GEE mais rigorosas por parte de países que apresentam menor volume de emissões. Como discutido no capítulo 2 e apresentado no Anexo III, os países europeus apresentaram as propostas mais ambiciosas de redução dos GEE para o Acordo de Paris. Enquanto isso, nações como China e Estados Unidos, posicionam-se contrárias as medidas adotadas, se ausentando em encontros e não aderindo aos acordos.

Além disso, ao observar a divergência no grau de redução das emissões e no impacto econômico em cada país, podemos identificar a alteração nos valores de participação dos países nas emissões e produções globais. Assim, buscou-se analisar a composição das emissões globais e VBP global antes e depois dos cenários de mitigação dos GEE. Para a análise, os dados iniciais e após a simulação dos cenários de redução das emissões foram agrupados

conforme apresentado no capítulo 4. Dessa forma, os dados agrupados resultaram em 7 grupos: América do Norte, América do Sul, Ásia, Europa, Europa-Ásia, Oceania e Resto do Mundo. A Figura 10 apresenta a percentagem de cada grupo na emissão global em 2009 e após os cenários de redução das emissões globais de GEE.

Figura 10 - Participação das regiões nas emissões após redução de 10, 30 e 50% das emissões globais



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

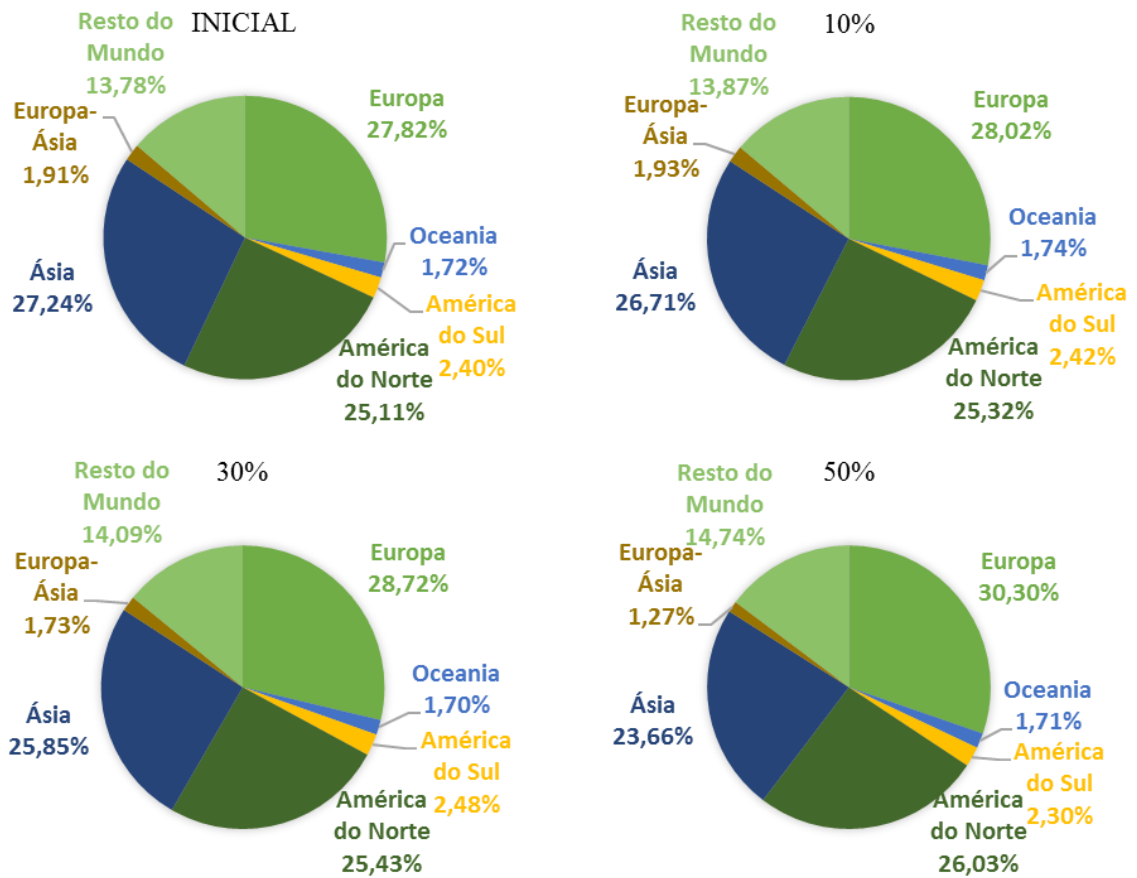
A Ásia foi a região responsável pela maior parcela das emissões globais em 2009. A maior diminuição das emissões ficou a cargo dos países pertencentes a região, como Índia e China. Portanto, à medida que as metas de mitigação dos GEE tornaram-se mais ambiciosas, a participação da Ásia nas emissões diminuiu de 37,91%, em 2009, para 16,14% no cenário otimista. Por outro lado, na Europa, a maior mitigação das emissões foi direcionada aos países pouco poluentes, como Malta e Estônia, em comparação a Alemanha, Reino Unido e França. Com isso, a medida que as metas de redução aumentaram, a participação da Europa nas emissões também aumentou, chegando a 20,99% no cenário otimista, em comparação aos 11,89% de 2009.

Em relação a América do Norte, a baixa participação dos países para a mitigação dos GEE no cenário pessimista, resultou no aumento da participação nas emissões da região, inicialmente de 17,90% para 19,88%. Porém, conforme houve uma maior redução das emissões nos Estados Unidos e Canadá, a América do Norte diminuiu sua parcela, chegando a 17,43% no cenário otimista. Já a América do Sul, representada somente pelo Brasil, tem a parcela das emissões crescente ao longo nos cenários pessimista e moderado, entretanto, no cenário otimista, com a maior redução das emissões do Brasil, a região diminuiu sua participação para 1,3%. A Europa-Ásia, diminuiu sua participação no cenário moderado e otimista, cenários onde foram atribuídos a Rússia uma maior responsabilidade pela redução das emissões. No cenário pessimista, a região apresentou aumento na sua participação para 6,6%, em comparação aos 5,96% iniciais.

Ao passo que a participação dos países nas emissões globais apresentou alterações conforme os cenários de metas de redução, a participação econômica também sofreu mudanças, com países perdendo enquanto outros ganharam espaço na economia mundial. A perda mais significativa foi observada na Ásia, onde nos três cenários houve diminuição da participação da região, sendo a queda maior no cenário otimista, com o grupo dos países asiáticos tendo a participação no VBP da economia mundial de 27,24%, em 2009, reduzida para 23,66%. A variação no VBP nos três cenários é apresentada na Figura 11.

Um dos motivos está no impacto econômico observado na China, Índia e Japão. As principais economias asiáticas, à medida que tiveram redução nas emissões, precisariam diminuir sua atividade econômica, o que além de impactar sua economia, influenciaria diretamente os países vizinhos, resultando em uma menor produção da região.

Figura 11 - Participação das regiões no VBP global após redução de 10, 30 e 50% nas emissões globais



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

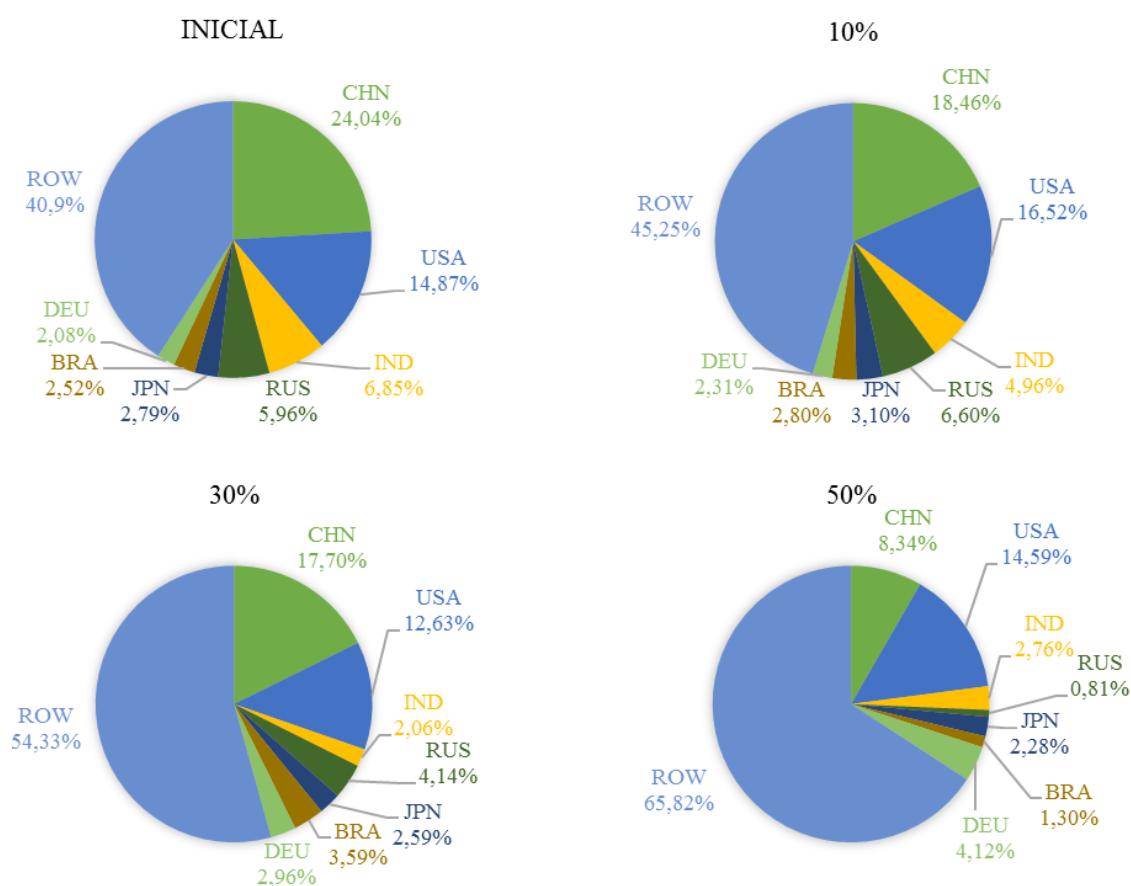
Com o impacto na Ásia, outros grupos ganharam espaço na economia mundial. A América do Norte aumentou sua parcela em todos os cenários, até no otimista, onde Estados Unidos e Canadá apresentaram significativa reduções dos GEE. Na Europa, além da perda econômica em países da Ásia e América do Norte, a redução do VBP em economias pouco expressivas da região enquanto as principais sofrem pequeno impacto, ajudou a região a ganhar espaço mundial, com sua participação subindo de 27,82% em 2009 para 30,30% no cenário otimista.

A América do Sul apresentou aumento na participação do VBP global nos cenários pessimista e moderado, porém no cenário otimista reduziu sua participação para 2,3%. Enquanto isso, Europa-Ásia cresceu sua parcela somente no cenário pessimista, diminuindo sua participação para 1,27% no cenário otimista. Já a Oceania teve aumento da participação somente no cenário pessimista, apresentando perda de participação nos demais cenários.

Diante da discussão, observou-se como uma política de mitigação dos GEE afeta não somente a produção do país, mas também a composição das regiões na economia e na emissão

global. Assim, as alterações nos países que compõe a região, resultariam na perda ou ganho da região na participação da economia global. Ademais, o impacto da política no país causaria alteração na sua participação na estrutura global. Para explorar essa análise, foram selecionados os sete países com maior participação na emissão global em 2009, Figura 2 - Participação dos países com maior nível de emissões em relação ao total, e os demais foram agrupados na abertura espacial da matriz denominada “Restante do Mundo”. A Figura 12 apresenta a variação na participação na emissão global da Alemanha (DEU), China (CHN), Brasil (BRA), Estados Unidos (USA), Índia (IND), Japão (JPN), Rússia (RUS) e Restante do Mundo (RWO) nos três cenários.

Figura 12 - Participação dos maiores emissores de 2009 nas emissões globais após redução de 10, 30 e 50%



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

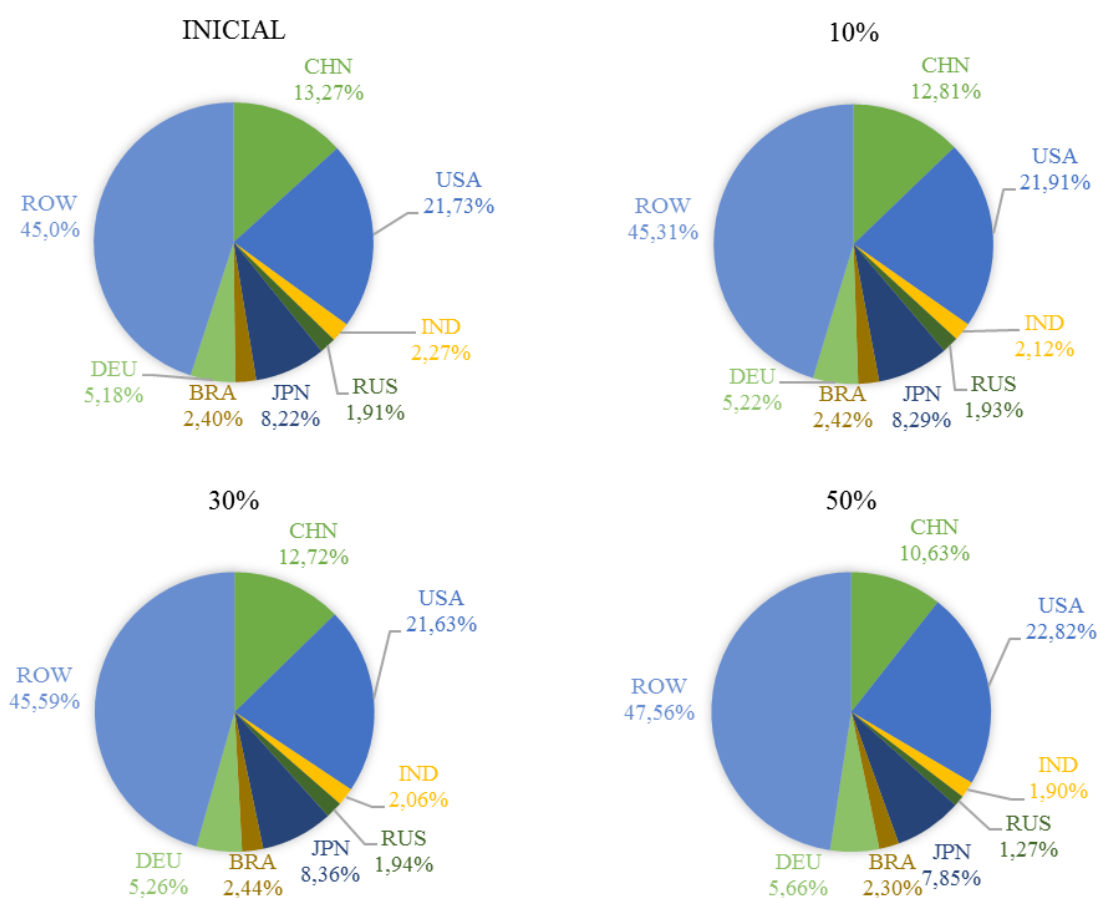
Em 2009 somente os sete países representaram 59,1% da emissão global. No cenário pessimista, com a respectiva redução de cada país, os sete países representariam 54,75%, reduzindo para 45,67% no cenário moderado e 34,18% no cenário otimista. Entre estes países, somente a Alemanha (DEU) aumentou sua participação dos valores de 2009 para o cenário

otimista. A Rússia (RUS) com participação de 5,96% em 2009, reduziria para 0,81% no cenário otimista.

Estados Unidos (USA) com a menor redução das emissões no cenário pessimista, aumentou sua participação nas emissões globais. Porém, nos cenários seguintes, principalmente no cenário moderado, teve valor reduzido na participação. China (CHN) e Índia (IND), países asiáticos com as maiores reduções das emissões, diminuíram sua participação progressivamente a cada cenário. A China, país com maior parcela em 2009, 24,04%, apresentou participação de 8,34% no cenário otimista.

Desse modo, como discutido ao longo desse capítulo, a redução das emissões dos países resultaria na variação do VBP, assim modificando a participação de cada país na composição da economia global. Em 2009, os mesmos sete países representaram 55% do VBP global. Nos cenários simulados, houve variação menor em relação a variação observada na composição das emissões globais. A participação dos sete países no VBP global diminuiu para 54,69%, no cenário pessimista, para 54,41% no cenário moderado e para 52,44% no cenário otimista. A Figura 13 apresenta a variação na participação no VBP global da Alemanha (DEU), China (CHN), Brasil (BRA), Estados Unidos (USA), Índia (IND), Japão (JPN), Rússia (RUS) e Restante do Mundo (RWO) nos três cenários.

Figura 13 - Participação dos maiores emissores de 2009 no VBP global após redução de 10, 30 e 50%



Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

A China (CHN) e Índia (IND) apresentaram redução na participação do VBP global nos três cenários. Já os Estados Unidos (USA) somente perdeu participação no cenário moderado, enquanto no otimista aumentou sua participação no VBP global para 22,82%. A Alemanha (DEU) foi o único país que apresentou aumento progressivo nos três cenários. O Brasil (BRA), com a maior necessidade de redução no cenário otimista, apresentou perda da participação nesse cenário.

Nos três cenários simulados, todos os países que compõe a matriz IP apresentaram redução, tanto nas emissões como no VBP. Entretanto, o importante da análise é destacar os países que sofreram maior redução em comparação aos demais, o que resultaria na alteração da participação de cada país. Dessa forma, o presente trabalho, além de analisar o comportamento em conjunto dos países frente a uma política de mitigação dos GEE, identificando quais tem maior diminuição das emissões e no VBP, permitiu investigar as modificações na participação de cada país no âmbito global.

Assim, diante das consequências das mudanças climáticas (MARENGO, 2007; NOBRE, SAMPAIO & SALAZAR, 2007; RIBEIRO, 2010; NICOLODI & PETERMANN, 2010; PATZ et al., 2005; MCMICHAEL, WOODRUFF & HALES, 2006; FISCHER et al., 2005; SCHMIDHUBER & TUBIELLO, 2007) e a relação com as emissões de GEE oriundas das atividades econômicas (IPCC, 2014), tornam-se relevantes os estudos que buscam explorar o tema e as questões que envolvem alternativas para elaboração de políticas de mitigação dos GEE mais eficazes. Como discutido no capítulo 2, os países buscam em encontros e acordos internacionais medidas para reduzir as emissões dos gases.

No acordo mais recente, o Acordo de Paris, a medida aprovada definiu que os países deveriam enviar proposta de redução das emissões. Entretanto, as propostas encaminhadas diferem muito umas das outras, levantando o questionamento se realmente serão eficazes para alcançar a meta proposta no acordo (UNEP, 2017; ROGELJ et al., 2016; CLÉMENÇON, 2016; SCHLEUSSNER et al., 2016). Dessa forma, estudos buscaram analisar o impacto dessas políticas de mitigação dos GEE nos países, analisando o comportamento econômico diante de uma restrição nas emissões (e.g., HRISTU-VARSAKELIS et al., 2010; SAN CRISTÓBAL, 2010; DE SOUZA, RIBEIRO & PEROBELLI, 2016; PASCUAL-GONZÁLEZ et al., 2016).

Entretanto, o presente estudo buscou simular uma política que vai de encontro com a recente proposta, ou seja, analisar uma política “top-down” de mitigação de GEE. Diante do volume de emissão global, quanto é necessário reduzir da emissão de GEE para alcançar a meta de emissões necessária para o controle do aumento da temperatura. Assim, a partir dessa restrição global da emissão, analisar quais países serão mais responsabilizados por reduzir as emissões e qual o impacto econômico dessa redução.

A partir dos resultados, observou-se o direcionamento das responsabilidades por reduzir as emissões para os países emergentes, Rússia, Índia, China e Brasil, o que resultou no maior impacto econômico nestes países. Importantes economias, como Estados Unidos e Japão, também apresentaram redução das suas emissões em nível elevado, porém com um menor impacto na economia. Por outro lado, economias europeias, como da Alemanha, Reino Unido e França, tem menores responsabilidades por reduzir suas emissões, sofrendo menor impacto econômico.

O principal fator, identificado pelo modelo desenvolvido, que leva países a apresentarem maiores responsabilidades em reduzir as emissões é o coeficiente de intensidade de emissões de CO₂eq. Dessa forma, economias estruturadas por setores que emitem altos valores de CO₂eq na sua produção sofreriam punições mais severas. Diante disso, o país ao

elaborar políticas de mitigação dos GEE, deve analisar a tecnologia empregada nos setores econômicos e a importância desses setores para o país.

No caso da China, Índia e Rússia, onde o setor responsável pelo fornecimento de energia apresentou a maior intensidade de emissão, seria necessário o investimento no desenvolvimento de energias mais limpas e alternativas para o fornecimento de energia. Nesses países, há uma grande dependência de energia proveniente de combustíveis fósseis. Um caso diferente foi observado no Brasil, onde o país é estruturado com uma matriz energética baseada principalmente em hidroelétricas. Entretanto, o nível de emissões oriundas do Brasil estava entre os maiores do mundo, o que resultou na maior responsabilidade pela redução.

No Brasil, o principal emissor de GEE encontrado na literatura é setor agropecuário, setor-chave para a economia do país. Por isso, a redução das emissões causaria um grande impacto ao país. A alternativa seria o emprego de técnicas produtivas que causam menor impacto ao meio ambiente, substituindo, por exemplo, a queimada e o uso abusivo de combustíveis fósseis, por tecnologia mais avançadas que causam menor emissão de GEE. Políticas que estimulam a produção e consumo do etanol também é uma das possíveis alternativas existente no país para o consumo de combustível.

Por outro lado, países como os Estados Unidos e o Japão, mesmo apresentando alto volume de redução das emissões, tiveram menor impacto econômico. Nesses países, os setores mais intensivos em emissões, não estavam constituídos pelos principais setores econômicos. Assim, mesmo reduzindo a produção desses setores, não houve um elevado choque no VBP do país. Já em relação as principais economias europeias, como Alemanha, Reino Unido e França, houve um menor direcionamento da responsabilidade por reduzir as emissões para esses países, ocasionando um menor impacto econômico. Além disso, no contexto da participação no VBP global, ganharam espaço econômico.

Frente a esse aspecto, entra em discussão a relação entre comércio internacional e emissões de GEE. Os países ao importarem produtos de setores com alta intensidade de emissões, além de estimularem as emissões nos países exportadores, transferem a responsabilidade da poluição aos produtores. Assim, no estabelecimento de uma política de mitigação global dos GEE, os países consumidores estariam se beneficiando caso não leve em consideração as relações comerciais.

Contudo, o presente trabalho buscou analisar uma política que considera a real necessidade de redução global das emissões de GEE e a partir dessa restrição (reduzir as emissões globais para o nível desejado) identificar o direcionamento da responsabilidade de

redução das emissões aos países. Diante dos cenários, analisar o impacto econômico causado pela redução dos GEE e o comportamento dos países frente a essa medida. Assim, buscar contribuir com o entendimento e exploração do principal desafio do século XXI para elaboração de acordos e melhores políticas ambientais.

5 CONCLUSÃO

Um acordo internacional que busque reduzir as emissões de GEE globais causará maior impacto econômico em países cujas economias são consideradas em desenvolvimento. Três fatores relacionados explicam esse fato. Primeiro, esses países são responsáveis por reduzir os maiores volumes de emissões de GEE diante da meta global. Segundo, a redução das emissões é direcionada para os setores com maior intensidade de poluição. Terceiro a redução das emissões está diretamente relacionada ao VBP e, nesses países, os principais setores para a economia são os que apresentam maior volume de emissões.

As emissões, assim como o VBP dos países, diminuem a medida que os cenários simulados tornam-se mais ambiciosos em relação a meta de mitigação dos GEE. Os países que apresentaram as maiores reduções nas duas variáveis, emissões e VBP, foram a Rússia, Índia, China e Brasil. Estados Unidos e Japão também tiveram redução significativa das suas emissões, entretanto como sua economia estava baseada em setores com baixa intensidade de emissões, tiveram menor impacto econômico.

Os resultados estão diretamente relacionados a intensidade de emissões dos países, com as principais economias europeias apresentando baixo valor do coeficiente de intensidade. Entretanto, é necessária uma análise mais profunda sobre as relações comerciais das emissões de GEE entre economias globais. Países desenvolvidos ao se especializaram em tecnologias menos intensivas em poluição, emitem volume menor de CO₂eq para sua produção, sofrendo menor impacto econômico ao aderir a acordos de mitigação dos GEE. Porém, para sua produção econômica, precisam importar produtos oriundos de países intensivos em poluição, principalmente economias em desenvolvimento. Dessa forma, a punição acaba com maior foco nos produtores em relação aos consumidores.

O comportamento dos países nos cenários de redução global das emissões modifica a composição global, tanto das emissões como do VBP. A parcela das emissões globais da Europa cresce à medida que a meta de redução seja como mais ambiciosa. Em contrapartida, há uma redução da participação da Ásia. Do mesmo modo, a Europa ganha participação no VBP global, enquanto Ásia perde espaço. Em relação a América do Norte, a região tem ganho somente no

cenário pessimista, principalmente pelo baixo impacto na economia dos Estados Unidos. Portanto, é importante observar o comportamento das economias ao traçar um acordo de mitigação dos GEE, de modo que influencia o VBP dos países e a composição econômica global. Ao analisar os sete países com maior volume de emissões de GEE em 2009, a alteração na participação também é observada, tanto em relação as emissões como no VBP global.

Logo, o presente estudo explorou o impacto de acordos internacionais com metas de mitigação global das emissões de GEE e a resposta dos países frente a redução das suas emissões. Com isso, busca contribuir e avançar no debate das emissões de GEE e na elaboração de políticas ambientais que visam não somente o menor impacto ambiental, mais também o desenvolvimento de economias mais sustentáveis. Além disso, o trabalho busca contribuir com os estudos relacionados a utilização da metodologia insumo-produto e programação linear em matrizes inter-setoriais e matrizes multi-regionais de insumo-produto. Entre as contribuições, a análise de países com emissões de GEE e estruturas produtivas diferentes e a aplicação da metodologia em uma matriz composta por 40 países, analisando o impacto e as relações econômicas na escala global.

Entretanto, os coeficientes e as equação lineares características do modelo IP-LP tornam-se uma limitação para explorar alternativas de redução das emissões e a evolução durante o tempo. No modelo, a análise é estática para o ano de 2009 e a redução das emissões de GEE é possível somente com a redução do VBP. Porém, como descrito por Wiedmann (2009), os modelos de simulação IP-PL tentam capturar a futura mudança de variáveis econômicas e ambientais impulsionada por uma mudança nos parâmetros determinantes subjacentes, sendo uma alternativa relevante e que possibilitou o desenvolvimento do trabalho e alcançar os objetivos propostos.

Para futuros trabalhos, atualizar o banco de dados do modelo, visto que para a pesquisa os dados disponíveis são até 2009 e, como discutido durante o texto, há uma evolução e diferenciação dos países tanto em relação as emissões de GEE como no VBP. Além disso, a utilização de modelos de Equilíbrio Geral Computável, avançando e explorando o tema, principalmente na abrangência de setores e países e nas alternativas de redução das emissões.

6 BIBLIOGRAFIA

- ABRAMOVAY, R. Desenvolvimento sustentável: qual a estratégia para o Brasil? **Novos estudos-CEBRAP**, n.87, p.97-113, 2010.
- AHMAD, N.; WYCKOFF, A. Carbon dioxide emissions embodied in international trade of goods, 2003.
- ANDREW, R.; PETERS, G. P.; LENNOX, J. Approximation and regional aggregation in multi-regional input–output analysis for national carbon footprint accounting. **Economic Systems Research**, v.21, n.3, p.311-335, 2009.
- ARTO, I., et al. The game of trading jobs for emissions. *Energy policy*, v.66, p.517-525, 2014.
- ARTO, I.; DIETZENBACHER, E. Drivers of the growth in global greenhouse gas emissions. **Environmental science & technology**, v.48, n.10, p.5388-5394, 2014.
- BATTJES, J. J.; NOORMAN, K. J.; BIESIOT, W. Assessing the energy intensities of imports. **Energy Economics**, v.20, n.1, p.67-83, 1998.
- BIN, S.; DOWLATABADI, H. Consumer lifestyle approach to US energy use and the related CO2 emissions. **Energy policy**, v.33, n.2, p.197-208, 2005.
- BRINK, L.; MCCARL, B. Input-output analysis, linear programming and the output multiplier. **Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue canadienne d'agroéconomie**, v.25, n.3, p.62-67, 1977.
- BURNIAUX, J. M.; TRUONG, T. P. GTAP-E: an energy-environmental version of the GTAP model, 2002.
- CANNING, P.; WANG, Z. A flexible mathematical programming model to estimate interregional input–output accounts. **Journal of regional science**, v.45, n.3, p.539-563, 2005.
- CARVALHO, T. S.; PEROBELLI, F. S. Avaliação da intensidade de emissões de CO2 setoriais e na estrutura de exportações: um modelo interregional de insumo-produto São Paulo/restante do Brasil. **Economia Aplicada**, v.13, n.1, p.99-124, 2009.
- CHANG, N. Changing industrial structure to reduce carbon dioxide emissions: a Chinese application. **Journal of Cleaner Production**, v.103, p.40-48, 2015.
- CHO, C.J. The economic-energy-environmental policy problem: An application of the interactive multiobjective decision method for Chungbuk Province. **Journal of Environmental Management**, v.56, n.2, p.119-131, 1999.
- CLÉMENÇON, R. The two sides of the Paris climate agreement: Dismal failure or historic breakthrough? 2016.

- DAVIS, S. J.; CALDEIRA, K. Consumption-based accounting of CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v.107, n.12, p.5687-5692, 2010.
- DAS, A.; PAUL, S. K. CO₂ emissions from household consumption in India between 1993–94 and 2006–07: a decomposition analysis. ***Energy Economics***, v.41, p.90-105, 2014.
- DE CARA, S.; JAYET, P. Emissions of greenhouse gases from agriculture: the heterogeneity of abatement costs in France. ***European Review of Agricultural Economics***, v.27, n.3, p.281-303, 2000.
- DE SOUZA, K. B.; RIBEIRO, L. C. S.; PEROBELLI, F. S. Reducing Brazilian greenhouse gas emissions: scenario simulations of targets and policies. ***Economic Systems Research***, v.28, n.4, p.482-496, 2016.
- DE SOUZA, K.; FREITAS, L. F.; RIBEIRO, L. C. Impactos de uma política de taxação de emissões sobre diferentes níveis de renda da economia brasileira. ***Anais do XLII Encontro Nacional de Economia***, p.184, 2016.
- DE VRIES, G. J.; ERUMBAN, A. A.; TIMMER, M. P.; VOSKOBOYNIKOV, I.; WU, H. X. Deconstructing the BRICs: Structural transformation and aggregate productivity growth. ***Journal of Comparative Economics***, v.40, n.2, p.211-227, 2012.
- DIETZENBACHER, E. LOS B., STEHRER R., TIMMER M. AND VRIES, G. The Construction of world input–output tables in the WIOD project. ***Economic Systems Research*** v.25, n.1, p.71-98, 2013.
- DORFMAN, R. P., SAMUELSON, A., & SOLOW, R. M. *Linear programming and economic analysis*. New York: Dover, 1958.
- DOWLATABADI, H., MORGAN, M.G. Integrated assessment of climate change. *Science*, Washington, v.259, n.26, p.1813-1932, 1993.
- ESPARTA, A. R. J., MOREIRA, J. R. Principais Conclusões do Terceiro Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. In: Apresentado no IX Congresso Brasileiro de Energia, v.20, 2002.
- FEIJÓ, F. T.; JÚNIOR, S. P. O Protocolo de Quioto e o Bem-Estar Econômico no Brasil-uma Análise Utilizando Equilíbrio Geral Computável. ***Análise Econômica***, v.27, n.51, 2009.
- FISCHER, G., SHAH, M., TUBIELLO, F. N., & VAN VELHUIZEN, H. Socio-economic and climate change impacts on agriculture: an integrated assessment, 1990–2080. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v.360(1463), p.2067-2083, 2005.
- GALE, L. R. Trade liberalization and pollution: an input–output study of carbon dioxide emissions in Mexico. ***Economic Systems Research***, v.7, n.3, p.309-320, 1995.

- GAY, P. W.; PROOPS, J. L.R. Carbon dioxide production by the UK economy: An input-output assessment. **Applied Energy**, v.44, n.2, p.113-130, 1993.
- GENTY, A., ARTO, I. AND NEUWAHL, F. Final database of environmental satellite accounts: technical report on their compilation. WIOD Documentation, v.4, 2012.
- GILJUM, S.; HUBACEK, K. International trade, material flows and land use: developing a physical trade balance for the European Union, 2001.
- HARRIS, T. R.; REA, M. L. Estimating the value of water among regional economic sectors using the 1972 national interindustry format. **Journal of the American Water Resources Association**, v.20, n.2, p.193-201, 1984.
- HAWDON, D.; PEARSON, P. Input-output simulations of energy, environment, economy interactions in the UK. **Energy economics**, v.17, n.1, p.73-86, 1995.
- HAYAMI, H.; KIJII, T. An input–output analysis on Japan– China environmental problem: compilation of the input– output table for the analysis of energy and air pollutants. **Journal of Applied Input–Output Analysis**, v.4, p.23–47, 1997.
- HERTEL, T. W. Global trade analysis: modeling and applications. **Cambridge university press**, 1997.
- HILGEMBERG, E. M.; GUILHOTO, J. J.M. Uso de combustíveis e emissões de CO2 no Brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. **Nova Economia**, v16, n.1, p.49-99, 2006.
- HRISTU-VARSAKELIS, D.; KARAGIANNI, S.; PEMPETZOGLOU, M.; SFETSOS, A. Optimizing Production in Greece under GHG emission reduction constraints: a comparison of objective functions, 2009.
- HRISTU-VARSAKELIS, D., KARAGIANNI, S., PEMPETZOGLOU, M.; SFETSOS, A. Optimizing production in the Greek economy: Exploring the interaction between greenhouse gas emissions and solid waste via input–output analysis. **Economic Systems Research**, v.24, n.1, p.57-75, 2012.
- HSU, G.J.; CHOU, F.Y. Integrated planning for mitigating CO₂ emissions in Taiwan: a multi-objective programming approach. **Energy Policy**, v.28, n.8, p.519-523, 2000.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014
- KUCUKVAR, M.; EGILMEZ, G.; TATARI, O. Sustainability assessment of US final consumption and investments: triple-bottom-line input–output analysis. **Journal of cleaner production**, v.81, p.234-243, 2014.

- KURODA, M.; CHING, W. Y. An Input-Output Analysis on Japan-China Environmental Problem (2): Issues in the Joint Implementation Program. KEO Discussion Paper No.40, 1995
- LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. **Journal of water resources planning and management**, v.130, n.2, p.93-111, 2004.
- LACHTERMACHER, G. Pesquisa operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel. **Elsevier**, 2007.
- LENZEN, M.; PADE, L.; MUNKSGAARD, J. CO₂ multipliers in multi-region input-output models. **Economic Systems Research**, v.16, n.4, p.391-412, 2004.
- LENZEN, M.; MORAN, D.; KANEMOTO, K.; GESCHKE, A. Building Eora: a global multi-region input-output database at high country and sector resolution. **Economic Systems Research**, v.25, n.1, p.20-49, 2013
- LEONTIEF, W. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach. *The review of economics and statistics*, p.262-271, 1970.
- LEONTIEF, W.; FORD, D. Air pollution and the economic structure: empirical results of input-output computations. Harvard University, 1972.
- LIN, C. Identifying Lowest-Emission Choices and Environmental Pareto Frontiers for Wastewater Treatment Wastewater Treatment Input-Output Model based Linear Programming. **Journal of Industrial Ecology**, v.15, n.3, p.367-380, 2011.
- MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007.
- KIM; M.; ZHU, E.; HARRIS, T. R.; ALEVY, J. E. An LP-SAM Approach for Examining Regional Economic Impacts: An Application to Wildfire Disasters in Southeast Oregon. **The Review of Regional Studies**, v.42, n.3, p.207, 2012.
- MCMICHAEL, A. J., WOODRUFF, R. E., & HALES, S. Climate change and human health: present and future risks. **The Lancet**, v.367(9513), p.859-869, 2006.
- MI, Z. F., PAN, S. Y., YU, H., & WEI, Y. M. Potential impacts of industrial structure on energy consumption and CO₂ emission: a case study of Beijing. **Journal of Cleaner Production**, v.103, p.455-462, 2015.
- MILLER, R. E. Optimization: Foundations and Applications. John Wiley & Sons, 2000.
- MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. Input-output analysis: foundations and extensions. **Cambridge University Press**, 2009.

- MINX, J., et al. GHG emissions in the global supply chain of food products. In: International Input–Output Meeting on Managing the Environment, p.9-11, 2008.
- MIYAZAWA, K. Internal and external matrix multipliers in the input-output model. Hitotsubashi **Journal of Economics**, v.7, n.1, p.38-55, 1966.
- MURATA, A.; KATO, K.; KUROKAWA, K. An estimation of environmental impacts of the trade of industrial products: a case of Japan. **International Journal of Global Energy Issues**, v.11, n.1-4, p.139-145, 1998.
- NANSAI, K.; MORIGUCHI, Y.; TOHNO, S. Compilation and application of Japanese inventories for energy consumption and air pollutant emissions using input– output tables. **Environmental science & technology**, v.37, n.9, p.2005-2015, 2003.
- NICOLODI, J. L., & PETERMANN, R. M. Mudanças Climáticas e a Vulnerabilidade da Zona Costeira do Brasil: Aspectos ambientais, sociais e tecnológicos, 2010.
- NOBRE, C. A., SAMPAIO, G., & SALAZAR, L. Mudanças climáticas e Amazônia. **Ciência e Cultura**, v.59, n.3, p.22-27, 2007.
- NORDHAUS, W. D. After Kyoto: alternative mechanisms to control global warming. **American Economic Review**, v.96, n.2, p.31-34, 2006.
- OBERTHÜR, S. Reflections on global climate politics post Paris: Power, interests and polycentricity. **The International Spectator**, v.51, n.4, p.80-94, 2016.
- OBERTHÜR, S.; OTT, H. E. The Kyoto Protocol: international climate policy for the 21st century. **Springer Science & Business Media**, 1999.
- OLIVEIRA, C.; ANTUNES, C.H. A multiple objective model to deal with economy–energy–environment interactions. **European Journal of Operational Research**, v.153, n.2, p.370-385, 2004.
- OLIVEIRA, C.; COELHO, D.; ANTUNES, C. H. Coupling input–output analysis with multiobjective linear programming models for the study of economy–energy–environment–social (E3S) trade-offs: a review. **Annals of Operations Research**, v.247, n.2, p.471-502, 2014.
- OTA, H. The 1985 Japan-US-EC-Asia Input-Output Table: Its compilation and some results of analysis. **Journal of Applied Input-Output**, v.2, p.54-78, 1994.
- PARIS AGREEMENT. United nations framework convention on climate change. Paris, França, 2015. Documentos disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf> Acesso em: 25 de outubro de 2017.

- PARRY, M.; PARRY, M. L.; CANZIANI, O.; PALUTIKOF, J.; VAN DER LINDEN, P. J.; HANSON, C. E. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. **Cambridge: Cambridge University Press**. v4, 2007.
- PASCUAL-GONZÁLEZ, J.; JIMÉNEZ-ESTELLER, L.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G.; SIIROLA, J. J.; GROSSMANN, I. E. Macro-economic multi-objective input–output model for minimizing CO2 emissions: Application to the US economy. **AIChE Journal**, v.62, n.10, p.3639-3656, 2016.
- PATZ, J. A., CAMPBELL-LENDRUM, D., HOLLOWAY, T., & FOLEY, J. A. Impact of regional climate change on human health. **Nature**, v.438(7066), p.310, 2005.
- PETERS, G. P. Opportunities and challenges for environmental MRIO modeling: illustrations with the GTAP database. In: **16th International Input-Output Conference**, 2007.
- PETERS, G. P.; HERTWICH, E. G. Structural analysis of international trade: Environmental impacts of Norway. **Economic Systems Research**, v.18, n.2, p.155-181, 2006.
- PETERS, G. P.; HERTWICH, E. G. The importance of imports for household environmental impacts. **Journal of Industrial Ecology**, v.10, n.3, p.89-109, 2006.
- PETERS, G. P.; MINX, J. C.; WEBER, C. L.; EDENHOFER, O. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. **Proceedings of the national academy of sciences**, v.108, n.21, p.8903-8908, 2011.
- PRATT, J. E. The Regional Economic Value of Nonmarket Household Production Time: Combining an IO Framework with Time Use Data. **Journal of Regional Analysis and Policy**, v.39, n.1, p.86-98, 2009.
- PROOPS, J. L.; ATKINSON, G.; SCHLOTHEIM, B. F. V.; SIMON, S. International trade and the sustainability footprint: a practical criterion for its assessment. **Ecological Economics**, v.28, n.1, p.75-97, 1999.
- RAJAMANI, L. Ambition and differentiation in the 2015 Paris Agreement: Interpretative possibilities and underlying politics. **International & Comparative Law Quarterly**, v.65, n.2, p.493-514, 2016.
- RIBEIRO, W. C. Impactos das mudanças climáticas em cidades no Brasil. Parcerias estratégicas, v.13, n.27, p.297-322, 2010.
- ROGELJ, J., DEN ELZEN, M., HÖHNE, N., FRANSEN, T., FEKETE, H., WINKLER, H., SCHAEFFER R., SHA F., RIAHI K. & MEINSHAUSEN, M. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. **Nature**, v.534, n.7609, p.631, 2016.

- SAN CRISTÓBAL, J. R. An environmental/input–output linear programming model to reach the targets for greenhouse gas emissions set by the kyoto protocol. **Economic Systems Research**, v.22, n.3, p.223-236, 2010.
- SAVARESI, A. The Paris Agreement: a new beginning? **Journal of Energy & Natural Resources Law**, v.34, n.1, p.16-26, 2016.
- SCHLEUSSNER, C. F., ROGELJ, J., SCHAEFFER, M., LISSNER, T., LICKER, R., FISCHER, E. M., KNUTTI, R., LEVERMANN, A., FRIELER, K. & HARE, W. Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. **Nature Climate Change**, v.6, n.9, p.827, 2016.
- SCHMIDHUBER, J.; TUBIELLO, F. N. Global food security under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v.104, n.50, p.19703-19708, 2007.
- SU, B.; ANG, B. W. Input–output analysis of CO 2 emissions embodied in trade: a multi-region model for China. **Applied Energy**, v.114, p.377-384, 2014.
- TIMMER, M. P; ERUMBAN, A. A.; GOUMA, R.; LOS, B.; TEMURSHOEV, U.; DE VRIES, G. J.; ARTO, I.; GENTY, V.A.A.; NEUWAHL, F.; RUEDA-CANTUCHE, J.M.; VILLANUEVA, A.; FRANCOIS, J.; PÖSCHL J.; STEHRER, R.; STREICHER, G.; PINDYUK, O. The World Input-Output Database (WIOD): Contents, sources and methods. **Institute for International and Development Economics**, 2012.
- TIWAREE, R. S.; IMURA, H. Input-output assessment of energy consumption and carbon dioxide emission in Asia. **Environmental Systems Research**, v.22, p.376-382, 1994.
- TUKKER, A.; DE KONING, A.; WOOD, R.; HAWKINS, T.; LUTTER, S.; ACOSTA, J.; CANTUCHE, J.M.R.; BOUWMEESTER, M.; OOSTERHAVEN, J.; DROSDOWSKI, T.; KUENEN, J. EXIOPOL–development and illustrative analyses of a detailed global MR EE SUT/IOT. **Economic Systems Research**, v.25, n.1, p.50-70, 2013.
- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, UNFCCC. Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update. 2016. Disponível em: < <http://unfccc.int/resource/docs/2016/cop22/eng/02.pdf>>. Acesso em: 22 de outubro de 2017.
- UNITED NATIONS, United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, UNEP. The Emissions Gap Report 2017: A UN Environment Synthesis Report, 2017. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22070/EGR_2017.pdf>. Acesso em: 02 de março de 2018.

- VALE, V. A.; PEROBELLI, F. S.; CHIMELI, A. B. International trade, pollution, and economic structure: evidence on CO₂ emissions for the North and the South. **Economic Systems Research**, p.1-17, 2017.
- VANDERBEI, R. J. Linear programming. Heidelberg: Springer, 2015.
- VOGSTAD, K. Input-output analysis and linear programming. **Handbook of input-output economics in industrial ecology**, Springer, Dordrecht, p.801-818, 2009.
- WEBER, C. L.; MATTHEWS, H. S. Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint. **Ecological economics**, v.66, n.2-3, p.379-391, 2008.
- WIEBE, K. S.; BRUCKNER, M.; GILJUM, S.; LUTZ, C. Calculating energy-related CO₂ emissions embodied in international trade using a global input–output model. **Economic Systems Research**, v.24, n.2, p.113-139, 2012.
- WIEDMANN, T. A review of recent multi-region input–output models used for consumption-based emission and resource accounting. **Ecological Economics**, v.69, n.2, p.211-222, 2009.
- WIEDMANN, T.; WOOD, R.; MINX, J.; LENZEN, M.; HARRIS, R. Emissions embedded in UK trade–UK-MRIO model results and error estimates. In: International input–output meeting on managing the environment, IIOA, Sevilha, Espanha p.9-11, 2008.
- WORLD ECONOMIC FORUM. Global risk 2007: a global risk network report. Geneva; **World Economic Forum**, 2007.
- WYCKOFF, A. W.; ROOP, J. M. The embodiment of carbon in imports of manufactured products: implications for international agreements on greenhouse gas emissions. **Energy policy**, v.22, n.3, p.187-194, 1994.
- YOUNG, C. E. F. International trade and industrial emissions in Brazil: an input-output approach. In: **XIII International Conference on Input–Output Techniques**, Macerata, Italia, 2000.
- ZAPPAROLI, I. D.; DE SOUZA, A. M.; SESSO FILHO, U. A.; BRENE, P. R. A.; DA CÂMARA, M. R. G. Análise dos transbordamentos nas emissões de dióxido de carbono: Brasil, Rússia, Índia e China-BRIC. **Revista Econômica do Nordeste**, v.49, n.1, p.149-164, 2018.
- ZHANG, Y. Structural decomposition analysis of sources of decarbonizing economic development in China: 1992–2006. **Ecological Economics**, v.68, n.8-9, p.2399-2405, 2009.
- ZHANG, W.; PENG, S.; SUN, C. CO₂ emissions in the global supply chains of services: An analysis based on a multi-regional input–output model. **Energy Policy**, v.86, p.93-103, 2015.

ZHU, E.; KIM, M. K.; HARRIS, T. R. Input–output analysis, linear programming and modified multipliers. In: Southern Agricultural Economics Association Meeting, Atlanta, Estados Unidos, v.31, 2009.

ANEXOS

Anexo I – Países que compõem a matriz insumo-produto da WIOD

| Sigla | Países | Sigla | Países |
|-------|-----------------|-------|-----------------|
| AUS | Austrália | IRL | Irlanda |
| AUT | Áustria | ITA | Itália |
| BEL | Bélgica | JPN | Japão |
| BGR | Bulgária | KOR | Korea |
| BRA | Brasil | LTU | Lituânia |
| CAN | Canada | LUX | Luxemburgo |
| CHN | China | LVA | Letónia |
| CYP | Chipre | MEX | México |
| CZE | República Checa | MLT | Malta |
| DEU | Alemanha | NLD | Países Baixos |
| DNK | Dinamarca | POL | Polónia |
| ESP | Espanha | PRT | Portugal |
| EST | Estónia | ROU | Roménia |
| FIN | Finlândia | RUS | Rússia |
| FRA | França | SVK | República Checa |
| GBR | Reino Unido | SVN | Eslovénia |
| GRC | Grécia | SWE | Suécia |
| HUN | Hungria | TUR | Turquia |
| IDN | Indonésia | TWN | Taiwan |
| IND | India | USA | Estados Unidos |

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

Anexo II – Setores que compõem a matriz insumo-produto da WIOD

| Código | Setor |
|--------|--|
| c1 | Agricultura, caça, silvicultura e pesca |
| c2 | Indústria extrativa |
| c3 | Produtos alimentícios, bebidas e tabaco |
| c4 | Têxteis e produtos têxteis |
| c5 | Couro e calçados |
| c6 | Madeira e produtos da madeira e da cortiça |
| c7 | Celulose, papel, produtos de papel, impressão e publicação |
| c8 | Coque, produtos petrolíferos refinados e combustível nuclear |
| c9 | Produtos químicos |
| c10 | Borracha e produtos plásticos |
| c11 | Outros produtos minerais não metálicos |
| c12 | Metais básicos e produtos metálicos |
| c13 | Máquinas e equipamentos, Nec |
| c14 | Aparelhos elétricos e óticos |
| c15 | Equipamentos de transporte |
| c16 | Indústrias transformadoras, nec, reciclagem |
| c17 | Eletricidade, gás e fornecimento de água |
| c18 | Construção |
| c19 | Comércio, reparos de veículos, comércio a varejo de combustível |
| c20 | Comércio atacadista e comissões, exceto para automóveis e motocicletas |
| c21 | Comércio varejista, exceto para automóveis e motocicleta, reparos |
| c22 | Hoteis e Restaurantes |
| c23 | Transportes terrestres |
| c24 | Transportes aquaviários |
| c25 | Transportes aéreos |
| c26 | Atividades de apoio e auxílio aos transportes; Agências de viagens |
| c27 | Correios e telecomunicações |
| c28 | Intermediações financeiras |
| c29 | Atividades imobiliárias |
| c30 | Locação de máquinas e equipamentos e outras atividades de empresa |
| c31 | Administração pública e defesa; Segurança social obrigatória |
| c32 | Educação |
| c33 | Saúde e Serviço Social |
| c34 | Outros serviços coletivos, sociais e pessoais |
| c35 | Famílias com empregados |

Fonte: Elaborado pelo autor a partir dos dados da WIOD, 2017.

Anexo III - Propostas de redução dos GEE por país

| Sigla | Países | Metas de redução dos gases do efeito estufa |
|-------|-----------------|---|
| AUS | Austrália | 26 a 28% abaixo dos níveis de 2005 até 2030 |
| AUT | Áustria | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| BEL | Bélgica | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| BGR | Bulgária | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| BRA | Brasil | 37% abaixo dos níveis de 2005 em 2025 |
| CAN | Canadá | 30% abaixo dos níveis de 2005 até 2030 |
| CHN | China | 40 a 45% abaixo dos níveis de 2005 até 2020 |
| CYP | Chipre | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| CZE | República Checa | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| DEU | Alemanha | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| DNK | Dinamarca | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| ESP | Espanha | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| EST | Estónia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| FIN | Finlândia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| FRA | França | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| GBR | Reino Unido | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| GRC | Grécia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| HUN | Hungria | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| IDN | Indonésia | 26% abaixo do BAU até 2020 |
| IND | Índia | 33 a 35% abaixo dos níveis de 2005 até 2030 |
| IRL | Irlanda | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| ITA | Itália | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| JPN | Japão | 25,4% em relação ao ano fiscal de 2005 |
| KOR | Korea | 37% abaixo do BAU até 2030 |
| LTU | Lituânia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| LUX | Luxemburgo | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| LVA | Letónia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| MEX | México | 25% abaixo do BAU até 2030 |
| MLT | Malta | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| NLD | Países Baixos | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| POL | Polónia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| PRT | Portugal | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| ROU | Roménia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| RUS | Rússia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| SVK | Eslováquia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| SVN | Eslovénia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| SWE | Suécia | 40% abaixo dos níveis de 1990 até 2030 |
| TUR | Turquia | 21% abaixo do BAU até 2030 |
| TWN | Taiwan | 50% abaixo dos níveis de 2005 até 2050 |
| USA | Estados Unidos | 26 a 28% abaixo do nível de 2005 em 2025 |

Fonte: Adaptado pelo autor a partir dos dados da UNFCCC ,2016.

