

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade de Ciências Econômicas
Programa de Pós-graduação em Economia

Micaele Martins de Carvalho

**EFETIVIDADE ECONÔMICA, SOCIAL E AMBIENTAL DA PRECIFICAÇÃO DE
CARBONO NA ECONOMIA BRASILEIRA PARA O ALCANCE DE METAS DE
REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

Belo Horizonte
2022

Micaele Martins de Carvalho

**EFETIVIDADE ECONÔMICA, SOCIAL E AMBIENTAL DA PRECIFICAÇÃO DE
CARBONO NA ECONOMIA BRASILEIRA PARA O ALCANCE DE METAS DE
REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Economia da Universidade Federal de Minas Gerais,
como requisito parcial à obtenção do título de Doutora
em Economia.

Orientadora: Profa. Dra. Aline Souza Magalhães
Coorientador: Prof. Dr. Edson Paulo Domingues

Belo Horizonte
2022

Ficha catalográfica

C331e
2022 Carvalho, Micaele Martins de.
Efetividade econômica, social e ambiental da precificação de carbono na economia brasileira para o alcance de metas de redução de emissões de gases de efeito estufa [manuscrito] / Micaele Martins de Carvalho . – 2022.

138 f.: il., gráfs. e tabs.

Orientadora: Aline Souza Magalhães.

Coorientador: Edson Paulo Domingues.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional.

Inclui bibliografia (fls. 126-135).

1. Economia – Teses. 2. Mercado de emissão de carbono – Teses. 3. Efeito estufa (Atmosfera) – Brasil – Teses 4. Créditos de carbono – Teses. I. Magalhães, Aline Souza.. II. Domingues, Edson P. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional. IV. Título.

CDD: 330

Elaborado por Rosilene Santos CRB-6/2527

Biblioteca da FACE/UFMG. –RSS38/2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
FACULDADE DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO E PLANEJAMENTO REGIONAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

MICAELE MARTINS DE CARVALHO

TÍTULO DO TRABALHO:

“EFETIVIDADE ECONÔMICA, SOCIAL E AMBIENTAL DA PRECIFICAÇÃO DE CARBONO NA ECONOMIA BRASILEIRA PARA O ALCANCE DE METAS DE REDUÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA”

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Economia, da Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Minas Gerais, para obtenção do título de Doutora em Economia, área de concentração: Economia Aplicada.

APROVADA EM 24 DE FEVEREIRO DE 2022.

Belo Horizonte, 24 de fevereiro de 2022.

Prof^ª. Aline Souza Magalhães (Orientadora) (CEDEPLAR/FACE/UFMG)
Prof. Edson Paulo Domingues (Coorientador) (CEDEPLAR/FACE/UFMG)
Prof. Ricardo Machado Ruiz (CEDEPLAR/FACE/UFMG)
Prof. Ronaldo Nazaré (FACE/UFMG)
Prof. Admir Antônio Betarelli Junior (UFJF)
Prof. Vinícius de Almeida Vale (UFPR)

PROF. EDSON PAULO DOMINGUES
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Economia

Documento assinado eletronicamente por **Aline Souza Magalhaes, Professora do Magistério**



Superior, em 24/02/2022, às 17:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Machado Ruiz, Professor do Magistério Superior**, em 24/02/2022, às 18:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edson Paulo Domingues, Professor do Magistério Superior**, em 24/02/2022, às 23:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ronaldo Nazaré, Professor do Magistério Superior**, em 03/03/2022, às 08:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Admir Antônio Betarelli Júnior, Usuário Externo**, em 14/03/2022, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vinícius de Almeida Vale, Usuário Externo**, em 14/03/2022, às 09:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1254317** e o código CRC **DDB9AC4D**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Aline e ao Edson pelas incontáveis contribuições a este trabalho e à minha jornada acadêmica! Aos membros da banca, agradeço pela disponibilidade e pelos comentários. Ao Cedeplar-UFMG e à COPPE-UFRJ, pela oportunidade de conviver com pessoas maravilhosas. Agradeço à CAPES que, por meio do Programa de Apoio à Pós-Graduação e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Desenvolvimento Socioeconômico no Brasil (PGPSE) e do Programa de Excelência Acadêmica (Proex), financiou e viabilizou um aprendizado muito além dos resultados da tese. Agradeço também à Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas (FIPE) e ao Projeto MCTI-Finep pelo auxílio financeiro na reta final deste trabalho. Tão importante quanto o conjunto de oportunidades que tive na academia, sou grata por ter uma família que sempre me apoiou, amigos que sempre me incentivaram e a sorte de ser dionisiana. Obrigada por fazerem parte deste trabalho e da minha vida! E Àquele que é refúgio e fortaleza, agradeço por todas essas bênçãos e tantas outras!

RESUMO

O Brasil é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa (GEE) do mundo e, como tal, as políticas nacionais de mitigação de emissões são de grande relevância para o combate ao Aquecimento Global. A redução do desmatamento tem sido a principal proposta como estratégia nacional de mitigação. No entanto, as atuais políticas climáticas brasileiras estão aquém do que é necessário para atingir as metas acordadas em Paris. Portanto, medidas adicionais podem ser necessárias o cumprimento da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), que inclui reduzir as emissões de GEE em 43% até 2030, em comparação com os níveis de 2005. De forma a identificar setores estratégicos para políticas setoriais de mitigação, esta tese avaliou o potencial de redução de emissões de GEE em setores produtivos brasileiros por meio de curvas de Custo de Abatimento Marginal (MAC). Além disso, o objetivo principal desta tese foi analisar os impactos econômicos da implementação de mercados de carbono, por meio do modelo de Equilíbrio Geral Computável (CGE) com estrutura recursiva-dinâmica denominado BEETS (*Brazilian Energy Emissions Trading Schemes model*). O modelo desenvolvido inclui módulos de especificação energética e ambiental que permitem o agrupamento das emissões por agente emissor (combustíveis, indústrias e residências), atividade emissora e mudança de uso da terra. O modelo ainda especifica um conjunto de 11 famílias representativas, divididas por classes de rendimento, o que possibilitou comparar as mudanças no padrão de consumo entre as diferentes classes devido à implementação do mercado de emissões de carbono. Além disso, os setores de geração de eletricidade foram desagregados para incorporar as mudanças na matriz elétrica, fonte relevante de emissão. Assim, foram analisados três diferentes cenários de controle de emissões: Mercado de Referência (comando e controle sem negociação); Mercado Amplo (mercado de carbono com todos os setores produtivos); Mercado Restrito (mercado de carbono com setores selecionados). Os resultados mostraram que os mercados de carbono são eficientes para alcançar a NDC. Por um lado, o Mercado Restrito exige um preço de carbono mais alto e está associado a um nível mais elevado de emissões de mudanças no uso da terra. Por outro lado, a implementação de um Mercado Amplo gera efeitos distributivos negativos em comparação ao Mercado Restrito.

Palavras-chave: Gases de efeito estufa. Precificação de carbono. Potencial de abatimento de emissões. Equilíbrio geral computável.

ABSTRACT

Brazil is one of the world's largest greenhouse gases (GHG) emitters, and as such, national emission mitigation policies are highly relevant to combat Global Warming. Reducing deforestation has been the main proposal as a national mitigation strategy. However, current Brazilian climate policies are to fall short of what is needed to reach the goals agreed in Paris. Therefore, additional measures can be necessary to achieve the targets at Nationally determined contribution (NDC), which includes to cut its greenhouse gases emissions by 43% until 2030, compared to 2005 levels. This thesis evaluated the potential for GHG emissions abatement on productive Brazilian sectors through Marginal Abatement Cost curves (MAC) to identify strategic sectors for sectoral mitigation policies. Moreover, the main goal of this thesis was to analyze the economic impacts of the implementation of carbon emission trading, through the Computable General Equilibrium (CGE) model with a recursive-dynamic structure named BEETS (Brazilian Energy Emissions Trading Schemes model). The model developed includes energetic and environmental specification modules that allow for emissions grouping by emitting agent (fuel, industries and households), emitting activity and land use change. A set of 11 representative families were specified, divided by yield classes, which made it possible to compare the consumption pattern changes between different classes due to implementation of carbon emission trading. Furthermore, the electricity generation sectors were disaggregated to incorporate changes in the electrical matrix, which is increasingly relevant as an emission source. Therefore, three different emission control scenarios were analyzed: Reference Scenario (command and control without negotiation); Expanded Trade (carbon emission trading with all productive sectors); Restricted Trade (carbon emission trading with selected sectors). The results showed that carbon emissions trading systems are efficient to achieve the NDC. On the one hand, Restricted Trade requires a higher carbon price and is associated with a higher level of emissions from land use change. On the other hand, Expanded Trade generates negative distributional effects compared to Restricted Trade.

Keywords: Greenhouse gases emissions. Carbon pricing. Emission abatement potential. Computable general equilibrium.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Emissões da Mudança do Uso da Terra (MtCO ₂ e).....	13
Figura 2: Emissões da Geração de Eletricidade (MtCO ₂ e).....	14
Quadro 1: Mecanismos de precificação – principais características	31
Figura 3: Estrutura hierárquica da tecnologia de produção: estruturas de substituição entre compostos energéticos	55
Figura 4: Estrutura hierárquica da tecnologia de produção do setor de Transmissão, Distribuição e Armazenagem de eletricidade	56
Quadro 2: Descrição dos setores no uso do fator terra	57
Figura 5: Alocação do fator terra entre usos e setores agropecuários	58
Figura 6: Estrutura da Oferta por Terra	60
Figura 7: Estrutura da Base de Dados do Modelo BEETS	65
Figura 8: Desagregação do Setor de Eletricidade, Gás e outras utilidades	68
Quadro 3: Hipóteses dos fechamentos do modelo – Cenário MAC	83
Quadro 4: Hipóteses do fechamento do modelo nas simulações.....	84
Quadro 5: Cenários de Mercado de Carbono	85
Figura 9: Custo de Abatimento Marginal	88
Figura 10: Custo de Abatimento Marginal dos setores da pecuária	89
Figura 11: Custo de Abatimento Marginal dos setores de transportes	90
Figura 12: Custo de Abatimento Marginal dos setores da indústria.....	90
Figura 13: Custo de Abatimento Marginal dos setores da agricultura	91
Figura 14: Custo de Abatimento Marginal dos combustíveis fósseis	91
Figura 15: Custo de Abatimento Marginal das termoeletricas	92
Figura 16: Reduções setoriais de emissão de CO ₂ e para um imposto de carbono de R\$100 e R\$500	96
Figura 17: Fluxograma de relações de causalidade do modelo BEETS	102
Figura 18: Evolução do preço de carbono nos mercados	107
Figura 19: Dinâmica dos setores com mercados de carbono: crescimento acumulado da produção entre 2022-2030 (var. %).....	107
Figura 20: Crescimento acumulado do consumo das famílias entre 2022-2030.....	110
Figura 21: Variação Equivalente na renda das famílias entre 2022-2030.....	111
Figura 22: Variação acumulada das emissões da Mudança do Uso da Terra.....	112
Figura 23: Atividade dos setores elétricos.....	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Emissões brutas por setores, participação e evolução no período 2005-2020.....	12
Tabela 2: Principais conjuntos do Modelo BEETS	65
Tabela 3: Parâmetros de elasticidades no modelo BEETS	67
Tabela 4: Desagregação setorial	69
Tabela 5: Valor da produção de energia elétrica por fonte geradora.....	69
Tabela 6: Matriz de Transição - bilhões de hectares	74
Tabela 7: Emissões de conversão de terras não utilizadas em outros usos, por bioma, em MtCO ₂ e (inicial base de dados).....	75
Tabela 8: Emissões associadas ao uso de combustíveis e à atividade no Brasil em 2015	75
Tabela 9: Emissões setoriais associadas à atividade econômica no Brasil em 2015.....	76
Tabela 10: Características das classes de renda no Brasil segundo a POF 2017 – 2018.....	77
Tabela 11: Participação dos bens no consumo das famílias (2015)	78
Tabela 12: Consumo de bens energéticos e sua participação no uso de insumos dos setores intensivos em energia em 2015	79
Tabela 13: Composição setorial do uso de fatores primários em 2015 (% do valor adicionado por setor)	80
Tabela 14: Insumos Utilizados na produção de Eletricidade, Gás e Outras utilidades em 2015	82
Tabela 15: Emissões evitadas e custo associado - Setores em que os efeitos indiretos aumentam o abatimento total	93
Tabela 16: Emissões evitadas e custo associado - Setores em que os efeitos indiretos reduzem o abatimento total.....	94
Tabela 17: Principais variáveis do cenário macroeconômico de linha de base (var. % real) ..	100
Tabela 18: Cenários de Precificação via Mercados de Crédito de Carbono	105
Tabela 19: Resultados Macroeconômicos dos Cenários de reduções de emissões para alcançar meta brasileira proposta na COP21	106
Tabela A1: Variação acumulada da atividade setorial entre 2022-2030	136

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO	12
2.1. O padrão de emissões da economia brasileira	12
2.2. Políticas de Mitigação de Gases de Efeito Estufa	17
2.2.1. Políticas de Mitigação nos Setores Energéticos.....	22
2.3. O papel dos mecanismos de precificação de carbono no controle das emissões.....	28
2.3.1. Tributação e Sistemas de Comércio de Emissões.....	29
2.3.2. Outros mecanismos de precificação adotados no Brasil.....	33
2.4. O Custo de Abatimento Marginal.....	35
3. METODOLOGIA	39
3.1. O Custo-Efetividade dos Mecanismos de Precificação no Brasil	40
3.2. Modelo.....	52
3.3. Base de Dados.....	64
3.3.1. Desagregação do setor “Eletricidade, Gás e outras utilidades”	68
3.3.2. Base de dados ambiental	72
3.3.3. Matriz de transição do uso da terra e emissões associadas	74
3.3.4. Indicadores da base de dados	75
3.4. Fechamentos	83
4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	87
4.1. Curvas de Abatimento Marginal.....	87
4.1.1. Utilizando a abordagem de EGC para construir e interpretar Curvas MAC	87
4.1.2. Custo de Abatimento Marginal dos Setores.....	89
4.2. Políticas de Mitigação.....	99
4.2.1. Cenários e Fechamentos	99
4.2.2. Mecanismos causais e Método de Solução	100
4.2.3. Resultados Agregados.....	104
4.2.4. Resultados setoriais.....	107
4.2.5. Resultados do Setor Elétrico	112
4.3. Discussão dos resultados	117
5. CONCLUSÕES	122
REFERÊNCIAS	126
APÊNDICE A1	136

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas pelas quais passam o planeta têm se intensificado nas últimas quatro décadas. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), responsável por estudar e congrega informações sobre mudanças climáticas, as mudanças climáticas são claras, inequívocas e irreversíveis. As mudanças recentes no clima não têm precedentes ao longo dos últimos milênios, sendo que cada uma das últimas cinco décadas tem sido sucessivamente mais quente do que qualquer outra década que a precedeu. Os últimos 8 anos foram os mais quentes já registrados e a temperatura da Terra aumentou 1,07° C em relação ao período pré-industrial (1850-1900) (IPCC, 2021).

O relatório do IPCC mostrou que o aquecimento de 1,5° C a 2° C será ultrapassado ainda nas próximas décadas se não houver forte e profunda redução nas emissões de dióxido de carbono (CO_2) e outros Gases de Efeito Estufa (GEE). Entre as consequências desse aquecimento estão o derretimento de calotas de gelo, o aumento do nível do mar, a perda da biodiversidade e a desertificação dos solos, podendo potencialmente gerar grandes impactos econômicos, sociais e ambientais ainda neste século (IPCC, 2021).

Um agravante das emissões de GEE é que elas não discriminam local de origem nem histórico de emissões. O que significa dizer que ações locais podem gerar consequências de escala internacional, afetando adversamente países que pouco contribuíram com as emissões acumuladas ao longo dos séculos XIX e XX. Assim, compensações que os países industrializados, principais responsáveis pela concentração de GEE presentes na atmosfera, devem oferecer aos países em desenvolvimento, que deparam com tecnologias disponíveis a baixo custo associadas a elevados níveis de emissão, estão no centro desse conflito. Além disso, apesar das emissões antrópicas, responsáveis pelo aquecimento global, gerarem externalidades negativas em escala global, seus impactos são perversamente distribuídos. Os mais pobres sofrem maiores custos sociais, devido a maior dificuldade de adaptação.

Diante desse quadro, em relação ao futuro da governança ambiental no mundo, e especificamente em relação às mudanças climáticas globais, em 2015, foi firmado o Acordo de Paris, cujo objetivo era fortalecer o compromisso internacional com a preservação do clima. O encontro estabeleceu um acordo juridicamente vinculativo e universal sobre o clima, visando manter o aquecimento global abaixo dos 2°C até 2100. Como parte do acordo, cada país

signatário indicou sua “Contribuição Nacionalmente Determinada” (NDC) para o cumprimento de metas estabelecidas para a redução das emissões de GEE. No acordo, é ressaltada a importância da cooperação entre os principais emissores: China (27%), Estados Unidos da América - EUA (13%), União Europeia – UE (8%), Índia (7%), Federação Russa (6%), Japão (3%) e Brasil (2%) (WORLD BANK, 2021c).

Diferenças relevantes em relação às metas podem ser vistas nas propostas de cada país. Entre os países desenvolvidos, os EUA, em sua nova NDC apresentada em 2021, comprometeu-se com uma meta de redução da emissão de GEE para 2030 entre 50% e 52% em comparação com os níveis de 2005. O Japão, por sua vez, apontou uma meta de redução da emissão de GEE em 25,4% em comparação ao mesmo ano base de 2005, ao passo que UE e seus Estados-Membros apresentaram proposta de redução de pelo menos 55% das emissões de gases do efeito estufa até 2030, numa comparação com 1990 (UNFCCC, 2021). Assim como a Federação Russa, comprometeu-se em reduzir as emissões de GEE em 70% até 2030, em relação a 1990. A NDC chinesa, por sua vez, propõe reduzir emissões em relação ao PIB entre 60% e 65% até 2030, enquanto Índia estabeleceu metas de redução na intensidade de carbono entre 33% e 35% de seu PIB até 2030 em relação a 2005 (UNFCCC, 2021).

Como país em desenvolvimento e elevado nível de desigualdade social, no Brasil, a mitigação das emissões mostra-se questão urgente para o desenvolvimento ambientalmente sustentável e para proteção, especialmente aos mais vulneráveis, contra intensificação dos eventos climáticos extremos provocados pelo aquecimento global. Nesse contexto, o Brasil compromete-se com uma meta absoluta de redução das emissões que visa reduzir as emissões de GEE em 37%, em relação aos níveis de 2005, até 2025. Além de ter indicado uma contribuição subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de emissão de 2005, em 2030.

Dentre as medidas para alcançar a meta brasileira, formalizada pela NDC, destacam-se a redução do desmatamento e reflorestamento de áreas degradadas, além da ampliação da participação de fontes renováveis na matriz energética e aumento da eficiência energética, com promoção do uso de tecnologias limpas no setor industrial e de medidas de eficiência no setor de transporte público. Como esses esforços de mitigação apresentam impactos econômicos e ambientais muito diversos, analisá-los caso a caso torna-se necessário.

Enquanto outros países tem matrizes energéticas com elevadas emissões, o Brasil apresenta matriz relativamente limpa, com grande participação das hidrelétricas na geração de eletricidade e da biomassa na geração de combustíveis. Além disso, o país possui elevado potencial para aproveitamento de fontes renováveis alternativas como eólica e solar. Porém, há grandes desafios quanto a pecuária, principal emissor direto pela atividade e indireto, pelo desmatamento que, após anos de considerável redução, volta a apresentar aumentos em um cenário de flexibilização e enfraquecimento da política de combate ao desmatamento ilegal. Portanto, devido às particularidades do Brasil, quanto maiores informações sobre as consequências das medidas da NDC no contexto nacional, maior a capacidade de alcançar benefícios ambientais sujeitos a menores custos econômicos.

A criação dos fundos de financiamento vem do reconhecimento de que os países desenvolvidos, principais responsáveis pela emissão de GEE presentes na atmosfera até então, devem assumir responsabilidades comuns, mas diferenciadas no combate às mudanças climáticas. Dentre elas, auxiliar os países em desenvolvimento a alcançar suas metas de mitigação sem significativo comprometimento dos seus processos de desenvolvimento. Neste contexto, os fundos, potencialmente, são importantes ferramentas para o financiar projetos de baixo carbono. Dentre as principais entidades internacionais que apoiam o Acordo de Paris estão a *Global Environment Facility* (GEF) e a *Green Climate Fund* (GCF). Além destas entidades, existem dois fundos especiais administrados pelo GEF que são o *Special Climate Change Fund* (SCCF) e o *Least Developed Countries Fund* (LDCF) (UNFCCC, 2021).

Entretanto, como destaca Albuquerque *et al.* (2020), se continuar na trajetória atual, o Brasil terá dificuldades para alcance das metas propostas. Esforços adicionais podem ser necessários. Entre eles, os mecanismos de precificação, como tributações de carbono e sistemas de comércio de emissões. Se por um lado são necessários esforços para garantir a sustentabilidade, por outro, o país pode se beneficiar à medida que conseguir tirar proveito de suas particularidades. Assim, o objetivo principal da presente tese é identificar estratégias para a redução das emissões de GEE nos setores produtivos e, assim, alcançar com menor sacrifício econômico as metas estabelecidas pela NDC e demais que o país vier a se comprometer.

Nesse sentido, o presente estudo contribui com a literatura ao analisar opções setoriais de alocação dos recursos provenientes dos fundos de financiamento climático, a partir da estimativa de curvas de Custo de Abatimento Marginal (*Marginal Abatement Costs* - MAC)

dos principais setores emissores no Brasil, considerando tanto as emissões pela própria atividade quanto as emissões indiretas pela da queima de combustível e transição do uso da terra. A análise dessas curvas pode auxiliar a criação de metas setoriais de abatimento e a decisão sobre a alocação setorial dos recursos financeiros para alcançar a NDC brasileira. Esta identificação, por sua vez, permite discutir alternativas para desenho de mercados de carbono eficientes para diferentes metas de abatimento, conforme metas propostas pelo Acordo de Paris, olhando tanto para mercados de carbono mais amplos quanto restrito a setores com menores custos de abatimento. Esta tese também contribui ao elucidar impactos destes mercados sobre as famílias, discutindo a progressividade ou regressividade da política de precificação.

Assim, busca-se investigar cenários possíveis dentro do contexto de transição para uma economia de baixo carbono, auxiliando a tomada de decisões, especialmente no que se refere ao planejamento energético e políticas de mitigação de emissões. Como incentivos à mitigação tendem a gerar alterações na economia em termos de renda, produção e consumo, modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC) tornam-se uma opção adequada para mensurar tais impactos. Mais especificamente, simular, com a abordagem de EGC, possíveis impactos e ambientais (representados por variações nas emissões de GEE) e econômicos, medidos em termos de agregados macroeconômicos (como PIB, balança comercial, emprego e consumo das famílias) e atividade setorial, especialmente sobre setores energéticos (combustíveis, geração e transmissão de eletricidade), de mudanças na matriz energética financiadas por fundos decorrentes da precificação de carbono, direcionando a transição energética para uma economia de baixo carbono.

A introdução dos mecanismos de precificação é capaz de afetar agentes e setores da economia e seus efeitos podem ser amplificados ou anulados dentro da cadeia de inter-relações econômicas. Por isso, a abordagem de Equilíbrio Geral Computável (EGC) vem sendo eleita por diversos trabalhos para analisar os impactos de mecanismos de precificação no Brasil. Entre os trabalhos mais recentes estão: Magalhães (2013), Wills (2013), Lucena *et al.* (2016), Gurgel e Paltsev (2017). Todavia, observa-se divergência entre os eles, em que políticas de mitigação podem gerar tanto crescimento econômico quanto aumento do desemprego. Como os resultados encontrados na literatura dependem dos tipos de incentivos governamentais e dos subsídios adotados, das características ambientais e do potencial energético da região, ainda há espaço para estudar os impactos e implicações de políticas de precificação de carbono no contexto nacional, levando em consideração as especificidades brasileiras.

Para investigar os custos de abatimento setoriais e os impactos da introdução de mecanismos de precificação de carbono no Brasil, a presente tese utilizou um modelo de Equilíbrio Geral Computável especialmente desenvolvido para tratar das emissões setoriais de GEE no país e os dados mais recentes da Matriz de Insumo-Produto ano base de 2015 (IBGE, 2019) e de emissões setoriais desagregadas (SEEG, 2021). O setor de eletricidade foi desagregado por fonte de geração, transmissão e distribuição. Foram incorporados dados de emissões mais recentes, que permitem a projeção de políticas de redução de emissões pela contabilidade de emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_2e), separando-as por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias) e inclui também as emissões pela transição do uso da terra, permitindo, assim, abranger todas as emissões de GEE na economia brasileira.

Além disso, o modelo foi especificado para capturar os efeitos de políticas de *cap-and-trade* entre setores da economia brasileira, especialmente os setores de geração de eletricidade e combustíveis. O maior detalhamento dado no modelo aos setores de energia e de emissões, incluindo as emissões provenientes do uso da terra justifica-se pelo fato de que a maior parte das emissões se concentra no uso da terra e as emissões dos setores de energia são crescentes e ganham cada vez mais destaque no contexto nacional. Assim, acredita-se que estes procedimentos criaram uma ferramenta, adaptada ao contexto brasileiro, capaz de conectar questões energéticas, ambientais e econômicas.

Além desta introdução, esta tese está dividida em 4 seções. A segunda discute alguns aspectos sobre a transição para uma economia de baixo carbono no Brasil, que passam pelo padrão de emissões brasileiro assim como políticas de mitigação de GEE e mecanismos de precificação de carbono adotados no Brasil e no mundo. A metodologia é apresentada no terceiro capítulo. As simulações e resultados serão apresentados no quarto capítulo e as considerações finais, no quinto. Assim, busca-se discutir formas alternativas de incorporar o custo social das emissões na estrutura produtiva brasileira e, por meio desse estudo de caso, discutir a conciliação entre meio ambiente e sistema econômico.

2. A TRANSIÇÃO PARA UMA ECONOMIA DE BAIXO CARBONO

2.1. O padrão de emissões da economia brasileira

Preocupações com as consequências do aquecimento global provocado pelas emissões de GEE de atividades humanas são crescentes. Esta seção apresenta brevemente as principais características das emissões de GEE no Brasil com o objetivo de identificar questões centrais para efetividade de políticas de mitigação. A Tabela 1 apresenta a participação das principais fontes de emissões, juntamente com sua evolução entre 2005 e 2020, no Brasil. É possível observar forte queda na participação do setor de Mudança no uso do solo e florestas, de 64% para 46% do total das emissões brutas do período, explicado pela redução das taxas de desmatamento, embora a partir de 2017 tenha ocorrido uma reversão dessa tendência de queda (SEEG, 2021).

Essa queda explica a redução das emissões totais (em 20% em relação aos níveis de 2005), apesar de todos os outros setores apresentarem crescimento das emissões no mesmo período. Crescimento esse que se dá principalmente no setor energético, cuja participação nas emissões totais aumentou de 12% em 2005 para 18% em 2020, sugerindo assim uma importância crescente do setor na formulação de políticas públicas para a mitigação de emissões de GEE.

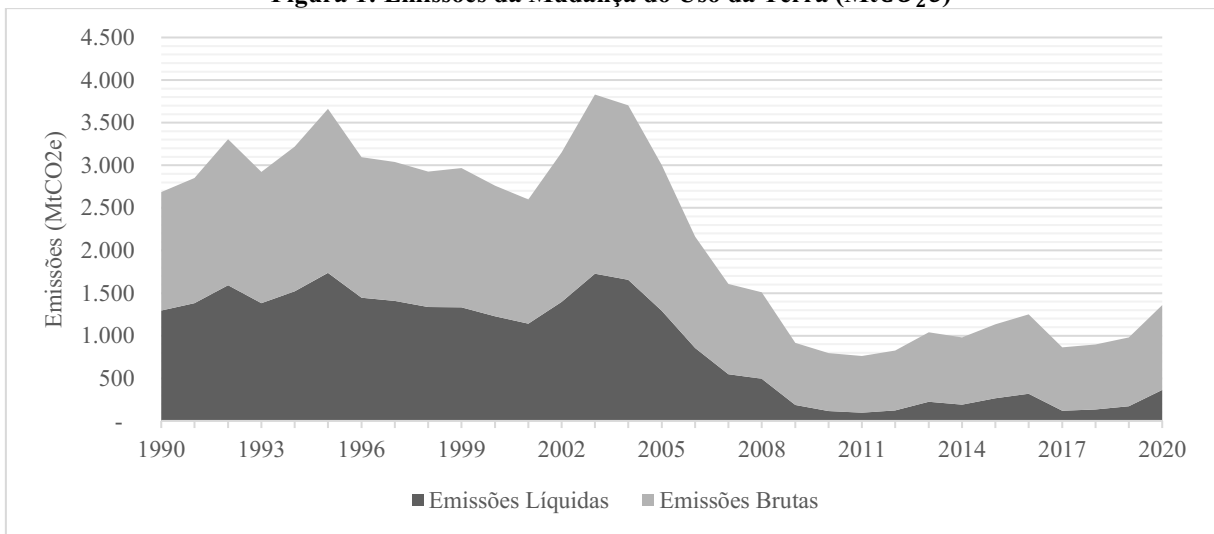
Tabela 1: Emissões brutas por setores, participação e evolução no período 2005-2020

Setores	2005		2020		Variação (2005-2020)
	MtCO _{2e}	Participação	MtCO _{2e}	Participação	
Energia	317,7	12%	413,7	19%	30%
Processos Industriais	80,5	3%	99,1	5%	23%
Agropecuária	536,1	20%	598,7	28%	12%
Mudança no Uso da terra	1.615,7	62%	968,1	44%	-40%
Tratamento de Resíduos	70,1	3%	96,1	4%	37%
Total	2.620,1	100%	2.175,7	100%	-17%

Fonte: SEEG (2021).

Nota: ¹ Megatonelada de dióxido de carbono equivalente.

A grande participação das emissões associadas à mudança do uso da terra e à agropecuária são particularidades brasileiras que merecem destaque quando o assunto são as emissões de GEE. A Figura 1 apresenta a evolução das emissões da mudança do uso da terra. Em que é possível notar redução significativa a partir de 2005, o que pode ser explicado pelas políticas de combate ao desmatamento que ocorreram no período (Seção 2.2).

Figura 1: Emissões da Mudança do Uso da Terra (MtCO₂e)

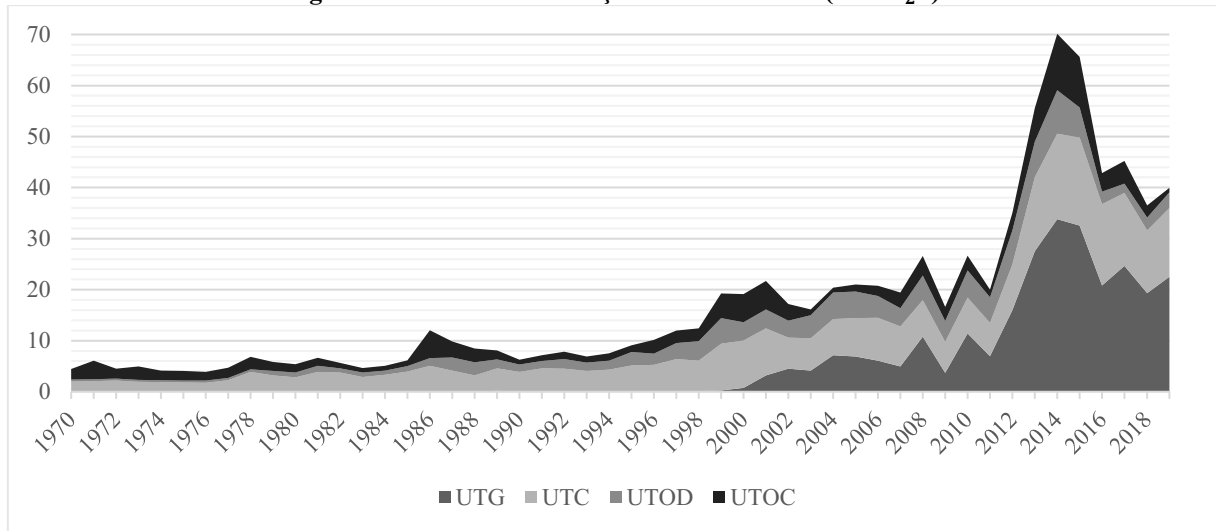
Fonte: SEEG (2021).

Em 2020, a agropecuária foi responsável por 27% das emissões brutas do Brasil. Desse total, 95% decorreram da pecuária: 87% da fermentação entérica e 6% do manejo de dejetos de animais. Em relação à agricultura, destaca-se o cultivo de arroz, responsável por 2% de todas as emissões da agropecuária. O restante decorre das emissões dos solos manejados (4%) e queima de resíduos agrícolas (0,1%).

Contudo, apesar do protagonismo do desmatamento para as emissões nacionais de GEE, vem ganhando cada vez mais relevância o controle sobre as emissões originadas pela estrutura produtiva, especialmente aquelas associadas à geração de eletricidade e processos industriais. Em 2020, das 100 MtCO₂e emitidas pela indústria, destaca a participação da Produção de Ferro Gusa e Aço (39%) e cimento (22%).

Transformações significativas no padrão de emissões também foram observadas na matriz energética ao longo dos anos. Desde as crises do petróleo da década de 1970, garantir a oferta de energia confiável, segura e estável tem sido objetivo de todos os países. A Figura 2 mostra a evolução das emissões desde 1970 no Brasil.

Figura 2: Emissões da Geração de Eletricidade (MtCO₂e)



Fonte: SEEG (2021).

O aumento observado nas emissões entre 2012-2016 está associado ao acionamento das termoelétricas para suprir a deficiência das hidrelétricas, com auge na crise hídrica em 2015. A reversão decorre de alterações do lado da demanda, que reduz devido à crise econômica doméstica de 2014. Além disso, observou-se nesse período expansão dos empreendimentos de energia eólica e biomassa (EPE, 2021). O ano de 2012 marca o início da operação das usinas eólicas decorrentes do primeiro leilão de comercialização de energia voltado exclusivamente para a fonte eólica, que ocorreu em 2009. Desde então, redução do custo de geração eólica e consequente aumento da competitividade dessa fonte têm contribuído para reduzir a dependência da matriz elétrica pelos combustíveis fósseis.

Em 2019, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu 419,9 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO₂e), sendo a maior parte (193,4 MtCO₂e) gerada no setor de transportes. Portanto, a redução dessas emissões exigirá substituição de combustíveis fósseis por outras opções menos poluentes. As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) provenientes da geração elétrica, por sua vez, totalizaram 56,3 MtCO₂e em 2019, quase 7% superior a 2018 (EPE, 2020a). Assim, mesmo com elevada participação de fontes renováveis limpas na matriz energética, o país enfrentará desafios para avançar na direção de uma transição energética de baixo carbono.

Como destacam Losekann e Tavares (2019), no contexto nacional, a eletricidade tem se mostrado uma opção adequada para ampliar o acesso e a qualidade no uso da energia, pois a infraestrutura ainda está em desenvolvimento, sendo, portanto, mais fácil modificá-la. O

predomínio da hidreletricidade na matriz elétrica justificou-se pela abundância nacional desse recurso, além de sua eficiência, competitividade econômica e elevada flexibilidade operativa, entre outros. Mas a continuidade da expansão da oferta de hidreletricidade encontra barreiras.

Os tradicionais grandes aproveitamentos hidrelétricos, vantajosos pela economia de escala e baixos custos de geração, veem sua expansão sendo dificultada pelo investimento intensivo em capital exigido para sua construção e pelo elevado período de tempo dispendido na construção e no desenvolvimento do projeto técnico e obtenção das licenças ambientais. Assim, apesar das inúmeras vantagens, a hidreletricidade enfrenta dificuldades para sua expansão relacionados as interferências socioambientais e/ou o financiamento dos elevados investimentos a ela associados, principalmente para projetos hidrelétricos de grande porte. Ressalta-se que 70% do potencial brasileiro inventariado situa-se na Amazônia, região que possui cerca de metade de sua extensão coberta por áreas protegidas e distante dos grandes centros de consumo. Isso incentiva o desenvolvimento de tecnologias alternativas como eólica, solar e de biomassa para a geração de energia elétrica.

Segundo Pereira *et al.* (2006), nos últimos anos foi possível perceber associação entre a capacitação tecnológica da indústria nacional, o custo decrescente da eletricidade de origem eólica e o elevado potencial eólico nacional. De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE *et al.*, 2001), o Brasil apresenta um elevado potencial disponível para geração de energia eólica, na ordem de 143 GW, sendo mais da metade na Região Nordeste. De acordo com o Plano Nacional de Energia (PNE 2050), que apresenta cenários de evolução do consumo de energia no horizonte de 2050, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020d), na última década houve redução substancial dos custos de fabricação de aerogeradores e aumento da qualidade e do tamanho dos mesmos. Associado a melhoria técnica, observou-se redução de custos por meio de economias de escala, resultantes da melhoria contínua do processo de fabricação e métodos de instalação e produtos, resultando em queda nos preços.

Como não há condições de vento adequadas para a geração de eletricidade em todo território nacional, a energia fotovoltaica torna-se uma opção importante. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA *et al.*, 2006), o Brasil encontra-se, em maior parte, na região intertropical, apresentado grande potencial para aproveitamento de energia solar durante todo ano também. Além disso, a energia solar permite a viabilização do desenvolvimento de regiões

remotas em que o custo da eletrificação pela rede convencional é mais elevado devido aos altos custos de transmissão. Embora existam diferentes características climáticas em todo território brasileiro, a média anual de irradiação global apresenta boa uniformidade e com valores relativamente altos em todo país.

De acordo com a EPE (2020d), os custos da geração elétrica fotovoltaica e a heliotérmica têm reduzido ao longo dos últimos anos em decorrência principalmente de inovações tecnológicas, aumentos na eficiência e economia de escala, cuja tendência é de manutenção ao longo do horizonte 2050, com quedas mais acentuadas até 2030. Além disso, espera-se que o aperfeiçoamento das tecnologias de armazenamento de eletricidade em grande escala possa trazer mudanças significativas para a geração fotovoltaica.

Outra fonte energética com grande potencial é a biomassa¹. Segundo a EPE (2020d), esse potencial está diretamente associado a oferta de resíduos (bagaço e palha), que é função do nível de produção de açúcar e etanol e da tecnologia utilizada. E a principal tecnologia para a expansão do setor de cogeração sucroalcooleira nos próximos anos deve ser o ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração, que permite a operação de forma integrada ao processo produtivo ou isoladamente.

Em relação às demais fontes de geração de energia em potencial, a EPE (2020d) destaca a relevância do papel da energia nuclear no desenvolvimento de matrizes energéticas mais limpas, em que se observa padronização da indústria na utilização de reatores nucleares, que são atrativos por características de segurança passiva, simplificação significativa de projeto, cumprimento das normas regulatórias e menores custos de instalação e de operação e manutenção. Além disso, a geração a carvão mineral tem buscado promover o aumento da eficiência térmica e a redução de emissões por meio da adoção de sistemas de captura e armazenamento de carbono (CCS). Há, ainda, a possibilidade de penetração em larga escala da geração termelétrica a gás natural na matriz elétrica brasileira em decorrência das descobertas na camada pré-sal.

¹Biomassa consiste em qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. Pode ser de origem florestal (como madeira), agrícola (como soja, arroz e cana-de-açúcar) e rejeitos urbanos e industriais. A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos, sendo uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética, redução da dependência dos combustíveis fósseis, geração de empregos diretos e indiretos e desenvolvimento regional (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Todas essas possibilidades associadas ao futuro da matriz energética nacional podem ter impacto significativo sobre as emissões de GEE no país. Contudo, incertezas associadas ao planejamento energético tornaram-se maiores em 2020, devido à pandemia de COVID-19. As medidas de isolamento social geraram impactos negativos na carga de energia, pois o aumento do consumo da classe residencial foi insuficiente para compensar a queda das demais classes, especialmente comercial e industrial (EPE, 2020c). Assim, as mudanças são constantes, mas a estrutura da oferta de energia apresenta certa inércia em decorrência do tamanho elevado dos investimentos do setor. Portanto, além de ser flexível, o planejamento energético deve incluir longos horizontes. Compreender a estrutura atual do setor energético bem como sua expansão nos próximos anos é determinante para medidas eficientes de mitigação das emissões.

Portanto, a formulação de políticas de mitigação eficazes precisa levar em conta tanto as particularidades do Brasil em relação ao resto do mundo, dentre as quais destacam-se as emissões associadas à mudança do uso da terra, à atividade pecuária e o crescente papel da matriz energética. Por isso, a presente tese direcionou esforços para construção de uma base de dados específica para tratar dessas questões, como detalhado na Seção 3.3, em que se destaca a desagregação dos setores agropecuários e energéticos, especialmente geração de eletricidade, e o uso de dados mais recentes sobre o desmatamento no Brasil.

2.2. Políticas de Mitigação de Gases de Efeito Estufa

O aquecimento global provocado pelas emissões antrópicas são um problema de escala global e como tal iniciativas internacionais são fundamentais. A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente em 1972, em Estocolmo (Suécia), é um marco importante dessas iniciativas. Desde então, a agenda climática tem se expandido, dando origem à Conferência das Partes (COP), encontros anuais criados em 1995, logo após a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada em 1992, no Rio de Janeiro (Rio 92). A edição mais recente ocorreu em 2021, em Glasgow (Escócia), sendo a 26ª Conferência das Partes sobre Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (ONU) - COP26.

Um marco das conferências foi a assinatura do Protocolo de Kyoto (1997), que consistiu em um pacto de ações para reduzir as emissões de GEE, especialmente dos países industrializados, principais responsáveis pela acumulação e concentração de GEE na atmosfera. Buscando

substituir o Protocolo de Kyoto, o 21º encontro anual da Conferência das Partes (COP21), que ocorreu em Paris em 2015, representou outro ponto balizador na transição para uma economia de baixo carbono. O encontro estabeleceu um acordo juridicamente vinculativo e universal sobre o clima, visando manter o aquecimento global abaixo dos 2°C até 2100. Os países signatários determinaram suas metas de contribuição nacional (*National Determined Contribution – NDC*).

O Brasil ratificou o Acordo de Paris em 2016, efetivando sua NDC ao Acordo. A proposta brasileira visou reduzir as emissões de GEE em 37%, em relação aos níveis de 2005, até 2025. Além de ter indicado uma contribuição subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de emissão de 2005, em 2030. Dentre as medidas para alcançar a meta brasileira destacam-se aquelas relacionadas ao setor de florestas e de mudança do uso da terra, atreladas a instrumentos de REDD², tais como políticas para alcançar o desmatamento ilegal zero até 2030 na Amazônia brasileira. Além de incentivos à ampliação da participação de fontes renováveis na matriz energética e aumento da eficiência energética, promoção do uso de tecnologias limpas no setor industrial e de medidas de eficiência no setor de transporte público.

Em sua NDC, o Brasil comprometeu-se com uma transição para sistemas de energia baseados em fontes renováveis e descarbonização da economia mundial até o final deste século, garantindo acesso aos meios financeiros e tecnológicos necessários. Mais especificamente, o país comprometeu-se com a expansão do consumo de biocombustíveis, aumentando a oferta de etanol e aumentando a parcela de biodiesel na mistura do diesel. No setor elétrico, propôs a expansão do uso de fontes renováveis, além da energia hídrica, aumento do uso doméstico de fontes de energia não fóssil e medidas de eficiência energética.

Em resposta às pressões para combater as mudanças climáticas, em âmbito nacional, políticas ambientais foram desenvolvidas nas últimas décadas, levando em conta as características particulares das emissões brasileiras, especialmente relacionadas ao agronegócio. A agropecuária é destaque na formulação de políticas de mitigação de emissões de GEE, tanto por suas emissões diretamente relacionadas ao nível de atividade, em que destaca a atividade

² Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal (REED) é um instrumento desenvolvido no âmbito Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima para recompensar financeiramente países em desenvolvimento por seus resultados relacionados à recuperação e conservação de suas florestas. Esse mecanismo permite a remuneração daqueles que mantêm suas florestas em pé, sem desmatar, evitando as emissões de gases de efeito estufa associadas ao desmatamento e degradação florestal.

pecuária e cultivo de arroz, como pelas emissões decorrentes da transição do uso da terra, uma vez que o desmatamento, principal responsável por esse tipo de emissão, decorre principalmente da expansão da pecuária. Por outro lado, a agropecuária também é sensível às consequências das mudanças climáticas, o que pode comprometer a segurança alimentar.

Por isso, medidas de combate ao desmatamento e de incentivo à agropecuária de baixo carbono tornam-se especialmente relevantes no Brasil. O primeiro Código Florestal do país foi aprovado pelo Decreto nº 23.793 de 1934, definindo as florestas existentes no território nacional como bem de interesse comum de todos os habitantes. Desde então, o arcabouço legal foi aprimorado como reflexo da crescente importância da agenda ambiental no país. A edição da Lei nº 6.902 de 1981, que trata da criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental, conhecida como Lei de Proteção Ambiental, pode ser tomada como exemplo. No mesmo ano, tem-se ainda a criação da Política Nacional do Meio Ambiente pela Lei nº 6.938 de 1981, considerada um grande avanço para a política ambiental nacional. Essa lei estabeleceu o Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama).

Desde então, os temas ambientais vêm alcançando novos espaços no Brasil e no mundo. Marco jurídico importante para a proteção e garantia da responsabilização dos danos causados ao meio ambiente foi a Lei de Proteção Ambiental (Lei nº 9.605 de 1998) e a Lei nº 9.985 de 2000, que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). Mas foi só entre 2004 e 2012 que os esforços para o combate ao desmatamento alcançaram resultados significativos. Grandes investimentos em fiscalização permitiram observar forte queda no desmatamento nesse período. Nesse período foi promulgada a Lei de Gestão de Florestas Públicas (Lei nº 11.284 de 2006), que dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável, institui o Serviço Florestal Brasileiro (SFB) na estrutura do MMA e cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal (FNDF).

Nesse período foi criado o Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal – PPCDAM (2004), responsável direto pela redução do desmatamento e, conseqüentemente, pela mitigação das emissões de GEE associadas à mudança do uso da terra percebidas. E, tratando especificamente das emissões de GEE, o primeiro compromisso assumido pelo Brasil foi perante a Política Nacional de Mudança do Clima (PNMC), Lei nº 12.187 de 2009, oficializando o compromisso voluntário do Brasil junto à Convenção-Quadro

das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de redução de emissões de gases de efeito estufa entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020.

Recentemente, o Senado aprovou o Projeto de Lei (PL) nº 6539 de 2019 que modifica PNMC para incluir os compromissos assumidos pelo Brasil no Acordo de Paris, assinado em 2015. Entre outros objetivos, O PL visa deliberar sobre a NDC e dispor sobre planos de ação para prevenção e controle do desmatamento e para mitigação e adaptação à mudança do clima, além da governança do PNMC, que são obrigações do poder público na implementação da política e compromissos do País.

Da PNMC surgiram os Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima, elaborados entre 2011-2012. As emissões de GEE podem ser divididas em três tipos: emissões diretamente associadas a mudança do uso da terra, especialmente desmatamento, emissões associadas a matriz energética (queima de combustível, especialmente no setor de transporte e geração de eletricidade) e emissões associadas diretamente à atividade econômica (especialmente a agropecuária e indústrias).

A maior parte dos planos setoriais de mitigação relacionados à PNMC buscam reduzir as emissões diretamente associadas ao nível de atividade, como o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC); o Plano Setorial de Mitigação da Mudança Climática para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Indústria de Transformação (Plano Indústria); o Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono (PMBC); o Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação da Mudança do Clima; e o Plano Setorial da Saúde para Mitigação e Adaptação à Mudança do Clima. Quase todos concluídos, segundo BRASIL (2021a), com exceção do Plano de Mineração, ainda em fase de elaboração, que consiste em políticas públicas de incentivo a utilização do carvão vegetal sustentável, oriundo de florestas plantadas, para uso na siderurgia.

Esses planos ressaltam a importância de medidas setoriais destinadas a promover redução das emissões nos setores produtivos da economia. Neste caso, o conhecimento sobre o potencial de abatimento dos setores e o custo associado é parte da definição de políticas e mesmo escopo setorial, dado que torna possível identificar as melhores opções de mitigação a partir de estratégias custo eficientes. Dentre elas, promoção de condições tanto técnicas quanto

institucionais e financeiras para eficiência no uso de energia e de materiais e insumos, especialmente nos setores responsáveis pelos maiores volumes de emissões. Sendo possível melhores resultados em termos de emissões de GEE por unidade de produto.

Todavia, foram as políticas públicas destinadas ao combate do desmatamento que apresentaram os resultados mais significativos em termos de redução das emissões de GEE no Brasil, entre 2005 e 2012. Embora, a partir de 2013, tem-se observado retrocessos ambientais frequentemente associados ao enfraquecimento da governança e política ambiental no país. A primeira delas seria a aprovação do Novo Código Florestal (Lei nº 12.651 de 2012), criticada por fornecer anistia para acusados de desmatamento ilegal e reduzir a proteção legal sob alguns biomas, como a floresta Amazônica.

Questão agravada pela redução de recursos financeiros destinados a políticas relacionadas à mudança climática no Brasil como cortes do orçamento de prevenção de incêndios florestais, suspensão do Fundo Amazônia³, incorporação do MMA pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) e redução do orçamento das autarquias responsáveis pela proteção da Amazônia, o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). Além da finalização dos Planos Setoriais associados a PNMC, inclusive o PPCDAM, e ausência de ações de mitigação em outros setores ou estratégia ou plano de implementação o NDC.

Neste contexto, a capacidade nacional de cumprir seus compromissos ambientais é colocada à prova e coloca em risco de retrocesso os resultados positivos alcançados no combate ao desmatamento. Como resultado recente, na contramão da tendência internacional de redução das emissões de GEE devido ao isolamento social e recessão econômica causada pela pandemia de Covid-19, estimativas indicam aumento das emissões brasileiras entre 2018-2020, puxadas pelo aumento do desmatamento (SEEG, 2020).

Tal resultado indica a importância das decisões políticas do Estado no combate às mudanças climáticas. Medidas de mitigação das emissões associadas à atividade e à transição do uso da terra, como as apresentadas nessa seção, podem ter resultados significativos no Brasil.

³ De acordo com Decreto nº 6.527 de 2008, o Fundo Amazônia destina-se a realização de aplicações não reembolsáveis em ações de prevenção, monitoramento e combate ao desmatamento e de promoção da conservação e do uso sustentável da Amazônia Legal e é gerido pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES.

Entretanto, cada vez mais ganham destaque as políticas voltadas à mitigação da matriz energética, cujas emissões encontram-se em rápida expansão e são cada vez mais relevantes para o crescimento econômico. Dada a importância crescente, a seção seguinte trata das medidas voltadas para a mitigação das emissões provenientes da matriz energética.

2.2.1. Políticas de Mitigação nos Setores Energéticos

A formulação de políticas e definição de prioridades das economias, desenvolvidas ou em desenvolvimento, leva em consideração as questões energéticas e ambientais, preocupando-se com a eficiência energética e a sustentabilidade da geração de energia. Os incentivos partem tanto de questões ambientais eminentes na geração de energia quanto à necessidade de diversificação da matriz para atender fins de segurança energética ao reduzir a dependência de fontes específicas. Essa seção apresenta as principais políticas de mitigação das emissões associadas à matriz energética adotadas no Brasil e no mundo para compreender alternativas para metas nacionais de abatimento das emissões de GEE.

Atender à crescente demanda de energia e limitar seu impacto ambiental interliga o planejamento energético à transição para uma economia de baixo carbono. Atenção deve ser dedicada às ligações entre planos de energia e estratégia geral de desenvolvimento econômico ambientalmente sustentável. Segundo Jefferson (2000), o desenvolvimento de políticas de energia para o desenvolvimento sustentável pode ser assegurado por fornecimento de suprimentos de energia adequados e acessíveis; incentivos à eficiência energética; aceleração do uso de novas energias renováveis e ampliação do uso de tecnologias alternativas de geração de energia.

Uma série de políticas de estímulo à utilização de fontes limpas de energia surgiram nas décadas de 1980 e 1990, estimulados pelos impactos ambientais negativos do consumo de combustíveis fósseis, além das limitações técnicas em termos de expansão da oferta: créditos fiscais, leis de preços, incentivos à produção e quotas e sistemas de comercialização. De acordo com Tavares (2019), políticas serão convergentes à transição energética de baixo carbono se priorizarem quatro tipos de estratégias de desenvolvimento energético:

- a) energia-expansiva: com expansão de fontes de baixo carbono;
- b) energia-reprodutiva: com a manutenção de fontes existentes com baixas emissões;
- c) energia-substitutiva: com a substituição de fontes de elevada emissão; e

- d) *energo-poupadora*: com produção e consumo mais eficientes e/ou pela conservação de energia.

Segundo Lu *et al.* (2020), uma transição sistêmica para regimes de energia mais eficientes requer uma sequência estrategicamente projetada de ações envolvendo todos os níveis de política, do local ao global. Uma ampla gama de ferramentas foi introduzida, como direitos de emissão negociáveis, impostos, subsídios e tarifas *feed-in* para produção de energia renovável. Segundo o autor, existem três políticas principais de energia para garantir o desenvolvimento sustentável:

- a) *Energy Efficiency Standard* (EES), que geralmente estabelecem níveis de eficiência energética mínima permitida ou uso máximo permitido de energia para produtos manufaturados, levando em conta as tecnologias disponíveis no mercado.
- b) *Building Energy Performance Certification* (BEPC), que consistem em esquemas de certificação de desempenho de energia em construções civis para aumentar o desempenho energético de edifícios.
- c) *Feed-in-Tariff* (FiT), que é um dos esquemas de incentivo de maior sucesso para promoção de tecnologias de energia renovável, principalmente solar e eólica. Sob um FiT, geradores de eletricidade recebem um determinado valor pelo excesso de eletricidade gerada que foi enviada para a rede. Em geral, FiTs incluem três disposições-chave: acesso garantido à rede, contratos de longo prazo e preço de compra baseado no custo.

Diante do exposto, o planejamento energético deve abranger, entre outros aspectos, a sustentabilidade ambiental, especialmente no que se refere à mitigação das emissões de GEE. Enquanto isso, a participação crescente do setor energético nas emissões brasileiras de GEE o torna cada vez mais relevante no contexto de transição para uma economia de baixo carbono.

Segundo Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007), o desenvolvimento econômico brasileiro, ainda insuficiente, associado ao baixo consumo específico de energética, à carência de infraestrutura energética e à concentração do uso das riquezas naturais, exige do Estado um papel ativo no planejamento energético nacional. A inserção das questões ambientais nesse contexto, especialmente aquelas relacionadas às emissões de GEE nos setores de energia, reforça a necessidade de regulação e da definição de políticas especificamente orientadas para

assegurar a sustentabilidade do desenvolvimento econômico e exige planejamento e ação governamental.

As políticas energéticas ganharam destaque na década de 1970 após os choques do petróleo. Neste período, as principais iniciativas buscavam garantir a oferta de combustíveis (ampliação do uso de álcool) e ampliar a oferta de hidreletricidade. Entre as iniciativas para reduzir a dependência do petróleo na década, estão a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Passou-se a estabelecer o percentual obrigatório de adição de álcool etílico combustível à gasolina. Em 2021, é regulamentado pelo Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA) pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), sendo, de acordo com a Portaria MAPA nº 75 de 2015, de 25% na gasolina *premium* e 27% na gasolina comum.

Quase três décadas depois, em 2003, o governo federal criou o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB). A partir de então, começou a regular o percentual de biodiesel no óleo diesel vendido ao consumidor final. Nos termos da Resolução CNPE nº 16 de 2018, o percentual mínimo obrigatório é de 12%. Ainda em termos de medidas para expansão da produção de biocombustíveis, o governo instituiu em 2017 a nova Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). Já em 2021, por meio da Resolução CNPE nº 07 de 2021, o governo criou o Programa Combustível do Futuro com o objetivo de integrar as políticas públicas relacionadas ao uso de combustíveis sustentáveis e de baixa intensidade de carbono.

Quanto à eficiência energética, o país começou a formular suas legislações na década de 1980, marcada pela estagnação econômica. Entre as principais iniciativas estão a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) em 1984, do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) em 1985 e do Programa Nacional da Racionalização do Uso de Derivados do Petróleo e do Gás Natural (Conpet) em 1991. O PBE fornece informações (por meio de etiquetas) sobre o desempenho dos produtos, considerando, entre outros atributos, a eficiência energética. O Procel e o Conpet visam promover a racionalização da produção e do consumo de recursos energéticos, buscando evitar desperdícios e reduzir custos e investimentos setoriais. Os produtos etiquetados pelo PBE podem receber o Selo Procel e o Selo Conpet caso satisfaçam aos índices de consumo e desempenho estabelecidos para consumo de energia elétrica e de derivados de petróleo e gás natural, respectivamente.

No início da década de 2000, estimulado pela crise energética nacional, foi publicado um marco legal na área de eficiência energética, a Lei nº 10.295 de 2001, a qual lançou a política nacional de conservação e uso racional de energia e estabeleceu a imposição de normas mínimas de eficiência energética. Assim, progressivamente, a questão da eficiência energética foi ganhando destaque no planejamento energético nacional. A crise também estimulou a criação do Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), em 2002, que analisa ações voltadas para conservação de energia em diversos setores, especialmente o industrial, transportes, edificações e iluminação pública.

Após a crise de 2001, por sua vez, os incentivos para tecnologias de geração renovável alternativas à hidrelétrica adquiriram maior urgência. Fontes como eólica, biomassa e PCH foram impulsionadas pela criação do Programa para o Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), em 2002. Essas fontes alternativas também foram ampliadas como resultado do Programa de Desenvolvimento Energético dos Estados e Municípios (Prodeem), instituído em 1994, e do Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica, iniciado em 2003, ambas iniciativas do MME para atender às áreas rurais e comunidades isoladas não supridas de energia elétrica pela rede convencional, obtendo essa energia de fontes renováveis locais

Outro incentivo relevante foi a criação do Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) em 2015. Este programa visa estimular a geração de energia a partir de fontes renováveis pelos consumidores, com atenção especial à energia solar fotovoltaica. Estima-se que o programa possa movimentar, até 2030, R\$ 100 bilhões em investimentos (BRASIL, 2015b). Em termos de políticas regionais, em 2015, firmou-se um convênio do Conselho Nacional de Política Fazendária (Confaz) que autoriza os estados a isentarem o ICMS para os consumidores que produzem energia e enviam à rede elétrica de abastecimento nos termos da Resolução Normativa nº 482 de 2012⁴ da ANEEL.

No Brasil, é a Lei nº 9.478 de 1997 que dispõe sobre a política energética nacional. Entre seus princípios, destacam-se: proteger o meio ambiente e promover a conservação de energia;

⁴ A Resolução Normativa nº 482 de 2012 (alterada pela Resolução Normativa nº 687 de 2015) da ANEEL estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e introduziu um sistema de compensação de energia elétrica (*Net Metering*).

utilizar fontes alternativas de energia, mediante o aproveitamento econômico dos insumos disponíveis e das tecnologias aplicáveis; incrementar a participação dos biocombustíveis na matriz energética nacional; incentivar a geração de energia elétrica a partir da biomassa; fomentar a pesquisa e o desenvolvimento relacionados à energia renovável; e mitigar as emissões de GEE nos setores de energia e de transportes.

Esses objetivos da política energética nacional convergem para o posicionamento externo, em que preocupações ambientais são parte chave das políticas energéticas. Essas preocupações vêm ganhando espaço no planejamento público nacional. O Projeto de Lei do Senado PSL nº 484 de 2017, por exemplo, que dispõe sobre a ampliação das atribuições institucionais relacionadas à política energética nacional com o objetivo de promover o desenvolvimento da geração eólica e fotovoltaica de eletricidade, foi remetido à Câmara dos Deputados em 2018 (PL nº 11247 de 2018).

Apensados a este projeto estão mais de 100 outros que tratam incentivos à produção de energia a partir de fontes renováveis, infraestrutura de geração distribuída, eficiência energética, fundos de energia alternativa, isenção de impostos, e assim por diante, indicando possíveis mudanças na regulamentação do setor energético nos próximos anos. Mecanismos de taxaço de carbono também estão em discussão: os Projetos de Lei Complementar nº 73 de 2007 e nº 559 de 2018 propõem uma “Reformulação Tributária Ecológica”, pela taxaço sobre o carbono na forma de Contribuição de Intervenção no Domínio Econômico (CIDE) para a sustentabilidade ambiental e a mitigação do aquecimento global.

Em termos de financiamento público, um dos principais instrumentos do Governo Federal para o financiamento de longo prazo e investimento em todos os segmentos da economia brasileira é o BNDES. Desde os anos 1970, um dos mecanismos de captação de recursos do BNDES é a emissão de títulos externos. A última captação, em 2017, foi em *green bonds*, totalizando US\$ 1 bilhão, com vencimento em 2024. Esses recursos foram aplicados em projetos de energia eólica que criaram 1.323 MW de nova capacidade de geração instalada, o que representa mais de 420 mil toneladas de CO_2e sequestrado da atmosfera. Essa iniciativa foi considerada a primeira entre as instituições financeiras brasileiras.

Em 2020, o BNDES começou nova captação de R\$ 1 bilhão com vencimento em dois anos, dessa vez no mercado interno, pela emissão de Letras Financeiras Verdes (LFV). Com o

objetivo de diversificar as fontes de recursos e estimular mercado a investir em *green bonds*. As LFV seguem o mesmo arcabouço dos *green bonds* de 2017, garantindo que a aplicação dos recursos seja destinada a financiar projetos ambientalmente sustentáveis, atestados por uma empresa verificadora, especializada na área ambiental. Os recursos devem ser destinados a projetos de geração eólica ou solar (BNDES, 2020).

Em termos de políticas já concretizados ou em discussão para fomentar o uso eficiente de energia e a penetração de fontes renováveis alternativas no Brasil, destaca-se o espaço para introdução de incentivos à descarbonização da matriz energética. Muitos instrumentos podem ser adotados. Porém, com crise fiscal e econômica do país, a geração de energia de fontes alternativas fica comprometida. Atualmente, grande parte dos insumos são importados, o que dificulta o desenvolvimento nacional da cadeia produtiva para abastecer os setores energéticos. Além de implicar menos renda, emprego e demanda energética.

De acordo com Paixão e Miranda (2018), a taxa de crescimento da produção das fontes alternativas apresentou períodos de oscilação frequentes nos últimos anos, apresentando dificuldade para alcançar as metas planejadas para o setor. Até mesmo o setor sucroenergético, destaque nacional, encontra limitações em decorrência das mudanças no direcionamento político e na visão prevalecente de priorização do petróleo em detrimento da sustentação da política do etanol, causando a crise observada no período recente. A crise do setor sucroalcooleiro acarretou processos de fusões e concordatas, afetando negativamente a quantidade produzida. A crise, à época teria sido ocasionada principalmente pela política de preços dos combustíveis, relacionada à política de controle da inflação. A intervenção governamental para estabilização dos preços domésticos dos combustíveis, por meio do controle do preço do petróleo por meio da CIDE ou dos ajustes no percentual da mistura de etanol anidro na gasolina, gerou efeitos também para a promoção de energia renovável.

O aprofundamento da crise econômica no país, por seu turno, provocou grandes mudanças no planejamento orçamentário de curto e longo prazos. O contingenciamento do orçamento federal provocado pelas restrições orçamentárias impostas na Emenda Constitucional nº 95 de 2016, que limita por 20 anos os gastos públicos, tende a afetar negativamente as ações fundamentais da política ambiental nacional, assim como a realização de investimentos públicos. Dessa forma, é possível que o Brasil necessite revisar suas metas da NDC, ampliando as opções de mitigação a serem consideradas setorialmente (RATHMANN, 2017).

Ademais, o cenário de crise foi agravado pela pandemia do COVID-19, exigindo novos posicionamentos do governo. Em termos de incentivos ao financiamento de projetos de infraestrutura com benefícios ambientais, em 2020, foi editado o Decreto nº 10.387, uma alteração do Decreto nº 8.874 de 2016. Esse novo decreto surge como uma indicação ao mercado de que o Estado visa estimular investimentos privados em infraestrutura ambientalmente sustentável. Em termos do setor de energia, especificamente, o decreto incentiva tecnologias renováveis de geração de energia solar, eólica, de resíduos; e as pequenas centrais hidrelétricas.

Apesar desses esforços, as emissões associadas à matriz energética estão em expansão, indicando que as políticas adotadas no Brasil podem não ser suficientes para alcançar as metas nacionais, tornando necessária a adoção de incentivos adicionais, tais como os mecanismos de precificação. No capítulo seguinte serão apresentados os principais mecanismos adotados no Brasil e no mundo.

2.3. O papel dos mecanismos de precificação de carbono no controle das emissões

Como as medidas adotadas pelo Brasil podem não ser suficientes para atender às metas de emissões de GEE, incentivos adicionais podem ser necessários. Os mecanismos de precificação de carbono mostram-se alternativas atraentes para mudanças de incentivos via preços. Formalizados como medida potencial para a mitigação das emissões na PNMC, foram novamente colocados em pauta na NDC brasileira, que sinaliza a possibilidade de participação do país em mercados de carbono.

Basicamente, as políticas de mitigação de emissões podem ser de cunho regulatório, como a definição de limites de emissão fixados pela legislação e exigências de eficiência energética mínima, ou de cunho econômico, como as baseadas em mecanismos de precificação de carbono (principalmente taxas e mercados de emissões). A preferência por políticas econômicas deve-se a sua maior flexibilidade e eficiência econômica, que levaria ao objetivo desejado com menores custos, dadas as diferenças notadas nas estruturas produtivas dos diversos setores da economia em termos de intensidade de emissões, além de fomentar a busca por novas tecnologias ambientalmente satisfatórias (NORDHAUS, 2008).

Nos mecanismos de precificação, segundo Nordhaus (2008), a mitigação das emissões de GEE, ou seja, a soma de esforços na redução de emissões antropogênicas e na remoção do carbono atmosférico, pode ser entendida como um bem público que atua como corretor das externalidades negativas produzidas pelas emissões. Apesar dos seus benefícios globais, seus custos são arcados pelos poluidores até o ponto em que se igualem, na margem, aos benefícios sociais da mitigação, alcançando assim um nível ótimo de emissões sob a ótica da análise de custo-benefício. Dessa forma, por meio desse tipo de análise é possível reduzir as limitações da valoração do bem “mitigação das emissões de GEE” decorrentes da complexidade e subjetividade associada ao valor do capital natural.

2.3.1. Tributação e Sistemas de Comércio de Emissões

A presente seção apresenta os principais mecanismos de precificação de carbono existentes em vigor. As informações apresentadas foram embasadas nos Relatórios *State and Trends of Carbon Pricing* de 2020 e 2021 (WORLD BANK, 2020; WORLD BANK, 2021), que fornecem uma visão geral dos principais instrumentos de precificação existentes (impostos sobre carbono e sistemas de comércio de emissões e mecanismos de crédito), incluindo iniciativas internacionais, nacionais e subnacionais.

Um dos principais mecanismos de precificação adotado pelos países tem sido a tributação das emissões, que segue o princípio do poluidor-pagador formalizado por Pigou (2013 [1920]). As taxas pigouvianas de internalização de custos ambientais buscam igualar o custo marginal social e o privado, corrigindo a falha de mercado. Um imposto sobre as emissões seria, segundo Stern (2006), um elemento essencial das políticas de combate às mudanças climáticas. Sobre os impostos de carbono na América Latina, destacam-se as iniciativas do Chile, Colômbia, Argentina e México, que recentemente, implementaram tributações de carbono. Em 2020, as maiores taxas de carbono (por tonelada de CO_2e) em iniciativas nacionais foram observadas na Islândia (entre US\$20-US\$35), Holanda (US\$35), Irlanda (US\$39), Luxemburgo (entre US\$23- US\$40), França (US\$52), Noruega (US\$4- US\$69), Finlândia (US\$62- US\$73), Suíça (US\$101) e Suécia (US\$137) (WORLD BANK, 2021a).

Outro mecanismo para internalizar o custo social das emissões são os sistemas de comércio de emissões, ou *Emissions Trading Systems* (ETS). O princípio básico desses mecanismos é a definição de direitos de propriedade (COASE, 2000 [1960]), segundo o qual a existência de

direitos de propriedades bem definidos e custos de transação desprezíveis, as negociações entre os agentes promoverá um resultado eficiente (neste caso, o nível ótimo de poluição) independente da alocação inicial de recursos.

Nos ETS, são definidos limites máximos de emissões (*cap*) e distribuídos direitos de propriedade, ou seja, permissões para emitir certa quantidade de toneladas de CO_2e , na forma de licenças alocadas entre os participantes do mercado gratuitamente ou por meio de leilões administrados pelo regulador. Em seguida, as permissões são negociadas entre os agentes a fim de atender seus limites de emissões. Assim, o custo marginal de abatimento das emissões direcionará a decisão da empresa de reduzir as emissões ou adquirir permissões. Empresas com custo baixo investirão em redução das emissões e venderão suas permissões, enquanto empresas com altos custos de mitigação comprarão tais permissões, financiando a redução das emissões.

Em 2021, o ETS da China foi o maior esquema de comércio de emissões de gases de efeito estufa, envolvendo múltiplos países e setores. Segundo dados do World Bank (2021a), existem 64 Instrumentos de Precificação de Carbono (em inglês, *Carbono Pricing Instruments – CPIs*) em operação. A cobertura das emissões por esses instrumentos cresceu de 15,1% em 2020 para 21,5% em 2021 devido, principalmente, ao lançamento do ETS nacional da China. O anúncio do pacote de recuperação do Acordo Verde Europeu (em inglês, *European Green Deal*) e das novas metas de mitigação para 2030 também desencadearam amplas mudanças para o ETS da UE. O Quadro 1 apresenta as principais características dos dois principais mecanismos de precificação de carbono utilizados no mundo.

Quadro 1: Mecanismos de precificação – principais características

	Taxação de Carbono	ETS
Certeza dos níveis de emissões	É difícil estimar antecipadamente as reduções de emissões alcançadas por meio de um imposto, dificultando o alinhamento com uma meta de emissões.	Um limite de ETS fornece certeza sobre um limite superior de emissões, permitindo seu alinhamento a uma determinada meta de política (por exemplo, um orçamento de carbono).
Custo-benefício	Um imposto não fornece os ganhos de eficiência econômica da negociação entre entidades e entre setores e oferece menos flexibilidade temporal de preços para entidades reguladas.	Um ETS permite a eficiência econômica entre e dentro dos setores (como resultado da negociação) e ao longo do tempo. No entanto, o poder de mercado, a falta de liquidez e a volatilidade excessiva nos preços das licenças podem reduzir a relação custo-benefício.
Cronograma de implementação	Os impostos sobre o carbono podem ser implementados com bastante rapidez, pois podem se basear na infraestrutura tributária existente.	O desenvolvimento de um ETS requer a criação de um mercado secundário no qual as licenças possam ser negociadas, tornando a sua criação um processo mais longo.
Facilidade de administração e escopo	Embora um imposto exija um sistema robusto de monitoramento, relatório e verificação (MRV), ele não requer nenhuma infraestrutura para negociar permissões, e a capacidade de contar com a infraestrutura tributária existente de uma jurisdição facilita a implementação em uma ampla gama de setores.	Um ETS é mais complexo de implementar porque, além da infraestrutura necessária para um imposto, também envolve um mercado secundário para negociação de permissões. O regulador e as entidades reguladas, portanto, precisam ter capacidades adicionais. Isso pode dificultar a inclusão de determinados setores no escopo.
Previsibilidade de preço	O preço do carbono é fixado por alíquotas predefinidas. Isso fornece um sinal de preço estável para informar as decisões de investimento.	O preço do carbono é determinado pelo mercado. Isso se ajusta automaticamente às condições econômicas, mas pode levar à volatilidade dos preços.

Fonte: World Bank (2021b)

Apesar da pandemia de *COVID-19* e da crise econômica, o número de projetos de mercados de crédito de carbono registrados aumentou 11%, passando de 16.854 em 2019 para 18.664 em 2020. Em relação aos preços das permissões, observou-se breve queda, seguida de rápida recuperação na maioria dos *ETSs*. Em 2020, os instrumentos de precificação de carbono, globalmente, geraram US\$ 53 bilhões em receitas. Esse é um aumento de cerca de US\$ 8 bilhões em relação a 2019, em grande parte devido ao aumento no preço da licença da UE. Apesar disso, os preços de carbono adotados (entre US\$5 e US\$40/tCO₂e) são insuficientes para alcançar a meta estabelecida no Acordo de Paris ou conduzir à descarbonização profunda. (WORLD BANK, 2021). Por isso, maior clareza sobre os impactos ambientais e socioeconômicos da precificação de carbono poderiam diminuir as incertezas e encorajar investimentos oportunos, em grande escala, em tecnologias de baixo carbono.

De acordo com o World Bank (2021), os *ETSs* podem ser divididos em três categorias: internacionais, independentes e domésticos. Os Mecanismos internacionais de crédito são regidos por tratados internacionais de clima e geralmente são administrados por instituições internacionais. São exemplos o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (em inglês, *Clean*

Development Mechanism – CDM) e o mecanismo conhecido como Implementação Conjunta (em inglês, *Joint Implementation – JI*), vinculados ao Protocolo de Kyoto.

Mecanismos de crédito independentes são mecanismos não regidos por qualquer regulamentação nacional ou tratados internacionais. Eles são administrados por organizações terceirizadas privadas e independentes, que geralmente são organizações não-governamentais. Os principais mecanismos independentes são o Padrão de Carbono Verificado (em inglês, *Verified Carbon Standard – VCS*), o Padrão Dourado (em inglês, *Golden Standard – GS*), o Registro Americano de Carbono (em inglês, *American Carbon Registry – ACR*) e a Reserva de Ação Climática (em inglês, *Climate Action Reserve – CAR*).

Os mecanismos de crédito regionais, nacionais e subnacionais são regidos por suas respectivas legislaturas jurisdicionais e geralmente são administrados por governos regionais, nacionais ou subnacionais. Os mercados desse tipo que apresentaram maiores preços de carbono em 2020 foram da EU (US\$50), Suíça (US\$46), Canadá (US\$32), Alemanha (US\$29), Nova Zelândia (US\$26), preços consideravelmente menores que aqueles percebidas nas políticas de taxaço.

Os mecanismos internacionais foram responsáveis por aproximadamente três quartos dos créditos emitidos até 2020, sendo 70% deles provenientes de projetos em gases industriais, energia renovável e emissões fugitivas, setores populares porque apresentam custos de desenvolvimento de projetos mais baixos associado a maior potencial de redução de emissões. Apesar do crédito ter sido frequentemente dominado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), após a queda do preço de mercado do MDL em 2012, a atividade de crédito se estabilizou. Em compensação, os créditos de mecanismos independentes foram responsáveis por quase dois terços de todos os créditos emitidos em 2019.

Além disso, com a substituição do Protocolo de Kyoto pelo Acordo de Paris, os mecanismos nacionais e independente vem ganhando destaque. Em 2019, o mercado de crédito de carbono foi dominado pela atividade de padrões de crédito independentes, observando crescimento significativo dos créditos florestais, que são maioria dos créditos emitidos nos últimos 5 anos. Os mecanismos de crédito domésticos vêm sendo cada vez mais utilizados para gerar compensações para a iniciativa obrigatória de precificação de carbono dos países. Em 2019, os mercados domésticos foram responsáveis por cerca de 17% da garantia global de crédito de carbono.

Em 2020, metade dos créditos emitidos vieram de padrões independentes. Os créditos emitidos por essa categoria de padrões cresceram 30% em relação a 2019. Enquanto a emissão de créditos em mecanismos de crédito nacionais aumentou por 25% e o crédito doméstico também representou 85% dos novos projetos registrados. Há ainda diferenças entre os mercados independentes e os domésticos que faz com que os efeitos deles sejam diferentes. A maioria dos mecanismos independentes cobrem as emissões da agricultura e da indústria, enquanto a maioria dos domésticos não. As emissões associadas aos setores de transporte e geração de eletricidade, por sua vez, são frequentemente consideradas nos três tipos de mecanismos. Portanto, análises específicas sobre os impactos de mercados domésticos tornam-se cada vez mais relevantes.

2.3.2. Outros mecanismos de precificação adotados no Brasil

Em relação ao Brasil, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), criada pela Lei nº 13.576 de 2017, é a primeira iniciativa de precificação que conta com metas nacionais de redução de GEE para a matriz de combustíveis, Créditos de Descarbonização por Biocombustíveis (CBIOS) e certificação da produção de biocombustíveis. A meta nacional é definida pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) realiza o desdobramento em metas individuais para os distribuidores de combustíveis. Para atender às metas, as distribuidoras compram volumes especificados de biocombustíveis ou CBIOS.

Até 2029 o programa espera evitar a emissão de 620 milhões de toneladas de GEE. A Resolução CNPE nº 8 de 2020 também estabeleceu que, excepcionalmente, como consequência dos impactos da Pandemia de COVID-19, as metas definidas para o ano de 2020 pela Resolução CNPE nº 15 de 2019, ficaram reduzidas. Em termos monetários, o preço inicial, estimado com base em experiências de outros países, do CBIO feito pelo Comitê RenovaBio foi de aproximadamente US\$10 dólares. O preço médio real, a cargo do mercado, foi de R\$ 43,7/CBIO em 2020. Além disso, em 2020 foram emitidos 18,5 milhões de CBIOS e negociados, na Bolsa de Valores, aproximadamente 15 milhões de Créditos de Descarbonização, totalizando R\$ 650 milhões em transações.

Além disso, como estímulo à certificação dos produtores e a busca pela maior eficiência energética do setor agroindustrial, indo ao encontro dos objetivos da política pública RenovaBio, o BNDES lançou, em 2021, o Programa BNDES RenovaBio. O programa realiza apoio direto por meio de crédito ASG (Ambiental, Social e Governança) para o setor de biocombustíveis, no âmbito da Política RenovaBio, com incentivo para a melhoria da eficiência energético-ambiental e da certificação da produção, buscando garantir a oferta de CBIOS no mercado e, assim, fortalecer a criação do mercado de CBIOS (BNDES, 2021).

Já em relação ao setor elétrico, segundo a EPE (2020d), a falta de sinalização dos custos das emissões no setor é uma das maiores dificuldades do seu controle, resultando em ineficiência econômica. Portanto, a sua adequada valoração poderia permitir a internalização das externalidades (emissões de GEE) produzidas pelo setor.

Todavia, em relação ao setor elétrico, segundo a EPE (2020d), por contar com mais de 80% de fontes renováveis, a mitigação adicional, apesar de bastante desafiadora, é o caminho indicado pelos planos governamentais (Planos Decenais de Energia e Plano Nacional de Energia) elaborados por ela. A EPE entende o setor elétrico como um potencial gerador de créditos de carbono, em que dificilmente seria viável uma política intrasetorial, uma vez que no mercado regulado de energia elétrica a geração está sob o comando do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a própria participação elevada de renováveis na matriz elétrica geraria um viés de baixa nos preços ou exigiria uma meta muito elevada para viabilizar a entrada de tecnologias de baixo carbono e ao mesmo tempo assegurar a confiabilidade do sistema. Mas defende ainda que o setor elétrico brasileiro como um todo se beneficiaria em mecanismos de mercado de carbono intersetoriais ou abrangentes e, principalmente, mecanismos internacionais. Ainda em relação aos impactos da precificação de emissões nos setores energéticos, segundo a EPE (2020d), há dois pontos relevantes. São eles a competitividade da indústria nacional e a capacidade de atrair Investimento Direto Estrangeiro (IDE).

Além dos benefícios ambientais da transição energética de baixo carbono, as vantagens comparativas do Brasil, em termos da renovabilidade da matriz energética, podem atrair investimentos (nacionais e estrangeiros) em fontes renováveis de geração elétrica, biocombustíveis, eficiência energética e tecnologias de baixo carbono e, conseqüentemente ganhos de competitividade da indústria nacional. Como não há consenso sobre os impactos da precificação de carbono como estratégia para transição para uma economia de baixo carbono

na estrutura produtiva do país, há espaço para estudá-los. A presente tese busca contribuir com essa discussão.

Ademais, mecanismos de precificação podem ser ferramenta válida para otimizar clima e desenvolvimento econômico, como defende o Projeto *Partnership for Market Readiness* (PMR Brasil), que teve por objetivo avaliar cenários de inclusão da precificação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) como instrumento para a implementação da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) no período pós-2020 (BRASIL, 2021). Segundo o projeto, os mecanismos de precificação na economia brasileira podem ser viáveis após 2020. Os princípios norteadores para a elaboração do sistema de comércio de emissões devem ser neutralidade fiscal e regulamentação. A necessidade de neutralidade fiscal justifica a existência de mecanismo de reciclagem de receita. Os ajustes regulatórios incluem, por exemplo, a exoneração da taxa para o caso dos combustíveis sensíveis. Entre os ajustes regulatórios consideram a eliminação da CIDE combustíveis. Os cenários do projeto incluíram segmentação setorial do mecanismo de precificação para que se ajuste à realidade setorial e não onerasse excessivamente setores fundamentais.

2.4. O Custo de Abatimento Marginal

As curvas de Custo de Abatimento Marginal (MAC), comumente descritas na literatura, auxiliam a entender a relação entre tributações de carbono e níveis de redução das emissões resultantes. Também são utilizadas para avaliar o preço setorial necessário para alcançar determinada meta de abatimento setorial ou identificar potenciais de abatimento com menores custos econômicos. Assim, torna-se importante considerá-las para que os mecanismos de precificação adotados sejam os mais eficientes possíveis, sejam eles tributação setorial, mercados de carbono ou outros.

Segundo Motta, Couto e Castro (2012), há, em geral, duas abordagens para estimação das curvas MAC: a tecnológica e a baseada em modelos econômicos *topdown*, de orientação econômica (equilíbrio geral), e *bottom-up*, orientados pela engenharia (equilíbrio parcial). Ambos os modelos econômicos analisam a relação entre preços e mitigação das emissões de GEE.

As curvas MAC de abordagem tecnológica buscam, de acordo com Motta, Couto e Castro (2012), descrever os custos de abatimento e a quantidade de medidas potenciais de abatimento, baseando-se em práticas usuais ou em projetos de engenharia. Os custos de cada tecnologia são apresentados em ordem crescente, associando as tecnologias aos níveis incrementais de redução das emissões. Por isso, permite considerar custos negativos associados aos potenciais de abatimento, ou seja, admite a existência de medidas de mitigação cujos benefícios financeiros superam os custos associados à sua implementação, o que pode superestimar os resultados.

Enquanto isso, as curvas MAC baseadas em modelos econômicos buscam otimizar o custo setorial de mitigação das emissões de GEE. Dessa forma, os resultados estão associados às elasticidades preço e substituição dos setores emissores, impossibilitando custos negativos. Assim, ao integrar as funções de oferta e demanda, os modelos econômicos podem ser vantajosos por abordar falhas de mercado e barreiras à entrada em relação aos modelos tecnológicos, que consideram apenas custos de engenharia.

A crescente literatura sobre avaliação de estratégias de descarbonização de baixo custo pela comparação entre o custo financeiro das tecnologias existentes (abordagem tecnológica) tem mostrado a relevância do tema. Entre os estudos que estimam os diferentes custos de tecnologias limpas, bem como os impactos econômicos de sua adoção, destacam-se Wills (2013), La Rovere *et al.* (2015), Lucena *et al.* (2016), Fiesp (2017), Rathmann (2017) e Brasil (2020). Esses trabalhos comparam os custos de investimentos em medidas de mitigação considerando diferentes níveis de preço de carbono.

De forma geral, os estudos concluem que mudanças tecnológicas nos processos produtivos industriais e agropecuários, na produção e uso de energia e nos padrões de consumo podem ser necessárias para alcançar uma ampla descarbonização da economia brasileira. Entre as principais estratégias, segundo La Rovere *et al.* (2015), há enorme potencial de abatimento de emissões de GEE no país, por medidas adicionais de mitigação com baixo custo: eficiência energética, uso de fontes renováveis de energia (hidrelétrica e etanol) e de técnicas para uma agropecuária de baixo carbono, mudança de modais de transporte, captura de metano em projetos de saneamento básico e reflorestamento com espécies nativas e de crescimento rápido.

Aspecto comum a esses trabalhos é o papel dos investimentos em tecnologia. Rathmann (2017), por exemplo, realizou uma extensa análise de diversas tecnologias para encontrar as Melhores

Tecnologias Disponíveis (MTD) para reduzir as emissões em cada setor econômico de acordo com o custo-efetividade para mitigar as emissões de GEE. Nesse sentido, Lucena *et al.* (2016) também ressaltaram a importância dos investimentos em infraestrutura e tecnologia para viabilizar os cenários de mitigação projetados.

Outro aspecto é o papel dos preços de carbono. Wills (2013), por exemplo, modelou medidas de mitigação para a indústria e com custos marginais de abatimento menores que 50 R\$/tCO₂e. O autor defende que uma taxa de carbono de 22 R\$/tCO₂e poderia gerar resultados satisfatórios em termos de crescimento econômico e emissões, mas ressalta que esse valor é bastante sensível às opções de mitigação consideradas. Enquanto isso, La Rovere *et al.* (2016) apontam ainda que se não houver um esforço adicional de mitigação, a tendência entre 2020 e 2030 é de aumento das emissões, principalmente devido ao ritmo de crescimento da queima de combustíveis fósseis e da agropecuária. Para os autores, o impacto sobre o PIB da implementação de tecnologias limpas financiadas por taxação de carbono depende do nível da taxa: até US\$20/tCO₂e, o PIB não se reduz; mas com taxas acima de US\$100/tCO₂e, haveria redução do crescimento PIB em razão de uma queda na atividade econômica como um todo, gerada pela imposição da taxa.

De forma geral, esses trabalhos permitem identificar os efeitos da inclusão de determinadas tecnologias. Nesses trabalhos, a curva MAC é estimada com base nos custos das tecnologias disponíveis e são dados de entrada para os modelos de EGC, quando utilizados. Mas, apesar de economicamente viáveis, não há como garantir que serão adotadas, dadas as barreiras à entrada de novas tecnologias. Portanto, para complementar a análise dos custos setoriais de abatimento, torna-se interessante comparar os resultados por outra ótica. Em que os custos de abatimento não sejam definidos exogenamente, mas resultado da estrutura produtiva atual.

Dentro desta abordagem, para analisar o potencial de abatimento utiliza-se o custo de carbono como dado de entrada e o modelo econômico, endogenamente, projeta o potencial de abatimento do setor dada sua estrutura produtiva. Neste caso, não há internalização de mudança tecnológica. Esses resultados representam, pois, o custo máximo que o setor enfrentaria para alcançar determinado nível de abatimento. Essa informação, combinada com as opções tecnológicas disponíveis, pode ser útil para identificar setores cujo abatimento deve ser financiado.

Esse tipo de abordagem busca responder, dada a estrutura produtiva atual, quais setores são mais sensíveis à imposição de um custo de carbono e quais apresentam maiores potenciais de abatimento. Um exemplo de aplicação desse tipo de análise pode ser visto em Magalhães (2013), que encontra as trajetórias de preços de carbono para alcançar metas de abatimento para o Brasil, mas de forma agregada para a economia brasileira.

Apesar da crescente literatura, poucos trabalhos estimam os custos marginais de abatimento setoriais. Esta tese busca contribuir com esta discussão utilizando um modelo construído com nível de desagregação setorial e dados recentes da economia brasileira, viabilizando a análise dos custos marginais setoriais e seus efeitos sobre variáveis macroeconômicas, considerando a tecnologia atual e efeitos indiretos da substituição entre fatores de produção e insumos e mudança do uso da terra. Assim, as estimativas complementam a literatura existente, especialmente em relação aos setores de geração de energia elétrica, especialmente desagregados. O intuito é identificar setores mais sensíveis quanto ao preço de carbono dada a estrutura produtiva atual.

Além disso, a partir desta identificação busca-se avaliar especificações setoriais para mercados de carbono na economia brasileira e seus impactos econômicos e sociais (sobre famílias). A literatura utilizando modelos de simulação e projeção é analisada na próxima seção, assim como o modelo construído nesta tese.

3. METODOLOGIA

A construção de um modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) envolve cinco etapas principais: i) a definição da estrutura teórica do modelo; ii) a definição das equações comportamentais e identidades contábeis; iii) a calibragem da base de dados e dos parâmetros; iv) o fechamento do modelo (definição das variáveis endógenas e exógenas) e v) a simulação dos resultados (SIMÕES, 2006).

A primeira etapa é de grande importância e consiste em definir questões relacionadas à estrutura de produção dos setores contemplados, especificando as hipóteses acerca das tecnologias de produção e as elasticidades de substituição adotadas. Além disso, também informa como é definida a demanda das famílias, a demanda por investimento, o estoque de capital, as relações de equilíbrio do mercado de trabalho, a demanda externa, entre outros.

Enquanto o nível de renda, preferências e preços determinam a demanda agregada, o preço dos insumos e demanda pelos *outputs* determinam a lucratividade e a produção. Esta produção é desagregada em certo número de setores, que geralmente apresentam funções de produção homogênea e coeficientes fixos. Já a demanda pode ser desagregada de acordo com um conjunto de grupos de renda que apresentam funções homogêneas de consumo e poupança (GUSSO, 2011, p. 386).

Em seguida, o próximo passo é definir as equações referentes ao comportamento dos agentes econômicos, estipulando como estes reagem a mudanças nos preços relativos e demais choques da economia. As regras de comportamento dos agentes econômicos seguem a teoria microeconômica de minimização dos custos pelas firmas, dada uma produção com retornos não crescentes de escala e fatores remunerados de acordo com sua taxa marginal de produtividade, e a maximização de utilidade pelos consumidores, sujeitos a restrições orçamentárias. As formas funcionais comumente utilizadas são a *Cobb-Douglas*, a *Constant Elasticity of Substitution* (CES), a *Constant Elasticity of Transformation* (CET) e a *Linear Expenditure System* (LES) (FOCHEZATTO, 2002).

As equações utilizadas nos modelos de EGC podem ser formadas por identidades contábeis e/ou por hipóteses decorrentes das teorias econômicas sobre o comportamento das variáveis cujo ajustamento levará ao equilíbrio do sistema. Assim, o fechamento do modelo, que constitui

a terceira etapa da construção dos modelos de EGC, consiste em impor restrições teóricas ao mesmo, definindo quais variáveis serão endógenas e quais serão exógenas, decorrendo de várias hipóteses teóricas, sejam elas clássicas, neoclássicas, estruturalistas, dentre outras (GUSSO, 2011, p. 368).

Na quarta etapa ocorre a calibragem dos parâmetros. Por fim, a última etapa é a de simulação e interpretação dos resultados fornecidos pelo modelo. Portanto, como os modelos de EGC são elaborados a partir de bases de dados consistentes, coerentes com a teoria econômica e em que o equilíbrio de todas as variáveis é determinado simultaneamente, permitindo que qualquer perturbação no sistema possa ser dimensionada.

Visando atender a tais etapas, este capítulo será dividido em quatro seções, a saber: revisão de literatura, modelo, base de dados e simulações. A primeira seção apresentará a revisão de literatura sobre impactos socioeconômicos da implementação de mecanismos de precificação de carbono no Brasil. A segunda seção, por sua vez, reporta a definição da estrutura teórica do modelo desenvolvido nesta tese, a partir das equações comportamentais e identidades contábeis; a terceira seção tratará da construção da base de dados; e a última seção versará sobre o fechamento e simulações realizadas.

3.1. O Custo-Efetividade dos Mecanismos de Precificação no Brasil

A presente seção traz uma breve revisão de literatura dos principais resultados encontrados na literatura aplicada sobre os custos econômicos e benefícios ambientais decorrentes da adoção de mecanismos de tributação e de mercados de carbono no Brasil, notadamente utilizando a abordagem de EGC.

Na abordagem aplicada de equilíbrio geral, a economia é vista como um sistema de mercados interligados no qual um conjunto de equações descreve o comportamento dos agentes econômicos (famílias, empresas, governo e demais instituições da economia), cujo equilíbrio entre todas as relações é obtido simultaneamente. De modo geral, esses modelos determinam endogenamente, por programas microeconômicos de otimização, os preços relativos e as quantidades produzidas. São considerados modelos aplicados, pois geram respostas numéricas para o problema de equilíbrio geral, fornecendo resultados detalhados e abrangentes sobre os efeitos de políticas analisadas.

Por isso, os modelos de EGC, utilizados em diferentes áreas, adquiriram espaço nas aplicações ambientais, em que são amplamente empregados na simulação do efeito de políticas climáticas (nos níveis regional, nacional e global), cujos impactos futuros frequentemente não podem ser mensurados por meio de séries de dados históricos. Como a maior parte das emissões globais de GEE vem do setor de energia, muitos desses modelos focam nesse setor. A crise do petróleo da década de 1970 teve papel relevante nesse desenvolvimento. Segundo Bergman (1988), os impactos econômicos (especialmente em termos de preços relativos dos produtos e fatores e alocação de recursos) de diversos aspectos das políticas energéticas, como custos de energia e mudanças tecnológicas, ganharam importância nesse período. Além disso, o aquecimento global e consequentes mudanças climáticas tornaram a questão ambiental indissociável da energética e econômica.

Além de gerar efeitos encadeados em toda a cadeia produtiva, pois é insumo para diversos setores produtivos, os setores energéticos têm papel estratégico no desenvolvimento de políticas econômicas e ambientais. Políticas sobretudo voltadas para a descarbonização da matriz energética têm efeitos socioeconômicos que precisam ser entendidos a fim de subsidiar um planejamento energético capaz de abranger interesses diversos e em algum grau conflitantes. Visando obter esse entendimento, é cada vez mais comum a utilização de modelos de EGC para estimar os impactos socioeconômicos de políticas ambientais voltadas para o setor energético em diversos países.

Contudo, observa-se divergências entre os trabalhos que analisam os impactos de políticas ambientais, em que os cenários nos quais o incentivo à transição para uma economia de baixo carbono pode gerar tanto crescimento econômico quanto aumento do desemprego. Como os resultados encontrados na literatura dependem da economia analisada, dos tipos de incentivos governamentais adotados, das características ambientais e do potencial energético da região, torna-se relevante compreender os impactos e encadeamentos do estímulo ao desenvolvimento de fontes de energia renovável no contexto nacional, levando em consideração as especificidades da matriz energética e do uso do solo no Brasil.

Os modelos de EGC utilizados para tratar, de forma interligada, questões energéticas, ambientais e econômicas no Brasil geralmente derivam da estrutura teórica de outros modelos desenvolvidos previamente para outros países. Normalmente, esses modelos partem da premissa básica de mercados em concorrência perfeita e retornos constantes de escala. As

inovações são traduzidas em um ganho de eficiência na combinação desses fatores, as estruturas de comércio externo seguem a hipótese de Armington (1969) e o sistema de produção é configurado como uma série de funções de elasticidade de substituição constante aninhadas (CES).

Geralmente, quando tratam da internalização dos custos ambientais das emissões de GEE, esses modelos calculam preço-sombra e imposto sobre cada unidade física de GEE, que é um indicador do custo de uma política de controle que apresenta custo marginal crescente, de modo que quanto maior a restrição, maior será o preço-sombra (Paltsev *et al.*, 2005). Enquanto isso, o efeito direto da taxaço de carbono consiste no aumento do custo em decorrência do imposto que é repassado para o preço do produto como proporção da intensidade de emissões na produção.

Entre os modelos, adaptados para a economia brasileira, estão os australianos *Monash* (ADAMS *et al.*, 1994) e o inter-regional *The Enormous Regional Model* (TERM), desenvolvido por Horridge, Madden, Wittwer (2005). Esses modelos partem da estrutura teórica do modelo ORANI desenvolvido pelo *Centre of Policy Studies* (CoPS) da Victoria University no final dos anos 1970. Nessa linha, ORANI-G foi um modelo genérico de um único país adaptado para muitos países, inclusive o Brasil. Já direcionado para questões ambientais e energéticas, MONASH-MRF (Peter *et al.*, 1996) é um modelo multissetorial e multirregional que busca detalhar as emissões de gases de efeito estufa por combustível, por usuário de combustível e por região de uso de combustível; e detalhar o uso de energia por combustível, usuário de energia e região de uso de energia.

O *Economic Forecasting Equilibrium System* (EFES) de Haddad e Domingues (2001) e o *Brazilian Energy and Greenhouse Gas Emissions General Equilibrium Model* (BeGreen) elaborado por Magalhães (2013), por exemplo, foram baseados na estrutura teórica do modelo *Monash*. O *BeGreen* também é um modelo dinâmico-recursivo que possui um módulo de detalhada especificação energética e um módulo ambiental que permite a projeção de políticas de redução de emissões, inspirados no MONASH-MRF.

Magalhães (2013) construiu e utilizou o *BeGreen* para analisar a imposição de metas de redução de emissões derivadas do uso de combustíveis, energia e atividade produtiva (com reciclagem da receita tributária para as famílias) e o impacto de aumento de eficiência energética. O modelo

também foi utilizado em Carvalho *et al.* (2018) para analisar metas de redução das emissões de GEE propostas na COP21. Ambos resultados indicaram redução do PIB, associada a uma redução do consumo das famílias e do investimento.

Já o modelo EFES, integrado a modelos setoriais de energia e de uso da terra, foi utilizado em Rathmann *et al.* (2017) para analisar a precificação de carbono com possibilidades de reciclagem do tributo de carbono para o governo ou para famílias. O estudo destaca que a adoção de tributo de carbono de 25 US\$/tCO₂e tornaria a matriz predominantemente renovável a partir 2030, pois incentivaria práticas mitigatórias inclusive nos setores energéticos, tais como efficientização energética, maior repotenciação de usinas hidrelétricas e inserção de biomassa nas termelétricas a carvão. Além disso, o potencial de mitigação nos setores industrial, transportes e energético aumenta consideravelmente ao nível de preços de 100 US\$/tCO₂e.

Enquanto isso, Rathmann (2017) utilizou o EFES a fim de analisar a aplicação de Melhores Tecnologias Disponíveis (MTD) buscando reduzir as emissões em cada setor econômico de acordo com o custo-efetividade para mitigar as emissões de GEE, e analisou adoção de mecanismos de precificação de carbono em diferentes valores. Os resultados mostraram que o cenário com adoção de MTD e preço de carbono nulo seria compatível com o cumprimento da meta da NDC para 2025, mas, em 2030, o cumprimento da meta exige internalização de preço de carbono na economia na ordem de US\$ 10/tCO₂e.

Além dos modelos nacionais, há ainda os modelos regionais, que apresentam especificação *bottom-up*, ou seja, resultados nacionais são agregações dos valores obtidos por região. Seguindo a estrutura teórica do modelo australiano TERM, encontram-se diversas adaptações desses modelos regionais para a economia brasileira, tais como o TERM-BR (FERREIRA FILHO, 1998) e o *Integrated Multirregional Applied General Equilibrium Model for Brazil* (IMAGEM-B), do qual derivaram o *Inter-regional General Equilibrium Model for the Brazilian Legal Amazon* (REGIA) e o IMAGEM-MG, ambos desenvolvidos no Cedeplar-UFMG. Versões do TERM-BR foram utilizadas para analisar os impactos de políticas nacionais de substituição de combustíveis fósseis (SANTOS; FERREIRA FILHO, 2017) e de investimentos em geração de energia renovável por fontes alternativas (DINIZ, 2019; SILVA, 2020).

O pacote computacional geralmente adotado para tais modelos é o *General Equilibrium Modelling PACKage* (Gempack) (HARRISON; PEARSON, 1996). Outro pacote computacional comumente utilizado para implementar modelos de EGC para analisar impactos econômicos e ambientais de políticas energéticas é o GAMS - *General Algebraic Modeling System* (BROOK, KENDRICK E MEERAUS, 1988). Uma descrição geral sobre esses pacotes computacionais é encontrada em Horridge *et al.* (2012). Uma das linguagens de programação que utiliza o GAMS é a *Mathematical Programming System for General Equilibrium Analysis* (MPSGE), desenvolvida por Rutherford (1999). Em linhas gerais, o MPSGE é um conjunto de equações algébricas que caracterizam as condições de lucro econômico zero para a produção, equilíbrio entre oferta e demanda nos mercados de bens e fatores de produção e equilíbrio entre renda e despesas dos consumidores.

Uma aplicação empregando um modelo dinâmico recursivo que utiliza a linguagem de modelagem MPSGE foi realizada por Chen *et al.* (2013) para analisar os impactos de impostos de carbono para atender uma meta voluntária de redução das emissões no uso energético e nos processos industriais, em diferentes cenários de desmatamento, com reciclagem da receita tributária. Os resultados mostraram que o simples cumprimento da política de mitigação das emissões (especialmente desmatamento) proposta pelo governo seria suficiente para alcançar a meta de emissões (não haveria necessidade de reduzir as emissões pelo uso de energia e processos industriais até 2035). Porém, quanto menor for o controle do desmatamento, maior a redução do PIB devido a precificação do carbono nos setores produtivos. Esse custo econômico pode ser minimizado se a receita do imposto sobre o carbono fosse reciclada na forma de redução de impostos sobre a renda do trabalho. Além disso, os autores defendem que o aproveitamento da receita do imposto de carbono pode ser uma ferramenta efetiva para subsidiar a expansão da geração de energia eólica.

Já em relação aos modelos globais, entre os utilizados para tratar de questões relacionadas à matriz energética e às emissões brasileiras, destaca-se o *Emissions Prediction and Policy Analysis Model* (EPPA), desenvolvido pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), que é um dos modelos, construído como um problema de complementaridade mista, escrito na linguagem de programação GAMS que utiliza a sintaxe do algoritmo MPSGE. Esse modelo global frequentemente é utilizado por ser um modelo multirregional recursivo-dinâmico que trata de forma abrangente as emissões dos principais gases de efeito estufa. O EPPA foi utilizado em diversas aplicações, entre elas Moraes (2013), Octaviano, Paltsev e Gurgel (2016),

Bistafa e Gurgel (2016), Lucena *et al.* (2016), Maluf e Gurgel (2016), Fiesp (2017), Gurgel e Paltsev (2017), Faccin (2019) e Oliveira, Gurgel e Tonry (2019).

Octaviano, Paltsev e Gurgel (2016) analisaram impostos de carbono e metas de redução das emissões entre 2020 e 2050 para o Brasil e o México, concluindo haver grande potencial de redução das emissões brasileiras de GEE, mas a taxação provocaria perdas do PIB. Os autores destacam que a redução da intensidade energética e aumento da eficiência energética têm papel nos cenários de mitigação e que metas de redução das emissões específicas (sobre combustíveis fósseis e emissões industriais) são mais custosas que metas que cobrem todos os setores econômicos. Além disso, sugerem que mecanismos de comércio poderiam reduzir os custos de mitigação.

Já Lucena *et al.* (2016) utilizam o EPPA para analisar os impactos econômicos de mecanismos baseados no mercado e das restrições de emissão de carbono na economia brasileira por meio de taxação e metas de redução das emissões. Os resultados mostram que a mitigação seria alcançada por uma combinação de ações como redução da demanda energética, descarbonização de energia primária e do *mix* de fornecimento de eletricidade, introdução de captura e armazenamento de carbono baseados em combustível fóssil. Além disso, ações para reduzir as emissões no setor de agricultura, silvicultura e outros usos da terra podem reduzir ainda mais as emissões no Brasil ou até mesmo reduzir a carga de mitigação no setor de energia.

De forma similar, Fiesp (2017) parte do EPPA para analisar a adoção de políticas de tributação setorial à emissão de diferentes GEE e políticas *cap-and-trade* de nos principais países emissores e no Brasil. Como resultado, observou-se que os incentivos diretos às fontes renováveis produzem efeitos positivos até um determinado limite, a partir do qual, o setor atinge o seu pleno potencial de mitigação; incentivos diretos, após 2040, não são custo-efetivos; e os cenários de mercados de carbono (*cap-and-trade*) permitem o uso de fontes fósseis de energia por um período maior que os cenários de tributação às emissões.

Ademais, o estudo realizado por Fiesp (2017) mostrou que os potenciais de mitigação de baixo custo advindos de mudanças no uso da terra esgotam-se em 2030, o que significa que futuros compromissos de redução de emissões pelo país vão implicar a adoção de uma estratégia mais abrangente, que inclua os demais setores econômicos. No horizonte de 2050, uma ampla “descarbonização” da economia pode exigir mudanças tecnológicas nos processos produtivos

industriais e agropecuários, na produção e uso de energia e nos padrões de consumo. O Estudo demonstrou que o preço do carbono a ser pago pelos diferentes setores brasileiros, na forma de tributos ou impostos, seria de cerca de US\$ 10 até 2030 para a maioria dos setores. E de US\$ 2,5 no caso de política do tipo *cap-and-trade*. Até 2050 esse preço chegaria a US\$ 103 (*cap-and-trade*) e a tributação ultrapassaria US\$ 190 para a maioria dos setores, chegando a mais de US\$ 350.

Em outra aplicação, Gurgel e Paltsev (2017) utilizam o EPPA para analisar cenários alternativos de precificação de carbono setorial e mercado *cap-and-trade*, definidos para atingir as metas do Acordo de Paris. Além disso, o imposto de carbono é endogenamente calculado para que todos os setores reduzam as emissões na mesma porcentagem. Como os setores têm diferentes capacidades para substituir fontes de energia e tecnologias, aqueles com custos de mitigação mais altos, mas altamente necessários na economia, tendem a enfrentar impostos mais altos. Este é o caso do setor de serviços, que paga as maiores taxas de carbono. Após esgotado o potencial de redução das emissões por desmatamento (possivelmente em 2030), seria necessário voltar maiores esforços ao setor energético. O baixo custo econômico do NDC brasileiro mostra o potencial de redução relativamente barata em emissões de mudanças no uso da terra e agricultura no curto prazo no país. Gurgel e Paltsev (2017) ressaltam que cenários *de cap-and-trade* produzem o menor impacto negativo no PIB: O preço do carbono neste cenário é muito baixo em comparação com o cenário de imposto sobre o carbono para a maioria dos setores. Atinge apenas US\$3/tCO₂e em 2030 e aumenta para US\$ 103/tCO₂e em 2050.

Por sua vez, Faccin (2019) analisou metas NDCs para os setores florestal e de energia e políticas *cap-and-trade*. Os resultados mostraram, que a imposição de políticas de mitigação das emissões geraria redução PIB e emissões. Além disso, a principal iniciativa para alcançar as metas NDCs é o controle do Desmatamento: no longo prazo, um mercado de carbono combinado com políticas de controle de desmatamento tende a ter maior eficiência no combate as mudanças climáticas. Por outro lado, o autor argumenta que o setor de energia brasileiro tem baixa relevância para a redução das emissões, em que políticas de incentivo ao setor, geram pouca redução, ou até aumento de emissão, devido aos seus custos. Assim, obter ganhos significativos de redução das emissões da matriz energética não seria viável no curto prazo.

Ainda no contexto de mecanismos de mercado, em aplicação recente, Oliveira, Gurgel e Tonry (2019) analisam os impactos da imposição de um *Emissions Trading Scheme* (ETS) nacional,

bilateral (pela cooperação entre Brasil e Europa) e global. Como resultado, os autores observam que, devido ao grande tamanho do ETS europeu, a cooperação com o Brasil não provocaria impactos significativos em futuras mitigações na Europa. Para o Brasil, o efeito da cooperação pode ser oposto ao desejado: os esforços de mitigação são realocados para a Europa, que vende licenças para o Brasil. Pois a matriz de baixo carbono faz com que os custos brasileiros para reduzir as emissões sejam altos e a importação de licenças da Europa torna-se mais econômica.

Cabe ressaltar que o EPPA é um dos muitos modelos globais que utiliza a base de dados do *Global Trade Analysis Project* (GTAP) (HERTEL, 1997). O GTAP é uma rede global de pesquisadores que conduzem análises quantitativas de questões de política econômica internacional, incluindo política climática. Além de oferecer uma base de dados global que descreve padrões de comércio bilateral, produção, consumo e uso intermediário de commodities e serviços, o GTAP oferece modelos e recursos para análise de equilíbrio geral multirregional aplicada a questões econômicas. O modelo GTAP padrão é um modelo global multirregional, multissetorial, em que as economias se interligam por relações comerciais bilaterais.

O *Global Trade Analysis Project - Energy* (GTAP-E) é uma extensão da estrutura do GTAP que inclui uma representação detalhada do uso de energia na produção e consumo e suas emissões de carbono associadas. Esse modelo, foi utilizado para avaliar os impactos de políticas de mitigação de GEE no Brasil em Feijó e Kuik (2018). Feijó e Kuik (2018) utilizaram o GTAP-E para investigar os impactos da aplicação de Border Carbon Adjustments (BCAs) pela UE aos produtos intensivos em emissão de GEE importados por ela. Os BCAs podem ser considerados uma forma indireta de imposição de imposto sobre o carbono, uma vez que eles transferem parte dos custos de abatimento da UE para países não abatidos por mudanças nos termos de troca nos setores mais afetados. Assim, sua adoção gera redução das emissões brasileiras e das exportações para a UE, principalmente de minerais metálicos, ferro e aço e metais não ferrosos (exportadores e intensivos em emissões).

O GTAP também serve de base para a construção de outros modelos de EGC brasileiros, como o *Total-Economy Assessment* (TEA) construído por Cunha (2019) no software GAMS com o intuito de ser o módulo econômico de um *Integrated Assessment Model* (IAM) do grupo Cenergia da COPPE/UFRJ (O *Computable Framework For Energy, Land and the Environment* - COFFEE). Cunha (2019) desenvolveu o TEA para analisar mudança de dieta alimentar induzida por precificação de emissões de GEE. Os resultados mostraram queda da taxa de

crescimento do PIB nos cenários de precificação de emissões. Todavia, a mitigação das emissões de GEE pode ser efetivada com menores custos sociais caso a sociedade altere seu padrão de consumo alimentar.

Os IAMs são outra abordagem em crescente utilização para análise de políticas ambientais. Segundo Cunha (2019), eles são normalmente usados para projetar crescimento econômico, população, uso de energia, mudanças no uso do solo, futuras emissões de GEE e orçamentos de carbono, determinando soluções ótimas e impactos sobre o clima, meio ambiente, bem-estar e analisando relações de custo-benefício de opções de políticas que poderiam ser implementadas para resolvê-los.

Os modelos de EGC comumente são parte dos IAMs. O *Images du Climat* (IMACLIM) do grupo francês CIRED (*Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*) é um dos IAMs que possui um modelo de EGC como módulo central e foi adaptado para a economia brasileira. Essa adaptação foi realizada por Wills (2013), o IMACLIM-BR: um modelo nacional híbrido de equilíbrio geral, baseado em dados econômicos e energéticos, que permite analisar os efeitos do preço do carbono na economia brasileira em nível setorial ou global, tais como custos setoriais, desemprego, distribuição de renda, comércio e outros indicadores macroeconômicos (WILLS; LEFREVRE, 2012). Esse modelo vem sendo utilizado em diversos trabalhos (LA ROVERE *et al.*, 2015; GROTTERA *et al.*, 2016; LA ROVERE *et al.*, 2016; LEFEVRE, 2016; INSTITUTO ESCOLHAS, 2017) em suas versões estática (IMACLIM-S) e dinâmica (IMACLIM-R) para analisar os impactos de políticas climáticas e energéticas no Brasil.

Wills e Lefreve (2012) utilizaram o Imaclim-BR para analisar os impactos de uma taxa de carbono de 200 R\$/ CO_2e sob diferentes opções de distribuição de receitas de carbono: para diminuir a dívida pública ou para diminuir os impostos sobre a folha de pagamento. Segundo os autores, em termos de produção, o setor de energia seria severamente impactado pelo imposto sobre o carbono.

Wills (2013) simulou os impactos de diferentes taxas de carbono (entre 0 e 200 R\$/ tCO_2e), considerando três diferentes formas de reciclagem da taxa de carbono: para pagar a dívida pública, para diminuir os encargos trabalhistas e para aumentar o poder de consumo das famílias. O autor modelou medidas de mitigação para a indústria pesada e com custos marginais

de abatimento menores que 50 R\$/tCO₂e. Os resultados mostraram que para qualquer nível de taxa de carbono, a reciclagem para reduzir os encargos trabalhistas apresenta melhor resultado em termos de crescimento econômico, pois estimula a criação de novos empregos e, conseqüentemente, aumenta a renda das famílias e seu consumo. Além disso, o autor defende que uma taxa de carbono de 22 R\$/tCO₂e e poderia gerar resultados satisfatórios em termos de crescimento econômico e emissões, mas ressalta que esse valor é bastante sensível às opções de mitigação consideradas.

La Rovere *et al.* (2015) analisam estratégias de descarbonização profundas, embutido em um caminho de rápida economia e desenvolvimento Social. Imposto sobre o carbono na queima de fósseis combustíveis (aumentando de \$ 0 - 168/tCO₂e e entre 2010-2050) com reciclagem de receita por meio redução de impostos sobre o trabalho. Coeficientes técnicos são calibrados de acordo com a variação percentual do uso de energia: valores monetários são os requisitos de investimento total para todas as ações de mitigação consideradas. Até 2030, assumiu-se que a maioria das reduções de emissões serão realizadas por meio de ações fora do setor de energia. No entanto, ações precisarão ser tomadas no a curto prazo para colocar em movimento a grande infraestrutura mudanças estruturais que permitiriam mudanças relacionadas à energia as emissões caem significativamente após 2030, graças a grandes investimentos em energias renováveis e seu armazenamento, eficiência energética eficiência e transporte de baixo carbono (como os carros elétricos). Portanto, Emissões relacionadas à energia do Brasil são esperadas para crescer no futuro imediato, pico em torno 2030 e, em seguida, diminuir até 2050.

Grottera *et al.* (2016) utilizaram o Imacim-BR para analisar os impactos da imposição de imposto de carbono entre 2015 a 2050, estimulando a introdução de uma série de medidas de mitigação discutidas em La Rovere *et al.* (2015). As receitas de carbono foram utilizadas para reduzir impostos sobre a folha de pagamento, estimular a criação de novos empregos ou para compensar o efeito recessivo dos aumentos de preços induzidos por impostos. Como muitas das opções de mitigação apresentam custos de abatimento baixos e até negativos, os resultados mostraram que sua implementação não compromete a produção total e empregos, mesmo que haja setores vencedores e perdedores. Entre os resultados estão redução do emprego em setores intensivos em petróleo e carvão (geralmente mão-de-obra qualificada) e aumento nos setores de biomassa e serviços (geralmente trabalhadores menos qualificados), gerando melhor redistribuição de renda, segundo os autores.

Enquanto isso, La Rovere *et al.* (2016) consideraram medidas de mitigação já acordadas/em implantação pelo governo no país e medidas de mitigação adicionais custos abaixo de US\$20/tCO₂e (cenário MA1) e US\$100/tCO₂e (cenário MA2). O estudo também avaliou os impactos macroeconômicos e sociais no Brasil da adoção de uma taxa global de carbono sobre a queima de combustíveis fósseis, com esses mesmos valores. Os resultados desse trabalho são fruto do PROJETO IES-Brasil para analisar o impacto socioeconômico das metas propostas na COP 21 por meio de diferentes conjuntos de ações de mitigação até 2030. Eles mostram que medidas de mitigação adicionais às já em andamento podem contribuir para um maior crescimento econômico, dependendo da forma como são implementadas.

Ademais, La Rovere *et al.* (2016) defendem que se não houver um esforço adicional de mitigação, a tendência entre 2020 e 2030 é de aumento das emissões, principalmente devido ao ritmo de crescimento da queima de combustíveis fósseis e da agropecuária. Há enorme potencial de abatimento de emissões de GEE no país, por meio de medidas adicionais de mitigação com baixo custo: eficiência energética, uso de fontes renováveis de energia (hidrelétrica e etanol) e de técnicas para uma agropecuária de baixo carbono, mudança de modais de transporte, captura de metano em projetos de saneamento básico e reflorestamento com espécies nativas e de crescimento rápido. Se as medidas selecionadas forem implementadas também com a taxa de carbono, seu impacto sobre o PIB depende do nível necessário para a taxa: até US\$20/tCO₂e, o PIB não reduz; mas com a taxa de US\$100/tCO₂e, haveria redução do crescimento PIB em razão de uma queda na atividade econômica como um todo, gerada pela imposição da taxa.

Lefevre (2016) também estudou cenários de tributação de carbono; além de cenários de exploração do pré-sal em maior ou menor intensidade. Em relação aos cenários de tributação sobre o carbono, os resultados mostraram que os objetivos de mitigação podem ser alcançados com baixo custo econômico desde que seja adotada uma política de tributação de carbono adequada. A reciclagem de receitas de carbono (para redução de impostos sobre a folha de pagamento) é um fator determinante das implicações sobre o bem-estar e distribuição de renda, mas pode implicar perdas significativas de competitividade.

Instituto Escolhas (2017) analisou a adoção de uma matriz elétrica para o Brasil com emissões GEE zero em 2050, considerando hipóteses relativas ao setor de energia em cenário otimista e pessimista em relação ao crescimento econômico do período. Os resultados mostraram redução

das emissões com pequeno impacto econômico (redução pequena da renda e gastos das famílias). O custo da transição não foi significativo nos cenários estudados. Por outro lado, o efeito sobre as emissões de GEE do setor elétrico foi significativo. A conclusão principal deste estudo é que seria possível introduzir um sistema elétrico de emissões zero no longo prazo sem prejudicar o crescimento econômico do país, sem diminuir a renda da população e sem provocar um aumento da desigualdade social. Ao contrário, as maiores participações de fontes como o bagaço e a biomassa florestal tendem a criar empregos de baixa renda no campo e, assim, aumentar a renda das populações mais pobres.

Por fim, em estudo recente, o Projeto PMR Brasil analisou cenários de precificação de carbono via taxação. Modelos parciais forneceram as ofertas e demandas setoriais que foram incorporadas ao modelo nacional de EGC, usado para estimar os resultados macroeconômicos da política. Os resultados indicam maior PIB *per capita*, associado ao maior nível de atividade, aumento no número de empregos e na taxa de investimento, graças a reciclagem de receitas, implementadas em conjunto com a precificação de carbono. O preço de carbono para atingir a contribuição dos setores produtivos para alcançar a NDC brasileira em 2030 ficou em torno de R\$ 26,50/tCO₂e. Essa contribuição levou em conta um ‘gap’ a ser coberto por instrumentos de precificação de carbono em 96 MtCO₂e e 184 MtCO₂e em 2025 e 2030, respectivamente. Esse valor foi obtido considerando o total necessário para alcançar a meta, reduzido da parcela esperada de redução que deve vir do combate ao desmatamento. Uma diferença deste trabalho é que no cenário de referência foram incorporadas políticas de comando e controle. Ou seja, o estudo compara o custo efetividade de diferentes formas de alcançar a meta da NDC (com ou sem precificação). Os resultados indicam que os cenários com precificação apresentam resultados melhores, principalmente porque os cenários consideram opções de reciclagem da receita.

Assim, além de permitir analisar diversos cenários e respectivos resultados sobre os impactos potenciais dos mecanismos de mitigação das emissões de GEE, a crescente literatura de estudos de EGC possibilita criar interconexões entre os estudos e aproximar da incorporação harmônica do problema ambiental associado às emissões na análise de questões econômicas. Ao longo da última década surgiram diversos estudos nacionais sobre os impactos macroeconômicos e sociais de cenários de emissões de GEE no Brasil. Apesar da relevância das emissões dos setores agropecuários e de mudança do uso do solo, a crescente participação das emissões oriundas da matriz energética tem se destacado nos estudos recentes.

Esta seção buscou reunir alguns dos cenários e resultados encontrados em trabalhos recentes sobre os impactos econômicos de políticas voltadas, direta ou indiretamente, para a descarbonização por mecanismos para a redução das emissões de GEE (como taxaço e *cap-and-trade*). A comparação entre os cenários e resultados desses trabalhos e da presente tese traz ganhos à análise das simulações aqui realizadas ao permitir uma visão mais abrangente da conjuntura atual e de trajetórias possíveis e eficácia de diferentes políticas energéticas e ambientais no Brasil.

3.2. Modelo

O modelo de EGC desenvolvido nesta tese é o BEETS (*Brazilian Energy Emissions Trading Schemes model*), que parte da estrutura teórica dos modelos BeGreen e REGIA. Do BeGreen são incorporados o módulo de especificação energética; o módulo ambiental, que permite a projeção de políticas de redução de emissões pela contabilidade de emissões de GEE (CO_2e), separando-as por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias); e a estrutura de dinâmica recursiva. Do REGIA é incorporado o módulo de transição do uso da terra, permitindo, assim, abranger todas as emissões de GEE na economia brasileira.

Modificações foram realizadas para tornar o modelo capacitado para análises recentes das mudanças de composição da matriz energética, dentre elas, a desagregação do setor de eletricidade, com tecnologias de produção específicas por fonte de geração, e a incorporação dos dados de emissões mais recentes. Outro avanço na especificação teórica do modelo é a incorporação de um módulo para analisar os efeitos de políticas de “*cap-and-trade*” entre setores da economia brasileira, especialmente os setores de energia. Assim, pode-se dizer que o modelo elaborado nesta tese permite analisar políticas de mitigação das emissões de GEE em toda economia, especialmente nos setores energéticos.

O modelo desenvolvido é composto por 138 produtos, além de cinco componentes da demanda final (consumo das famílias, consumo do governo, investimento, exportações e estoques), três fatores primários (capital, trabalho e terra), dois setores de margens (comércio e transportes), importações por produto, um agregado de impostos indiretos e um agregado de impostos sobre a produção. Os aspectos metodológicos do modelo, brevemente apresentados a seguir, foram embasados em Horridge (2006), Magalhães (2013) e Carvalho (2014).

O modelo é do tipo Johansen, cuja estrutura matemática é representada por um conjunto de equações linearizadas e as soluções são obtidas na forma de taxas de crescimento (JOHANSEN, 1960). O modelo foi calibrado para o ano de 2015, que representa os dados mais recentes da Matriz de Insumo Produto fornecido pelo Sistema de Contas Nacionais⁵.

A Figura 3 apresenta a estrutura hierárquica de produção. A tecnologia de produção setorial, que apresenta estrutura de substituição entre insumos energéticos, é segmentada em três níveis de otimização, em que cada setor produz um produto, empregando insumos intermediários de origem doméstica e importada, fatores primários e um composto energético. No primeiro nível, as firmas escolhem a composição de insumos energéticos de dois compostos: renovável e não renovável, compostos pela combinação entre insumos energéticos a partir de uma função de Elasticidade de Substituição Constante (CES).

No segundo nível, esses dois compostos são combinados a partir de uma função CES para formar um composto energético. Nesse nível também ocorre a combinação dos fatores primários terra, capital e trabalho e dos demais produtos (insumos intermediários não energéticos) por meio de funções do tipo CES. No terceiro nível é adotada uma especificação de Leontief em que os fatores primários, os insumos intermediários não energéticos e os insumos energéticos são combinados em proporções fixas. Em outras palavras, as firmas escolhem uma combinação de insumos que minimiza o custo de produção sujeito a tecnologias de retorno constantes de escala.

No caso do setor Transmissão, Distribuição e Armazenagem (TDA) (Figura 4), há algumas particularidades: no primeiro nível, há um terceiro componente entre os insumos energéticos: a geração de eletricidade, composto pela escolha entre os diferentes tipos de geração a partir de uma CES. No nível seguinte, o composto geração de eletricidade e os outros dois compostos (renovável e não renovável) são combinados também por meio de uma função CES. Os tipos de geração considerados foram Usinas Hidroelétricas (UHE), Pequenas Centrais Hidroelétricas

⁵ O Sistema de Contas Nacionais (SCN) é elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e apresenta informações sobre a geração, a distribuição e o uso da renda no país. Entre elas, as Tabelas de Recursos e Usos (TRU), que mostram os fluxos de oferta e demanda dos bens e serviços e a geração da renda e do emprego em cada atividade econômica. Elas foram utilizadas como insumos no modelo e estão disponíveis em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=resultados>.

Também foram utilizadas informações da Matriz de Insumo-Produto 2015, elaborada a partir das TRU, cujos dados estão disponíveis em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9085-matriz-de-insumo-produto.html?=&t=resultados>.

(PCH), Usinas Eólicas (EOL), Usinas Solares (SOL), Usinas Termoelétricas movidas a Biomassa (BIO), Usinas Termoelétricas movidas a carvão (UTC), Usinas Termoelétricas movidas a Gás Natural (UTG), Usinas Termoelétricas movidas a Óleo Diesel (UTOD), Usinas Termoelétricas movidas a Óleo Combustível (UTOC), Usinas Termoelétricas movidas a outros combustíveis fósseis e efluentes industriais (UTOF) e Usinas Termonucleares (UTN).

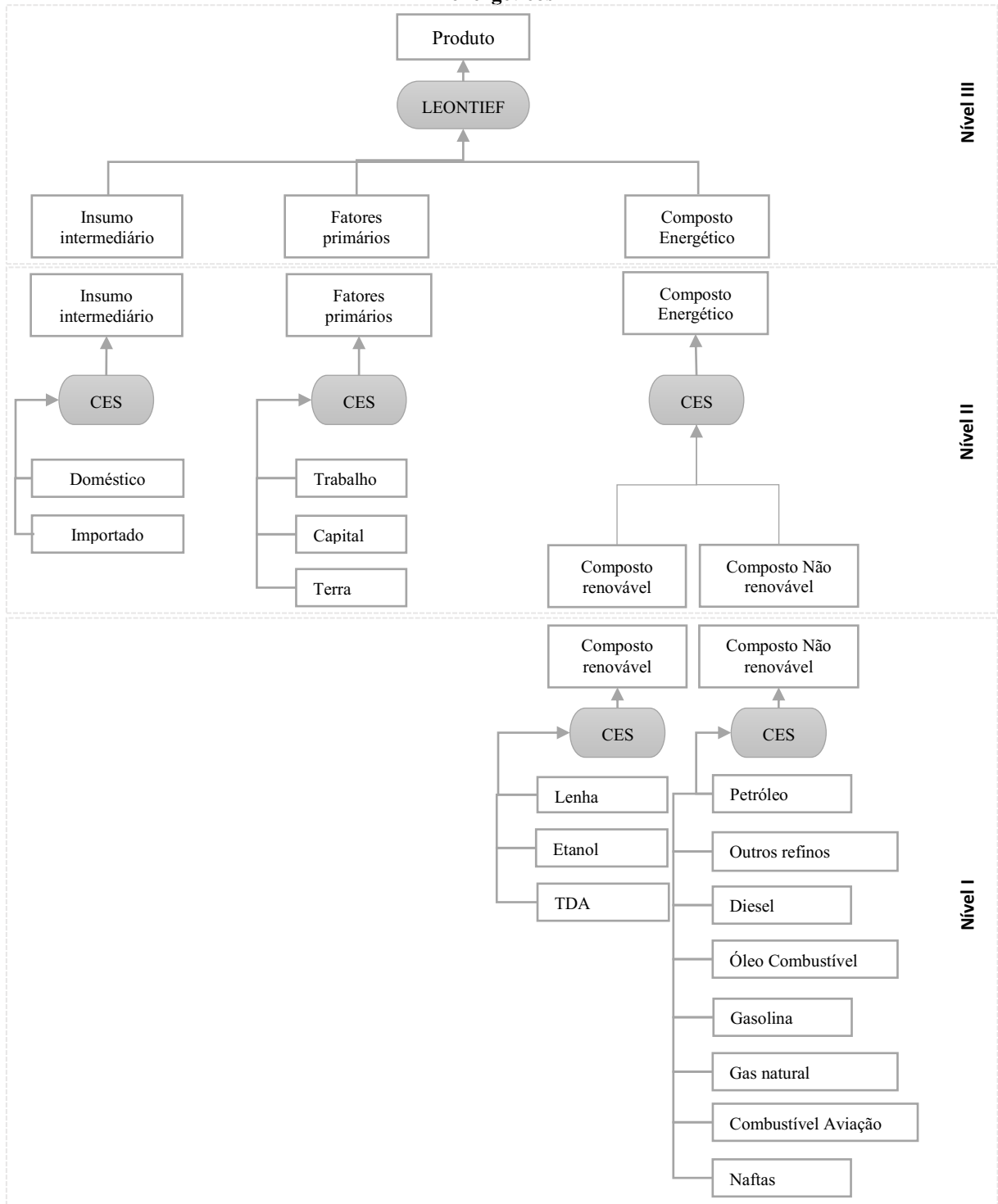
Em uma função de produção baseada em uma CES, a taxa de crescimento dos preços de um setor é uma soma ponderada das participações nos custos das taxas de crescimento dos preços dos insumos. A taxa de crescimento da demanda por insumo linearizada é dado por:

$$x(i,j) = \sigma [p(j) - p(i,j)] + y(i) \quad (1)$$

em que $x(i,j)$ é a taxa de crescimento da demanda pelo insumo i usado no setor j e $y(j)$ é a taxa de crescimento do produto no setor. Assim, sob uma função CES, as equações de demanda por insumos podem ser decompostas em dois efeitos, a saber: efeito substituição, medido pelo desvio da taxa de crescimento do preço do insumo em relação ao preço ponderado pela participação nos custos de todos os insumos multiplicado pela elasticidade de substituição, e efeito renda, que mede a taxa de crescimento da produção setorial.

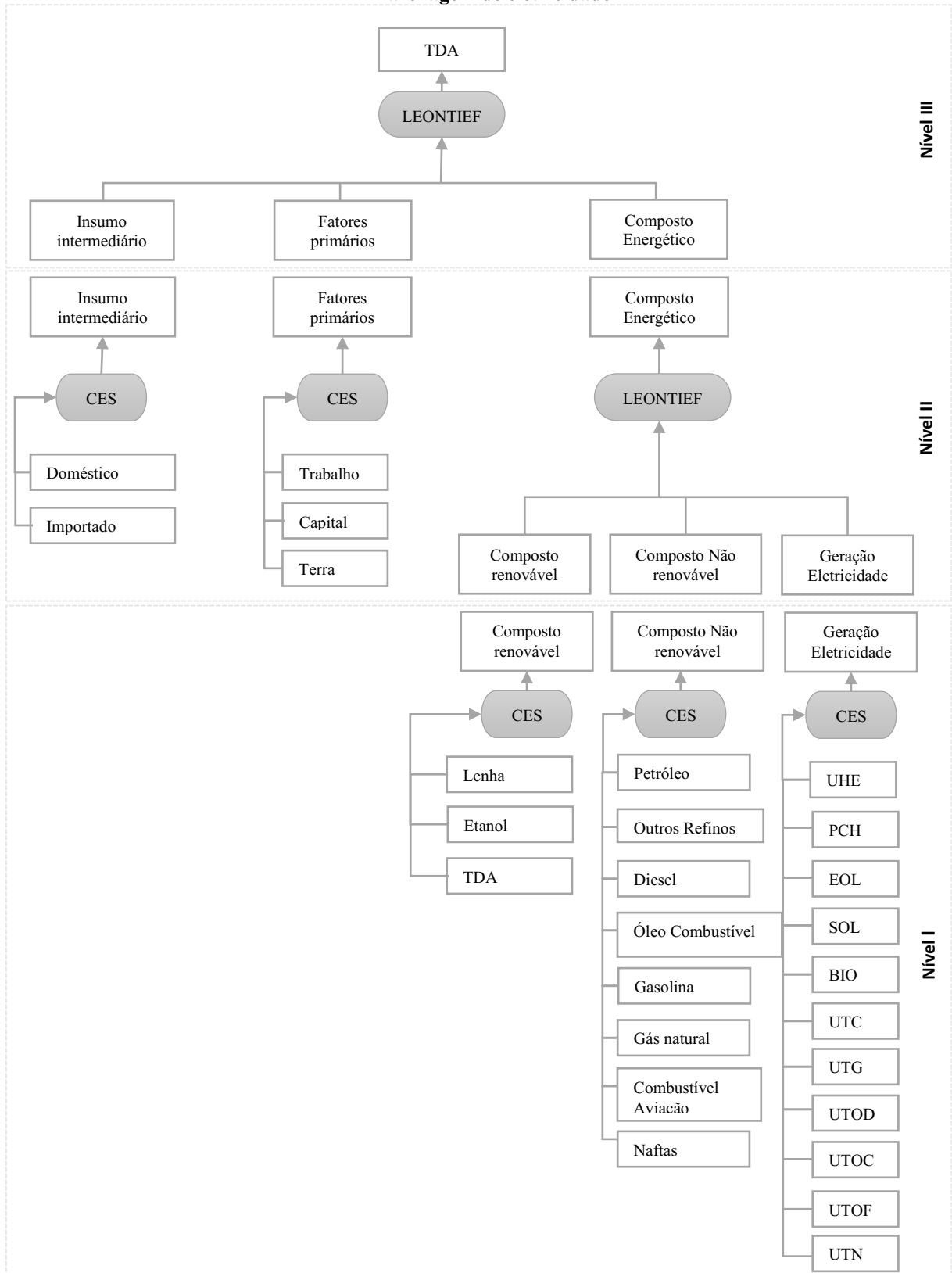
A utilização de funções CES na tecnologia de produção decorre da adoção da hipótese de Armington (ARMINGTON, 1969) para a diferenciação de produtos, implicando condições de substituição imperfeita para bens de diferentes origens. Dessa forma, considera-se que os bens de origem doméstica e importada são substitutos imperfeitos entre si. Se o parâmetro de elasticidade de substituição assume o valor 1, as demandas comportam-se como uma função Cobb-Douglas hierarquizada, em que mudanças nos preços relativos não alteram a participação nos gastos. Se o parâmetro assume o valor zero, as demandas comportam-se como uma função Leontief, em que as proporções das quantidades são constantes independentemente do preço.

Figura 3: Estrutura hierárquica da tecnologia de produção: estruturas de substituição entre compostos energéticos



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4: Estrutura hierárquica da tecnologia de produção do setor de Transmissão, Distribuição e Armazenagem de eletricidade



Fonte: Elaboração própria.

Conforme dito, um avanço em relação ao BeGreen é a incorporação de um módulo do uso da terra. Este módulo foi adaptado de Carvalho (2014) e Silva (2015). Como ambos tem por base o modelo regional TERM, foi necessário adaptá-lo para incorporá-lo ao modelo nacional utilizado. As mudanças incorporadas permitiram que o fator terra pudesse ser alocado entre os diferentes setores agrícolas de acordo com os diferenciais de remuneração (Figura 5). Os dados relativos à transição do uso da terra são provenientes do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias⁶). Com os dados disponíveis foi possível dividir o uso da terra em quatro tipos: i) lavoura, ii) pasto, iii) floresta plantada e iv) área não utilizada. O Quadro 2 mostra quais setores são responsáveis por cada tipo de uso.

O quarto tipo, área não utilizada, é definido como a área total menos as áreas dos outros três grupos. Assim, inclui, além da floresta natural, todas as outras áreas que não são utilizadas na agropecuária, tais como áreas urbanas, montanhas, estradas, reservatórios, rios, entre outros. De acordo com Carvalho (2014), uma vez que tais áreas mudam mais lentamente do que as florestas naturais, é possível assumir que a mudança nesse tipo de uso da terra seja uma *proxy* para medir o desmatamento para a expansão da agropecuária.

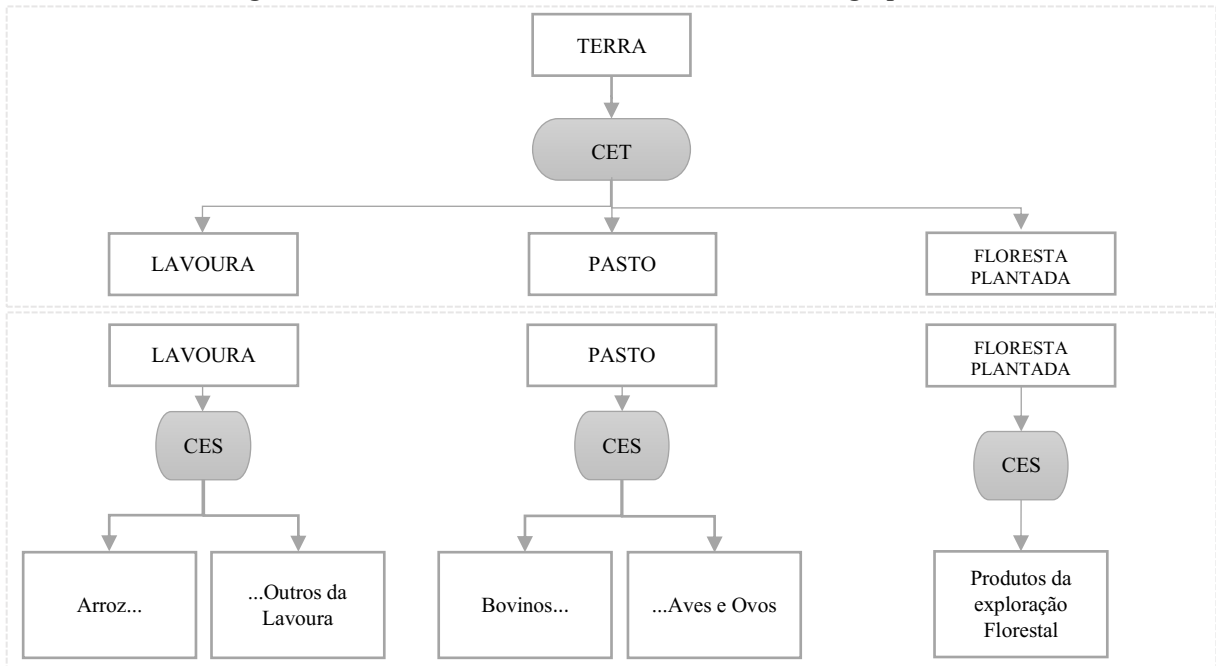
Quadro 2: Descrição dos setores no uso do fator terra

Uso da terra	Setores
Lavoura	Arroz, trigo e outros cereais; Milho em grão; Algodão e outras fibras; Cana-de-açúcar; Soja em grão; Outros da lavoura temporária; Laranja; Café em grão e Outros da lavoura permanente.
Pasto	Bovinos e outros animais; Leite de vaca e de outros animais; Suínos e Aves e Ovos
Floresta plantada	Produtos da exploração florestal

Fonte: Elaboração própria.

⁶ O projeto produz mapas anuais de cobertura e uso do solo para o Brasil tendo como base a plataforma Google Earth Engine. Os dados estão disponíveis em: <<https://mapbiomas.org/download>>.

Figura 5: Alocação do fator terra entre usos e setores agropecuários



Fonte: Elaboração própria.

No primeiro nível, cada uso do fator terra (lavoura, pasto e floresta plantada) é distribuído entre os setores agropecuários de acordo com uma função CES. Na forma percentual:

$$l_i = \alpha_{ind}(p_i - p) + l \quad (2)$$

Em que:

l_i é a mudança percentual da demanda por terra alocada para o produto i ;

l é a variação percentual do insumo total terra;

α_{ind} é um parâmetro de sensibilidade, que mede a resposta da demanda de terra em relação às variações da remuneração da terra;

p_i é a mudança percentual na remuneração da terra para o produto i ;

p é a remuneração média da terra para todos os produtos i .

Portanto, se a remuneração da terra no setor i for maior que a remuneração média da terra, ou seja, se $p_i > p$, deve haver aumento do respectivo uso da terra no setor em questão.

No segundo nível, os diferentes usos da terra são combinados por meio de uma função de elasticidade constante de transformação (CET) formando a área total, ou seja, o fator terra desagregado nos diferentes usos, que é inicialmente pré-determinado. Assim, a demanda por

terra no modelo responde às variações da remuneração do fator em cada setor e sua variação total por uso da terra é dada por:

$$l = \sum_k S_k l_k \quad (3)$$

Em que S_k é a distribuição da remuneração entre os diversos usos da terra, k , e l_k é a mudança percentual da demanda por terra alocada para o uso k .

O limite físico da área total é dado por:

$$\sum_k H_k l_k = 0 \quad (4)$$

Em que H_k é a distribuição em hectares.

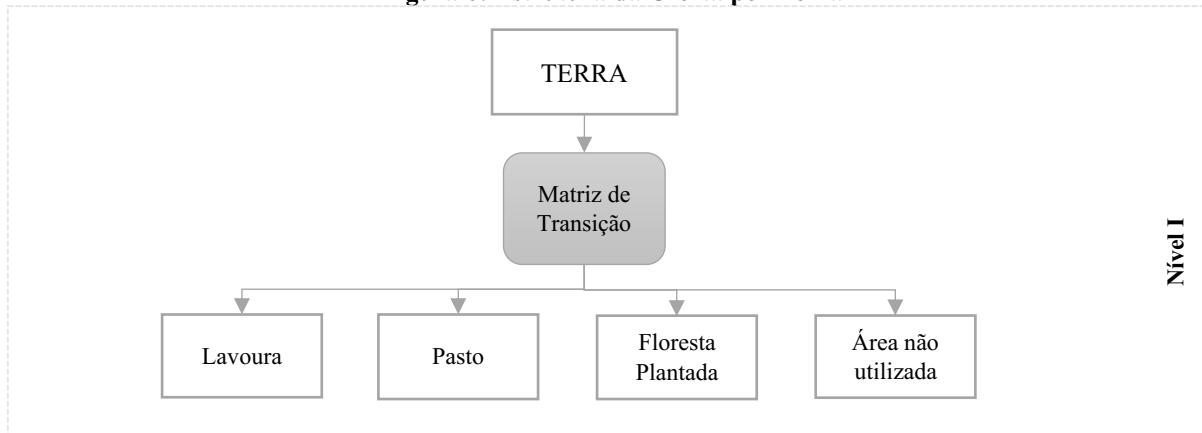
Para manter a área total constante, utiliza-se uma variável física em hectares para cada uso da terra:

$$n_k = l_k + \mu \quad (5)$$

Em que n_k é a oferta de terra e μ é calculado para garantir que a oferta física total de terra seja fixa. Dessa forma, a demanda pelo fator terra, segundo os diferentes usos, é ligada à oferta de terra no modelo. A demanda por terra x_k influencia o processo de conversão da terra entre os usos, ou seja, o lado da oferta, n_k . Em resumo, esse mecanismo em que a demanda por terra se iguala a oferta de terra garante o equilíbrio no mercado de terra e fixa a oferta total de terra disponível.

A estrutura da oferta de terra segundo os diferentes usos e o ajuste dinâmico no mercado de terra são representados na Figura 6.

Figura 6: Estrutura da Oferta por Terra



Fonte: Elaboração própria.

Para representar o processo de conversão entre os tipos de uso da terra recorre-se ao uso de uma matriz de transição, que representa as possibilidades de transformação dos diferentes usos do fator entre dois períodos de tempo pré-definidos. No presente trabalho, representado pelos anos de 2015 e 2016. Segundo Carvalho (2014), esta matriz torna possível capturar o fato de que as terras são utilizadas em ordem decrescente de produtividade e a conversão de terra em uso produtivo é limitada. Além disso, o processo econômico de conversão da terra segue a lógica de que as florestas inicialmente são convertidas em áreas de pasto e, após algum tempo, tornam-se aptas à conversão para lavoura.

Ademais, para ajustar a matriz de transição para o próximo período, o estoque corrente de terra em t é distribuído para o próximo ano, $t + 1$, mediante uma função CES. Tanto a matriz de transição como a oferta de terra são ajustadas anualmente. A proporção em que ocorrem as mudanças entre os usos da terra são modeladas como uma função da variação da rentabilidade de cada tipo de terra:

$$S_{pk} = \mu_p * R_{pk} * P_k^{\beta_{ind}} * M_k \quad (6)$$

Em que:

S_{pk} é a participação do tipo de terra, p , que se transforma em k ;

μ_p é uma variável de folga, ajustada para garantir que $\sum_k S_{pk} = 1$;

R_{pk} uma constante de calibração, representa o valor inicial de S_{pk} ;

$P_k^{\beta_{ind}}$ é o aluguel médio unitário ganho por tipo de terreno k ;

β_{ind} é um parâmetro de sensibilidade, que mede a resposta da oferta de terra em relação às variações da remuneração;

M_k é uma variável de deslocamento cujo valor inicial é 1.

Enquanto isso, a composição da demanda por investimentos é dividida em dois níveis. Essa categoria da demanda final é responsável pela formação bruta de capital fixo. A escolha entre os insumos utilizados no processo de criação de capital ocorre devido a um processo de minimização de custos sujeito à estrutura de tecnologia hierarquizada. No primeiro nível ocorre a combinação entre bens de origem doméstica e importada por meio de uma função CES. No segundo nível, o nível de produção do capital do setor é definido por um conjunto dos insumos intermediários compostos agregados a partir de uma função tipo Leontief.

As equações da demanda das famílias, composta por 11 famílias representativas, derivam de um problema de maximização de utilidade, que segue duas etapas hierarquizadas. No primeiro nível ocorre a substituição CES entre bens domésticos e importados e no segundo nível ocorre uma agregação Klein-Rubin dos bens compostos. Dessa forma, a utilidade derivada do consumo é maximizada segundo essa função de utilidade: tem-se um Sistema Linear de Gastos (LES), em que a participação do gasto acima do nível de subsistência representa uma proporção constante do gasto total de subsistência familiar para cada bem. Cada composto é definido por uma forma funcional Elasticidade de Substituição Constante (CES), permitindo a substituição imperfeita entre os bens domésticos e importados.

Enquanto isso, a resposta da demanda externa a alterações no preço *free on board* (F.O.B.) das exportações é representada por um vetor de elasticidades. A demanda externa pelo bem doméstico depende do preço em moeda estrangeira e das variáveis de deslocamento, normalmente exógenas. Essas variáveis permitem calcular o preço do bem doméstico para todos os bens do modelo. Todos os bens são definidos com curvas de demanda negativamente inclinadas nos preços no mercado mundial.

A demanda do governo pode variar conforme as mudanças do consumo privado real ou pode ser definida exogenamente. Já a demanda por variação de estoques é proporcional ao nível de

produção do bem e a demanda do governo (agregada nas esferas municipal, estadual e federal) não é modelada explicitamente, mas pode seguir a renda regional ou um cenário exógeno.

A estrutura dinâmica recursiva tem sua especificação baseada na modelagem do comportamento intertemporal e em resultados de períodos anteriores (*backward looking*). As condições econômicas correntes são endogenamente dependentes dos períodos posteriores, mas permanecem não afetadas por expectativas de períodos futuros (*forward-looking*). Deste modo, o investimento e o estoque de capital seguem mecanismos de acumulação e de deslocamento intersetorial a partir de regras pré-estabelecidas, associadas à taxa de depreciação e taxas de retorno.

Para cada ano da simulação, assume-se que a disposição dos indivíduos em investir, em relação aos aumentos na taxa de retorno esperada, determina as taxas de crescimento do capital em cada indústria e, conseqüentemente, o nível de investimento (DIXON; RIMMER, 1998). Dessa forma, a taxa de crescimento do capital no ano t será maior que sua taxa normal (taxa de crescimento do capital no estado estacionário) quando a taxa de retorno esperada pelos investidores for superior a taxa de retorno normal, pois o crescimento do capital em uma indústria específica no ano t é limitado pelas percepções de risco do investidor.

O mercado de trabalho possui um mecanismo de ajuste intertemporal envolvendo as variáveis salário real, emprego atual e emprego tendencial. Nesse mercado, a taxa de desemprego determina o salário real e é determinada pelo nível de atividade econômica. Quando o nível de emprego em $t+1$ exceder em $x\%$ o emprego tendencial (definido exogenamente), o salário real aumentará em $\lambda x\%$. Dada a relação negativa entre emprego e salário real no mercado de trabalho, esse aumento do salário real ajustará o nível de emprego nos períodos seguintes fazendo convergir para o nível tendencial.

O Modelo opera com equações de equilíbrio de mercado para todos os bens consumidos (domésticos e importados) e equilíbrio no mercado de fatores de produção (terra, capital e trabalho). Os preços de compra para cada um dos grupos de uso (produtores, investidores, famílias, exportadores e governo) são compostos pela soma dos valores básicos, acrescidos de impostos (diretos e indiretos) sobre vendas e das margens. Os impostos sobre vendas são tratados como taxas *ad-valorem* sobre os fluxos básicos. As demandas por margens (transporte e de comércio) são proporcionais aos fluxos de bens aos quais as margens estão conectadas.

Por fim, o módulo ambiental acoplado do *BeGreen* foi inspirado no *modelo Monash Multi-Regional Forecasting-Green* (MMRF-Green), apresentado em detalhes por Adams, Horridge e Parmenter (2000). Sua incorporação permite tratar as emissões de forma detalhada, separando-as por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias), e atividade emissora. As emissões no modelo estão associadas ao uso de combustíveis, sendo 8 combustíveis no total, ou ao nível de atividade do setor. A emissão proveniente do uso de combustíveis é modelada como diretamente proporcional a seu uso, assim como as emissões de atividade em relação ao produto das indústrias relacionadas. Não há no modelo inovações tecnológicas endógenas para o caso do uso de combustíveis fósseis, que, por exemplo, permitam que a queima de carvão libere menos CO_2e por tonelada utilizada. Mas os setores podem reduzir suas emissões pela substituição de insumos energéticos, via mudança de preços relativos.

O modelo calcula endogenamente o preço do carbono, ou custo de redução de emissões, pela imposição de metas de emissões de GEE. Esse módulo é responsável pela transformação destes preços ou impostos físicos da taxaço de carbono em alíquotas *ad-valorem*, que alimentam o núcleo do modelo. A partir dos resultados de determinadas variáveis (uso de combustível pelos setores, nível de atividade e consumo das famílias), o módulo ambiental calcula as variações nas emissões. Para converter impostos específicos de CO_2e em impostos *ad valorem* normais é utilizado o índice:

$$E.I/P.Q \quad (7)$$

Em que:

$E.I$ é o valor indexado das emissões: E corresponde ao total de emissões e I é o índice de preços;

$P.Q$ é o valor da base tributária *ad valorem* (preço x quantidade) que corresponde ao o valor básico de uso para os combustíveis e valor da produção para as indústrias ou o valor total do consumo das famílias para as atividades.

Uma vez que a mudança normal na alíquota *ad valorem*, v , corresponde a um aumento de R\$1 por tonelada em um imposto de emissão específico, s , a receita do imposto pode ser reciclada. O módulo de emissões permite ainda incorporar um mercado de emissões (*cap-and-trade*), tornando possível definir metas setoriais de emissão e permitir a comercialização entre os setores. Após definir o limite de emissões setoriais, $xgascap$, o modelo calcula endogenamente

a redução necessária das emissões de cada setor para alcançar atender ao limite imposto. O modelo permite que as emissões sejam alocadas entre os setores por meio de um mercado de emissões comerciais que podem ter um valor inicial exógeno sendo posteriormente atualizadas endogenamente para representar o custo necessário para alcançar as metas setoriais.

3.3. Base de Dados

A Figura 7 representa o banco de dados de insumo-produto do modelo, em que as dimensões das matrizes, que são definidas por índices (s, c, m, i), correspondem aos conjuntos da Tabela 2. As matrizes apresentam os valores dos fluxos, assim determinados:

- Valores básicos = preços de produção (para bens produzidos domesticamente), ou preços CIF (importações)
- Valores de entrega = básicos + margens
- Valores de compra = básicos + margens + impostos = entrega + impostos

Os fluxos básicos (e.g. V1BAS) representam demanda a preços básicos (valor de produção) dos bens (“c” em COM), de origem doméstica ou importada (“s” em SRC), pelas 138 indústrias (“i” em IND) e pelos 5 demandantes finais (famílias, investimento, exportações, governo e estoques). Em que V1BAS é o consumo intermediário –firmas), V2BAS é o investimento ou formação bruta de capital fixo, cujos valores foram distribuídos a partir do V1CAP. Os coeficientes representativos das margens (e.g. V1MAR), que representam a demanda por serviços de comércio e de transporte pelos setores e usuários finais (exceto estoque) e os coeficientes de impostos (e.g. V1TAX), que tratam da soma dos valores de IPI, ICMS e “Outros impostos menos subsídios” para todos os usuários (menos estoque), foram distribuídos por origem (doméstico e importado), a partir das tarifas calculadas sobre o total do valor básico.

Tabela 2: Principais conjuntos do Modelo BEETS

Índice	Conjunto	Descrição	Dimensão
s	SRC	Origem doméstica ou importada	2
c	COM	Bens	138
m	MAR	Margens (comércio e transporte)	2
i	IND	Setores	138

Fonte: Elaboração própria.

Figura 7: Estrutura da Base de Dados do Modelo BEETS

		MATRIZ DE ABSORÇÃO					
		1	2	3	4	5	6
		Produtores	Investidores	Famílias	Exportações	Governo	Estoques
	Dimensões	i	i	1	1	1	1
Fluxos Básicos	c x s	V1BAS	V2BAS	V3BAS	V4BAS	V5BAS	V6BAS
Margens	c x s x m	V1MAR	V2MAR	V3MAR	V4MAR	V5MAR	n/a
Impostos	c x s	V1TAX	V2TAX	V3TAX	V4TAX	V5TAX	n/a
Trabalhos	1	V1LAB					
Capital	1	V1CAP					
Terra	1	V1LND					
Impostos sobre a Produção	1	V1PTX					
Outros Custos	1	V1OCT					

	MATRIZ DE PRODUÇÃO	TARIFAS DE IMPORTAÇÃO
Dimensão	i	1
c	MAKE	V0TAR

Fonte: Adaptado de Horridge (2006, p. 9).

Em relação aos fatores de produção, a remuneração do fator terra dos setores agropecuários foi extraída do Censo Agropecuário de 2017, cujos dados foram agregados entre os setores do BEETS e deflacionados para o ano base do modelo (2015), conforme procedimento realizado por Tanure (2020). Além disso, as 11 famílias representativas foram desagregadas no modelo por extratos de renda e perfis de gastos por unidade familiar a partir de dados da Pesquisa de Orçamento Familiar (POF) de 2017-2018 (IBGE, 2021c), conforme Cardoso *et al.* (2021). Os principais parâmetros utilizados no modelo estão sintetizados na Tabela 3.

Por fim, para o cálculo do estoque de capital da economia, assumiu um crescimento econômico no estado estacionário de 2%. Com esses dados, foi calculada a taxa bruta de investimento (razão entre valor a preço de mercado do investimento e o estoque de capital). Com esse valor, foram calibradas a tendência comportamental para todas as indústrias ao longo do tempo e a taxa de depreciação, além da taxa normal bruta de retorno do investimento (MAGALHÃES,

2013). Em linhas gerais, o estoque de capital em cada período cresce em proporção à taxa de investimento no início do período menos uma dedução para a depreciação, enquanto o investimento depende das taxas de retorno e essas, por sua vez, convergem para taxas de retorno reais por meio de um mecanismo de ajuste parcial. No modelo dinâmico, como o resultado de cada ano é composto por mudanças entre esse ano e o ano seguinte, a mudança no investimento nesse período afeta a taxa de crescimento do capital no período seguinte.

Tabela 3: Parâmetros de elasticidades no modelo BEETS

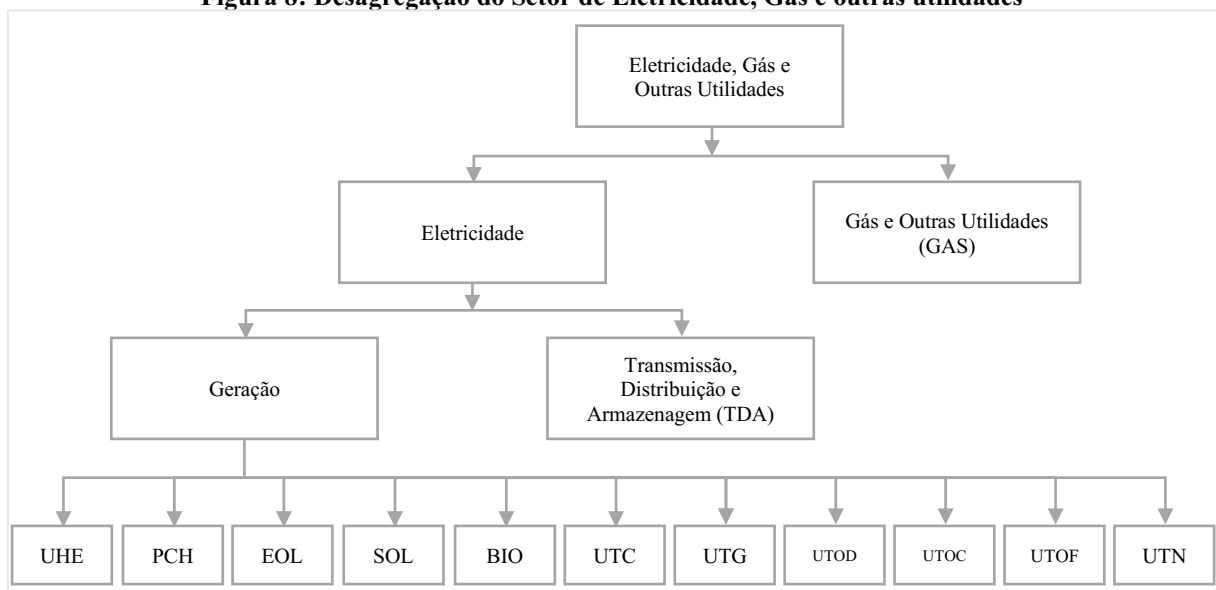
Parâmetro	Dimensão	Descrição	Valor	Fonte
SIGMA1PRIM	IND	Elasticidade de substituição dos fatores primários	0,28 a 1,55	Domingues <i>et al.</i> (2009)
SIGMA1LAB	IND	Elasticidade de substituição do trabalho	0,02	Domingues <i>et al.</i> (2009)
SIGMA1ARM	COM	Elasticidade de Armington para bens intermediários	0 a 13,7	Kume e Piani (2011)
SIGMA2ARM	COM	Elasticidade de Armington para bens de investimento	0 a 13,7	Kume e Piani (2011)
SIGMA3ARM	COM	Elasticidade de Armington para demanda das famílias	0 a 13,7	Kume e Piani (2011)
FRISCH	1	Parâmetro de Frisch	-1,94	Almeida (2011)
EPS	COM	Elasticidade de gastos das famílias	0,02 a 1,33	Hoffmann (2010)
EXP_ELAST	COM	Elasticidade de substituição entre domésticos e importados	0,38 a 2,07	Domingues <i>et al.</i> (2009)
SIGMA1OUT	IND	Elasticidade de transformação CET	0,5	
EXP_ELAST_NT	1	Elasticidade de demanda de exportação coletiva	1	
DPRC	IND	Taxa de Depreciação	3,40%	
QRATIO	IND	Razão investimento/capital (máxima/tendência)	4	
ALPHA	IND	Elasticidade do investimento	4,8	Perobelli (2004)
EMPRAT	1	razão emprego/tendência em estado estacionário	1	
ELASTWAGE	1	Elasticidade do salário real em relação ao emprego	0,66	Gonzaga e Corseuil (2001)
RNORMAL	IND	Taxa de retorno normal bruta	12,50%	
GRETEXP	IND	Taxa Bruta de Retorno Esperada	12,50%	
GROTREND	IND	Razão investimento/capital (tendência)	6% a 9%	
EIPQ	FUEL*SRC*FUELUSER	Emissões indexadas por real de uso	0 a 10	
EIPZ	FUELUSER	Emissões indexadas por real de produção	0 a 1,4	
ETAXRATE	FUELX*SRC*FUELUSER	Taxa específica de imposto sobre energia nova	0	
ENDX	1	Preço ao qual o imposto de gás é indexado	1	
ETXR	FUELX*SRC*FUELUSER	Taxa específica de energia nova	0	
ETAX	FUELX*SRC*FUELUSER	Receita do imposto de energia	0	
COMP	1	Taxa de compensação ad valorem	0	
GACT	IND	Resposta das emissões ao imposto CO_2e/ton	1	
SUBENER	IND	Elasticidade de substituição entre fontes de geração de eletricidade	5	Diniz (2019)
SUBCOMB	1	Elasticidade de substituição entre Gasolina e Etanol	1,45	Farina (2010)
SIGMAGREEN	COM*IND	Elasticidade de substituição intermediária geral	0	
SLND	1	Elasticidade de Oferta da Terra	0,5	

Fonte: Elaboração Própria.

3.3.1. Desagregação do setor “Eletricidade, Gás e outras utilidades”

Como representado na Figura 8, o setor “Eletricidade, Gás e Outras Utilidades”, presente na Matriz de Insumo Produto (IBGE, 2019), foi desagregado em Eletricidade e Gás e outras utilidades (GAS). Em seguida, o setor de Eletricidade foi subdividido entre Geração e Transmissão, distribuição e armazenagem (TDA). Por fim, o setor Geração foi novamente subdividido nos setores UHE, PCH, EOL, SOL, BIO, UTC, UTG, UTOD, UTOC, UTOF, UTN. Assim, foram criados 13 novos setores a partir da desagregação do setor original.

Figura 8: Desagregação do Setor de Eletricidade, Gás e outras utilidades



Fonte: Elaboração própria.

Para dividir o valor da produção de cada setor entre Eletricidade e GAS foram utilizados dados do consumo final energético do BEN (EPE, 2016), cujo ano base é 2015. Essa estrutura busca representar o atual modelo do setor elétrico, regulamentado pela Lei nº 10.848 de 2004. Em seguida, o valor da produção de Eletricidade foi subdividido em Geração e TDA por meio de dados do Relatório de Evolução das Tarifas Residenciais (ANEEL, 2020). A Tabela 4 apresenta o resultado desta desagregação.

Em termos práticos, o ONS é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, localizados principalmente na região Norte, mas que vêm sendo gradativamente interligadas ao SIN. Esse sistema permite o intercâmbio da energia produzida em todo território nacional, transportadas através de linhas

interligadas de transmissão. O SIN disponibiliza energia ao sistema de distribuição de energia elétrica que, por sua vez, reduz o nível de tensão proveniente do sistema de transmissão aos níveis entregues aos consumidores finais. Assim, apesar da participação significativa dos consumidores livres, uma vez que o Brasil possui mais de mil consumidores livres cujo consumo de energia corresponde a aproximadamente 18% do consumo total, quase toda energia comercializada no Brasil utiliza o sistema de transmissão/distribuição e, portanto, integra o SIN (ANEEL, 2017).

Tabela 4: Desagregação setorial

Descrição	Valor da produção (%)
Gás e outras utilidades	10%
Transmissão, Distribuição e Armazenagem	51%
Geração	39%

Fonte: Elaboração própria com base em dados da EPE (2016) e ANEEL (2020).

E, por fim, para desagregar a geração de energia elétrica por fonte, utilizou-se dados de capacidade instalada de geração elétrica por fonte (EPE, 2016) conjugados a dados dos preços dos leilões de energia elétrica (CCEE, 2019), obtendo os percentuais da Tabela 5.

Tabela 5: Valor da produção de energia elétrica por fonte geradora

TIPO DE GERAÇÃO	Descrição	Valor da produção (%)
UHE	Usina hidroelétrica	55,95%
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas	4,27%
EOL	Usina Eólica	4,86%
SOL	Usina Solar	0,02%
BIO	Termoelétrica Biomassa	11,14%
UTC	Termoelétrica Carvão	2,76%
UTG	Termoelétrica Gás Natural	10,18%
UTOD	Termoelétrica Óleo Diesel	4,09%
UTOC	Termoelétrica Óleo Combustível	3,45%
UTOF	Termoelétrica Outros Fósseis	1,49%
UTN	Usina Nuclear	1,80%

Fonte: Elaboração própria com base em dados da EPE (2016), CCEE (2019) e FGV (2019).

Os valores apresentados na Tabela 5 são compostos por médias do preço de venda (R\$/MWh) ponderadas pela quantidade de energia negociada por contrato (MW médio) dos empreendimentos contratados vigentes em 2015. Para a energia solar foram utilizados os preços relativos a leilões realizados até 2015, cuja energia seria ofertada a partir de 2017, dado que só existem leilões de energia solar com início de suprimento a partir desse ano. Ademais, no caso

na energia nuclear, que não é contemplada pelo sistema de leilões, utilizou-se os preços do relatório de conjuntura do setor elétrico da FGV (2019).

Assim, tais percentuais foram utilizados para distribuir os valores da produção do setor original, “Eletricidade, Gás e Outras Utilidades”, entre os 13 setores derivados. Entretanto, cada setor derivado possui sua própria tecnologia de produção, consumindo diferentes insumos intermediários, não sendo bem representada pela média do consumo do setor original. Por isso, para melhor representatividade, buscou-se detalhar a tecnologia de produção de cada setor derivado, identificando fluxos específicos de consumo de insumos de consumo significativo nos respectivos processos produtivos setoriais.

Para identificar os produtos consumidos por cada setor de eletricidade recorreu-se a trabalhos que analisam os custos de geração de eletricidade por fonte e dados do BEN (EPE, 2016). Nesse sentido, as simplificações adotadas foram embasadas nos trabalhos de Tourkolias e Mirasgedis (2011) e Markaki *et al.* (2013), que mostraram em quais setores concentram-se os gastos com operação e manutenção para geração de eletricidade por diferentes fontes. Além disso, utilizou-se também o Relatório de Formação de Custos e Preços de Geração e Transmissão de Energia Elétrica (ANEEL, 2015), que detalhou os custos de funcionamento dos setores de energia e transmissão.

Para o caso de setores pouco expressivos ou setores em que não foi possível identificar produtos específicos, manteve-se o consumo intermediário proporcional ao valor da produção calculado. Quando possível, os produtos foram diretamente alocados em setores específicos conforme detalhado a seguir.

Entre os produtos da Exploração Florestal e da Silvicultura, por exemplo, destaca-se a lenha usada para geração elétrica. E, assim como o Carvão Mineral, supõe-se que o consumo desses produtos é realizado pelas Termoelétricas movidas a carvão. Supõe-se também que o produto Petróleo, Gás natural e Serviços de apoio é consumido tanto pelo setor de distribuição de gás quanto pelas termoelétricas movidas a gás, distribuindo-se entre estes dois setores de acordo com os dados do BEN.

Também por meio dos dados do BEN, pode-se afirmar que o consumo de Óleo Combustível do setor de eletricidade é para uso nas termoelétricas, sendo alocado neste setor. O Óleo Diesel,

por sua vez, é utilizado principalmente pelas Termoelétricas movidas a óleo diesel. E o produto do setor de Etanol e Biocombustíveis é consumido pela Termoelétrica a Biomassa. Já no setor de Produtos Químicos Inorgânicos, destaca-se a elaboração de combustíveis nucleares (urânio), sendo, portanto, consumido pelas Usinas Nucleares.

Dentro do setor de Transporte terrestre de carga, destaca-se o gasto do setor GAS com transporte dutoviário e o gasto das termoelétricas com transporte de combustíveis. Para alocar o consumo de Transporte terrestre de carga entre os setores desagregados foram utilizados dados do Boletim Mensal de Acompanhamento de Indústria de Gás Natural (BRASIL, 2015e), que informa que em 2015 o preço do gás natural foi composto 65% por mercadoria e o restante por transporte. Utilizando o percentual relativo ao custo do transporte sobre o valor da produção do setor GAS calculado previamente, foi estimado o valor gasto com transporte pelo mesmo. Assim, parte do consumo intermediário do setor de Transporte terrestre de carga realizado pelo setor original, que correspondente ao transporte dutoviário, foi alocado diretamente no setor de Distribuição de Gás. Em seguida, o restante foi alocado entre as termoelétricas em função do valor da produção.

As importações do setor “Eletricidade Gás e Outras Utilidades” foram distribuídas entre os setores de eletricidade (TDA) e GAS em função dos dados de importação de gás natural e de eletricidade do BEN (EPE, 2016). Assumiu-se ainda que o setor Comércio por atacado e a varejo consome todo produto do setor GAS para posteriormente revendê-lo para as famílias e setores. E que o setor TDA consome toda eletricidade gerada pelos setores de Geração de Eletricidade e repassa a eletricidade para os demais setores produtivos e residencial, ou seja, não há compra direta de eletricidade dos setores geradores. Foi considerado ainda que os setores geradores de eletricidade não consomem eletricidade do setor TDA, mas diretamente pelo autoconsumo.

O Brasil destaca-se pela interconexão dos sistemas elétricos, integrando geração e transmissão, por meio da malha de transmissão, que possibilita a transferência de energia entre subsistemas e fontes de geração de energia. Assim, graças ao controle realizado pelo Sistema Integrado Nacional, a energia gerada por diversas fontes, pode ser aproveitada por diferentes consumidores, em diferentes localidades, de forma a garantir melhor aproveitamento dos recursos energéticos. Logo, a pressuposição assumida, em que um setor de transmissão, distribuição e armazenagem consome toda a energia gerada e a vende para os demais setores

da economia, é compatível com a realidade do mercado brasileiro de energia elétrica com controle central. No entanto, a autogeração é um mercado em expansão e por isso é necessário entender suas implicações no modelo adotado.

Segundo o BEN (EPE, 2016), a autoprodução de eletricidade setorial agrega as mais diversas instalações industriais que produzem energia para consumo próprio, a exemplo dos setores de Papel e Celulose, Siderurgia, Açúcar e Alcool, Química, entre outros, além do Setor Energético. Neste último, destacam-se os segmentos de exploração, refino e produção de petróleo. Esta autoprodução não caracteriza compra de eletricidade, portanto, esse fluxo não está representado na MIP (mas apenas o consumo dos insumos que serão transformados em eletricidade). Em um cenário de expansão da geração distribuída, seria possível considerá-la no modelo desenvolvido nesta tese apenas como uma redução do consumo setorial de eletricidade, sendo necessário atentar para a variação nas emissões de GEE de acordo com a fonte de energia utilizada para a autogeração.

Por outro lado, existe ainda a autoprodução das centrais elétricas, ou seja, a energia gerada por elas e não injetada na rede. Assim, a partir dos dados da autoprodução injetada e não injetada na rede, foram encontrados os percentuais de autoconsumo dos setores geradores de eletricidade que foram utilizados para estimar a parcela de autoconsumo desses setores.

3.3.2. Base de dados ambiental

Essa seção detalha a construção da base de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e sua compatibilização aos setores do modelo. As emissões setoriais de GEE podem ser divididas em dois grupos: emissões por queima de combustíveis e emissões decorrentes do próprio processo produtivo. Os dados relativos às emissões foram extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021) e distribuídos entre os 138 setores do modelo.

Nos casos de incompatibilidade entre os setores do modelo e do SEEG, foram feitas algumas simplificações: as emissões decorrentes do uso de fertilizantes sintéticos, diretas ou indiretas (em decorrência da decomposição atmosférica ou da lixiviação) foram alocadas entre os setores agropecuários segundo o consumo de fertilizantes dos mesmos. Os resíduos agrícolas de outras culturas foram alocados entre os outros setores agropecuários (todos os setores, exceto aqueles

que já tiveram suas emissões por resíduos agrícolas computadas separadamente pelo SEEG) em função da área colhida em 2015, extraída da pesquisa Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2016). Igualmente foram distribuídas as emissões dos solos orgânicos não classificados nem como origem animal e nem vegetal.

Nos dados do SEEG, as emissões originadas da queima de combustíveis são calculadas pela abordagem *button-up*, o que torna possível associá-las aos respectivos setores de uso final de energia e centros de transformação. Contudo, para a compatibilização com os setores do modelo, foram necessárias novas simplificações: as emissões por queima de combustíveis da autoprodução do setor agropecuário foram divididas em função do valor da produção dos setores agropecuários. As emissões das indústrias pela da queima de combustíveis foram alocadas entre os setores industriais do modelo de acordo com o consumo setorial de cada combustível. Entre os quais se destacam os setores relativos às indústrias de alimentos e bebidas, têxteis, químicas e de metais não ferrosos.

Além disso, as emissões de GEE por queima de combustíveis provenientes do consumo público podem ser divididas em três categorias: Centrais elétricas, cujas emissões foram alocadas nos setores de geração de eletricidade; Produção de combustíveis, cujas emissões foram alocadas diretamente nos setores de combustíveis; e Consumo final energético dos serviços públicos propriamente ditos, que corresponde a 0,1% do total de emissões e foi desconsiderado⁷. Enquanto as emissões de GEE por queima de combustíveis provenientes do consumo de gás canalizado foram contabilizadas diretamente como emissões do consumo das famílias.

Ademais, de acordo com o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo (CETESB, 2013), o setor Eletrodoméstico é o principal gerador das emissões provenientes dos gases hidrofluorcarbonos (HFCs), enquanto as emissões provenientes do hexafluoreto de enxofre (SF6) são típicas perdas fugitivas das termoelétricas a gás. Assim, as emissões associadas aos HFCs foram alocadas no setor de eletrodomésticos e aquelas associadas ao SF6 no setor UTG.

⁷ As emissões pela queima de óleo combustível do consumo final energético dos serviços públicos não puderam ser alocadas com os dados disponíveis uma vez que os setores de serviço público (administração, saúde, educação) não apresentam consumo desse combustível na matriz de insumo-produto. Devido ao baixo valor representativo, optou-se por sua desconsideração.

3.3.3. Matriz de transição do uso da terra e emissões associadas

Mudanças no uso da terra e florestas são tratadas endogenamente por meio de uma matriz de transição calibrada com dados do MapBiomias. Detalhes metodológicos são descritos em Ferreira Filho e Horridge (2014). As transformações entre os diferentes usos do fator terra (lavoura, pasto, floresta plantada) ou a conversão da terra não utilizada em um dos usos, são sintetizadas na Tabela 6. A soma das linhas representa o uso da terra no ano 2010 e a soma das colunas representa o uso da terra no ano de 2016.

Tabela 6: Matriz de Transição - bilhões de hectares

Possibilidades de Conversão	Lavoura	Pasto	Floresta Plantada	Área não utilizada	Total ano 2016
Lavoura	54.140	6.241	282	3.623	64.288
Pasto	14.013	155.320	773	12.045	182.153
Floresta Plantada	46.021	27	6.381	104	6.558
Área não utilizada	5.854	19.554	901	572.394	598.705
Total ano 2010	74.054	181.144	8.339	588.167	851.706

Fonte: MapBiomias (2020).

Estes dados foram balanceados pelo método de ajuste bi-proporcional (MILLER; BLAIR, 2009). Este método consistiu no ajuste iterativo dos valores das linhas e colunas da Tabela 6, considerando a proporcionalidade dos seus valores totais. O procedimento para identificar as emissões associadas às mudanças no uso da terra apresentados a seguir foram embasados em Silva (2015). Em linhas gerais, os dados sobre as emissões por mudança do uso do solo foram extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021) e agregados nas categorias lavoura, pasto, floresta plantada e área não utilizada.

A matriz de transição obtida do procedimento de balanceamento foi atribuída às emissões de GEE de acordo com cada categoria de uso do solo. Os dados sobre as emissões por mudança do uso da terra entre 2010 e 2016 (tCO_2e) foram utilizados para calcular índices de emissões líquidas representativas das emissões por mudança do uso da terra entre 2015-2016. Assim como em Silva (2015), ao fim de tais procedimentos, um novo modelo capaz de abranger o manejo do uso do solo e suas emissões de GEE emergiu endogenamente. Para tanto, foi utilizado o método RAS⁸, que consiste no ajuste de uma matriz de modo que some os totais de linha e coluna dados.

⁸ O procedimento RAS é indicado para eliminar pequenas inconsistências que surgiram durante a manipulação de dados ou que podem ser atribuídas ao uso de dados de várias fontes mutuamente inconsistentes.

A Tabela 7 mostra as emissões de GEE distribuídas por categoria de uso do solo. Assim, enquanto lida com questões energéticas, o modelo tornou-se apto também a analisar as principais atividades econômicas do país e a expansão da fronteira agrícola, associando-as às emissões de GEE. Além de indicar alternativas para a agricultura brasileira em termos de realocação de atividades econômicas com o objetivo de aumentar a produção agrícola e reduzir o desmatamento e as emissões de GEE.

Tabela 7: Emissões de conversão de terras não utilizadas em outros usos, por bioma, em MtCO₂e (inicial base de dados)









	Lavoura	Pasto	Floresta plantada	Área não utilizada	Total
Lavoura	0,0	4,0	-3,0	4,9	5,9
Pasto	39,2	1,5	-8,3	6,6	39,0
Floresta plantada	0,9	0,5	0,5	-0,1	1,8
Área não utilizada	80,0	358,7	4,4	-188,3	254,8
Total	120,2	364,8	-6,3	-176,9	301,6

Fonte: Elaboração própria com base em dados do SEEG (2021)

3.3.4. Indicadores da base de dados

Para entender possíveis efeitos da transição para uma economia de baixo carbono, a estrutura produtiva setorial configura-se fator chave. Aqueles setores que utilizam mais energia e combustíveis e aqueles cuja atividade produtiva provoca emissões de GEE, como os agropecuários, deverão ser mais afetados. Assim, esta seção apresenta indicadores setoriais, no ano base de 2015, para auxiliar no entendimento dos impactos diretos da imposição de preços de carbono. Inicialmente, destaca-se que as emissões podem estar associadas diretamente à queima de combustíveis (Tabela 8) ou à própria atividade produtiva setorial (Tabela 9).

Tabela 8: Emissões associadas ao uso de combustíveis e à atividade no Brasil em 2015

Fontes de emissões	Emissões (Gg CO ₂ -e)	Participação
Atividade	704.918.931	62,0% 
Diesel - biodiesel	148.758.493	13,1% 
Outros produtos do refino do petróleo	143.925.523	12,7% 
Gasócool	71.172.369	6,3% 
Carvão mineral	22.196.316	2,0% 
Óleo combustível	22.093.108	1,9% 
Combustíveis para aviação	11.029.489	1,0% 
Produtos da exploração florestal e da silvicultura	9.859.413	0,9% 
Etanol e outros biocombustíveis	2.848.435	0,3%
Total	1.136.802.077	100,0%

Fonte: Base de dados do modelo BEETS.

Tabela 9: Emissões setoriais associadas à atividade econômica no Brasil em 2015

Setor	Emissões (Gg CO ₂ -e)	Participação
Bovinos e outros animais vivos	353.438.042	50,1%
Água, esgoto, reciclagem e gestão de resíduos	66.581.290	9,4%
Leite de vaca e de outros animais	53.612.778	7,6%
Ferro-gusa e ferroligas	44.475.705	6,3%
Cimento	22.793.837	3,2%
Petróleo, gás natural e serviços de apoio	21.910.540	3,1%
Soja em grão	16.350.665	2,3%
Elerodomésticos	15.383.099	2,2%
Arroz, trigo e outros cereais	15.093.238	2,1%
Suínos	11.830.173	1,7%
Cana-de-açúcar	11.290.552	1,6%
Aves e ovos	10.634.637	1,5%
Milho em grão	6.742.243	1,0%
Produtos da metalurgia de metais não-ferrosos	6.534.749	0,9%
Vidros e cerâmicos	6.522.232	0,9%
Celulose	6.287.997	0,9%
Açúcar	5.975.948	0,8%
Outros produtos e serviços da lavoura temporária	5.536.162	0,8%
Gasoálcool	4.217.728	0,6%
Outros produtos da lavoura permanente	3.503.090	0,5%
Carvão mineral	3.237.355	0,5%
Produtos químicos inorgânicos	2.970.943	0,4%
Leite resfriado, esterilizado e pasteurizado	2.395.130	0,3%
Café em grão	1.490.671	0,2%
Produtos químicos orgânicos	1.398.220	0,2%
Carne de bovinos	1.104.682	0,2%
Algodão herbáceo e outras fibras	832.624	0,1%
Outros produtos do refino do petróleo	644.693	0,1%
Laranja	545.681	0,1%
Carne de suíno	524.491	0,1%
Carne de aves	374.768	0,1%
Máquinas, aparelhos e materiais elétricos	208.210	0,0%
Produtos da exploração florestal e da silvicultura	200.798	0,0%
Bebidas	176.077	0,0%
Pesca e aquicultura	99.883	0,0%
Total	704.918.931	100%

Fonte: Base de dados do modelo BEETS.

Um resultado bastante discutido na literatura é a incidência distributiva das políticas climáticas. Os efeitos distributivos sobre as famílias da implementação de mercados de carbono podem ser analisados fazendo uso do modelo BEETS, que apresenta em sua especificação 11 famílias representativas, definidas de acordo com os extratos de renda total por unidade familiar. As denominações H01 a H11 representam a desagregação das famílias baseadas em decis de renda, no qual H01 refere-se ao primeiro extrato (famílias de menor renda), ao passo que em H11 estão às famílias na faixa de maior renda. As Características das classes de renda no Brasil são apresentadas na Tabela 10. De acordo com esses dados, e possível notar, por exemplo, que

cerca de 67% das famílias brasileiras estão concentradas nas três quatro primeiras faixas de renda (até 5 salários mínimos). Porém, mais importante para o estudo em questão é a composição do consumo de cada classe. Por isso, a Tabela 11 retrata a participação das famílias no consumo, de acordo com o banco de dados do modelo.

Tabela 10: Características das classes de renda no Brasil segundo a POF 2017 – 2018

Classes	Faixas salários-mínimos	Unidades de Consumo	%	Renda Total (milhões R\$)	%	Renda Monetária <i>Per Capita</i> (R\$)
H1	0 – 1	4.029.753	5,8%	3.018	0%	181,63
H2	1 – 2	12.707.685	18,4%	21.509	3%	438,78
H3	2 – 3	13.079.821	19,0%	41.242	5%	704,41
H4	3 – 5	16.204.220	23,5%	106.483	14%	1.011,67
H5	5 – 6	4.895.276	7,1%	53.672	7%	1.348,49
H6	6 – 8	6.175.983	8,9%	88.386	11%	1.702,32
H7	8 – 10	3.333.025	4,8%	63.075	8%	2.273,62
H8	10 – 15	4.256.727	6,2%	112.370	15%	3.120,18
H9	15 – 20	1.782.091	2,6%	63.923	8%	4.514,29
H10	20 – 30	1.399.354	2,0%	75.363	10%	6.703,11
H11	> 30	1.153.769	1,7%	142.958	19%	13.506,12
Total		69.017.704	100,0%	772.003	100%	3.227,69

Fonte: Cardoso *et al.* (2021) com base em IBGE (2021c).

Além disso, os setores utilizam insumos intermediários para a produção de bens e serviços. Entre eles, destacam-se os combustíveis, cuja queima é responsável por 38% das emissões de GEE do país. A Tabela 12 apresenta os principais consumidores de combustíveis em relação ao total de insumos utilizados em seus processos produtivos. Desta tabela é possível concluir, por exemplo, que 93,4% do valor insumos utilizados pelo setor de Combustíveis para aviação decorre do consumo de insumos energéticos, já que, grosso modo, o petróleo é principal insumo para a produção de combustíveis para a aviação. Além disso, a composição setorial é detalhada na Tabela 13.

Ainda sobre a participação dos combustíveis como insumo dos setores produtivos, deve-se atentar ao fato que o setor de Transmissão e distribuição de energia, apesar de não ter consumo direto significativo de insumos energéticos para situar-se na Tabela 12, é responsável por adquirir todo produto dos setores geradores de energia e distribuí-lo aos demais setores da economia. Além disso, como a tecnologia de produção de cada novo setor derivado a partir do setor de “Eletricidade, Gás e Outras Utilidades” apresenta características particulares, os principais produtos consumidos por esses setores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 11: Participação dos bens no consumo das famílias (2015)

	Consumo das famílias (%)										
	HOU01	HOU02	HOU03	HOU04	HOU05	HOU06	HOU07	HOU08	HOU09	HOU10	HOU11
Produtos da exploração florestal	1,0%	0,6%	0,4%	0,3%	0,2%	0,2%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
Combustíveis para aviação	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%
Gasoálcool	1,5%	1,7%	1,9%	2,5%	2,8%	2,8%	3,0%	2,7%	2,6%	2,4%	1,8%
Diesel - biodiesel	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,1%	0,2%
Outros produtos do refino do petróleo	0,8%	0,3%	0,7%	0,3%	0,2%	0,4%	0,2%	0,3%	0,6%	0,2%	0,2%
Etanol e outros biocombustíveis	0,4%	0,4%	0,6%	0,9%	1,3%	1,2%	1,4%	1,4%	0,9%	1,0%	0,4%
Total de insumos Energéticos	3,8%	3,0%	3,7%	4,1%	4,8%	4,7%	4,9%	4,8%	4,4%	3,9%	2,8%
Agropecuária	6,6%	5,8%	4,8%	3,9%	3,3%	2,9%	2,5%	2,4%	2,0%	1,6%	1,1%
Alimentos	22,8%	19,3%	17,1%	15,6%	13,9%	12,2%	11,5%	10,2%	8,7%	7,5%	5,0%
Eletricidade	4,0%	3,5%	3,0%	2,5%	2,2%	1,9%	1,6%	1,4%	1,1%	1,0%	0,7%
Indústria	18,9%	18,3%	18,0%	17,7%	17,9%	16,8%	16,9%	14,8%	14,2%	15,4%	13,7%
Transportes	3,9%	3,7%	3,8%	4,1%	4,2%	4,3%	4,0%	4,1%	4,0%	4,8%	4,2%
Serviços	40,1%	46,5%	49,7%	52,0%	53,7%	57,2%	58,6%	62,3%	65,6%	65,9%	72,4%
Total	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Fonte: Base de dados do modelo BEETS.

Tabela 12: Consumo de bens energéticos e sua participação no uso de insumos dos setores intensivos em energia em 2015

Setores intensivos em energia	Insumos energéticos (R\$ milhões)										Insumos energéticos/ insumos totais
	Produtos da exploração florestal	Carvão mineral	Petróleo e gás natural	Combustíveis para aviação	Gasoálcool	Naftas para petroquímica	Óleo combustível	Diesel - biodiesel	Outros produtos do refino do petróleo	Etanol e outros biocombustíveis	
Combustíveis para aviação	0,0	0,1	2590,5	0,0	0,0	58,6	6,6	0,6	3367,3	668,1	93,7%
Gasoálcool	0,0	1,1	20380,6	0,0	0,2	461,0	51,7	5,0	26492,1	5256,0	93,7%
Diesel - biodiesel	0,0	1,5	28075,2	0,0	0,3	635,0	71,3	6,9	36494,1	7240,4	93,7%
Naftas para petroquímica	0,0	0,1	2058,4	0,0	0,0	46,6	5,2	0,5	2675,7	530,8	93,7%
Óleo combustível	0,0	0,2	4045,3	0,0	0,0	91,5	10,4	1,3	5258,7	1043,2	93,5%
Outros produtos do refino do petróleo	3,2	2,1	36130,5	9,3	6,2	909,2	103,2	48,7	46846,7	9305,5	91,5%
Termoelétrica Óleo Combustível	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	1961,2	0,0	0,0	0,0	73,2%
Termoelétrica Óleo Diesel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	2525,5	0,0	0,0	69,1%
Transporte de carga	0,2	0,0	0,0	0,0	935,4	0,0	530,4	41388,6	1699,8	531,9	41,4%
Transporte de passageiros	0,0	0,0	0,0	0,6	341,9	0,0	190,6	15033,1	617,1	195,0	41,1%
Termoelétrica Gás Natural	0,0	0,0	1610,2	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	134,7	0,0	38,7%
Pesca e aquicultura	506,7	0,0	0,0	0,0	22,4	0,0	2,8	174,5	12,1	2,3	31,8%
Produtos da exploração florestal e da silvicultura	843,7	0,0	0,0	0,0	39,2	0,0	4,8	312,7	22,2	4,4	30,6%
Distribuição de gás e outras utilidades	0,0	0,0	1884,5	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,2%
Transporte aéreo	0,0	0,0	0,0	4339,1	80,1	0,0	0,0	56,7	0,0	7,9	27,1%
Termoelétrica Carvão	0,0	240,5	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	24,3%
Produtos de madeira, exclusive móveis	2621,1	0,0	13,0	0,0	118,7	0,0	22,9	67,0	1,8	10,7	23,8%
Petróleo, gás natural e serviços de apoio	0,1	0,0	11375,1	941,4	39,2	1,1	52,4	173,1	631,0	688,6	21,8%
Minerais metálicos não-ferrosos	4,3	6,5	14,7	0,0	4,8	0,8	251,3	979,0	109,2	0,0	16,8%
Adubos e fertilizantes	42,0	2,4	146,2	0,0	1,2	1623,4	139,7	223,5	286,5	75,9	14,6%
Minério de ferro	4,9	6,2	46,3	0,0	2,0	0,0	1,4	2684,7	284,6	0,0	14,3%
Produtos químicos inorgânicos	32,3	3,1	130,5	0,1	0,9	1213,0	130,6	178,1	253,3	73,3	14,2%
Produtos químicos orgânicos	42,5	3,0	156,5	0,0	0,5	1590,0	138,1	230,9	313,2	106,8	13,9%
Resinas, elastômeros e fibras	40,7	2,0	124,5	0,0	0,3	1367,7	119,3	195,2	263,3	76,3	13,6%
Celulose	984,1	0,0	58,8	0,0	6,2	0,0	177,1	106,3	89,8	0,3	13,6%
Papel e artefatos de papel	2533,0	0,0	151,7	0,0	16,1	0,0	456,7	282,9	241,5	33,0	13,4%
Carvão mineral	1,6	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0	22,3	42,3	1,2	0,3	12,6%
Minerais não-metálicos	5,9	0,2	3,6	0,0	2,2	12,6	296,9	574,3	34,8	5,4	12,2%

Fonte: Base de dados do modelo BEETS.

Tabela 13: Composição setorial do uso de fatores primários em 2015 (% do valor adicionado por setor)

SETOR	CAPITAL	TRABALHO	TERRA	SETOR	CAPITAL	TRABALHO
Arroz, trigo e outros cereais	59%	30%	11%	Bebidas	61%	39%
Milho em grão	59%	30%	12%	Produtos do fumo	67%	33%
Algodão e outras fibras	70%	28%	2%	Fios e fibras têxteis beneficiados	25%	75%
Cana-de-açúcar	69%	28%	3%	Tecidos	13%	87%
Soja em grão	67%	28%	5%	Artigos têxteis de uso doméstico	15%	85%
Outros da lavoura temporária	65%	29%	6%	Artigos do vestuário e acessórios	7%	93%
Laranja	70%	28%	2%	Calçados e artefatos de couro	23%	77%
Café em grão	69%	30%	2%	Produtos de madeira	28%	72%
Outros da lavoura permanente	70%	29%	2%	Celulose	48%	52%
Bovinos e outros animais	39%	61%	0%	Papel e artefatos de papel	47%	53%
Leite de vaca e de outros animais	35%	59%	5%	Serviços de impressão e reprodução	26%	74%
Suínos	31%	61%	7%	Combustíveis para aviação	80%	20%
Aves e ovos	31%	63%	6%	Gasoálcool	80%	20%
Produtos da exploração florestal	80%	19%	1%	Naftas para petroquímica	80%	20%
Pesca e aquicultura	82%	18%	0%	Óleo combustível	80%	20%
Carvão mineral	51%	49%		Diesel - biodiesel	80%	20%
Minerais não-metálicos	51%	49%		Outros produtos do refino do petróleo	76%	24%
Petróleo E gás natural	69%	31%		Etanol e outros biocombustíveis	23%	77%
Minério de ferro	81%	19%		Produtos químicos inorgânicos	50%	50%
Minerais metálicos não-ferrosos	49%	51%		Aadubos e fertilizantes	53%	47%
Carne de bovinos	33%	67%		Produtos químicos orgânicos	52%	48%
Carne de suínos	33%	67%		Resinas, elastômeros e fibras	51%	49%
Carne de aves	34%	66%		Defensivos agrícolas	36%	64%
Pescado industrializado	33%	67%		Produtos químicos diversos	37%	63%
Leite	36%	64%		Tintas, vernizes, esmaltes e lacas	36%	64%
Outros produtos do laticínio	33%	67%		Perfumaria e artigos de limpeza	27%	73%
Açúcar	15%	85%		Produtos farmacêuticos	49%	51%
Conservas de frutas e legumes	35%	65%		Artigos de borracha	18%	82%
Óleos vegetais e animais	35%	65%		Artigos de plástico	19%	81%
Café beneficiado	34%	66%		Cimento	23%	77%
Arroz beneficiado	37%	63%		Artefatos de cimento e gesso	24%	76%
Derivados do trigo, mandioca ou milho	38%	62%		Vidros e cerâmicos	23%	77%
Rações balanceadas para animais	34%	66%		Ferro-gusa e ferroligas	43%	57%
Outros produtos alimentares	38%	62%		Semi-acabados e laminados	42%	58%

(...)

SETOR	CAPITAL	TRABALHO	SETOR	CAPITAL	TRABALHO
Produtos da metalurgia de não-ferrosos	51%	49%	Serviços para construção	41%	59%
Peças fundidas de aço	50%	50%	Comércio por atacado e a varejo	42%	58%
Produtos de metal	27%	73%	Transporte de carga	37%	63%
Componentes eletrônicos	22%	78%	Transporte de passageiros	36%	64%
Máquinas para escritório	25%	75%	Transporte aéreo	11%	89%
Material eletrônico e de comunicações	22%	78%	Armazenamento e serviços auxiliares	34%	66%
Equipamentos de medida e teste	25%	75%	Correio e outros serviços de entrega	35%	65%
Máquinas e materiais elétricos	14%	86%	Serviços de hotelaria	19%	81%
Eletrodomésticos	16%	84%	Serviços de alimentação	35%	65%
Tratores e outras máquinas agrícolas	23%	77%	Livros, jornais e revistas	14%	86%
Máquinas para extração mineral	23%	77%	Serviços de música, rádio e televisão	40%	60%
Outras máquinas e equipamentos	24%	76%	Telecomunicações	71%	29%
Automóveis	6%	94%	Intermediação financeira e seguros	37%	63%
Caminhões e ônibus	7%	93%	Desenvolvimento de sistemas	60%	40%
Peças para veículos automotores	2%	98%	Aluguel e serviços imobiliários	91%	9%
Aeronaves e embarcações	17%	83%	Aluguel imputado	99%	1%
Móveis	45%	55%	Serviços jurídicos e consultorias	43%	57%
Produtos de indústrias diversas	44%	56%	Pesquisa e desenvolvimento	13%	87%
Manutenção de máquinas e equipamentos	37%	63%	Serviços de arquitetura e engenharia	36%	64%
Distribuição de gás e outras utilidades	81%	19%	Publicidade	49%	51%
Transmissão e distribuição de energia	81%	19%	Aluguéis não-imobiliários	61%	39%
Usina hidroelétrica	81%	19%	Serviços para edifícios	27%	73%
Pequenas Centrais Hidrelétricas	81%	19%	Outros serviços administrativos	27%	73%
Usina Eólica	81%	19%	Serviços de vigilância e segurança	9%	91%
Usina Solar	81%	19%	Serviços da administração pública	14%	86%
Termoelétrica Biomassa	81%	19%	Serviços de previdência e assistência	14%	86%
Termoelétrica Carvão	81%	19%	Educação pública	4%	96%
Termoelétrica Gás Natural	81%	19%	Educação privada	1%	99%
Termoelétrica Óleo Diesel	81%	19%	Saúde pública	5%	95%
Termoelétrica Óleo Combustível	81%	19%	Saúde privada	32%	68%
Termoelétrica Outros Fósseis	81%	19%	Serviços de artes, cultura e esporte	22%	78%
Usina Nuclear	81%	19%	Organizações patronais e sindicais	14%	86%
Água, esgoto e gestão de resíduos	51%	49%	Manutenção de computadores	25%	75%
Edificações	41%	59%	Serviços pessoais	14%	86%
Obras de infraestrutura	43%	57%	Serviços domésticos	0%	100%

Fonte: Base de dados do modelo BEETS.

Tabela 14: Insumos Utilizados na produção de Eletricidade, Gás e Outras utilidades em 2015

Principais produtos consumidos	Setores											
	GAS	UHE	PCH	EOL	SOL	BIO	UTC	UTG	UTOD	UTOC	UTOF	UTN
Petróleo E gás natural	57,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	75,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Máquinas e materiais elétricos	5,9%	18,5%	18,5%	18,5%	18,5%	13,7%	3,6%	3,1%	3,0%	3,1%	13,8%	8,4%
Desenvolvimento de sistemas	4,6%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	10,6%	2,8%	2,4%	2,3%	2,4%	10,7%	6,5%
Serviços de arquitetura e engenharia	3,1%	9,8%	9,8%	9,8%	9,8%	7,3%	1,9%	1,6%	1,6%	1,6%	7,3%	4,4%
Publicidade	2,9%	9,1%	9,1%	9,1%	9,1%	6,7%	1,7%	1,5%	1,5%	1,5%	6,8%	4,1%
Transporte de carga	10,9%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	25,6%	6,6%	5,7%	5,5%	5,7%	25,6%	15,7%
Produtos de metal	2,1%	6,7%	6,7%	6,7%	6,7%	5,0%	1,3%	1,1%	1,1%	1,1%	5,0%	3,1%
Diesel - biodiesel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	78,4%	0,0%	0,0%	0,0%
Óleo combustível	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	77,8%	0,0%	0,0%
Outros serviços administrativos	1,5%	4,6%	4,6%	4,6%	4,6%	3,4%	0,9%	0,8%	0,7%	0,8%	3,5%	2,1%
Manutenção de máquinas e equipamentos	1,3%	4,0%	4,0%	4,0%	4,0%	2,9%	0,8%	0,7%	0,6%	0,7%	3,0%	1,8%
Carvão mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	74,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Aluguéis não-imobiliários	1,0%	3,1%	3,1%	3,1%	3,1%	2,3%	0,6%	0,5%	0,5%	0,5%	2,3%	1,4%
Intermediação financeira e seguros	0,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,2%	0,6%	0,5%	0,5%	0,5%	2,2%	1,3%
Aluguel e serviços imobiliários	0,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,9%	2,1%	0,6%	0,5%	0,5%	0,5%	2,2%	1,3%
Serviços jurídicos e consultorias	0,9%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,1%	0,5%	0,5%	0,5%	0,5%	2,1%	1,3%
Artefatos de cimento e gesso	0,9%	2,8%	2,8%	2,8%	2,8%	2,1%	0,5%	0,5%	0,4%	0,5%	2,1%	1,3%
Serviços para edifícios	0,7%	2,1%	2,1%	2,1%	2,1%	1,6%	0,4%	0,4%	0,3%	0,4%	1,6%	1,0%
Manutenção de computadores	0,5%	1,7%	1,7%	1,7%	1,7%	1,3%	0,3%	0,3%	0,3%	0,3%	1,3%	0,8%
Cimento	0,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,5%	1,1%	0,3%	0,3%	0,2%	0,3%	1,1%	0,7%
Transporte aéreo	0,4%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,0%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	1,0%	0,6%
Correio e outros serviços de entrega	0,4%	1,3%	1,3%	1,3%	1,3%	1,0%	0,3%	0,2%	0,2%	0,2%	1,0%	0,6%
Produtos de madeira	0,3%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	0,8%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,8%	0,5%
Produtos químicos inorgânicos	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	16,5%
Telecomunicações	0,3%	1,1%	1,1%	1,1%	1,1%	0,8%	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%	0,8%	0,5%
Outros Setores	2,6%	8,3%	8,3%	8,3%	8,3%	6,5%	1,6%	3,5%	1,3%	1,4%	6,2%	26,1%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Fonte: Base de dados do modelo BEETS.

3.4. Fechamentos

O fechamento em um modelo de EGC é o responsável por representar as hipóteses sobre o funcionamento da economia por meio da definição de um conjunto de variáveis exógenas e endógenas. Essa escolha impõe ao modelo de EGC o caráter teórico que se pretende para determinada economia. Conforme salienta Ferreira Filho (1998), essa questão é desprovida de aleatoriedade, condicionando-se a sua determinação não só à visão teórica imposta ao modelo, mas também à natureza do problema investigado.

Para encontrar as Curvas de Abatimento marginal, é adotado um fechamento conhecido como de “curto prazo”, dado que a intenção é captar os custos relativos à estrutura produtiva atual dos setores. Assim, as simulações consideram fixo o estoque de capital dos setores e o salário real, enquanto a taxa de retorno ao capital e emprego variam endogenamente, para encontrar o novo equilíbrio dada a introdução de um preço de carbono. O Quadro 3 contém as hipóteses adotadas nesse fechamento.

Quadro 3: Hipóteses dos fechamentos do modelo – Cenário MAC

Fechamento Base	
Variáveis exógenas do PIB real (lado da renda)	
a1cap a1lab_o a1lnd a1tot a2tot a0com a1	Mudanças tecnológicas
Variáveis exógenas do PIB real (lado do gasto)	
delB	Razão saldo comercial nominal / PIB nominal
invslack	Investimento agregado determinado pelas configurações do investimento setorial
x5tot	Demanda real do governo
x3tot	Consumo das famílias
x2tot i	Investimento real total
delx6	Demanda real de estoques por mercadoria
Condições externas: preços das importações fixos; curvas de demanda por exportações fixas no preço e quantidade	
pf0cif	Preços externos das importações
f4p f4q	Deslocamento das Exportações setoriais
f4qtot	Mudança geral da quantidade nas demandas de exportação
f4p ntrad f4q ntrad	exportações coletivas
Todos os impostos são exógenos	
delPTXRATE f0tax s f1tax csi f2tax csi f3tax cs f5tax cs t0imp f4tax trad f4tax ntrad fl oct	
Distribuição da demanda do governo	
f5	Mudança de demanda do governo
Distribuição do investimento entre os setores	
finv3	Ativador da regra de investimento de longo prazo no modelo estático
Número de famílias e preferências no consumo são exógenas	
qh	Número de famílias
a3 s	Preferências das famílias por bens
a3	

Variável dummy: sempre exogenamente definida como 1	
delLnd	
Módulo ambiental (Mudanças tecnológicas e Mudanças ordinárias da tributação)	
Delgastot delgastax_sq deltax deltax1all deltax1st deltax1_idom deltax1_ij deltax1_is deltax2all deltax2st deltax3all deltax3comp deltax3_i deltax5 deltaxsource agascomb agasind agasfuel agasresid f_agasAct fcomp3 f_agreen fgovgen fgovgen_cap fgovgen_cap2	
Modulo de uso da terra	
fqtrans	Mudança de uso da terra
lndtwist	Mudança no uso da terra não causada por preços
Numerário	
phi	Taxa nominal de câmbio

Fonte: Elaboração própria.

Enquanto isso, para a composição das simulações em dinâmica recursiva foram utilizados dois tipos de fechamento: o Fechamento Base e o Fechamento de Política. O Quadro 4 define as variáveis exógenas comuns a todos os cenários. Neste quadro as variáveis estão denominadas como se apresentam no código computacional do modelo, operacionalizado no *software* de modelagem econômica Gempack (Horridge *et al.*, 2018). Os arquivos das simulações estão disponíveis publicamente para uso acadêmico.

Quadro 4: Hipóteses do fechamento do modelo nas simulações

Fechamento Base	
Variáveis exógenas do PIB real (lado da renda)	
rnorm	Taxa de retorno bruta
gtrend	Taxa bruta de retorno setorial tendencial
emptrend	Emprego tendencial
a1cap a1lab_o a1lnd a1tot a2tot a0com a1 a1nren a1ren	Mudanças tecnológicas
x0gdpinc	PIB real
Variáveis exógenas do PIB real (lado do gasto)	
delB	Razão saldo comercial nominal / PIB nominal
invslack	Investimento agregado determinado pelas configurações do investimento setorial
x5tot	Demanda real do governo
fx6	Mudança na regra de estoques
Condições externas: preços das importações fixos; curvas de demanda por exportações fixas no preço e quantidade	
pf0cif	Preços externos das importações
f4p f4q	Deslocamento das Exportações setoriais
f4qtot	Mudança geral da quantidade nas demandas de exportação
f4p ntrad f4q ntrad	exportações coletivas
Todos os impostos são exógenos	
delPTXRATE f0tax s f1tax csi f2tax csi f3tax cs f5tax cs t0imp f4tax trad f4tax ntrad f1oct	
Distribuição da demanda do governo	
f5	Mudança de demanda do governo
Distribuição do investimento entre os setores	
finv4	Ativador da regra de investimento modelo dinâmico
delfwage	Mecanismo de ajuste de salário real
faccum	Mecanismo para ativar a equação de acumulação
Número de famílias e preferências no consumo são exógenas	

qh	Número de famílias
a3 s	Preferências das famílias por bens
a3	
houslack houslack2	Mudança no consumo das famílias
Módulo ambiental (Mudanças tecnológicas e Mudanças ordinárias da tributação)	
Delgastot delgastax_sq deletaxrev deltax deltax1all deltax1st deltax1_idom deltax1_ij deltax1_is deltax2all deltax2st deltax3all deltax3comp deltax3_i deltax5 deltaxsource agascomb xgas agasresid f_agasAct f_agreen fgovgen fgovgen_cap fgovgen_cap2	
Mercado de carbono	
delgascap delaloc delgascap2 delaloc2 trade deltradegas trade2 deltradegas2 delgastax_sqf delgastax_sqf2	
Módulo de uso da terra	
fqtrans	Mudança de uso da terra
lndtwist	Mudança no uso da terra não causada por preços
Numerário	
phi	Taxa nominal de câmbio

Fonte: Elaboração própria.

Nos cenários de mercado de carbono, algumas variáveis tornam-se exógenas, enquanto outras, endógenas (Quadro 5). Essas mudanças tornam possível estabelecer exogenamente uma meta de abatimento (variação percentual) das emissões, que poderão ou não negociar licenças para emitir em um mercado de carbono. No cenário de referência, a alteração implica a imposição da mesma redução de emissões em todos os setores, de forma que custos distintos de redução de emissões (*delgastax_sq*) são gerados. Nas simulações de mercado de carbono, as reduções de emissões são distintas (para se atingir a meta do mercado) e o custo marginal de redução de emissões (preço do mercado de carbono) é o mesmo para todos os setores.

Quadro 5: Cenários de Mercado de Carbono

Variáveis que se tornam endógenas		Variáveis que se tornam exógenas	
<i>delgascap</i>	Taxa específica de emissão para os setores do mercado de carbono	<i>xgascap</i>	Emissões dos setores sujeitos à meta de abatimento
<i>delgastax_sq</i>	Taxa específica de emissão por combustível e usuário final	<i>fdgascap</i>	Mudança na regra do abatimento (ativa negociações)
<i>trade</i>	Comércio de permissões (em variação %)	<i>ftrade</i>	Mudança na regra do abatimento (ativa negociações)
<i>deltradegas</i>	Comércio de permissões (em unidade física)	<i>fdtradegas</i>	Mudança na regra do abatimento (desativa deltradegas)
<i>altot</i>	Mudança técnica total	<i>faltot</i>	Mudança na resposta das emissões ao preço de carbono

Fonte: Elaboração própria.

Uma inovação na operação do modelo é um mecanismo endógeno e paramétrico de abatimento de emissões, que procura capturar respostas custo-neutra dos setores a preços de carbono. Tornando a mudança técnica total endógena (*altot*) e permitindo alterações na resposta das emissões ao preço de carbono (tornando *faltot* exógena), é possível definir ganhos de eficiência ambiental (*agasact*) para os setores produtivos. Para tanto, considera-se que os setores

respondem ao preço de carbono adotando novas tecnologias que permitem reduzir a relação entre quantidade emitida e produção setorial. Uma mudança de 1% em *agasact* significa que é necessário 1% menos de emissão para uma unidade produzida pelo setor. O custo desse ganho de eficiência ambiental é compensado por uma deterioração tecnológica do parâmetro *aItot*, de forma que a mudança seja neutra em termos de custos para os setores. Portanto, ao assumir valores para o *agasact*, assume que os setores são incentivados a adotar alguma mudança tecnológica mais eficiente em emissões.

4. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1. Curvas de Abatimento Marginal

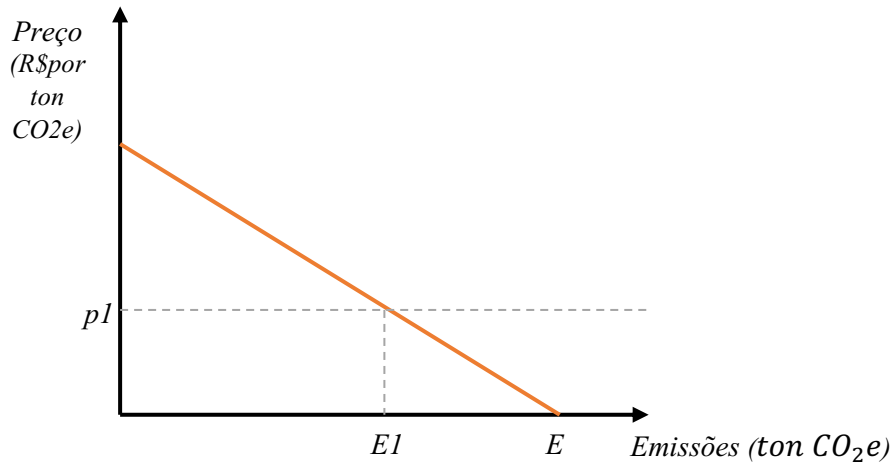
Nesta seção são analisadas as Curvas de Abatimento Marginal (MAC) dos principais setores emissores de GEE no Brasil. Inicialmente, apresenta-se a forma com que o modelo EGC é utilizado para esse fim e o fechamento necessário para isso. Em seguida, são apresentados os resultados setoriais.

4.1.1. Utilizando a abordagem de EGC para construir e interpretar Curvas MAC

As simulações foram realizadas com o objetivo de produzir informações a respeito das possibilidades setoriais de abatimento de emissões de setores brasileiros, no contexto de um modelo de equilíbrio geral. Usualmente, curvas MAC são produzidas a partir de estudos setoriais (WILLS,2013; LA ROVERE *et al.*, 2015; LUCENA *et al.*,2016; FIESP, 2017; RATHMANN, 2017; BRASIL,2020) que avaliam possibilidades e custos de redução. Nesta tese, tomamos o modelo EGC como ferramenta para a construção dessas curvas.

Os resultados representam impactos da imposição de um custo sobre as emissões de GEE. Com esses resultados, é possível fazer outras análises, como em Clarke, Fraser, Waschik (2014), que geraram uma curva MAC para a Austrália usando um equilíbrio geral computável estático, calibrado com a base de dados do GTAP. O custo de qualquer nível de redução das emissões como um todo é a área sob esta curva MAC. O custo para alcançar determinado nível de redução das emissões pode ser usado como teto limite para a adoção de políticas de mitigação. Se o custo for inferior ao imposto de carbono necessário para alcançar determinado nível de emissões, essa política pode ser considerada como opção financeiramente mais viável do que o imposto. Os resultados MAC obtidos a partir da simulação de EGC podem ser explicados pela Figura 9.

Figura 9: Custo de Abatimento Marginal



Fonte: Adaptado de Clarke, Fraser e Waschik (2014).

Na ausência de imposto de carbono ou esquemas de subsídio, as emissões agregadas serão E unidades de CO_2e . Com um imposto de $p1$ por unidade de emissões, as empresas irão mitigar suas emissões enquanto o custo for menor que $p1$ e as emissões cairão para $E1$. A redução de emissões ocasionadas por $p1$ seria $E-E1$. Os autores ressaltam a importância das elasticidades de substituição para o MAC em qualquer setor e na economia agregada: as elasticidades de demanda mais altas tornam mais fácil substituir insumos mais emissores por outros com menor nível de emissão, reduzindo o MAC. Cada ponto do gráfico representa um ponto de equilíbrio em que o preço de carbono de equilíbrio será o custo de abatimento marginal da economia para esse nível de emissões/abatimento.

No presente estudo, assim como em Clarke, Fraser e Waschik (2014), as emissões foram incorporadas ao modelo conforme detalhado na seção de base de dados. Portanto, o uso de dada quantidade de qualquer bem energético sempre resulta em uma determinada quantidade de emissão de CO_2e . E, para simular os efeitos de um preço sobre o carbono, de forma similar ao realizado em Clarke, Fraser e Waschik (2014), foi introduzida uma faixa de preços por tonelada de emissões de CO_2e entre R\$10-R\$1000. Preços são compatíveis com os da literatura, como o indicado pelo relatório de Stiglitz e Stern (2017) para o Banco Mundial, que realizam uma revisão de literatura sobre precificação de carbono e concluem que o preço do carbono consistente com o alcance da meta de temperatura do Acordo de Paris deve ser de pelo menos \$40-80 em 2020 e \$50-100 / tCO_2e até 2030.

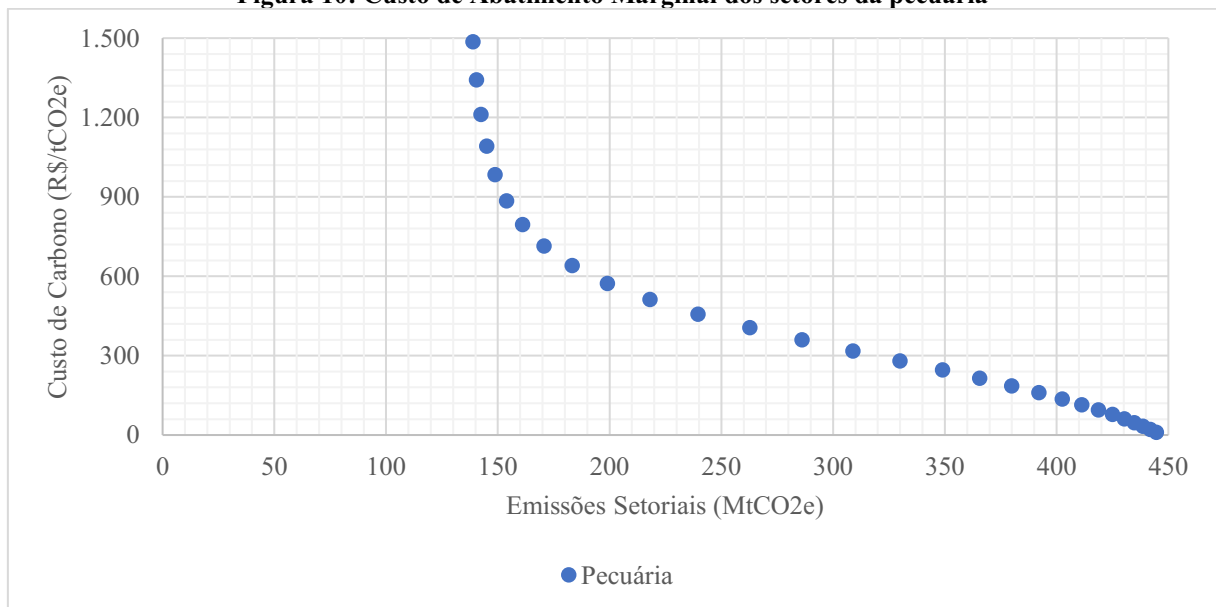
4.1.2. Custo de Abatimento Marginal dos Setores

Esta seção busca analisar o potencial de abatimento setorial das emissões de GEE partindo do conceito de curvas MAC, mas adaptado ao modelo de análise em equilíbrio geral. Para tanto, uma faixa de valores de custos de carbono para as emissões associadas ao nível de atividade e à queima de combustível foi exogenamente imposta aos setores emissores individualmente.

Dada a importância do setor Bovinos e outros animais, principal emissor setorial, a Figura 10 apresenta o custo de abatimento por nível de emissão dos principais setores da pecuária. Chama-se atenção ao eixo das abscissas, cujo valor máximo é de 400 MtCO₂e. Cada ponto do gráfico representa uma simulação específica em estática comparativa em que o preço de carbono é o custo de abatimento marginal do setor para certo nível de emissões/abatimento.

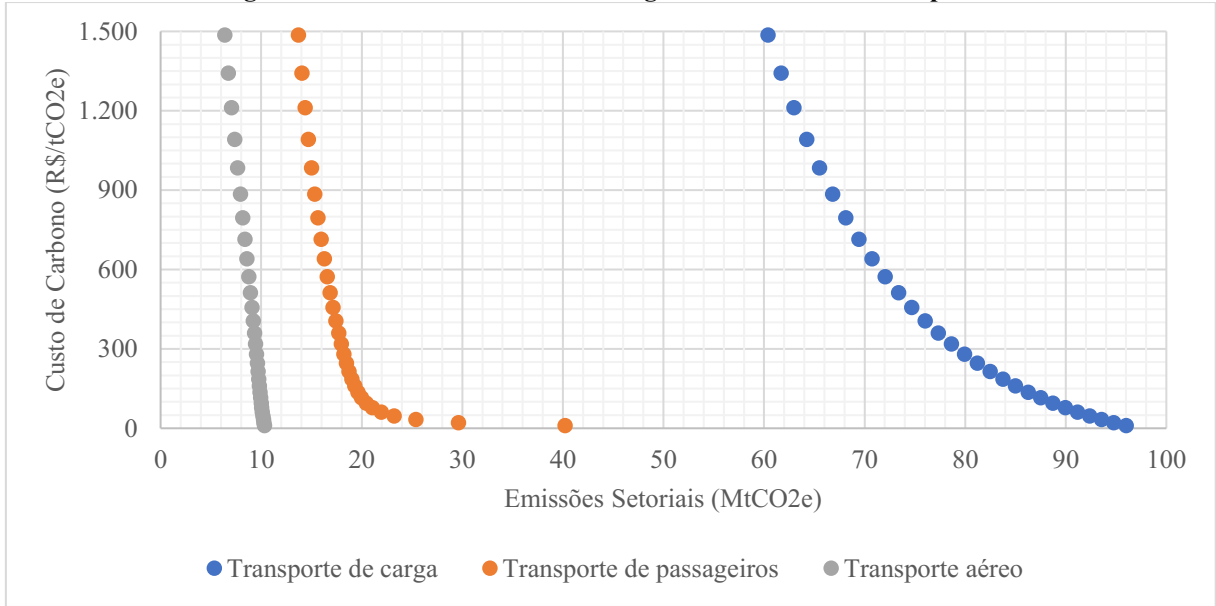
Após a pecuária, o setor transporte é o que apresenta maior potencial de abatimento, representado na Figura 11. Percebe-se que o valor máximo no eixo das abscissas nesse caso é 100 MtCO₂e, um quarto do valor máximo das emissões na representação gráfica da pecuária.

Figura 10: Custo de Abatimento Marginal dos setores da pecuária



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

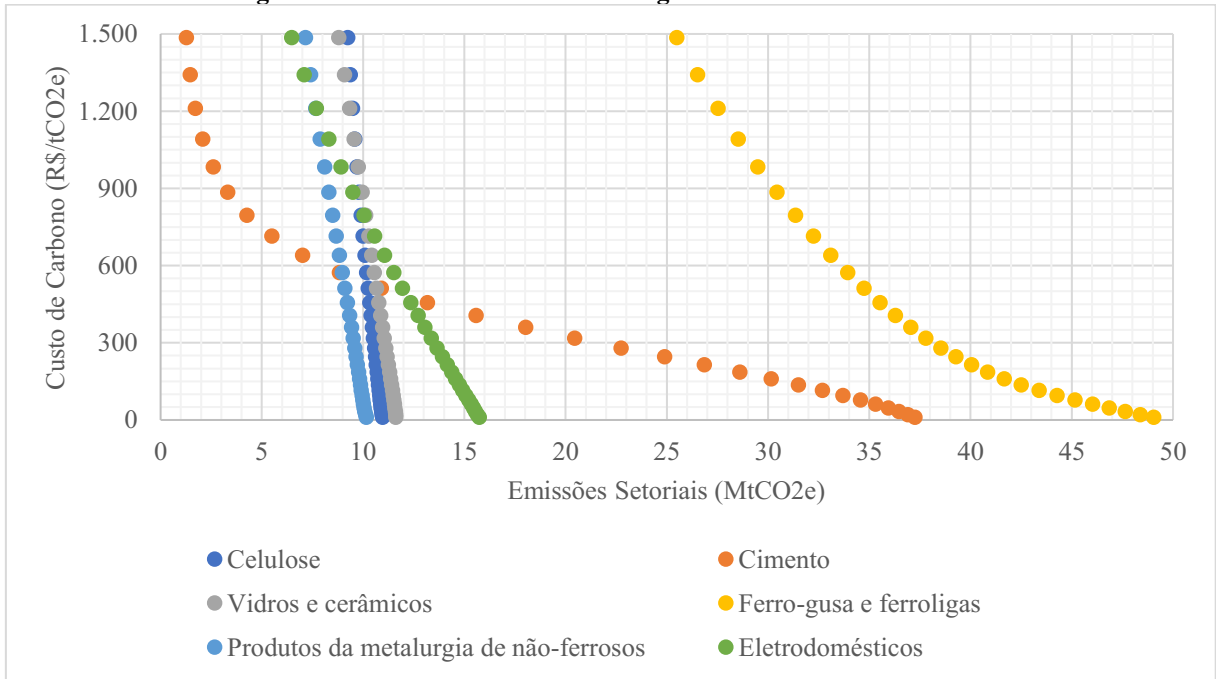
Figura 11: Custo de Abatimento Marginal dos setores de transportes



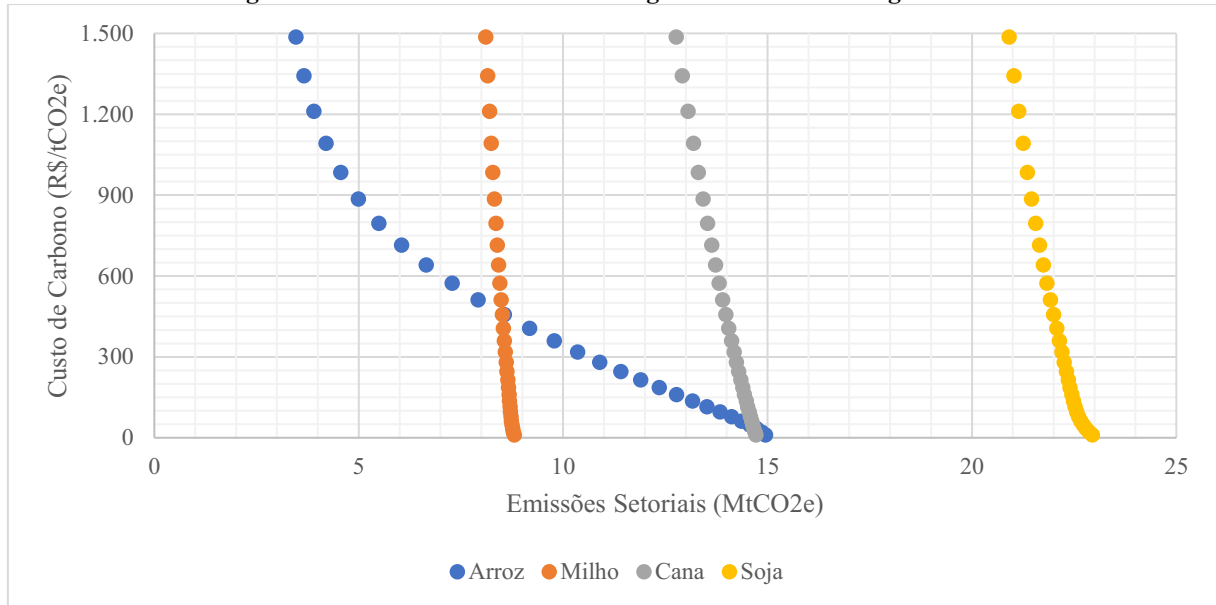
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Ainda se destacam quanto a potenciais de mitigação, os setores industriais e agrícolas, apresentados nas Figuras 12 e 13. O valor máximo das emissões das curvas MAC da indústria corresponde à metade do valor dos transportes e, conseqüentemente um oitavo da pecuária. Os setores agrícolas, por sua vez, têm metade do potencial da indústria.

Figura 12: Custo de Abatimento Marginal dos setores da indústria

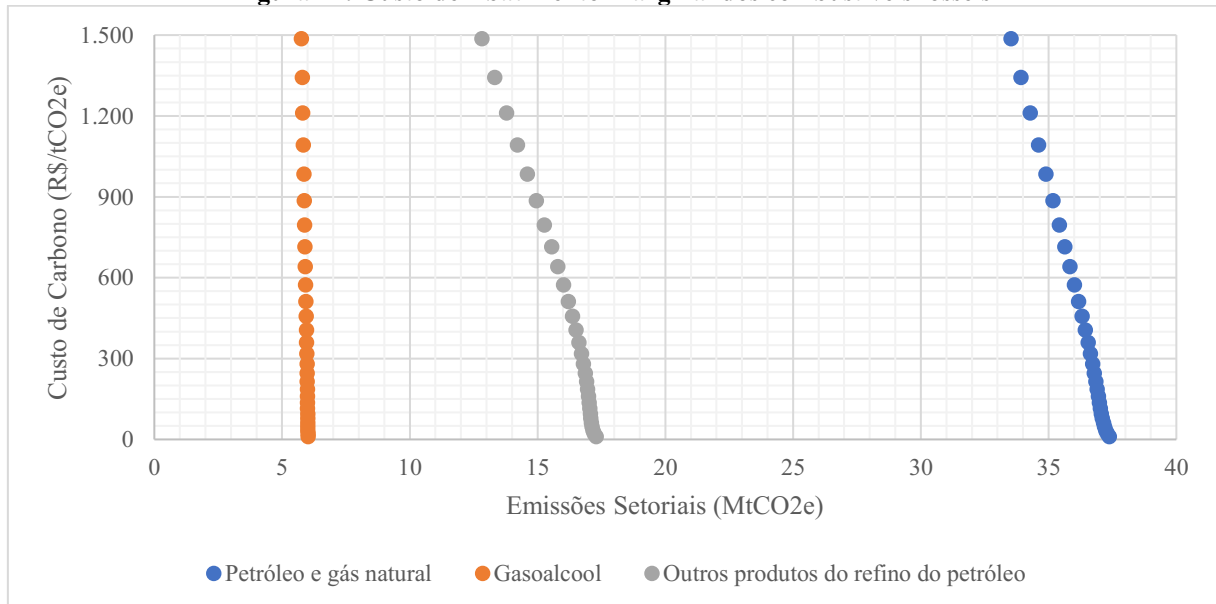


Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

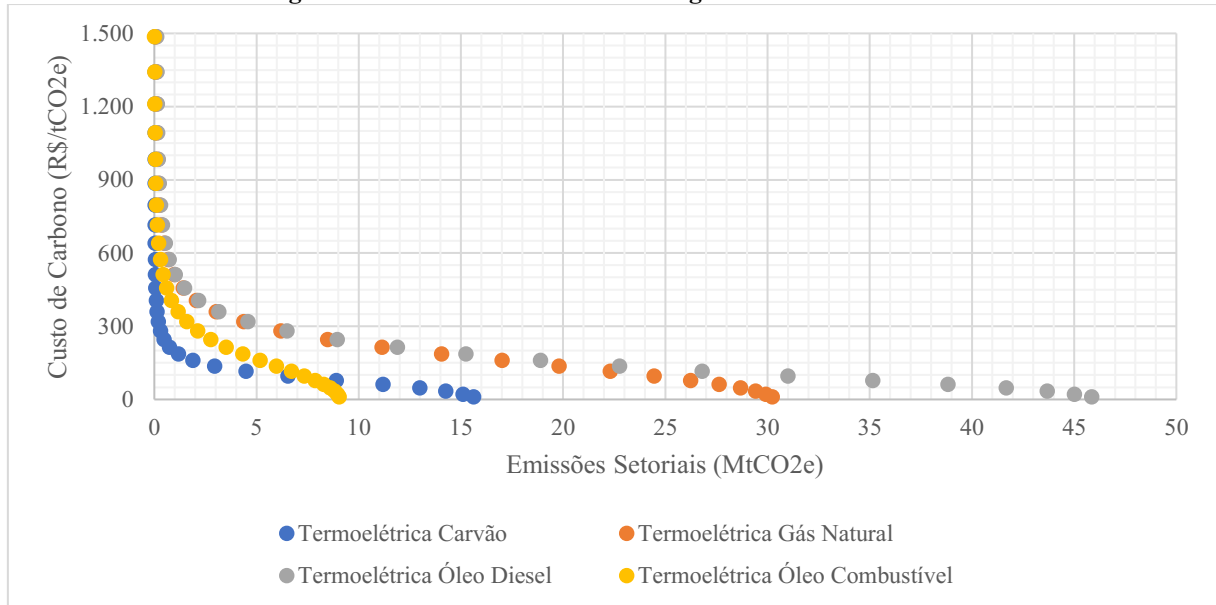
Figura 13: Custo de Abatimento Marginal dos setores da agricultura

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Os setores de combustível e geração termoeletrica são apresentados nas Figuras 14 e 15. O limite máximo do eixo das abscissas de combustíveis e termoeletricas representa um décimo da pecuária.

Figura 14: Custo de Abatimento Marginal dos combustíveis fósseis

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Figura 15: Custo de Abatimento Marginal das termoeletricas

A redução das emissões no setor sujeito ao custo e na economia como um todo decorrente desse custo setorial são apresentados nas Tabelas 15 e 16. Os setores apresentados nessas tabelas correspondem a 98% das emissões setoriais, concentrando a maior parcela do potencial de abatimento do país.

Quando combinadas metas para diferentes setores, os efeitos encadeados podem assumir magnitudes e direções diferentes, uma vez que se trata de uma abordagem de equilíbrio geral. Portanto, além do impacto sobre as emissões setoriais, é interessante analisar o resultado agregado da imposição do custo setorial, que envolvem efeitos indiretos ao longo da cadeia produtiva, demanda final, mudança do uso do solo e toda a economia. Na Tabela 15 estão os setores cuja redução agregada das emissões é superior à redução setorial. Ou seja, as emissões da economia como um todo reforçam o efeito mitigador da imposição do custo setorial. Enquanto isso, na Tabela 16 estão os setores em que o resultado agregado da mitigação é inferior ao resultado setorial, indicando que os efeitos substituição e efeitos indiretos decorrentes da transição do uso da terra atuam reduzindo os impactos ambientais da redução setorial.

Tabela 15: Emissões evitadas e custo associado - Setores em que os efeitos indiretos aumentam o abatimento total

Setores	Emissões Evitadas (milhares de tCO ₂ e) e Custo de Carbono (R\$/tCO ₂ e)											
	Emissões Setoriais Evitadas a cada Custo Marginal						Emissões Agregadas Evitadas a cada Custo Marginal					
	R\$10	R\$100	R\$250	R\$500	R\$1.000	R\$2.000	R\$10	R\$100	R\$250	R\$500	R\$1.000	R\$2.000
Bovinos e outros animais	2285	27203	95438	224368	291312	300719	4698	41446	124006	262055	320055	312523
Transporte de carga	1086	8507	17133	26068	34440	43634	1129	9283	19882	32626	47758	70923
Transporte de passageiros	38716	58065	61320	63733	65992	68427	38688	58040	61370	63924	66448	69412
Leite de vaca e de outros animais	118	1045	2327	3871	5616	7992	935	6086	13019	23036	37867	65768
Cimento	358	4003	12497	26206	34377	35919	364	4100	12989	27314	36624	39735
Água, esgoto e gestão de resíduos	213	2104	5221	9220	13545	18205	293	2597	6471	11914	18937	29639
Ferro-gusa e ferroligas	572	5255	10314	14940	20235	11007	565	5196	10268	14953	20278	27405
Aves e ovos	18	163	372	662	1088	2073	187	1307	3032	6062	11754	26364
Outros produtos do refino do petróleo	21	290	898	1995	3861	7508	50	733	2535	5939	11510	21397
Suínos	10	89	206	362	558	862	181	1320	3116	6076	10975	21033
Arroz, trigo e outros cereais	68	1177	3619	7128	10497	11988	169	2252	6040	10759	14536	15894
Vidros e cerâmicos	16	161	422	896	1772	3707	30	294	863	1923	3808	7756
Gasoolcool	1	16	45	96	183	365	31	340	946	2010	3843	7580
Soja em grão	29	265	646	1161	1767	2608	49	464	1174	2265	3891	6967
Milho em grão	9	85	209	377	590	927	32	290	705	1372	2451	4659
Outros da lavoura temporária	16	151	361	648	1009	1569	33	313	756	1443	2509	4611
Petróleo e gás natural	24	239	688	1506	2900	5677	33	313	756	1443	2509	4611
Cana-de-açúcar	17	190	473	898	1504	2567	31	273	679	1342	2400	4539
Transporte aéreo	28	270	708	1488	2824	5320	32	239	581	1168	2129	3794
Açúcar	0	5	15	30	59	125	6	49	121	245	461	934

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Tabela 16: Emissões evitadas e custo associado - Setores em que os efeitos indiretos reduzem o abatimento total

Setores	Tipo de Emissão e Custo de Carbono (R\$/tCO ₂ e)											
	Custo Marginal						Custo Marginal					
	R\$10	R\$100	R\$250	R\$500	R\$1.000	R\$2.000	R\$10	R\$100	R\$250	R\$500	R\$1.000	R\$2.000
Termoelétrica Gás Natural	331	7514	24400	31800	32144	31733	304	6510	19957	24168	24283	24913
Termoelétrica Carvão	381	10154	16741	17171	16985	16744	356	9318	14597	14826	14928	15031
Eletrodomésticos	77	736	1895	3858	6901	11007	77	673	1680	3374	6021	9599
Termoelétrica Óleo Combustível	97	2258	7148	9560	9929	9944	77	1605	4554	5466	5651	6088
Produtos da metalurgia de não-ferrosos	18	199	561	1193	2228	4009	14	133	416	938	1829	3486
Celulose	15	143	370	754	1325	2130	10	107	274	559	999	1668
Termoelétrica Óleo Diesel	28	616	2286	4594	5719	5938	12	201	591	916	803	944

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

A primeira parte é o custo explícito do setor. A segunda parte é o custo implícito, da economia como um todo, em que há efeito substituição e emissões indiretas decorrentes do uso da terra. Esse tipo de análise, a partir das curvas MAC, pode ser usada como ferramenta de auxílio para responder perguntas como quanto abatimento pode ser financiado com determinado valor monetário.

A partir das Tabelas 15 e 16 é possível comparar o potencial de abatimento dos setores sobre diferentes preços. Os setores estão ordenados segundo sua participação nas emissões, destacando-se o elevado potencial do setor de Transporte de Passageiros para reduzir emissões, sujeito a custos relativamente baixos. Ressalta-se também o elevado potencial de abatimento do setor de Bovinos e outros animais, embora a preços de carbono mais significativos.

Em relação às Termoeletricas, conforme Tabela 15, nota-se que a redução setorial é sempre superior à redução agregada das emissões. Uma vez que o custo das emissões pela queima de combustíveis é aplicado apenas ao setor em análise, os demais setores geradores de energia se beneficiam pelo aumento relativo dos custos desse setor e obtém, pelo efeito substituição da demanda, aumentos em seus níveis de atividade, aumentando suas emissões e reduzindo o efeito agregado da precificação setorial.

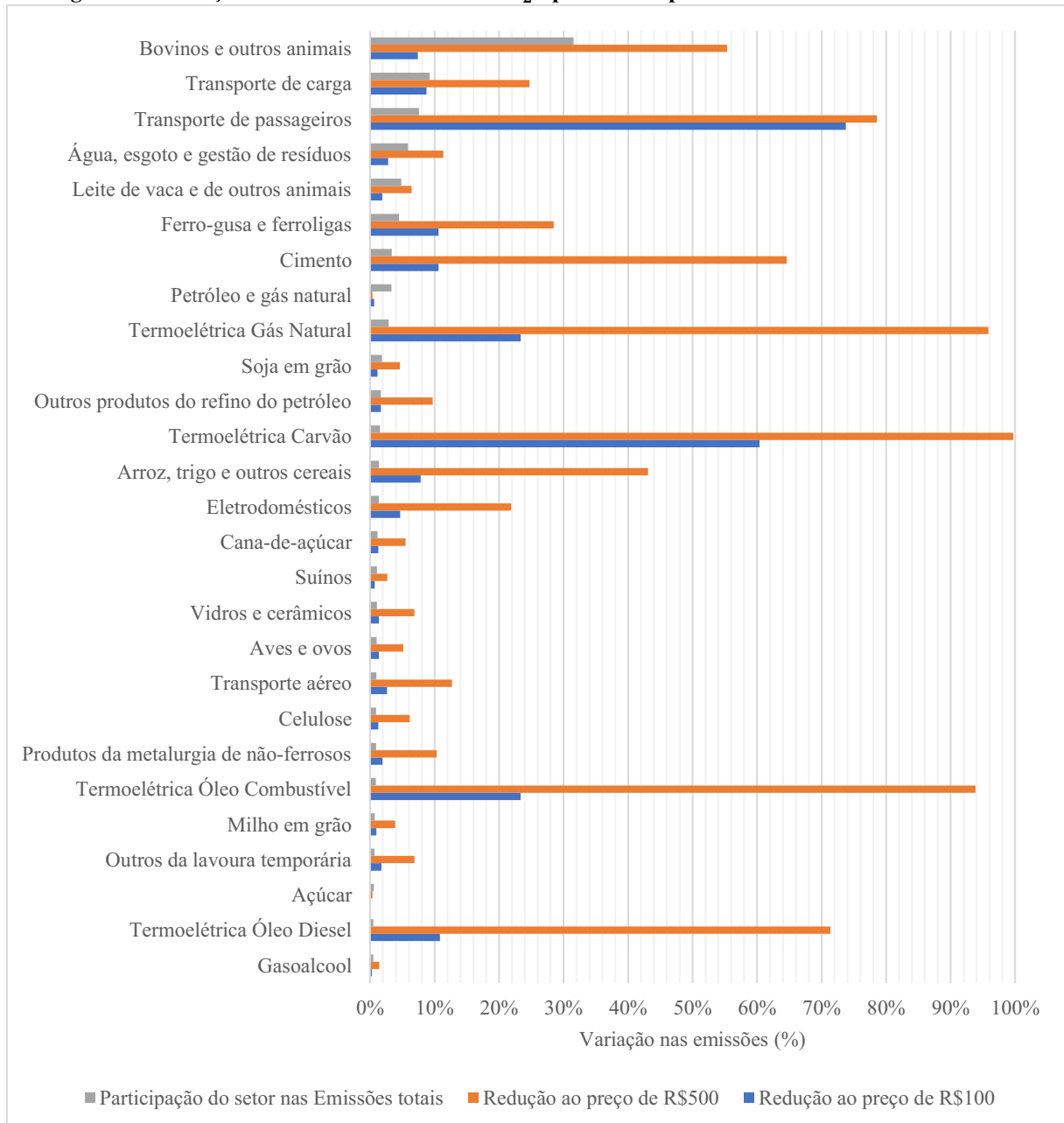
Além disso, segundo Clarke, Fraser e Waschik (2014), a introdução de qualquer política de redução de emissões geralmente terá três efeitos:

- a) Efeito de escala: à medida que as emissões de carbono se tornam mais caras, a escala de produção de insumos intensivos em carbono diminui;
- b) Efeito de substituição: os usuários de bens energéticos substituem os insumos mais poluentes por outros mais limpos;
- c) Efeito da mudança tecnológica: conforme a tecnologia suja se torna mais cara com a introdução de um preço do carbono, o preço relativo de tecnologias mais limpas cai.

Embora a introdução de políticas de redução de emissões geralmente encoraje todos os três efeitos, o modelo EGC desenvolvido nesta tese para simular os efeitos de um imposto de carbono incorpora os dois primeiros. Os resultados não incluem os efeitos da mudança tecnológica, portanto, os resultados encontrados para os custos de abatimento podem ser considerados um limite superior do custo da mitigação das emissões de GEE.

Ainda sobre como os setores comportam-se a dado preço, Figura 16 ilustra a redução das emissões setoriais aos preços de R\$100 e R\$500 por tonelada de CO_2e . Os setores estão ordenados por sua participação no total de emissões. Assim, o primeiro setor seria aquele que mais emite por sua própria atividade e/ou queima de combustíveis.

Figura 16: Reduções setoriais de emissão de CO_2e para um imposto de carbono de R\$100 e R\$500



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Ao preço de R\$100, dois setores têm redução das emissões acima de 30%, são eles, Transporte de Passageiros e Termoelétrica a Carvão. Reduções acima de 20% são observadas nos setores

de Termoelétrica a Gás natural e a óleo combustível e acima de 10% nos setores de Ferro-Gusa e Ferroligas, Cimento, e Termoelétrica a óleo diesel. Portanto, ao preço de R\$100, esses setores são os que mais reduzem suas emissões setoriais em relação ao total emitido pelo setor na ausência do mecanismo.

Ao preço de R\$ 500, o efeito em cada setor é maior, mas os setores com maiores variações são similares aos observados ao preço de R\$ 100. Nos dois níveis de preço, os setores que mais reduzem suas emissões seriam Transporte de passageiros, Termoelétrica Carvão, Termoelétrica Óleo Combustível, Termoelétrica Gás Natural e Termoelétrica Óleo Diesel. Esse preço (R\$ 500) poderia reduzir em mais de 90% as emissões das Termoelétricas a Gás Natural, Carvão e Óleo Combustível, em mais de 70% as emissões das Termoelétricas a Óleo Diesel e do Transporte de passageiros e em mais de 50% as emissões dos setores de Cimento e Bovinos. Desses, destaca-se o setor de Bovinos, que a esse preço tem uma resposta relativamente maior e entra para a lista dos setores com maior variação percentual em suas emissões. Por outro lado, entre os principais emissores, o setor de Transporte de Carga continua apresentando variação relativamente menor em suas emissões. Portanto, devido à tecnologia de produção do setor, preços maiores seriam necessários para alcançar variações percentuais nas emissões setoriais similares às percebidas por esses outros setores. Indicando que o abatimento das emissões desse setor é mais custoso.

Os demais setores apresentam relativamente baixos potenciais de mitigação frente a imposição de preços de carbono. Neste grupo, incluem-se setores do transporte aéreo, da indústria, como celulose, e agropecuários como cana-de-açúcar, milho, soja, suínos e aves. As exceções à regra são as termoelétricas a óleo diesel e óleo combustível que apresentam elevados potenciais em reduzir suas emissões (acima de 60% ao preço de R\$500) e baixo potencial de impactar as emissões totais, pois é possível substituir a geração de eletricidade da fonte fóssil taxada por outra fonte fóssil não taxada. Portanto, para os setores de geração de energia, é especialmente relevante considerar a taxaçãõ simultânea de todos os combustíveis utilizados pelas termoelétricas.

Na Figura 16 é possível notar mudanças relativas nas posições dos setores em termos de redução das emissões. Alguns setores subiram posições como Termoelétrica Carvão, Termoelétrica Gás Natural, Termoelétrica Óleo Combustível, Bovinos e outros animais e Arroz, trigo e outros cereais. Indicando que ao preço de R\$500 as emissões totais desses setores são relativamente

mais afetadas, quando comparado ao preço de R\$100. Outros setores como Transporte de passageiros, Ferro-gusa e ferroligas e Transporte de carga perderam posições entre os que mais reduzem as emissões dado o preço de R\$500, quando comparado ao preço de R\$100.

Quanto maior a redução das emissões, maior tende a ser o impacto sobre a atividade setorial. Todavia, devido à estrutura produtiva, a magnitude desse impacto pode variar entre os setores. Este resultado está condicionado ao preço, alguns respondem mais que outros a determinados preços. Sobre esses resultados, cabe ainda ressaltar que ao considerar ausência de mudanças tecnológicas permite analisar o custo setorial de mitigação dada a estrutura produtiva atual, encontra-se o custo limite para alcançar determinado nível de abatimento setorial das emissões de GEE.

Dessa forma, a adoção de novas tecnologias que possuam custos menores do que os estimados pelas curvas MAC torna-se atraente para alcançar o abatimento desejado. Além disso, mesmo que todos os setores estejam sujeitos ao mesmo preço de carbono, o custo da mitigação setorial em relação ao valor da produção do setor varia de acordo com particularidades do setor, tais como intensidade do uso dos fatores de produção, insumos intermediários utilizados e quantidade demandada.

Por isso, além de analisar o nível de abatimento desejado para cada setor, é preciso levar em conta ainda os efeitos encadeados da imposição desse custo setorial. Nesse ponto, o quanto cada setor consegue reduzir das emissões agregadas e o custo setorial em termos de queda do valor da produção são aspectos que precisam ser ponderados. Setores que sacrificam menos de sua produção para alcançar reduções significativas no volume de emissões são, portanto, opções atraentes para políticas de mitigação. Assim, identificados esses setores, é possível, por exemplo, desenhos de políticas de regulamentação de emissões e de mercados de carbono (*cap* ou *cap-and-trade*). A questão, portanto, não é se o Brasil deve ou não se comprometer em mitigar suas emissões, mas qual a melhor estratégia a ser adotada para otimizar os benefícios ambientais alcançáveis, levando em conta as particularidades setoriais nacionais.

4.2. Políticas de Mitigação

Nesta seção são analisados os impactos econômicos de uma meta de abatimento das emissões nos setores produtivos necessária para alcançar o Acordo de Paris. Para isso, considerou-se um Cenário de Referência em que os setores são sujeitos a meta, mas não há comercialização de permissões para emitir. Neste cenário de referência reduções setoriais de emissões são colocadas de forma a se atingir a meta do acordo.

Considera-se também dois cenários alternativos em que os setores sujeitos à meta de abatimento participam de um mercado de carbono no qual podem negociar livremente suas permissões (inicialmente distribuídas gratuitamente) para emitir e, assim, encontrar uma forma mais eficiente de alcançar a meta de abatimento. Foram realizadas simulações de dinâmica recursiva cujas informações necessárias para interpretar seus resultados, tais como cenário base e fechamento necessários, mecanismos causais e método de solução, são apresentados a seguir.

4.2.1. Cenários e Fechamentos

Os mecanismos de dinâmica recursiva permitem a utilização explicitamente temporal do modelo. As variáveis endógenas ajustam-se ao longo do período de análise após os choques iniciais, tanto no cenário base quanto no cenário de política, que inclui choques específicos das simulações. O cenário base deve refletir, tanto quanto possível, as mudanças projetadas na economia brasileira ao longo do período de estudo (2015 a 2030). A elaboração de um cenário base ou contrafactual é um componente importante numa simulação quando se utiliza um modelo dinâmico (Adams, Horridge e Parmenter, 2000).

Tal construção possibilita visualizar duas trajetórias para cada variável de interesse: uma trajetória que mostra como a variável iria mudar ao longo do tempo não considerando a questão que se deseja estudar (mercados de carbono); e a trajetória de como a variável se comportaria com a política em vigor, que no caso desta simulação ilustrativa refere-se a políticas de mitigação de emissões de GEE via precificação de carbono. A diferença entre estas trajetórias (cenário base e o cenário com o choque de política, ou seja, com mercados de carbono) representa o efeito adicional da tributação sobre a economia. Normalmente, essas diferenças são acumuladas ao longo do período de análise para ilustrar o impacto total sobre determinada variável.

Para a construção do cenário de referência, foram adotadas estimativas em termos de variações percentuais, para o PIB real, exportações, consumo das famílias, investimento, consumo do governo e exportações, conforme apresentado na Tabela 17, a partir de dados observados de 2016 a 2020 da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua trimestral (IBGE, 2021a), das Contas Nacionais Trimestrais (IBGE, 2021b) e projeções baseadas em estimativas do Banco Central do Brasil para o período 2022-2030 (BCB, 2021). A essa linha de base será adicionada a meta de redução de emissões em um conjunto de setores, o que implica que o crescimento do PIB ficará abaixo dos números apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Principais variáveis do cenário macroeconômico de linha de base (var. % real)

Indicadores	2016	2017	2018	2019	2020	2021-2027	2028-2030
PIB a preços de mercado	-3,3	1,3	1,8	1,4	-4,1	2,2	2,2
Consumo das famílias	-3,8	2	2,4	2,2	-5,5	-	-
Gastos do Governo	0,2	-0,7	0,8	-0,4	-4,7	0	2
Investimento	-12,1	-2,6	5,2	3,4	-0,8	-	-
Exportação	0,9	4,9	4,1	-2,4	-1,8	-	-
Importação (-)	-10,3	6,7	7,7	1,1	-10,0	-	-
Emprego	-2,1	2,1	1,1	2,0	-12,1	1	1
População	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1	1

Fonte: Elaboração própria com base em dados do IBGE (2021b).

Os dados da exportação setorial do sistema de consultas Comex Stat (BRASIL, 2021). O cenário para a economia brasileira está ancorado no crescimento médio do PIB de 2,2% ao ano de 2022 a 2030 e os gastos do governo respeitam o teto de gastos impostos pela Emenda Constitucional nº 95 de 2016 (BRASIL, 2016).

4.2.2. Mecanismos causais e Método de Solução

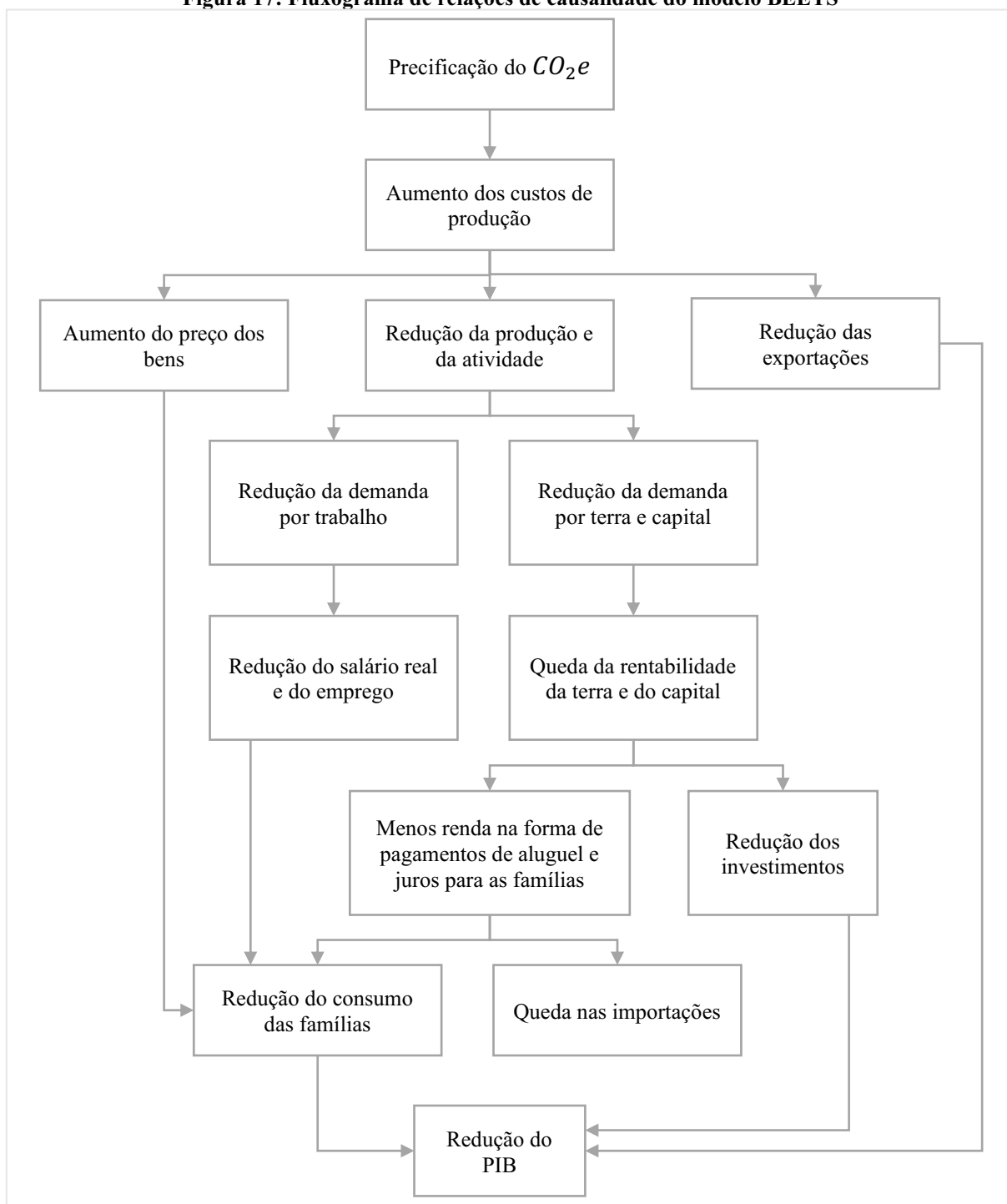
Nesta seção são analisados os impactos da imposição de mecanismos de precificação de carbono. As relações de causalidade do modelo que auxiliam na elucidação dos resultados encontram-se esquematizadas na Figura 17. Impor uma meta de abatimento e permitir que os setores sujeitos à meta comercializem licenças para emitir, tem o efeito similar à imposição de um tributo sobre as emissões de GEE.

Isso implica aumento dos custos de produção os setores da economia que emitem diretamente pela própria atividade ou por meio da queima de combustíveis ou indiretamente, através dos

insumos utilizados na produção. Esse aumento nos custos de produção é repassado para os consumidores em forma de aumento dos preços, o que gera também redução das exportações.

O aumento dos custos de produção faz com que o nível de atividade caia, reduzindo a demanda por fatores de produção (terra, capital e trabalho) e, conseqüentemente, sua rentabilidade. E isso significa menos renda para as famílias em forma de remuneração aos fatores produtivos. A redução na taxa de retorno do capital reduz o investimento que, no período seguinte reduzirá a taxa de crescimento do estoque de capital. Tanto a redução na renda das famílias quanto o aumento dos preços dos bens implicam redução no consumo das famílias e, por consequência, redução do PIB.

Figura 17: Fluxograma de relações de causalidade do modelo BEETS



Fonte: Elaboração própria.

Ou seja, a partir da Figura 17 é possível concluir que a internalização do imposto de carbono transforma-se em um custo de produção. E, assim como explicado por Rathmann (2017), a resposta setorial a esse imposto implica na modificação endógena do uso de insumos e da produção setorial.

Os resultados das simulações⁹ realizadas foram obtidos usando o software de modelagem Gempack. O modelo é resolvido recursivamente, ano a ano, começando com os dados iniciais. Para cada ano subsequente, os dados do cenário base são os dados atualizados produzidos pela simulação anterior. O cenário de política é similar ao base, exceto que as mudanças exógenas incluem alguns choques de interesse de política, como a criação de um mercado de carbono.

Os arquivos de dados de entrada são o ponto de partida para os cenários, além disso, são especificados os fechamentos e choques executados nos cenários de política. A solução cumulativa determina o caminho da solução e os coeficientes são atualizados a partir dos dados na solução cumulativa em cada etapa. As contribuições separadas dos choques exógenos são registradas e acumuladas, permitindo analisar os efeitos dos choques implementados. Cada simulação produz uma sequência de mudanças ano a ano em todas as variáveis do modelo. O método de solução empregado foi o *Gragg* com 2, 4 e 6 etapas.

O método Gragg é uma variação do método de Euler, que busca produzir resultados mais precisos para um determinado número de etapas. No procedimento de solução *multi-step* de Euler, o choque exógeno é dividido em um número de componentes iguais (etapas). Os resultados de cada parcela são utilizados para atualizar o banco de dados. Os novos dados são utilizados para calcular os resultados da etapa seguinte, aumentando, assim, a precisão dos resultados de acordo com a quantidade de etapas. Esses métodos surgem como alternativa para reduzir erros de linearização que surgem do método padrão de uma etapa ou de solução Johansen. No Gragg 2-4-6, são geradas 3 soluções com 2, 4 e 6 etapas, respectivamente. Esses resultados são, então, extrapolados para encontrar uma solução mais precisa do que qualquer uma das 3 soluções individuais.

⁹ Como os resultados das simulações muitas vezes dependem criticamente dos valores das principais entradas exógenas, tais como os valores dos parâmetros do modelo e os choques aplicados, é indicado realizar a Análise de Sensibilidade Sistemática (SSA), que permite calcular a sensibilidade dos resultados da simulação às mudanças nos parâmetros subjacentes do modelo ou às mudanças nos choques. Arndt e Pearson (1998) descrevem métodos práticos para conduzir análises de SSA usando o Gempack. Para a presente tese, parâmetros de substituição energética (SUBENER, SUBCOMB) e parâmetros necessários para o módulo de dinâmica recursiva (ALPHA e ELASTWAGE) são relevantes. Eles foram testados para um intervalo de 50%, com distribuição triangular, em relação aos resultados do Mercado Amplo, que inclui todos os setores produtivos do modelo.

4.2.3. Resultados Agregados

Os cenários elaborados avaliam 3 situações:

- a) Cenário de referência: imposição de redução de emissões idêntica em todos os setores da economia;
- b) Cenário de Mercado Restrito;
- c) Cenário de Mercado Amplo.

Os impactos da imposição de mecanismos de redução de emissões (cenário de referência) e de precificação (*cenários de mercado de carbono*) consideram as emissões associadas à atividade setorial e a matriz energética a partir de 2022. Assim, novas simulações encadeadas, ano a ano, permitem analisar os resultados até 2030 dos três cenários. Para definir a meta de abatimento das emissões a ser alcançada por meio dos mecanismos de imposição de redução e de precificação de carbono levou-se em consideração a NDC brasileira apresentada na COP21 (redução de 43% das emissões em relação ao nível de 2005). De acordo com essa meta, o total de emissões em 2030 deve ser de 1,2 GtCO₂e.

O modelo de dinâmica recursiva permitiu estabelecer metas anuais para alcançar a meta total acumulada ao longo do período. Para alcançá-las, os setores alocam entre si as permissões para emitir de forma a estabelecer o preço de carbono anualmente, possibilitando também analisar os resultados para cada período. As simulações consideram metas de abatimento absolutas, ou seja, redução em relação a um cenário base em que as emissões permanecem estáveis. Assim, a variação das emissões totais (inclusive emissões da transição do uso da terra) no cenário de política em relação ao cenário base devem-se à imposição da meta de abatimento nos setores produtivos e restrição ao desmatamento. Esta última, ao reduzir as emissões associadas ao uso da terra e contribuir para níveis maiores de abatimento de emissões, permite que sejam impostas metas relativamente menores aos setores produtivos para alcançar o compromisso estabelecido no Acordo de Paris.

Nas simulações de mercado foram considerados duas combinações de setores participantes do mercado de carbono para alcançar a mesma meta de abatimento. O objetivo é comparar o custo-efetividade de diferentes configurações de mercado de carbono para alcançar a mesma meta agregada de redução de emissões. Os setores participantes de cada mercado estão detalhados

na Tabela 18. Os setores foram definidos com base na relação de custo-efetividade da taxaço de carbono sobre cada um deles, obtida da análise de suas curvas MAC setoriais (Seção 4.1).

Tabela 18: Cenários de Precificação via Mercados de Crédito de Carbono

Setores participantes do Mercado	Emissões (MtCO ₂ e)			Participação do setor no total das emissões	
	Emissões pela Atividade	Emissões pela Queima de Combustíveis	Emissões setoriais totais	Mercado Restrito	Mercado Amplo
Transporte de carga	0,00	104,38	104,38	33,1%	9,4%
Transporte de passageiros	0,00	85,69	85,69	27,2%	7,8%
Transporte aéreo	0,00	11,03	11,03	3,5%	1,0%
Termoelétrica Carvão	0,00	17,23	17,23	5,5%	1,6%
Termoelétrica Gás Natural	0,00	32,65	32,65	10,4%	3,0%
Termoelétrica Óleo Diesel	0,00	5,91	5,91	1,9%	0,5%
Termoelétrica Óleo Combustível	0,00	9,91	9,91	3,1%	0,9%
Produtos da metalurgia de não-ferrosos	6,53	3,91	10,44	3,3%	0,9%
Cimento	22,79	15,39	38,19	12,1%	3,5%
Ferro-gusa e ferroligas	44,48	6,33	50,80	-	4,6%
Vidros e cerâmicos	6,52	5,37	11,90	-	1,1%
Celulose	6,29	4,47	10,76	-	1,0%
Produtos químicos orgânicos	1,40	2,90	4,30	-	0,4%
Produtos químicos inorgânicos	2,33	2,44	4,77	-	0,4%
Bovinos e outros animais	353,44	2,93	356,37	-	32,3%
Leite de vaca e de outros animais	53,61	1,05	54,66	-	4,9%
Outros setores	207,53	88,17	295,69	-	26,8%
Total de Emissões	704,92	399,78	1104,70	100,0%	100,0%

Fonte: Elaboração própria com base nos dados do SEEG (2021).

Os dois cenários de *cap-and-trade* (Restrito e Amplo) foram associados a imposição do desmatamento zero como estratégia de mitigação das emissões para a mudança de uso da terra e florestas. Ressalta-se que os dados são relativos ao desmatamento resultante da expansão das atividades produtivas, excluindo desmatamento ilegal, grilagem ou mineração. Dessa forma, os resultados obtidos com o modelo BEETS indicam que a contribuição desse setor para alcançar a meta seria uma redução de aproximadamente 170 MtCO₂e. Considerando as estimativas mais recentes de emissões (SEEG, 2021) e descontando a redução esperada das emissões do desmatamento, as demais emissões (diretamente pela atividade e pela queima de combustível) precisariam de uma redução acumulada de 10% entre 2022-2030. No cenário de referência, adota-se a mesma redução percentual (10%) de emissões em todos os setores, de forma que não

há preço de carbono comum, mas custos setoriais distintos. A Tabela 19 apresenta os principais resultados macroeconômicos dos cenários alternativos analisados.

Tabela 19: Resultados Macroeconômicos dos Cenários de reduções de emissões para alcançar meta brasileira proposta na COP21

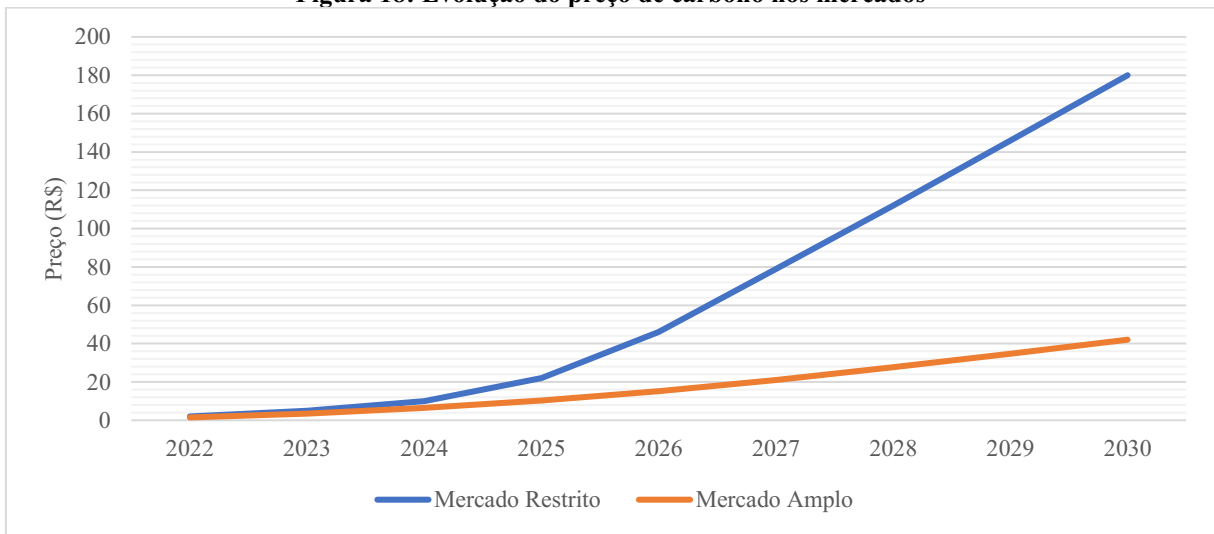
	Crescimento Acumulado 2022-2030 (var. %)		
	Referência	Mercado Restrito	Mercado Amplo
PIB	16,5	19,5	19,5
Consumo das Famílias	19,7	19,3	19,2
Investimento	7,0	19,8	19,9
Exportação	3,0	5,9	5,7
Importação	0,5	0,5	0,6
Emprego	10,2	11,9	11,9
Rentabilidade do Capital	12,5	16,4	16,4
Preço Carbono (R\$)	-	180,0	42,1

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Os cenários com mercado são mais eficientes, pois incentivam a mitigação em setores com menores custos de abatimento, que é financiada pelos setores com maiores custos ao comprarem licenças para emitir (se, por exemplo, fossem dadas permissões gratuitas referentes a 10% das emissões de cada setor). Os resultados agregados observados no Mercado Restrito e Amplo são similares, exceto pelo preço de carbono. Para alcançar a meta em cada cenário preços diferentes de carbono são exigidos (endogenamente). Seus valores anuais são representados pela Figura 18.

O Mercado Amplo apresenta o menor custo financeiro para alcançar a meta, principalmente por incorporar o setor de Bovinos e outros animais, que corresponde a 33% das emissões dos setores participantes do mercado. Contudo, embora apresente elevado potencial de abatimento, a participação desse setor para alcançar a meta de abatimento é especialmente custosa para o setor, pois representa um sacrifício relativamente alto de seu valor de produção.

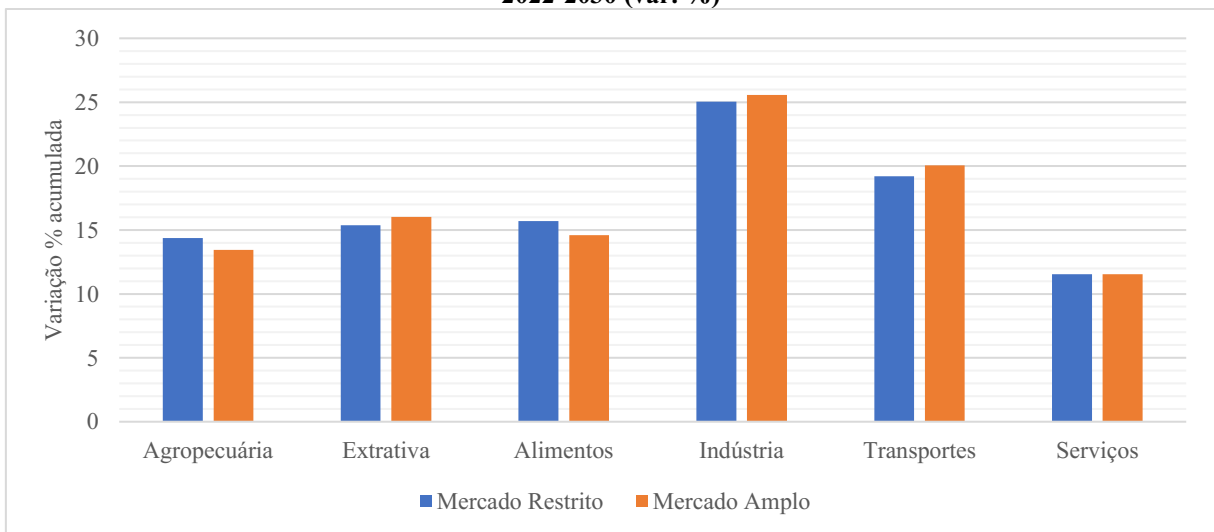
Além disso, o Mercado Amplo inclui os demais setores que individualmente não apresentam participação significativa nas emissões, mas em conjunto correspondem a 21% das emissões totais quando incluídos no mercado de carbono. Inicialmente, a inclusão desses setores faz com que o preço de carbono seja menor, mas a partir de um certo momento, a inclusão desses setores torna-se mais custosa em termos de nível de atividade setorial (Tabela A1 no Apêndice)

Figura 18: Evolução do preço de carbono nos mercados

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

4.2.4. Resultados setoriais

Quando o setor participante do mercado de carbono é sujeito às restrições de suas emissões, espera-se queda da sua produção e de seu consumo de combustíveis. Isso tem efeitos indiretos para os outros setores que compram os bens produzidos pelo setor ou que vendem insumos pra ele. Tornando interessante analisar, em cada cenário, a dinâmica dos setores. Dessa forma, é possível identificar setores estratégicos para a formação de um mercado de carbono no Brasil dada a estrutura produtiva do país.

Figura 19: Dinâmica dos setores com mercados de carbono: crescimento acumulado da produção entre 2022-2030 (var. %)

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Quando se considera que todos os setores contribuem para alcançar a meta como no Mercado Amplo, a redução das emissões em cada setor individualmente é menor. Para reduzir suas emissões (que não eram limitadas no Mercado Restrito), os setores agropecuário e de alimentos têm menor crescimento no Mercado Amplo. Isso porque a pecuária é o principal setor emissor e foi poupado no Mercado Restrito. Por outro lado, o nível de atividade no setor de serviços não é significativamente impactado, tendo em vista que não apresenta emissões significativas.

Quando a meta é geral, um preço determinado pelo mercado se efetiva para todos os setores. Assim, setores mais sensíveis ao preço reduzem mais suas emissões, reduzindo também seu nível de atividade. Por outro lado, no cenário em que apenas alguns setores selecionados têm suas emissões restringidas por uma meta, os demais setores que não sofrem a penalização não têm incentivo para reduzir suas emissões e, portanto, não são diretamente afetados. Mas ainda assim são afetados indiretamente ao perceberem custos maiores em seus insumos intermediários, mudanças no preço relativo dos fatores de produção e na demanda por seus produtos.

De forma geral, os resultados mostram o papel central do setor de Transportes no abatimento das emissões setoriais. No Mercado Restrito, esse setor é responsável por 63,7% das emissões iniciais do mercado, enquanto no Mercado Amplo por 18,2%. Mas apesar da contribuição significativa desse setor para o cumprimento da meta no Mercado Restrito, seu nível de atividade é pouco impactado, sendo sua variação acumulada no período apenas 1% menor em relação ao Mercado Amplo. Isso reforça a relevância de políticas voltadas a esse setor, como o *RenovaBio* (Lei nº 13.576 de 2017). Porém, para alcançar metas maiores de abatimento, a inclusão de outros setores nos mercados de carbono é necessária para não sobrecarregar poucos setores exigindo preços de carbono elevados para alcançar determinada meta.

Quanto mais setores participam do mercado, menor é a queda no nível de atividade setorial, pois ao dividir a meta de abatimento entre mais setores, o custo para alcançá-la também é dividido. Os resultados obtidos, que levam em consideração a estrutura produtiva setorial, o potencial de abatimento e os custos associados, podem embasar políticas de subsídios para investimentos em tecnologias limpas nos setores mais impactados.

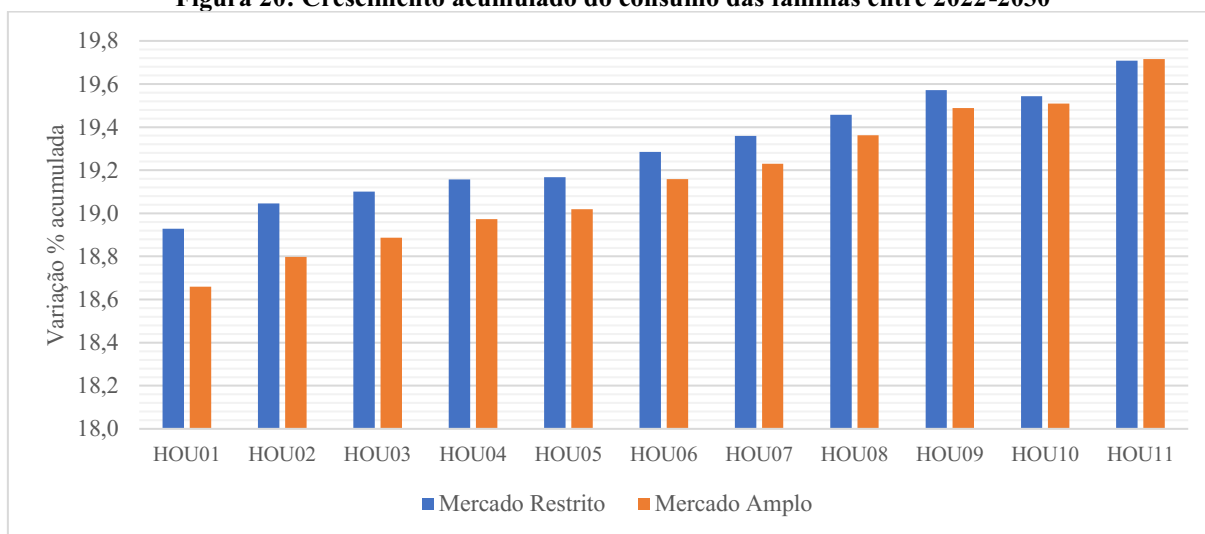
Além dos resultados setoriais, é interessante analisar o consumo das famílias, um indicador do impacto de bem-estar econômico. A Figura 20 apresenta a variação acumulada no consumo das

famílias no Mercado Restrito e no Mercado Amplo. O resultado agregado do consumo mostra que estas variações são semelhantes nos dois experimentos de mercado, mas as famílias de menor classe de renda são as que tem o consumo mais afetado no Mercado Amplo (o crescimento do seu consumo seria maior no Mercado Restrito). Portanto, apesar de alcançar a meta de abatimento com menor preço de carbono, o Mercado Amplo teria um efeito distributivo negativo.

Esse efeito regressivo é consequência do aumento dos custos setoriais causados pela introdução dos mercados de carbono. No Mercado Restrito, apenas setores industriais, de transporte e de geração de eletricidade são abrangidos pela meta de abatimento, sendo, portanto, aqueles que enfrentam maiores custos para alcançar a mitigação desejada. Esses setores representam 26,8% do consumo das famílias do primeiro extrato de renda e 18,6% do consumo das famílias do grupo de renda mais elevada.

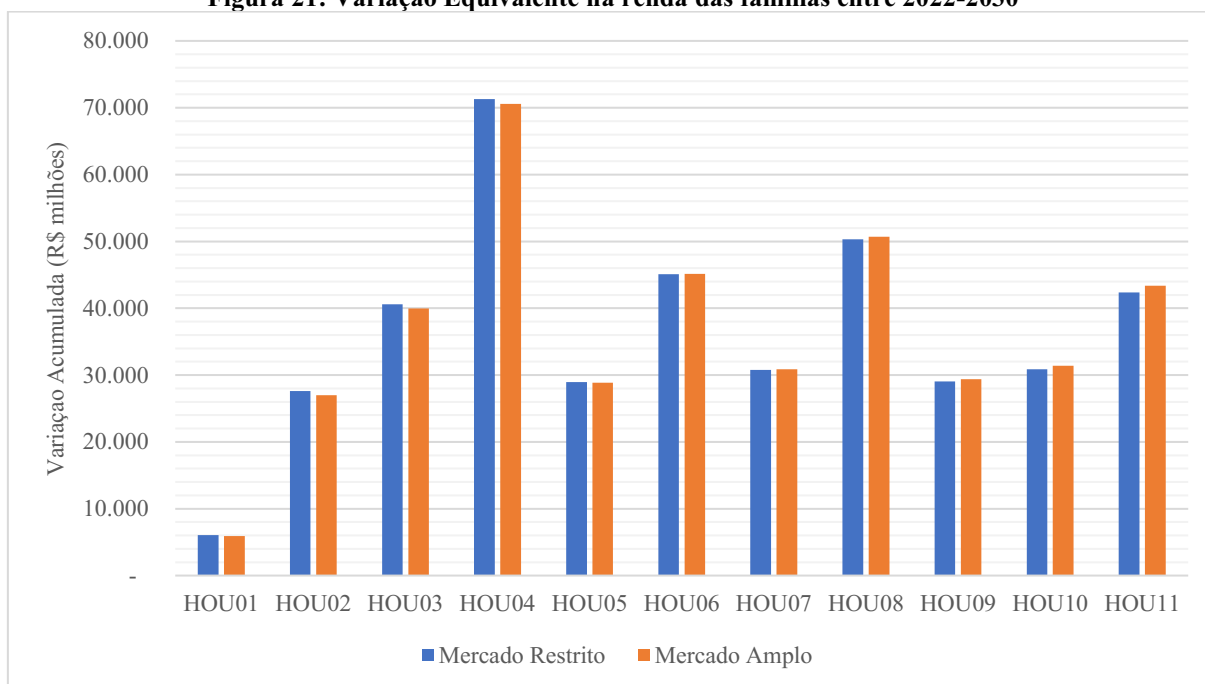
No Mercado Amplo, contudo, a incorporação dos demais setores, especialmente os agropecuários e de alimentos, que correspondem a 29,4% do consumo das famílias do primeiro extrato, impacta relativamente mais o consumo dessa classe. Já as famílias dos extratos mais altos, o consumo de agropecuária e alimentos é relativamente menor, chegando a apenas 6,1% no extrato de renda mais alta. Enquanto a proporção do consumo de bens agropecuários e alimentos em relação ao total consumo é inversamente proporcional à renda, o oposto é percebido em relação ao setor de serviços. Nas famílias do primeiro extrato 40,1% da sua cesta é de bens desse setor, essa proporção aumenta para cada classe seguinte, chegando a 72,4% nas famílias de maior renda.

Ao incluir todos os setores no mercado de carbono, as famílias dos extratos de menor renda são, portanto, mais afetadas, já que o setor de serviços é relativamente limpo, enquanto a agropecuária concentra grande parte das emissões de GEE (Tabela 9). Além disso, contrariando a tendência geral, a classe de maior renda é beneficiada no Mercado Amplo em termos de variação no consumo. Apesar de também sofrerem com o aumento do custo dos setores que são incluídos do Mercado Amplo, essas classes se beneficiam mais do menor preço de carbono exigido nesse mercado. Para essas famílias do grupo de maior renda, um preço de carbono menor sobre mais setores tem menor impacto sobre o consumo do que um custo maior sobre menos setores.

Figura 20: Crescimento acumulado do consumo das famílias entre 2022-2030

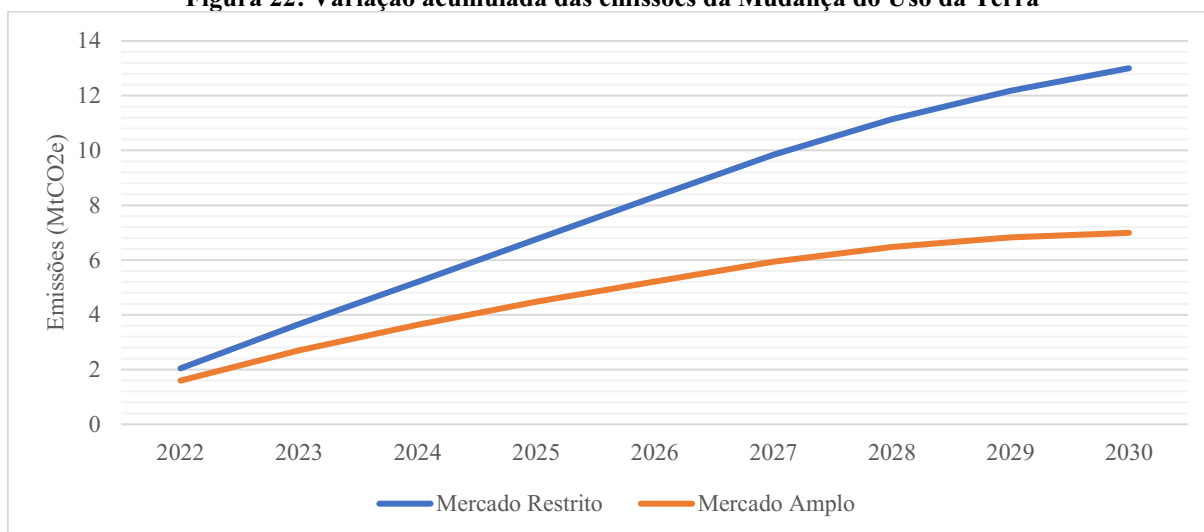
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

A Figura 21, por sua vez, mostra a variação equivalente de renda. A variação equivalente da renda mede o ganho necessário, em termos monetários, para que as famílias mantenham o mesmo nível de bem-estar anterior à mudança de preços provocada pela imposição de uma meta de abatimento aos setores participantes do mercado de carbono. Os grupos familiares 1 a 5 têm variação equivalente na renda maior no cenário restrito, ao passo que, grupos 6 a 10 têm sua variação maior no Mercado Amplo. Ou seja, famílias de menor renda precisam de compensações maiores no mercado restrito para manter seu nível de bem estar, enquanto as famílias de maior renda precisam de compensações relativamente maiores no mercado restrito, indicando novamente os efeitos regressivos da inclusão de mais setores no mercado de carbono.

Figura 21: Variação Equivalente na renda das famílias entre 2022-2030

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Em relação às variações nas emissões do uso da terra decorrentes da própria introdução dos mercados de carbono (Figura 22), nota-se que o Mercado Restrito provocaria emissões decorrentes do uso da terra de 13 MtCO₂e. Já o mercado amplo, devido a queda da atividade da agropecuária, as emissões seriam de 7 MtCO₂e. E esse aumento das emissões do uso da terra em decorrência da implementação de um mercado de carbono precisa ser considerado para que as emissões totais fiquem dentro da meta, ou seja, os mercados de carbono tenderiam a gerar emissões indiretas no uso da terra; embora um mercado amplo diminua consideravelmente esse efeito (por incluir a agropecuária). Esse resultado condiz com aquilo que é observado nos mercados de carbono implementados no mundo: medidas complementares aos mecanismos de precificação também são necessárias para enfrentar as barreiras não relacionadas a preços e reduzir as emissões em setores não cobertos pela precificação do carbono (WORLD BANK, 2021).

Figura 22: Variação acumulada das emissões da Mudança do Uso da Terra

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Nesse sentido, observa-se a relevância dos setores de energia para eficiência das políticas de precificação de carbono mesmo no contexto brasileiro. As emissões associadas à matriz energética podem ser divididas em dois grupos: as emissões setoriais da queima de combustíveis (ex.: gasolina utilizada no setor de transportes) e as emissões associadas à produção de eletricidade (ex.: termelétricas). O BEETS foi desenvolvido para dar maior detalhamento a esses dois grupos de emissões. Por desagregar o setor de eletricidade por tipo de geração, é possível analisar a participação de cada tipo de termelétrica nos mercados de carbono. E, por considerar os diferentes combustíveis, precificar as emissões associadas ao uso de diferentes combustíveis fósseis. Por isso, os resultados relativos ao setor de eletricidade foram detalhados na seção seguinte.

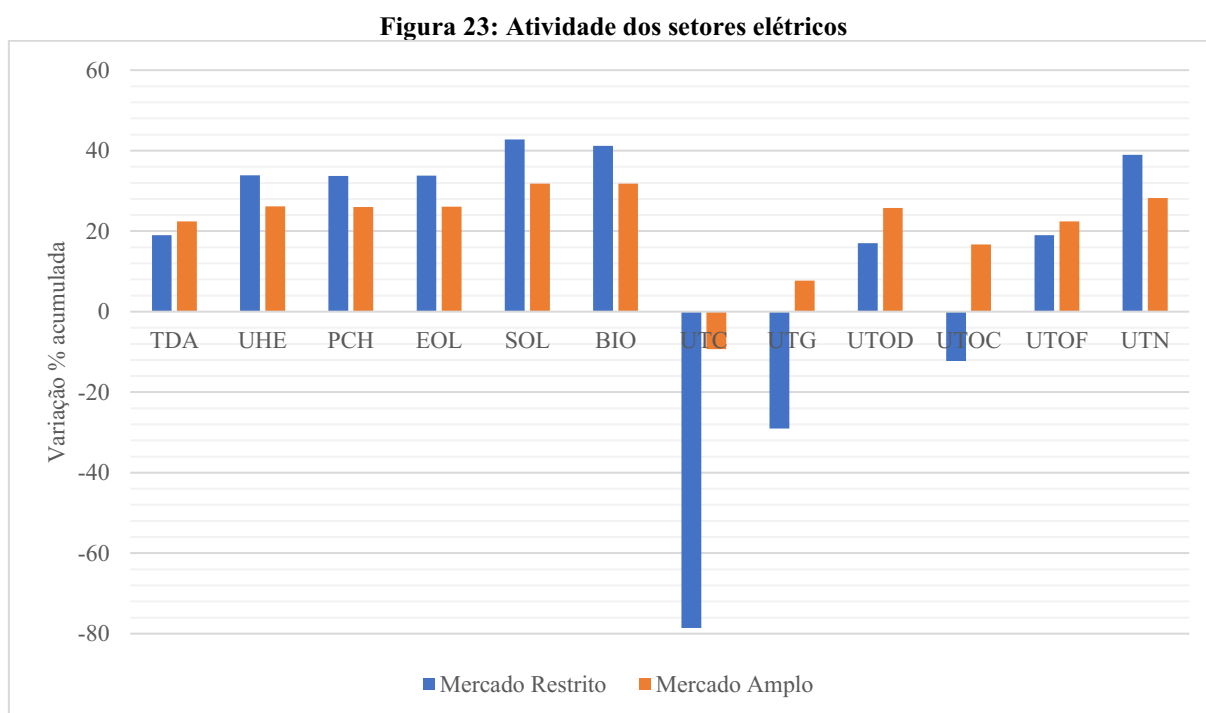
4.2.5. Resultados do Setor Elétrico

Como visto na Tabela A1 (Apêndice), os setores participantes do mercado, por serem os que sofrem diretamente com os custos para alcançar a meta, também são os que mais reduzem a atividade. Entretanto, o setor de eletricidade é um caso particular que merece ser tratado separadamente. Destaca nesse conjunto o setor de Transmissão e distribuição de energia que não emite diretamente, mas recebe a energia e repassa ao consumidor final. Portanto, tem a atividade afetada pelo resultado das térmicas.

A composição da matriz energética de um país é resultante de diversos fatores (planejamento, econômicos, sociais, tecnológicos e ambientais). Esses últimos relacionam-se principalmente

com a abundância de recursos energéticos, como reservas petrolíferas ou potencial hidrelétrico, eólico ou fotovoltaico, e com o combate ao aquecimento global. Mudanças nessa matriz afetam toda a cadeia produtiva de um país, gerando elevados efeitos encadeados no restante da economia. Dessa forma, é relevante compreender a conjuntura atual e perspectivas futuras dos setores energéticos brasileiros para entender as implicações de restrições às emissões nesses setores, buscando avaliar como mecanismos de precificação de carbono poderiam afetar a composição da matriz energética (que inclui a matriz elétrica).

Atingir a meta de abatimento das emissões propostas pela NDC pode exigir grandes mudanças na matriz elétrica, que dependem da forma com que as políticas serão executadas. Os efeitos sobre a atividade dos setores de eletricidade decorrentes da implementação do Mercado Restrito (preço médio de carbono R\$180) e do Mercado Amplo (preço médio de carbono a R\$74) são apresentados na Figura 23. Eles representam a mudança que ocorreria na matriz energética a partir da participação dos setores de geração de energia em mercados nacionais de carbono.



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Cada setor possui custos específicos de abatimento das emissões de GEE e, portanto, são diferentemente afetados quando participam de um mercado de carbono. Assim, políticas que busquem reduzir especificamente as emissões setoriais (e.g. meta de redução das emissões da geração de eletricidade) devem levar isso em conta. O modelo determina endogenamente os

preços de carbono necessários para o alcance das metas, e assim, os cortes de redução de emissões dos setores ou usos de maneira custo-eficiente.

Os setores de geração vendem apenas para o setor de transmissão e distribuição (TDA), responsável por repassar a energia para o consumidor final (setores e famílias). No mercado restrito esse setor cresce um pouco menos que no mercado amplo. (aproximadamente 3% menos acumulado ao longo do período). Então, os demais setores se deparam com uma demanda de energia similar entre os dois cenários. O que muda significativamente é a composição dessa eletricidade. No Mercado Restrito, as Termoeletricas à Carvão reduziriam muito sua atividade. As Termoeletricas a gás natural e a óleo combustível também. Em compensação, as fontes renováveis crescem para compensar. No Mercado Amplo apenas as Termoeletricas a Carvão teriam uma redução da sua atividade. Os demais setores têm crescimento da atividade ao longo do período. E as fontes alternativas não crescem tanto.

Todavia, reduzir o uso das termoeletricas não é tarefa simples. Elas são importantes para garantir a estabilidade da rede em um contexto de aumento das fontes intermitentes. São uma opção muito mais custosa do que reduzir as emissões em outros setores. Além disso, elevar a participação dos renováveis exige investimentos altos que tem reduzida capacidade de gerar efeitos encadeados positivos para o país, dada a dependência de bens de capital importados nesses setores.

Além disso, o aumento da participação das fontes intermitentes compromete a confiabilidade da rede e pode encarecer a geração de eletricidade, que é insumo básico para toda a cadeia produtiva e está diretamente associado à qualidade de vida da população. Mas o aumento das emissões ocorrido nas últimas décadas mostra que, se deixadas à própria sorte, as emissões dos setores de energia se tornarão um problema cada vez maior. Portanto, apesar dos efeitos negativos da internalização dos custos das emissões de GEE dos setores de energia, essa é uma medida urgente.

Um dos motivos para as mudanças no nível de atividade dos setores de geração de eletricidade relaciona-se à estrutura teórica do modelo. Como o modelo considera retornos constantes de escala, as emissões são proporcionais ao nível de atividade dos setores e uso de energia e combustíveis. Assim, uma queda nas emissões implica queda no nível de produção do setor. Em outras palavras, as emissões são reduzidas devido à substituição de insumos energéticos via

mudança de preços relativos, não sendo considerada a existência de mudanças tecnológicas ou cenários alternativos que pudessem reduzir as emissões dos setores. Porém, o setor de transmissão muda a composição de fontes de energia ao enxergar os custos de carbono impostos em cada simulação de mercado de carbono.

As emissões associadas à matriz energética apresentam trajetória ascendente, pois o próprio crescimento econômico demanda a expansão da oferta energética. Todavia, esse não é o único motivo para que os setores energéticos tenham papel central na transição para uma economia de baixo carbono mesmo sendo um país com uma matriz energética relativamente limpa e cujas principais fontes emissoras estarem associadas à agropecuária e ao desmatamento.

O crescimento da demanda energética, o progresso tecnológico e as pressões ambientais são questões inerentes ao planejamento energético. Esses fatores podem assumir papel significativo como desafios/oportunidades no contexto nacional. A relação entre o uso de energia e o crescimento da produção é especialmente importante no contexto brasileiro, de país em desenvolvimento e de industrialização tardia. Há consenso de que a demanda energética crescerá nos próximos anos, uma vez que a industrialização e a urbanização devem crescer. Em linhas gerais, segundo a EPE (2020c), espera-se um crescimento médio da demanda brasileira por energia final entre 1,4% - 2,2% a.a. até 2050. A ampliação do acesso a eletrodomésticos e da mobilidade urbana estão entre os principais demandantes de energia. Por outro lado, a oferta de energia pode tornar-se fator limitante ao crescimento econômico.

A geração distribuída aumenta a complexidade do planejamento energético a medida em que exige maior flexibilização e gera descentralização espacial da geração. Por outro lado, se bem planejada, pode auxiliar na redução das perdas técnicas. O fato de localizar-se próximo aos centros consumidores permite aumentar a eficiência e reduzir os investimentos em sistemas de geração e transmissão. Em 2019, o valor de perdas (comerciais e técnicas) de eletricidade foi de 16,2% (EPE, 2020a), evidenciando a importância das ações de eficiência energética voltadas para a redução das perdas no planejamento energético nacional.

Nesse sentido, a incorporação das tecnologias Rede Inteligente (*Smart Grid*) nas redes de transmissão e distribuição de energia elétrica apresentam elevado potencial para aumentar a eficiência energética e contribuir para reduzir a demanda energética. Esse conceito pode ser visto como parte da solução aos desafios do planejamento energético. Entretanto, sua

implantação poderá representar mudanças da operacionalização da rede elétrica, em que sinais tarifários como as Tarifas Brancas¹⁰ podem gerar incentivos adequados para modificar a demanda de melhor maneira para o planejador do sistema energético. Segundo o PNE 2050, esse o papel mais ativo do consumidor final de energia como agente de mercado será decisivo para a expansão do setor energético.

De toda forma, o contínuo processo de desenvolvimento tecnológico do setor energético é notável. De acordo com Aguero, Khodaei e Masiello (2016), o setor de distribuição de energia elétrica está em plena evolução, a indústria da eletricidade evolui a um ritmo que lembra as transformações ocorridas no início do século XX. Mas a conjuntura atual apresenta outros desafios técnicos para o abastecimento energético. A intermitência das fontes eólica e solar demanda maior esforço para o controle de estabilidade e, conseqüentemente, operação mais dinâmica do sistema elétrico. E, para tal controle, destaca-se a importância da participação de usinas térmicas na operação do SIN. Assim, serão necessárias soluções regulatórias inovadoras para a remuneração da eletricidade gerada por tais fontes. As diferentes características desse tipo de geração, grande variabilidade e despachabilidade reduzida em comparação às opções tradicionais (hidroelétricas e termelétricas), demanda, no longo prazo, interconexões, gerenciamento da demanda e a contratação de potência complementar de reserva, como baterias, hidrelétricas reversíveis ou, no curto e médio prazo, turbinas a gás, para sua maior inserção na matriz elétrica. Nesse contexto, a disponibilidade do gás natural poderia tornar-se condicionante importante no planejamento da expansão dessa geração. Esses problemas de integração e estabilidade da rede devido às grandes penetrações de energia intermitente colocam em dúvida a real possibilidade de grande expansão ligada ao SIN (EPE, 2018).

Portanto, para além da preocupação em atender de forma segura a demanda de energia e com modicidade tarifária, ganhos de eficiência energética tanto no consumo, através de tecnologias da informação, telecomunicação, automação e eletrônica de potência, como na oferta, por meio de novas tecnologias mais eficientes e com menos perdas nos processos de transmissão e distribuição e a busca pelo aumento da eficiência do processo de conversão das fontes de energia primária em eletricidade, são variáveis fundamentais para o planejamento energético,

¹⁰ A Tarifa Branca é uma nova opção tarifária homologada por resoluções da Aneel, iniciada em 2018, para as unidades consumidoras atendidas em baixa tensão. Há três valores tarifários ao longo do dia: no período de ponta a tarifa é mais elevada. No período intermediário, tarifa intermediária. Fora da ponta, tarifa menor que a convencional. Dessa forma, apresenta-se como opção indicada aos consumidores que conseguem concentrar seu consumo no período fora de ponta dos dias úteis e nos fins de semanas.

uma vez que tornam possível atender a uma demanda crescente sem contrapartida equivalente na geração. Mas o papel das inovações tecnológicas não se limita ao planejamento energético. Além de configurarem desafios ao planejamento energético, os avanços tecnológicos do setor energético podem desempenhar um papel relevante nas políticas de desenvolvimento econômico nacional.

4.3. Discussão dos resultados

Para entender a importância relativa dos setores produtivos para a transição para uma economia de baixo carbono, diferentes possibilidades de mercados de carbono foram analisadas. Os setores participantes de cada cenário foram definidos com base na relação de custo-efetividade da taxa de carbono sobre cada um deles, obtida da análise de suas curvas marginais de abatimento setorial. A presente seção compara os resultados encontrados neste capítulo com outros da literatura.

Assim como a presente tese, muitos estudos recentes foram estimulados pelas NDC apresentada pelo Brasil na COP21. Embora adotem modelos e pressupostos diferentes, esses trabalhos trazem preocupações similares: a necessidade de descarbonizar a matriz energética e os custos econômicos associados a isso. E todos eles partem de uma mesma realidade: um país em desenvolvimento, com características socioeconômicas, geográficas, políticas e ambientais singulares. Especialmente relevantes são as particularidades da matriz energética: potencial do pré-sal, mercado de biocombustíveis, elevada participação de hidreletricidade, elevado potencial de geração eólica e fotovoltaica são algumas dessas características.

A magnitude dos resultados depende dos fechamentos adotados, portanto, não é tão importante quanto sua direção. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura utiliza modelos globais. Segundo Lucena *et al.* (2016), existem quatro canais principais que levam à diminuição do consumo de energia nos modelos de EGC globais: i) PIB diminui com as políticas de carbono, reduzindo a renda per capita e, como consequência, o consumo de energia em relação ao cenário de linha de base; ii) políticas de carbono aumentam os custos das fontes de energia fóssil, o que reduz o consumo; iii) preços maiores da energia induzem a eficiência energética; e iv) como as políticas de carbono são aplicadas a outros países, há uma diminuição da atividade econômica global, reduzindo novamente o uso de energia.

As reduções de emissões são principalmente devido ao menor consumo de energia, aumento da penetração de energia renovável (especialmente biomassa e eólica) e de tecnologias de captura e armazenamento de carbono para fósseis e/ou combustíveis de biomassa. Porém, segundo Oliveira, Gurgel e Tonry (2019) independentemente de quão recomendável seja a construção de um mercado de carbono global, sua viabilidade é muito limitada no curto prazo. Portanto, modelos nacionais, como o utilizado na presente tese, para mercados nacionais são uma opção atraente. Além disso, os canais principais que levam a redução do consumo de energia são os mesmos.

Há consenso na literatura que, caso medidas adicionais não sejam tomadas, haverá crescimento das emissões, principalmente dos setores de energia e agropecuária. São vários os estudos que simulam os impactos da tributação sobre o carbono justamente pelo seu elevado potencial para reduzir o volume total de emissões, tais como Wills e Lefreve (2012), Chen *et al.* (2013), Wills (2013), Magalhães (2013), Lucena *et al.* (2016), La Rovere *et al.* (2015), Grottera *et al.* (2016) Lefreve *et al.* (2016), Octaviano, Paltsev e Gurgel (2016), Rathmann (2017), Rathmann *et al.* (2017), Carvalho *et al.* (2018), Brasil (2020) e Brasil (2021) . No geral, a imposição de metas de emissão implica redução do PIB real devido aos aumentos dos custos de produção associados ao pagamento de impostos de carbono. Os impactos negativos em termos de produção, atividade econômica e bem-estar são maiores à medida em que as metas de redução de GEE tornam-se mais ambiciosas devido aos aumentos dos custos de produção associados ao pagamento de impostos de carbono (MAGALHÃES, 2013). Os resultados encontrados nesta tese estão alinhados a esta literatura.

Como compensação à queda no nível de atividade, a maioria dos estudos defende a reciclagem dos impostos (i. e., realocação da receita arrecadada para, por exemplo, desonerar a folha de pagamento, subsidiar tecnologias ambientalmente eficientes ou gerar renda para as famílias). Assim, concordam que é possível associar redução das emissões e crescimento econômico. Por sua vez, as simulações realizadas na presente tese consideram que as permissões para emitir são distribuídas gratuitamente, pelo menos no momento inicial de incentivo a entrada no mercado, não havendo receita para o governo. Dessa forma, não foram considerados efeitos positivos da reciclagem da receita. Contudo, isso permite que os preços de carbono no mercado sejam menores. O objetivo dessa estratégia de simulação consistiu em aumentar a viabilidade da introdução do mecanismo de mercado no curto prazo, diminuindo os custos setoriais e permitindo alcançar a meta do Acordo de Paris.

Ainda em termos de custos setoriais, o imposto sobre o carbono impacta os preços setoriais de forma diferente, com maiores impactos em setores intensivos em energia. Por isso, estudos tem observado que as metas de redução das emissões podem reduzir o número de empregos nos setores de petróleo e carvão (trabalhadores qualificados) e aumentar na produção de biocombustíveis (mão-de-obra desqualificada). Outro efeito setorial comumente percebido é a substituição de combustíveis fósseis por eletricidade como em Carvalho *et al.* (2018). Já Grottera *et al.* (2016), por exemplo, defende que a existência de custos marginais de abatimento baixos ou até mesmo negativos para alguns setores produtivos permite reduzir as emissões sem comprometer os níveis de produção e emprego. Os resultados encontrados nesta tese estão nessa direção: a precificação de carbono incentiva a substituição de fontes poluentes por fontes limpas em todos os setores, com efeitos mais significativos na geração de eletricidade e no setor de transportes, cuja estrutura produtiva permite que essa substituição ocorra com sacrifício da produção setorial relativamente menor.

Enquanto isso, os efeitos da taxaço sobre a distribuição de renda são mais conflitantes. Grottera *et al.* (2016), defende que a taxaço pode gerar melhor distribuição de renda. Para os autores, a variação de preços dos setores intensivos em energia (significativamente maior do que no geral índice de preços), especialmente transportes e combustíveis derivados do petróleo, afetam mais os estratos mais ricos devido a maior parcela de despesas com esses itens. Classes mais ricas geralmente gastam mais em bens como combustíveis, para os quais os preços aumentam consideravelmente, mas não representam uma grande parcela da cesta de consumo dos mais pobres. As classes mais baixas gastam uma grande parcela de sua renda em produtos alimentícios, por exemplo, cujos preços permanecem praticamente inalterados.

Enquanto Magalhães (2013) e Carvalho *et al.* (2018) observam efeitos concentradores de renda. Ao contrário de Grottera *et al.* (2016), Carvalho *et al.* (2018) observa que os primeiros decis de renda seriam sim prejudicados pelo aumento do preço dos alimentos. E, segundo Magalhães (2013), com base no consumo das famílias, o imposto sobre o carbono seria moderadamente regressivo em termos de consumo. De forma geral, pode-se dizer que depende dos incentivos adotados, especialmente da forma com que a receita da tributação é utilizada.

O presente trabalho observou que os efeitos sobre as famílias dependem do mecanismo de precificação adotado. Quanto maior o preço de carbono imposto aos combustíveis, mais afetaria o consumo das famílias de maior renda, concordando com Grottera *et al.* (2016). Todavia, em

um mercado de carbono que inclui a agropecuária, maior a redução do consumo das famílias de baixa renda, percebendo efeitos concentradores, como em Magalhães (2013) e Carvalho *et al.* (2018).

Os trabalhos sobre taxação de carbono são bastante divergentes quanto aos valores da tonelada de emissões necessários para alcançar determinados patamares de emissões de GEE. Segundo o estudo realizado pela Fiesp (2017), essa divergência é consequência da existência de diferentes oportunidades setoriais de mitigação a baixos custos, que poderiam ser melhor aproveitadas em mercados *cap-and-trade*. Assim, os mecanismos de comércio de emissões poderiam reduzir os custos de mitigação. Os resultados do presente trabalho corroboram com essa hipótese. De fato, é possível observar que Cenário de Referência, em que não há mercado, os agregados econômicos tem desempenho pior do que nos Cenários de Mercado Amplo e Restrito.

Os mercados de crédito de carbono foram foco de trabalhos como Fiesp (2017), Gurgel e Paltsev (2017), Faccin (2019) e Oliveira, Gurgel e Tonry (2019). Esses estudos também indicam que os mercados podem gerar impacto negativo menor no PIB do que a taxação. Além disso, segundo Gurgel e Paltsev (2017), a introdução de um sistema de precificação de carbono poderia ser uma estratégia de política climática para evitar altos custos e perdas na competitividade do país.

Outro ponto fundamental, consenso entre todos os trabalhos encontrados na literatura em questão, é que o esforço de controle do desmatamento é o principal fator que deve permitir ao país cumprir os objetivos de redução das emissões de GEE propostas na NDC por ser a forma economicamente menos custosa de reduzir as emissões no Brasil. Como destacam Chen *et al.* (2013) e Lucena *et al.* (2016), o menor controle do desmatamento, dada a representatividade das emissões do uso da terra no total emitido pelo Brasil, pode acarretar maior custo de carbono. Ou, inversamente, um maior controle do desmatamento pode reduzir a carga de mitigação dos demais setores, especialmente o energético.

Pela mesma razão, os mecanismos de tributação de carbono seriam menos custosos se incluíssem as emissões pela mudança do uso da terra. Segundo Oliveira, Gurgel e Tonry (2019) devido às oportunidades de mitigação existentes disponíveis no setor de mudança do uso da terra, sua inclusão no sistema ETS, via compensações, por exemplo, poderia estimular o Brasil

para reduzir ainda mais e até mesmo exportar licenças para a Europa. A importância de políticas de desmatamento também é ressaltada por Octaviano, Paltsev e Gurgel (2016).

Em termos da estrutura produtiva nacional, estudos sugerem que uma política de controle do desmatamento provocaria perda apenas marginal sobre o crescimento econômico, tais como Cabral e Gurgel (2014), Carvalho, Magalhães e Domingues (2016), Francisco (2018). Os resultados desses trabalhos mostram que o *trade-off* entre preservação ambiental e crescimento econômico não é significativo para o caso do desmatamento na Amazônia porque não afeta significativamente a produção do setor agropecuário e um pequeno aumento da produtividade da agropecuária na Amazônia Legal de (1% ao ano) seria suficiente para compensar o sacrifício econômico para combater o desmatamento. Os resultados desse trabalho também indicam isso. Foi imposto a condição de desmatamento zero para alcançar 170 MtCO₂e de abatimento e não houve mudança significativa no crescimento dos agregados econômicos.

Além da importância da mudança do uso do solo, os estudos realizados até então apresentaram possibilidades interessantes a respeito do potencial do setor energético num contexto de economia de baixo carbono. Porém, o setor energético apresenta características particulares para cada tipo de geração de energia, além de características específicas de transmissão e distribuição, mediante controlador central, via Sistema Integrado Nacional (SIN). Assim, utilizando como base os resultados dos trabalhos apresentados nessa seção, o presente trabalho busca promover sua própria contribuição, criando uma ferramenta inédita adaptada para a realidade brasileira, que permite estimar o custo de abatimento setorial das emissões e identificar os impactos sobre a economia e o volume de emissões de opções de mercado de carbono, considerando as particularidades da estrutura produtiva e uso da terra no Brasil.

Para tanto, o presente trabalho desagregou o setor energético, separando a geração da transmissão e distribuição de eletricidade. E, desse modo, buscou identificar tecnologias de produção específicas para cada tipo de geração, especialmente de fontes que representam alternativas renováveis de geração de eletricidade. Há ainda outras particularidades do modelo desenvolvido para a presente tese, como a dinâmica recursiva e módulo ambiental e de transição do uso da terra, que procuram complementar os estudos já realizados e apresentar uma outra abordagem para mensuração dos impactos econômicos e ambientais de políticas voltadas para a transição energética para uma economia de baixo carbono.

5. CONCLUSÕES

Apesar das iniciativas governamentais, observou-se aumento recente no desmatamento e, conseqüentemente, no total líquido das emissões brasileiras. O que traz muitas dúvidas sobre a efetividade dos instrumentos adotados pelo país para alcançar crescimento econômico ambientalmente sustentável. Mesmo que os compromissos assumidos pelo Brasil em sua NDC representem um desafio de manter as emissões totais próximas ao nível atual, ou seja, buscar crescimento econômico sem que isso continue representando aumento das emissões setoriais e que a redução das emissões advindas das mudanças no uso do solo e florestas já observadas até 2020 não apresentem reversões significativas, ainda assim pode ser difícil alcançá-los. Por isso, incentivos adicionais como os mecanismos de precificação podem ser necessários.

Os mecanismos de precificação têm efeitos encadeados em toda estrutura produtiva, por isso, torna-se útil a construção de modelos preditivos que possam indicar que tipo de impacto econômico é esperado a partir da implementação desses mecanismos sobre a estrutura produtiva brasileira, especialmente sobre os setores energéticos, com participação crescente nas emissões nacionais. Entre os estudos encontrados na literatura, há divergências quanto a esses impactos. A utilização de mecanismos de precificação para alcançar metas de abatimento de emissões frequentemente exige sacrifícios em termos de PIB e emprego, no entanto, quando incorporam reciclagem de receitas, os resultados podem ser opostos.

Na presente tese, foram estudados dois tipos de mecanismos de precificação: a taxaço, a partir da análise das curvas MAC, e os mercados de carbono. Para isso, utilizou-se uma metodologia de Equilíbrio Geral Computável que torna possível analisar a estrutura produtiva setorial e sua reação aos mecanismos de precificação. A metodologia foi escolhida por sua capacidade em captar os efeitos sistêmicos, diretos e indiretos, entre os setores da economia.

O modelo BEETS foi especialmente desenvolvido levando em consideração as principais características das emissões e da matriz energética nacionais. Para isso, além do módulo de emissões, que considera separadamente as emissões decorrentes da atividade produtiva e da queima de combustíveis, o modelo possui um módulo de transição do uso da terra, que permite capturar as mudanças no uso da terra decorrentes das atividades econômicas. Assim, quando os mecanismos de precificação afetam a atividade dos setores que utilizam terra (agropecuários e

exploração florestal), afetam também a demanda por esse fator de produção, o que pode contribuir para o aumento do desmatamento e das emissões de GEE.

Além disso, devido à importância dos resultados setoriais associados aos mecanismos de precificação, optou-se por construir uma base de dados desagregados para os setores de geração, transmissão e distribuição de eletricidade, o que permite analisar os impactos da precificação de carbono sobre a composição da matriz elétrica e identificar o custo de abatimento marginal para os principais tipos de termoelétricas em operação no Brasil (movidas a carvão, a óleo diesel, a gás natural e a óleo combustível).

Em relação aos resultados encontrados, a partir das curvas MAC obtidas das simulações é possível elaborar e comparar estratégias de mitigação avaliando a importância relativa e o potencial de abatimento de cada setor individualmente nesse processo. Utilizando a abordagem de equilíbrio geral, pode-se avaliar quais setores possuem menores custos (setoriais e agregados) para alcançar determinados níveis de abatimento. Esse custo representa o limite de custo, abaixo do qual, as tecnologias disponíveis que se encontrarem, seriam adotadas.

Em outras palavras, curvas MAC baseadas em modelos econômicos auxiliam a entender a relação entre o imposto sobre o carbono e os níveis de redução das emissões resultantes. Assim, os resultados ajudam a identificar quais setores deveriam receber subsídios para custear o volume de abatimento desejado. Ao introduzir preços de carbono entre R\$10-R\$2.000, o maior volume de redução das emissões é observado na pecuária, seguida pelo setor de transportes. Pois são os principais emissores.

Menor volume de abatimento é percebido entre as termoelétricas, porém, devido à possibilidade de substituição entre as fontes de geração de eletricidade, o aumento de custos associados a um preço de carbono relativamente baixo é suficiente para provocar queda no nível de atividade e emissões setoriais relativamente alta. Por isso, Termoelétrica Carvão, Termoelétrica Óleo Combustível, Termoelétrica Gás Natural e Termoelétrica Óleo Diesel estão os cinco setores que mais reduzem suas emissões em relação ao total de emissões do setor com preços de R\$100 ou R\$500 por tonelada de CO₂e, por exemplo. Além das térmicas, outro setor que reduz seu volume de emissões em relação ao total de emissões é Transporte de passageiros, devido à possibilidade de substituição entre gasolina e etanol.

Por sua vez, nas simulações com mercados de carbono, os preços de carbono encontrados, ano a ano, para o Mercado Amplo e Mercado Restrito, são preços sombra endogenamente determinados pelas simulações. Após a alocação inicial gratuita, os agentes comercializam suas licenças. Setores com maiores custos de abatimento preferem comprar permissões, enquanto setores com menores custos são incentivados a mitigar suas emissões e vender suas permissões. Assim, o mercado encontra uma forma eficiente de alcançar a meta com menor sacrifício econômico agregado.

Resultados corroboram com outros da literatura, indicando que os mercados de carbono são mais eficientes que políticas de comando e controle para alcançar a meta de abatimento estabelecida pela NDC. Os resultados também mostram que um mercado de carbono abrangente, apesar de conseguir reduzir o preço de carbono necessário para alcançar a meta de abatimento, pode ter efeitos distributivos negativos, pois envolve aumentar os custos de bens que representam uma parcela relativamente maior da renda das famílias de maior renda (como agropecuária).

Como a maior parcela do consumo nas famílias de maior renda é proveniente de serviços, não associados a volumes significativos de emissões, o consumo dessas famílias seria relativamente menos impactado pela implementação de um mercado de carbono. Entretanto, apesar de ser pior para as famílias de menor renda, em termos de consumo e bem-estar, a implementação de um mercado de carbono abrangente, que inclui setores da agropecuária, permite preços de carbono menores para alcançar a mesma meta de abatimento. Por isso, pode ser atraente compensações financeiras para as famílias, como a reciclagem da receita que poderia ser arrecadada mediante a venda das permissões para emitir.

Em geral, os resultados também mostraram que o Brasil possui elevado potencial de abatimento das emissões de GEE com reduzido custo econômico. Todavia, cabe ressaltar que se espera mudanças do lado da demanda cujos efeitos não estão efetivamente representados nos cenários estudados nesta tese, embora possam ser incentivados por precificações de carbono. Em relação ao setor energético, por exemplo, segundo Foell (1985), análises da demanda setorial de energia são aspecto essencial do planejamento energético em países em desenvolvimento, pois auxiliam no planejamento de requisitos básicos da oferta como quantidade, qualidade e localização, o que é particularmente válido para as opções de fontes intermitentes, além de auxiliar a avaliação

do impacto das políticas de preços, investimentos de conservação, regulamentos e a possibilidade de substituição de energia.

No setor residencial, por exemplo, espera-se aumento na venda de eletrodomésticos e, mesmo com os mecanismos de eficiência energética, esse aumento deve contribuir positivamente para o aumento do consumo de eletricidade nas residências nas próximas décadas. No setor de transportes, mudanças na demanda por mobilidade, especialmente nos centros urbanos, e a penetração de novas tecnologias como veículos híbridos e elétricos conectáveis à rede elétrica (*Plug-in Electric Vehicles*) e movidos a célula combustível na frota brasileira, implicarão alterações significativas no consumo energético do setor. Em função das projeções de aumento da carga de eletricidade e da demanda de etanol no setor de transportes, espera-se aumento da intensidade elétrica decorrente da expansão do setor sucroalcooleiro e do setor elétrico, representando um desafio ao dimensionamento da oferta de eletricidade.

Além das mudanças na demanda de energia, outro ponto que influenciará significativamente o cumprimento das metas de emissões no Brasil é o desmatamento. Os cenários desta tese consideram que as metas de abatimento de emissões serão cumpridas, mas isso está diretamente relacionado a decisões políticas. O aumento do desmatamento impactaria em alterações no cenário de referência, demandando maior redução das emissões setoriais, pela queima de combustíveis ou pelo nível de atividade, para alcançar a mesma meta total de emissões. Isso, em geral, aumentaria o custo total de abatimento para toda a economia.

Por fim, ressalta-se que, para analisar os possíveis impactos, em termos de agregados econômicos e volume de emissões, de mecanismos de precificação de carbono no Brasil, como a presente tese buscou fazer, é preciso levar em consideração o contexto ao qual políticas energéticas e ambientais devem ser construídas, especialmente no caso brasileiro, devido tanto aos aspectos de formação econômica do país quanto à recente flexibilização de políticas ambientais e deterioramento de indicadores de sustentabilidade ambiental. Assim, espera-se que, mesmo muito limitada, a discussão realizada nessa tese possa contribuir para compreensão do papel do Brasil no combate ao aquecimento global e suas implicações para a sociedade.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, P. D., DIXON, P. B., MCDONALD, D., MEAGHER, G. A., & PARMENTER, B. R. Forecasts for the Australian economy using the MONASH model. **International Journal of forecasting**, v. 10, n. 4, p. 557-571, 1994.
- ADAMS, P. D.; HORRIDGE, M.; PARMENTER, B. R. **MMRF-GREEN: A Dynamic, Multi-sectoral, Multi-regional Model of Australia**. Monash University, Centre of Policy Studies. Melbourne, 2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Fundamentos do Setor Elétrico**. 1ª edição. Brasília, 2017. Disponível em: http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl17.html. Acesso em: mar. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório V – Formação de custos e preços de geração e transmissão de energia elétrica**. 2015. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos>. Acesso em: nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório de Evolução das Tarifas Residências**. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/relatorio-evolucao-tarifas-residenciais>. Acesso em: set. 2020.
- AGUERO, J. R.; KHODAEI, A.; MASIELLO, R. The utility and grid of future: challenges, needs, and trends. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 14, n. 5, p. 29-37, 2016.
- ALBUQUERQUE, I.; ALENCAR, A.; ANGELO, C.; AZEVEDO, T.; BARCELLOS, F.; COLUNA, I.; COSTA JUNIOR, C.; CREMER, M.; PIATTO, M.; POTENZA, R.; QUINTANA, G.; SHIMBO, J.; TSAI, D.; ZIMBRES, B. ANÁLISE DAS EMISSÕES BRASILEIRAS DE GASES DE EFEITO ESTUFA E SUAS IMPLICAÇÕES PARA AS METAS DE CLIMA DO BRASIL 1970-2019. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. Observatório do Clima, 2020.
- ALMEIDA, A. N. **Elasticidades renda e preços: análise do consumo familiar a partir dos dados da POF 2008/2009**. Texto para discussão Nereus 04-2011. São Paulo: NEREUS, 2011. 29 p.
- AMARANTE, O.A.C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001.
- ARMINGTON, P. S. A. Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production. **International Monetary Fund Staff Papers**, v. 16, n. 1, p. 159-178, 1969.
- BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Sistema de Expectativas de mercado**. 2021. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/expectativas2/#/consultas>. Acesso em: jul. 2021.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Financiamentos**. 2020. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento>. Acesso em: jan. 2020.
- BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **BNDES RenovaBio**. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-renovabio>. Acesso em: 26 jun. 2021.
- BERGMAN, L. Energy Policy Modeling: A Survey of General Equilibrium Approaches. **Stockholm School of Economics**. v. 1988, p. 377–399, 1988.

BISTAFA, R. C.; GURGEL, A. C. Impactos Econômicos da Nova Realidade da Exploração do Pré-Sal. Existe Uma Ameaça Ao Etanol? In: **Anais do XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**. Maceió, 2016.

BRASIL. **Emenda Constitucional nº 95, de 15 de dezembro de 2016**. Altera o Ato das Disposições Constitucionais Transitórias, para instituir o Novo Regime Fiscal, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2016.

BRASIL. **Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981**. Dispõe sobre a criação de Estações Ecológicas, Áreas de Proteção Ambiental e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 1981a.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 1981b.

BRASIL. **Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997**. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 1997.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 1998.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2000.

BRASIL. **Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001**. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2001.

BRASIL. **Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004**. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2004.

BRASIL. **Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006**. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF; altera as Leis nºs 10.683, de 28 de maio de 2003, 5.868, de 12 de dezembro de 1972, 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 4.771, de 15 de setembro de 1965, 6.938, de 31 de agosto de 1981, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2006.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2012a.

Brasil. **Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017**. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2017.

BRASIL. **Decreto nº 9.888, de 27 de junho de 2019**. Dispõe sobre a definição das metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis de que trata a Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, e institui o Comitê da Política Nacional de Biocombustíveis - Comitê RenovaBio. Diário Oficial da União. Brasília, 2019.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa Aneel nº 482 de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Diário Oficial da União, Brasília, 2012b.

BRASIL. ANEEL. **Resolução Normativa Aneel nº 687 de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Diário Oficial da União. Brasília, 2015a.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA FAZENDÁRIA. **Convênio ICMS 16, de 22 de abril de 2015**. Autoriza a conceder isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica de que trata a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Brasília, 2015b.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA – CNPE. **Resolução nº 15 de 24 de junho de 2019**. Define as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. Diário Oficial da União. Brasília, 2019.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA – CNPE. **Resolução nº 8, de 18 de agosto de 2020**. Define as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. Diário Oficial da União. Brasília, 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Portaria MAPA nº 75 de 2015**. Brasília, 2015c.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS. **Exportação e Importação Geral. 2021a** Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/29482>. Acesso em: fev. 2021 a.

BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Boletim Mensal de Acompanhamento de Indústria de Gás Natural. Edição n. 106, 2015d.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha Energética Brasileira. Brasília, 2015e**.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação. 2021b**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima/planos-setoriais-de-mitigacao-e-adaptacao.html>. Acesso em: dez. 2021.

BRASIL. MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. **Planos Setoriais de Mitigação e Adaptação**, 2021c. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima/planos-setoriais-de-mitigacao-e-adaptacao.html> Acesso em: dez. 2021.

BROOK, A.; KENDRICK, D.; MEERAUS, A. GAMS, a user's guide. **ACM Signum Newsletter**, v. 23, n. 3-4, p. 10-11, 1988.

CABRAL, C. D. S. R.; GURGEL, A. C. Análise econômica da limitação do desmatamento no Brasil utilizando um modelo de equilíbrio geral computável. **Anais do XLI Encontro Nacional de Economia**. ANPEC, 2014.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Resultados Consolidados**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/mercado/leilao-mercado>. Acesso em: set. 2019.

CARDOSO, D. F.; DOMINGUES, E. P.; MAGALHAES, A. S.; CARDOSO, G.; SIMONATTO, T. **Redistribuição como medida de recuperação dos efeitos da pandemia de Covid-19: Impactos de longo prazo de um programa de renda básica permanente**. (Working paper), 2021.

CARVALHO, M. M.; FRANCO, M. P. V.; LOMBARDI FILHO, S. C.; MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Simulação Dos Impactos Econômicos Da Proposta Brasileira Na Cop21: Uma Abordagem De Equilíbrio Geral Computável. In: **Anais do XLIV Encontro Nacional de Economia**. ANPEC, 2018.

CARVALHO, M. M.; MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Impactos econômicos da ampliação do uso de energia solar residencial em Minas Gerais. **Nova Economia**, v. 29, n. 2, p. 459-485, 2019.

CARVALHO, T. S. **Uso do solo e desmatamento nas regiões da Amazônia legal brasileira: condicionantes econômicos e impactos de políticas públicas**. 2014. 210 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CARVALHO, T. S.; MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Desmatamento e a contribuição econômica da floresta na Amazônia. **Estudos Econômicos**, v. 46, p. 499-531, 2016.

CHEN, Y.-H. H.; TIMILSINA, G. R.; LANDIS, F. Economic implications of reducing carbon emissions from energy use and industrial processes in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 130, p. 436-446, 2013.

CLARKE, H.; FRASER, I.; WASCHIK, R. G. How much abatement will Australia's emissions reduction fund buy? **Economic Papers: A journal of applied economics and policy**, v. 33, n. 4, p. 315-326, 2014.

COASE, R. H. (1960) The problem of social cost. In: GOPALAKRISHNAN, C. (ed.), **Classic Papers in Natural Resource Economics**. Palgrave Macmillan, London, 2000. p. 87-137.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo, 2014.

CUNHA, B. S. L. **Desenvolvimento de um modelo global de equilíbrio geral computável para avaliação de políticas climáticas: o papel da mudança de dieta**. 2019. 286 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

DINIZ, C. C.; CROCCO, M. Bases teóricas e instrumentais da economia regional e urbana e sua aplicabilidade ao Brasil: uma breve reflexão. In: DINIZ, C. e CROCCO, M. **Economia Regional e Urbana: Contribuições Teóricas Recentes**. Belo Horizonte, MG, 2006.

DINIZ, T. B. **Impactos econômicos e regionais dos investimentos em geração de energia elétrica no Brasil**. 2019. 102 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.

DIXON, P.B.; RIMMER, M. **Forecasting and Policy Analysis with a Dynamic CGE Model of Australia**. Centre of Policy Studies/IMPACT Centre Working Papers op-90, Victoria University, 1998.

DOMINGUES, E. P.; BETARELLI A. A. J.; MAGALHÃES, A. S.; OLIVEIRA, H. C.; VALLADARES, L.M. **Calibragem do Modelo ORANIG para os Dados da Matriz Insumo-Produto Nacional (2005)**. Relatório Técnico de Pesquisa. CEDEPLAR/UFMG, 2009, 33 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço energético nacional 2016: Ano base 2015**. Rio de Janeiro, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050**. NOTA TÉCNICA PR 07/18. Rio de Janeiro, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro, 2020a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Impactos nos mercados de energia no Brasil - 1º semestre de 2020**. BALANÇO COVID-19. Rio de Janeiro, 2020b.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050**. Rio de Janeiro, 2020c.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Precificação de carbono: riscos e oportunidades para o Brasil**. Nota Técnica 014, 2020d.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional 50 anos: 50 anos de estatísticas energéticas**. Brasília, 2021.

FACCIN, F. **Impactos das metas do Acordo de Paris sobre a economia brasileira: uma abordagem de equilíbrio geral computável**. 2019. 58 f. Tese de Doutorado. Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.

FARINA, E., VIEGAS, C., PEREDA, P. e GARCIA, C. Mercado e concorrência do etanol. In: SOUZA, E. L. L.; MACEDO, I. C. **Etanol e Bioeletricidade: A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética**. UNICA, São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010. pg. 226-259

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP). **Mudança do clima: avaliação dos reflexos das metas de redução de emissões sobre a economia e a indústria brasileira**. São Paulo, 2017.

FEIJÓ, F. T.; KUIK, O. Brazilian competitiveness of energy-intensive and trade-exposed industrial sectors vis-à-vis the adoption of border carbon adjustments by the EU: an approach using the GTAP-EP model. In: **Anais do XLIV Encontro Nacional de Economia**. ANPEC, 2018.

FERREIRA FILHO, J. B. S. **Introdução aos modelos aplicados de equilíbrio geral: conceitos, teoria e aplicações**. Piracicaba: ESALQ, 1998.

FERREIRA FILHO, J. B. S.; HORRIDGE, J. M. Ethanol expansion and indirect land use change in Brazil. **Land Use Policy**, v. 36, p. 595-604, 2014.

FOCHEZATTO, A. Testando um modelo de equilíbrio geral computável para a economia gaúcha: impactos da reestruturação tributária. **Ensaio FEE**, v. 23, p. 371-398, 2002.

FOELL, W.; K. Energy planning in developing countries. **Energy Policy**, v. 13, n. 4, p. 350-354, 1985.

FRANCISCO, A. X. **O impacto na economia brasileira e mundial do fim do desmatamento no Brasil: uma abordagem econômica por meio de modelo de equilíbrio geral**. 2018. 131f. Dissertação (MPAGRO) - Escola de Economia de São Paulo.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **Boletim de conjuntura do setor energético**. Rio de Janeiro, 2019.

GONZAGA, G., CORSEUIL, C. H. Emprego industrial no Brasil: uma análise de curto e longo prazos. **Revista Brasileira de Economia**, v. 55, n. 4, p. 467-491, 2001.

GROTTERA, C.; WILLS, W.; LA ROVERE, E. L. The Transition to a Low Carbon Economy and Its Effects on Jobs and Welfare-A Long-Term Scenario for Brazil. In: **The Fourth Green Growth Knowledge Platform Annual Conference**, Republic of Korea, 2016.

GURGEL, A. G.; PALTSEV, S. The impacts of the Brazilian NDC and their contribution to the Paris agreement on climate change. 2017.

HADDAD, E. A.; DOMINGUES, E. P. EFES: Um modelo aplicado de equilíbrio geral para a economia brasileira: projeções setoriais para 1999-2004. **Estudos Econômicos**. São Paulo, v. 31, n.1, p. 89-125, 2001.

HARRISON, W. J.; PEARSON, K. R. Computing solutions for large general equilibrium models using GEMPACK. **Computational Economics**, v. 9, n. 2, p. 83-127, 1996.

HERTEL, T. W. **Global trade analysis: modeling and applications**. Cambridge University press, 1997.

HOFFMANN, R. Estimativas das elasticidades-renda de várias categorias de despesa e de consumo, especialmente alimentos, no Brasil, com base na POF de 2008-2009. **Revista de Economia Agrícola**, v. 57, n. 2, p. 49-62, 2010.

HORRIDGE, M. ORANI-G: **A Generic Single-Country Computable General Equilibrium Model**. Centre of Policy Studies and Impact Project. Monash University, Austrália, 2006, 78 p.

HORRIDGE, M.; MADDEN, J.; WITTEWER, G.; The impact of the 2002-03 drought on Australia. **Journal of Policy Modeling**. v.27, p. 285-308, 2005.

HORRIDGE, J.M.; PEARSON, K.R.; MEERAUS, A.; RUTHERFORD, T.F. Solution Software for CGE Modeling. In: DIXON, P.B.; JORGENSEN, D. (eds) **Handbook of CGE modeling**. Elsevier, 2012.

HORRIDGE J.M.; JERIE M.; MUSTAKINOV, D.; SCHIFFMANN F. GEMPACK manual, GEMPACK Software, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Matriz de insumo-produto: Brasil 2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 60p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro, v. 43, p.1-62, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua trimestral**. 2021a. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q>. Acesso em: fev. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema de Contas Nacionais Trimestrais**. 2021b. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=72121>. Acesso em: mar. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa de orçamentos familiares: 2017-2018: perfil das despesas no Brasil: indicadores de qualidade de vida**. IBGE, 2021c.

INSTITUTO ESCOLHAS. **Quanto custa zerar as emissões da geração de eletricidade no brasil até 2050?** 88p. São Paulo, 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge University, 2021.

JEFFERSON, M. **Políticas de Energia para o Desenvolvimento Sustentável**; PNUD: Londres, Reino Unido, 2000.

JOHANSEN, L. Multi-sectoral study of economic growth. 1960.

KUME, H.; PIANI, G. Elasticidades de substituição das importações no Brasil. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 17, n. 3, 2011.

LA ROVERE, E. L.; WILLS, W.; PEREIRA JR, A. O.; DUBEUX, C. B. S; CUNHA, S. H. F.; OLIVEIRA, B. C. P.; MOREIRA, M.M.R.; WATANABE, S; LOUREIRO, S. M.; GROTTERRA, C.; HARFUCH, L.; WEISS, M.; SANTOS, L. A. S.; CARVALHO, P.T.; KISHINAMI, R.; ZVEIBIL, V.; SANTOS, L.; ELY, R. N.; MOREIRA, L. S. S.C.; KIMURA, W.; SANTOS, T.; TONI, A.; LEFREVE, J.; BACHION, L. C.; LIMA, R.; ZAMBIANCO, W.; NASSAR, A.; WALTER, M. K. C; ZICARELLI, I.; e OLIVEIRA, L. D. B.; **Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030: Projeto IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC**. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2016.

LA ROVERE, E. L.; GESTEIRA, C.; GROTTERRA, C.; WILLS, W. **Pathways to Deep Decarbonization in Brasil**, SDSN – IDDRI, 2015.

LEFEVRE, J. **Hybridization challenges in energy-economy integrated models and representation of the low carbon transition: An application to the Brazilian case**. 2016. 297f. Tese de Doutorado. Université Paris Saclay, Paris.

LOSEKANN, L.; TAVARES, F. B. **Política Energética no BRICS: desafios da transição energética**. Texto para Discussão n. 2495. CEPAL/IPEA, 2019.

LU, Y.; KHAN, Z. A.; ALVAREZ-ALVARADO, M. S.; ZHANG, Y.; HUANG, Z.; IMRAN, M. A critical review of sustainable energy policies for the promotion of renewable energy sources. **Sustainability**, v. 12, n. 12:5078, 2020.

LUCENA, A., CLARKE, L., SCHAEFFER, R., SZKLO, A., ROCHEDO, P., NOGUEIRA, L., DAENZER, K., GURGEL, A., KITOUS, A., KOBER, T., 2016. Climate Policy Scenarios In Brazil: A multi-model comparison for energy. **Energy Economics**, v. 56, p. 564-574, 2016.

MAGALHÃES, A. S. Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa. 2013. 293 f. Tese (Doutorado em Economia) - Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Aumento da eficiência energética no Brasil: uma opção para uma economia de baixo carbono? **Economia Aplicada**, v. 20, n. 3, p. 273, 2016.

MAGALHÃES, A. S.; SOUZA, K. B. D.; CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E. P. Custo econômico da energia em Minas Gerais: impactos das elevações de tarifas entre 2011 e 2015. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 48, n. 1, p. 103-130, 2018.

MALUF, G.; GURGEL, A. C. Competição entre o etanol de segunda geração e a bioeletricidade pelo uso do bagaço de cana de açúcar. In: **Anais do XLIII Encontro Nacional de Economia**. ANPEC, 2016.

MARKAKI, M.; BELEGRI-ROBOLI, A.; MICHAELIDES, P.; MIRASGEDIS, S.; LALAS, D. P. The impact of clean energy investments on the Greek economy: An input–output analysis (2010–2020). **Energy Policy**, v. 57, p. 263-275, 2013.

MILLER, R.; BLAIR, P. **Input-Output analysis: foundations and extensions**. New Jersey: Prentice-Hall, 2009. 782p.

MORAES, M. J. I. **Impactos do pré-sal na economia brasileira**. 2013. 122 f. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.

NORDHAUS, W. D. **A question of balance: weighing the options on global warming policies**. New Haven, Yale University Press, 2008.

OCTAVIANO, C.; PALTSEV, S.; GURGEL, A. C. Climate change policy in Brazil and Mexico: Results from the MIT EPPA model. **Energy Economics**, v. 56, p. 600-614, 2016.

OLIVEIRA, T. D.; GURGEL, A. C.; TONRY, S. International market mechanisms under the Paris Agreement: A cooperation between Brazil and Europe. **Energy policy**, v. 129, p. 397-409, 2019.

PAIXÃO, M. A. S.; MIRANDA, S. H. G. Um comparativo entre a política de energia renovável no Brasil e na China. **Pesquisa & Debate. Revista do Programa de Estudos Pós-Graduados em Economia Política**, v. 29, n. 1 (53), p. 50-83, 2018.

PALTSEV, S.; REILLY, J. M.; JACOBY, H. D.; ECKAUS, R. S.; MCFARLAND, J. R.; SAROFIM, M. C.; ASADOORIAN, M. O.; BABIKER, M. H. M. The MIT emissions prediction and policy analysis (EPPA) model: version 4. MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change, **Technical Report 125**, 2005.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

PEROBELLI, F. S. **Análise das Interações Econômicas entre os Estados Brasileiros**. 2004, 246 f. (Tese de Doutorado). Departamento de Economia/IPE, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

PETER, M. W., HORRIDGE, J., MEAGHER, G., NAQVI, F., & PARMENTER, B. R. **The theoretical structure of MONASH-MRF**. Preliminary Working Paper n. OP-85. Centre of Policy Studies, Monash University, 1996.

PIGOU, A. C. (1920) **The economics of welfare**. Palgrave Macmillan, London, 2013.

RATHMANN, R. (Org.). **Modelagem Integrada e Impactos Econômicos de Opções Setoriais de Baixo Carbono**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017.

RATHMANN, R. ARAUJO, R. V. III. CRUZ, M. R. IV. MENDONÇA, A. M. (Orgs.). **Trajatórias de mitigação e instrumentos de políticas públicas para alcance das metas brasileiras no acordo de Paris**. Brasília: MCTI, 2017. 64 p.

ROCHEDO, P. R.; SOARES-FILHO, B.; SCHAEFFER, R.; VIOLA, E.; SZKLO, A.; LUCENA, A. F.; KOBERLE, A.; DAVIS, J. L.; RAJÃO, R.; RATHMANN, R. The threat of political bargaining to climate mitigation in Brazil. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 8, p. 695, 2018.

RUTHERFORD, T. F. Applied general equilibrium modeling with MPSGE as a GAMS subsystem: An overview of the modeling framework and syntax. **Computational economics**, v. 14, n. 1/2, p. 1-46, 1999.

SANTOS, J. A.; FERREIRA FILHO, J. B. S. Substituição de combustíveis fósseis por etanol e biodiesel no Brasil e seus impactos econômicos: uma avaliação do Plano Nacional de Energia 2030. **Pesquisa e Planejamento Econômico**, v. 47, n. 03, p. 185-216, 2017

SILVA, D. I. **Demanda por ocupações em cenários de investimentos em geração de energia elétrica no Brasil**. 2020. 96 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo.

SIMÕES, R. Métodos de análise regional e urbana: diagnóstico aplicado ao planejamento. In: DINIZ, C. e CROCCO, M. **Economia Regional e Urbana: Contribuições Teóricas Recentes**. Belo Horizonte, MG, 2006.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG) 2021. **Tabela geral de dados - Brasil e Estados**. Disponível em: <http://seeg.eco.br/download>. Acesso em: dez. 2021.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). **Impacto da pandemia de covid-19 nas emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil** (Nota Técnica), 2020.

STERN, N. **The Economics of Climate Change: the Stern Review**. Cambridge University Press, 2006.

STERN, N.; STIGLITZ, J. E. **Report of the high-level commission on carbon prices**. World Bank, Washington D.C., 2017.

TANURE, T. M. P. **Mudanças climáticas e agricultura no Brasil: impactos econômicos regionais e por cultivo familiar e patronal**. 2020. 257 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

TAVARES, F. B. **Política energética em um contexto de transição: a construção de um regime de baixo carbono**. 2019. 216 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. **Novos estudos CEBRAP**, n. 79, p. 47-69, 2007.

TOURKOLIAS, C.; MIRASGEDIS, S. Quantification and monetization of employment benefits associated with renewable energy technologies in Greece. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 2876-2886, 2011.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). Nationally determined contributions under the Paris Agreement. Synthesis report. 3ª Edição. Glasgow, 2021.

WILLS, W. **Modelagem dos efeitos de longo prazo das políticas de mitigação de gases de efeito estufa no Economia brasileira**. 2013. 222 f. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WILLS, W., LEFÈVRE, J. O impacto de um imposto sobre o carbono na economia brasileira em 2030 -IMACLIM: a abordagem do modelo híbrido CGE. In: **ISEE 2012 Conferência - Economia Ecológica e Rio + 20: Desafios e Contribuições para uma economia verde**. Rio de Janeiro, 2012.

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing 2020**. Washington, D.C., 2020.

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing 2021**. Washington, D.C., 2021a.

WORLD BANK. **Carbon pricing assessment and decision-making: a guide to adopting a carbon price**. Washington, D.C., 2021b.

WORLD BANK. **Total greenhouse gas emissions**. 2021c. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.GHGT.KT.CE>. Acesso em: dez 2021.

APÊNDICE A1

Tabela A1: Variação acumulada da atividade setorial entre 2022-2030

Grupo	Setor	Mercado Restrito	Mercado Amplo	Variação
Agropecuária	Arroz, trigo e outros cereais	22%	17%	-5,2%
Agropecuária	Milho em grão	12%	12%	-0,3%
Agropecuária	Algodão e outras fibras	14%	15%	0,1%
Agropecuária	Cana-de-açúcar	18%	18%	-0,5%
Agropecuária	Soja em grão	10%	10%	-0,1%
Agropecuária	Outros da lavoura temporária	16%	15%	-0,2%
Agropecuária	Laranja	17%	17%	-0,4%
Agropecuária	Café em grão	7%	7%	0,0%
Agropecuária	Outros da lavoura permanente	16%	16%	-0,3%
Agropecuária	Bovinos e outros animais	16%	13%	-3,0%
Agropecuária	Leite de vaca e de outros animais	14%	12%	-2,1%
Agropecuária	Suínos	15%	13%	-2,3%
Agropecuária	Aves e ovos	15%	13%	-1,4%
Agropecuária	Produtos da exploração florestal	20%	20%	-0,1%
Agropecuária	Pesca e aquicultura	20%	20%	-0,3%
Extrativa	Carvão mineral	21%	17%	-4,0%
Extrativa	Mínerais não-metálicos	22%	23%	1,1%
Extrativa	Petróleo e gás natural	18%	19%	0,9%
Extrativa	Mínério de ferro	6%	6%	0,0%
Extrativa	Mínerais metálicos não-ferrosos	13%	13%	0,5%
Alimentos	Carne de bovinos	15%	13%	-2,1%
Alimentos	Carne de suínos	13%	11%	-2,4%
Alimentos	Carne de aves	11%	9%	-2,4%
Alimentos	Pescado industrializado	25%	16%	-9,5%
Alimentos	Leite	16%	14%	-2,0%
Alimentos	Outros produtos do laticínio	17%	15%	-2,3%
Alimentos	Açúcar	9%	8%	-0,4%
Alimentos	Conservas de frutas e legumes	15%	15%	-0,2%
Alimentos	Óleos vegetais e animais	14%	13%	-0,4%
Alimentos	Café beneficiado	15%	15%	-0,1%
Alimentos	Arroz beneficiado	16%	16%	-0,1%
Alimentos	Derivados do trigo, mandioca ou milho	18%	17%	-0,4%
Alimentos	Rações balanceadas para animais	17%	15%	-1,5%
Alimentos	Outros produtos alimentares	17%	17%	-0,2%
Alimentos	Bebidas	22%	22%	0,0%
Indústria	Produtos do fumo	15%	15%	0,0%
Indústria	Fios e fibras têxteis beneficiados	31%	32%	0,4%
Indústria	Tecidos	31%	32%	0,4%
Indústria	Artigos têxteis de uso doméstico	24%	24%	0,2%
Indústria	Artigos do vestuário e acessórios	24%	24%	0,1%
Indústria	Calçados e artefatos de couro	18%	18%	-0,3%
Indústria	Produtos de madeira	18%	18%	0,2%

Grupo	Setor	Mercado Restrito	Mercado Amplo	Varição
Indústria	Celulose	5%	5%	-0,4%
Indústria	Papel e artefatos de papel	21%	22%	0,1%
Indústria	Serviços de impressão e reprodução	22%	22%	0,1%
Indústria	Combustíveis para aviação	17%	19%	1,3%
Indústria	Gasoálcool	24%	24%	-0,3%
Indústria	Naftas para petroquímica	44%	41%	-2,4%
Indústria	Óleo combustível	10%	13%	2,7%
Indústria	Diesel - biodiesel	17%	20%	3,5%
Indústria	Outros produtos do refino do petróleo	27%	27%	-0,1%
Indústria	Etanol e outros biocombustíveis	26%	25%	-0,7%
Indústria	Produtos químicos inorgânicos	35%	34%	-0,8%
Indústria	Adubos e fertilizantes	19%	19%	-0,5%
Indústria	Produtos químicos orgânicos	31%	31%	-0,6%
Indústria	Resinas, elastômeros e fibras	29%	29%	0,2%
Indústria	Defensivos agrícolas	36%	36%	-0,4%
Indústria	Produtos químicos diversos	26%	26%	-0,1%
Indústria	Tintas, vernizes, esmaltes e lacas	26%	26%	0,3%
Indústria	Perfumaria e artigos de limpeza	23%	23%	-0,2%
Indústria	Produtos farmacêuticos	27%	27%	0,2%
Indústria	Artigos de borracha	28%	29%	0,8%
Indústria	Artigos de plástico	26%	26%	0,2%
Indústria	Cimento	5%	21%	16,0%
Indústria	Artefatos de cimento e gesso	23%	24%	0,9%
Indústria	Vidros e cerâmicos	21%	22%	1,2%
Indústria	Ferro-gusa e ferroligas	8%	3%	-5,4%
Indústria	Semiacabados e laminados	23%	23%	0,2%
Indústria	Produtos da metalurgia de não-ferrosos	16%	20%	3,7%
Indústria	Peças fundidas de aço	30%	30%	0,7%
Indústria	Produtos de metal	27%	28%	0,2%
Indústria	Componentes eletrônicos	51%	53%	1,5%
Indústria	Máquinas para escritório	28%	28%	0,4%
Indústria	Material eletrônico e de comunicações	27%	27%	0,3%
Indústria	Equipamentos de medida e teste	37%	37%	0,8%
Indústria	Máquinas e materiais elétricos	32%	33%	0,9%
Indústria	Eletrodomésticos	23%	22%	-1,8%
Indústria	Tratores e outras máquinas agrícolas	23%	23%	0,3%
Indústria	Máquinas para extração mineral	25%	25%	0,5%
Indústria	Outras máquinas e equipamentos	35%	35%	0,7%
Indústria	Automóveis	30%	30%	0,3%
Indústria	Caminhões e ônibus	19%	19%	0,3%
Indústria	Peças para veículos automotores	32%	33%	0,9%
Indústria	Aeronaves e embarcações	26%	27%	0,7%
Indústria	Móveis	21%	21%	0,0%
Indústria	Produtos de industrias diversas	24%	25%	0,2%
Indústria	Manutenção de máquinas e equipamentos	26%	26%	0,4%

Grupo	Setor	Mercado Restrito	Mercado Amplo	Varição
Indústria	Distribuição de gás e outras utilidades	23%	23%	0,0%
Transportes	Transporte de carga	20%	21%	0,7%
Transportes	Transporte de passageiros	18%	19%	1,1%
Transportes	Transporte aéreo	17%	20%	3,7%
Transportes	Armazenamento e serviços auxiliares	19%	19%	0,2%
Transportes	Correio e outros serviços de entrega	19%	19%	0,0%

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.