



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA (UnB)
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO, CONTABILIDADE E GESTÃO DE
POLÍTICAS PÚBLICAS (FACE)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA (PPGECO)

FELIPE MORELLI DA SILVA

RISCOS CLIMÁTICOS E MERCADO DE CARBONO NO BRASIL: um estudo com
modelos de equilíbrio geral computável

Brasília, DF

2025

FELIPE MORELLI DA SILVA

RISCOS CLIMÁTICOS E MERCADO DE CARBONO NO BRASIL: um estudo com
modelos de equilíbrio geral computável

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Gestão de Políticas Públicas, da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Economia.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Vitor Carvalho Sousa

Área de Concentração: Economia Política, Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Linha de Pesquisa: Economia e Política do Meio Ambiente e da Agricultura.

Brasília, DF

2025

FICHA CATALOGRÁFICA

--

FELIPE MORELLI DA SILVA

RISCOS CLIMÁTICOS E MERCADO DE CARBONO NO BRASIL: um estudo com
modelos de equilíbrio geral computável

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Gestão de Políticas Públicas, da Universidade de Brasília (UnB), como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Economia.

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Lucas Vitor de Carvalho Sousa

Programa de Pós-graduação em Economia (PPGECO/UnB)

(Presidente da Banca)

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Torres

Programa de Pós-graduação em Economia (PPGECO/UnB)

(Membro Interno)

Dr. João Maria de Oliveira

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA)

(Membro Externo)

Prof. Dr. Ricardo Bruno Nascimento dos Santos

Universidade Federal do Pará (UFPA)

(Membro Externo)

Prof. Dr. Milene Takasago

Programa de Pós-graduação em Economia (PPGECO/UnB)

(Membro Suplente)

Brasília, DF, 16 de dezembro de 2025.

Aos meus pais,
Altair Antônio da Silva e Jussara Morelli.

Ao meu irmão,
Rodrigo Morelli da Silva

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos professores e coordenadores do PPGECO, que me proporcionaram a oportunidade de realizar este doutorado e contribuíram de maneira fundamental para a minha formação.

Em seguida, registro minha gratidão ao Prof. Dr. Lucas Vitor, que gentilmente aceitou ser meu orientador e cuja orientação foi essencial para o desenvolvimento desta tese.

Agradeço também aos colegas do Banco Central — Mikio Koyama, Clodoaldo Annibal, Marcos Tsuchida, Ricardo Nunes e Rodrigo Miranda — pelas valiosas contribuições ao desenvolvimento do modelo. Expresso um agradecimento especial ao Marcos pelo apoio dedicado, sobretudo na parte matemática.

Manifesto ainda meu sincero agradecimento ao João Maria, pela confiança no meu trabalho, pelas discussões enriquecedoras e pelas oportunidades que esta pesquisa proporcionou.

À Ermelina Paula e CarlosVieira Mota, agradeço pela revisão de forma e estilo na escrita deste trabalho.

Agradeço à Carmem Frühauf pelo companheirismo e pela paciência ao longo deste processo.

Por fim, agradeço profundamente aos meus pais, ao meu irmão e à minha cunhada pelo apoio incondicional, e aos meus amigos e familiares, cuja amizade tornou essa jornada mais agradável.

RESUMO

Este estudo buscou adaptar um modelo de Equilíbrio Geral Computável (CGE) para que também abordasse questões ambientais. O modelo original é dinâmico, com ampla estrutura espacial e se destaca por incorporar explicitamente diversos mecanismos relevantes: fricções de mobilidade da força de trabalho, custos de comércio, encadeamentos produtivos intersetoriais, comércio internacional e intersetorial, e consumo de bens finais locais em cestas agregadas via função Cobb-Douglas (com possibilidade de extensão para CES). A adaptação proposta nesta tese consiste na inclusão das emissões como um fator de produção. Essa extensão teórica permite a análise de instrumentos ambientais, como mercados de carbono sobre emissões, dentro de um arcabouço consistente de equilíbrio geral com comércio e migração. Considera-se que essa extensão teórica constitui a principal contribuição desta tese, por permitir a avaliação integrada de políticas ambientais e comerciais em um modelo dinâmico espacialmente estruturado. Para não deixar esta tese apenas no campo teórico, propõe-se uma simulação prática da implementação de um Mercado de Carbono no Brasil a partir do ano de 2026, com três cenários distintos de redução de emissões de GEE até o ano de 2030, tomando 2005 como ano-base. Todos os cenários visam à redução total de 50% nas emissões até 2030, alcançando aproximadamente 1,28 Gt CO₂e, mas se diferenciam na forma como essa meta é distribuída entre desmatamento e setores produtivos. No Cenário I, o mais restritivo, todos os setores — inclusive o desmatamento — reduzem proporcionalmente suas emissões em 50%, gerando a maior queda no Valor Adicionado (VA), de aproximadamente 0,83% até 2030. No Cenário II, menos restritivo que o primeiro, a redução das emissões concentra-se no desmatamento (70%), enquanto os demais setores reduzem apenas 18%, resultando em um impacto econômico intermediário, com queda acumulada de 0,35% no VA. No Cenário III, o menos restritivo para as atividades produtivas, as emissões do desmatamento caem 81,5% e as dos demais setores permanecem constantes, produzindo o efeito macroeconômico mais brando, com redução de apenas 0,15% no VA. Portanto, os resultados demonstram que quanto maior o foco da política sobre o desmatamento, menores os custos econômicos da transição e mais suave o ajuste para os setores produtivos. Além disso, em todos os cenários, o emprego agregado permanece relativamente estável, apesar das realocações entre setores — de atividades mais emissoras para atividades menos emissoras, como serviços —, o que sugere a adoção de políticas complementares capazes de preservar a produtividade da economia brasileira.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Mercado de Carbono. Modelos de equilíbrio geral.

Emissões de GEE. Políticas ambientais.

ABSTRACT

The goal of this thesis project was to adapt a Computable General Equilibrium (CGE) model to also address environmental issues. The original is dynamic, features a broad spatial structure, and stands out for explicitly incorporating several relevant mechanisms: labor mobility frictions, trade costs, intersectoral input-output linkages, international and intersectoral trade, and consumption of local final goods aggregated via a Cobb-Douglas function (with the possibility of extension to CES preferences). The adaptation proposed in this thesis consists of including emissions as a factor of production. This theoretical extension allows for the analysis of environmental policy instruments such as carbon markets on emissions, within a consistent general equilibrium framework that incorporates trade and migration. We consider this theoretical extension to be the main contribution of this thesis project, as it enables an integrated evaluation of environmental and trade policies in a dynamic and spatially structured model. To ensure the project went beyond the theoretical realm, we propose a practical simulation of a carbon market in Brazil starting in 2026, with three different scenarios for reducing greenhouse gas (GHG) emissions by 2030, taking 2005 as the baseline year. All scenarios aim for a 50% total reduction in emissions by 2030, reaching approximately 1.28 Gt CO_{2e}, but they differ in how this target is distributed between deforestation and productive sectors. In Scenario I, the most restrictive one, all sectors — including deforestation — reduce their emissions proportionally by 50%, generating the largest decline in Value Added (VA), of approximately 0.83% by 2030. In Scenario II, less restrictive than the first, emission reductions are concentrated in deforestation (70%), while the other sectors reduce emissions by only 18%, resulting in an intermediate economic impact, with an accumulated decrease of 0.35% in VA. In Scenario III, the least restrictive for productive activities, deforestation emissions fall by 81.5% while emissions from the other sectors remain constant, producing the mildest macroeconomic effect, with a reduction of only 0.15% in VA. Therefore, the results show that the greater the policy focus on deforestation, the lower the economic costs of the transition and the smoother the adjustment for productive sectors. Moreover, in all scenarios, aggregate employment remains relatively stable despite reallocations across sectors — from more emission-intensive activities toward less emission-intensive ones, such as services — which suggests the need for complementary policies capable of preserving the productivity of the Brazilian economy.

Keywords: Climate change. Carbon market. General equilibrium models. GHG emissions. Environmental policies.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissões de GEE no Brasil.....	16
Figura 2 – Evolução do aquecimento global segundo diferentes níveis de intervenção	21
Figura 3 – Relação entre políticas ambientais, agentes econômicos e emissões de GEE	22
Figura 4 – Representação da metodologia: <i>dynamic exact-hat algebra</i>	52
Figura 5 Teste de sensibilidade para o parâmetro: inversa da elasticidade de migração	67
Figura 6 – Variação anual acumulada do VA – Cenário-base versus cenários com MC.....	79
Figura 7 – Valor anual do VA – Cenário-base versus cenário 1	81
Figura 8 – Queda acumulada do VA por grupo setorial (em %) depois da implementação do MC	82
Figura 9– Variação anual acumulada do Estoque do Emprego– Cenário-base versus cenários com MC.....	83
Figura 10 – Top 10 Setores mais afetadas - variação acumulada do Emprego (2025 a 2030).84	
Figura 11 – Variação acumulada do número de empregados por grupo de setores depois da implementação do MC	85
Figura 12 – Variação anual acumulada da produtividade (VA/L) – Cenário-base versus cenários com MC.....	86
Figura 13 – Evolução anual das Emissões de <i>CO2e</i> – histórico e projeções	88
Figura 14 – Variação anual do VA acumulada – Cenário-base versus cenário com MC	90
Figura 15 – Elasticidade de emissão	117
Figura 16 – Elasticidade de emissão <i>gnj</i> e linha de tendência	119
Figura 17 – Teste de estresse para elasticidade de emissão (<i>gnj</i>).....	127
Figura 18 – Convergência das variáveis ao longo do tempo (variação salarial e utilidade) ..	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução das metas de redução de emissões de GEE assumidas pelo Brasil	20
Tabela 2 – Cenários de redução de emissões	61
Tabela 3 - Indicadores de intensidade de carbono por trabalhador nos principais setores da economia brasileira (2017)	74
Tabela 4 - variação dos indicadores de intensidade de carbono por trabalhador nos principais setores da economia brasileira após a implementação do MC (2017-2030)	77
Tabela 5 - Valor inicial da produção em 2017 em milhões de USD (X_{nj})	103
Tabela 6 – Valor inicial da remuneração do trabalho em 2017 em milhões de USD (wL_{nj})	104
Tabela 7 – Valor inicial da remuneração do capital em 2017 em milhões de USD (rH_{nj})... ..	105
Tabela 8 - Intensidade de emissões e estrutura produtiva por região e grande grupo setorial (cenário-base, 2017)	106
Tabela 9 – Participação da demanda final do mercado n_j na demanda total (α_{nj})	108
Tabela 10 – Participação das emissões no valor adicionado no mercado n_j (g_{nj})	109
Tabela 11 – Participação das estruturas no valor adicionado (ξ_{nj})	110
Tabela 12 – Participação do valor adicionado na produção do setor j na região n (γ_{nj})	111
Tabela 13 – Participação de materiais do setor k usados na produção do setor j na região n (γ_{nj} , n_k) (somado sobre origem k)	112
Tabela 14 – Participação constante das receitas totais no portfólio global recebida pelos rentistas na região n (π_n)	113
Tabela 15 – Parâmetro de dispersão da produtividade específico do setor, derivado da distribuição de Fréchet, também referido como elasticidade comercial para o setor (θ_j)	113

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Marcos históricos das emissões de GEE no Brasil e ações de mitigação adotadas	18
Quadro 2 – Autores que discutem <i>Cap-and-trade</i>	25
Quadro 3 – Comparação de Alta e Baixa Dispersão da Produtividade	71
Quadro 4 – Agregação Setorial dos Códigos GTAP	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACM	Modelo desenvolvido por Artuç, Chaudhuri, McLaren
APP	Áreas de Preservação Permanente
BCB	Banco Central do Brasil
BEN	Balanço Energético Nacional
BRL	Real Brasileiro
CAGED	Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CDP	Modelo desenvolvido por Caliendo, Dvorkin e Parro
CDP-C	Modelo de Copeland e Taylor
CES	Função de Elasticidade de Substituição Constante
CGE	Computable General Equilibrium
COP	Conferência das Partes
DEK	Modelo desenvolvido por Dekle, Eaton, Kortum
DETER	Sistema de Detecção do Desmatamento em Tempo Real
EK	Modelo de Iceberg cost de Krugman
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EU ETS	Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia
EUA	Estados Unidos da América
FPT	Função de Progresso Tecnológico
FSB	Conselho de Estabilidade Financeira
GEE	Gases de Efeito Estufa
GMM	Método dos Momentos Generalizados
GTAP	Global Trade Analysis Project
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
IPPU	Industrial Processes and Product Use
KKT	Condições de Karush-Kuhn-Tucker
LULUCF	Land Use, Land-Use Change, and Forestry
MC	Mercado de Carbono
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MIP	Sistema de Classificação da Matriz Insumo-Produto Brasileira
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NAFTA	Acordo de Livre Comércio da América do Norte
NAMAS	Ações de Mitigação Nacionalmente Adequadas
NDC	Contribuição Nacionalmente Determinada
OC/SEEG	Observatório do Clima
OLS	Ordinary Least Squares
PIB	Produto Interno Bruto
PNMC	Política Nacional sobre Mudança no Clima
PPCDAM	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal
PRODES	Sistema de Monitoramento do Desmatamento da Amazônia Legal por Satélite
RAIS	Relação Anual de Informações Sociais
RC	Riscos Climáticos
RCEP	Acordo de Parceria Econômica Regional
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SEATS	Sand Extraction Allowances Trading Scheme
TCFD	Força-Tarefa sobre Divulgações Financeiras Relacionadas ao Clima
TRU	Tabela de Recursos e Usos

UNMFCCC	Convenção-Quadro das nações Unidas sobre mudança do Clima
USD	Dólares Americanos
VA	Valor Adicionado
VFM	Compras de Fatores Primários a Preços de Mercado
WIOD	World Input-Output Database

LISTA DE VARIÁVEIS E PARÂMETROS

N	Número de regiões.
J	Número de setores.
n, i, m	Índices usados para identificar uma região particular.
j, k, h	Índices usados para identificar um setor particular.
t	Índice para período discreto.
α^k	Participação do setor k no consumo final, com $\sum_{k=1}^J \alpha^k = 1$.
β	Fator de desconto intertemporal, indicando como as famílias valorizam a utilidade futura.
γ^{nj}	Participação do valor adicionado na produção do setor j na região n .
$\gamma^{nj,nk}$	Participação de materiais do setor k usados na produção do setor j na região n .
ξ^n	Participação das estruturas (um fator local) no valor adicionado na região n .
θ^j	O parâmetro de dispersão da produtividade específico do setor, derivado da distribuição de Fréchet, também referido como elasticidade comercial para o setor j .
η^{nj}	Parâmetro na agregação de bens intermediários em bens setoriais locais no mercado nj .
ϵ^{nj}	Constante da fórmula do índice de preços para bens setoriais agregados.
ι^n	Participação constante das receitas totais no portfólio global recebida pelos rentistas na região n , com $\sum_{n=1}^N \iota^n = 1$.
ν	Parâmetro que escala a variância dos choques idiossincráticos; seu inverso, $1/\nu$, é interpretado como a elasticidade da migração.
B^{nj}	Constante usada na equação de preço unitário de um pacote de insumos para o setor j na região n .
L_t^{nj}	Massa de trabalho na localização n e setor j no período t .
w_t^{nj}	Salário de mercado competitivo local na região n e setor j no período t .
C_t^{nj}	Consumo agregado dos trabalhadores no mercado nj no período t .
$c_t^{nj,k}$	Consumo final de bens do setor k no mercado nj no período t pelos trabalhadores.
b^n	Produção doméstica (consumo) obtida por trabalhadores não empregados na região n , tal que: $C_t^{n0} = b^n$.
$\tau^{nj,ik}$	Custos dos trabalhadores em mudar da origem nj para o destino ik . É aditivo, invariante no tempo e medido em termos de utilidade.
ϵ_t^{ik}	Choque idiossincrático aditivo para cada escolha ik no período t , assumido como i.i.d. Tipo-I Valor Extremo.
v_t^{nj}	Utilidade intertemporal total de um trabalhador atualmente na região n e setor j no período t .
V_t^{nj}	Utilidade intertemporal total esperada.
$\mu_t^{nj,ik}$	Fração de trabalhadores que se realocam do mercado nj para ik no período t .
ω^{nj}	Salário real no mercado nj , calculado como: w_t^{nj}/P_t^n .
u_t^{nj}	Definido como $\exp(V_t^{nj})$, representando a exponencial da utilidade intertemporal esperada.

H^{nj}	Oferta fixa ou estoque de estruturas na região n e setor j .
r_t^{nj}	Preço de aluguel de estruturas na região n e setor j no período t .
q_t^{nj}	Quantidade produzida, no período t , por uma firma (variedade) intermediária com produtividade idiossincrática z^{nj} , pertencente ao setor j e localizada na região n .
z^{nj}	Componente idiossincrático de produtividade da firma (variedade) no setor j e região n , extraído de uma distribuição Fréchet.
A_t^{nj}	Componente da produtividade, comum a todas as variedades do setor j na região n , que pode variar ao longo do tempo.
h_t^{nj}	Quantidade de estruturas (fator fixo local) utilizada por uma firma do setor j na região n no período t .
l_t^{nj}	Quantidade de trabalho utilizada por uma firma (variedade) do setor j na região n no período t .
$M_t^{nj,nk}$	Quantidade do bem setorial agregado k (ou apenas bem k), produzida na região n , utilizada como insumo por uma firma do setor j na região n .
x_t^{nj}	Custo unitário do pacote de insumos (trabalho, estruturas, materiais e emissões) necessário para produzir no setor j e região n no período t .
$\kappa_t^{nj,ij}$	Custo de comércio do tipo <i>iceberg</i> , tal que $\kappa_t^{nj,ij}$ unidades devem ser enviadas da região i para que uma unidade do bem j chegue à região n .
$p_t^{nj}(z^j)$	Preço pago, na região n , por uma variedade específica do bem j — aquela fornecida pelo produtor de menor custo — no período t .
Q_t^{nj}	Quantidade produzida do bem j na região n no período t , resultante da agregação CES das variedades.
$\tilde{q}_t^{nj}(z^j)$	Quantidade demandada de uma variedade específica do bem setorial agregado j , proveniente do fornecedor de menor custo para a região n .
$\phi^j(z^j)$	Função de distribuição conjunta do vetor de produtividades idiossincráticas ($z^j = z^{1j}, \dots, z^{Nj}$) no setor j .
P_t^{nj}	Preço do bem j na região n no período t .
$\pi_t^{nj,ij}$	Participação da despesa total no mercado nj em bens do setor j adquiridos da região i , representando a participação bilateral de comércio.
χ_t	Receita total do portfólio global de estruturas no período t .
X_t^{nj}	Despesa total em bens do setor j na região n no período t .
Θ_t	Conjunto de fundamentos da economia que variam no tempo, especificamente: A_t, κ_t
$\bar{\Theta}$	Conjunto de fundamentos constantes da economia, especificamente (Y, H, b) , onde Y inclui todos os $\tau^{nj,ik}$, H inclui todos os H^{nj} , e b inclui todos os b^n .
$\dot{y}_{t+1} \equiv y_{t+1}/y_t$	Dot denota a mudança proporcional em qualquer escalar ou vetor y entre os períodos t e $t + 1$
g^{nj}	Participação das emissões no valor adicionado no mercado nj .
e^{nj}	Preço unitário das emissões.
ε^{nj}	Quantidade de emissões.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MERCADO DE CARBONO	23
1.2	REGULAÇÃO DO MERCADO DE CARBONO NO BRASIL	27
1.3	OBJETIVOS	30
1.3.1	Objetivo Geral.....	32
1.3.2	Objetivos específicos	32
2	MODELOS CGE E MEIO AMBIENTE	34
3	METODOLOGIA	38
3.1	MODELO CDP	39
3.1.1	Bloco 1 – Migração (modelo ACM).....	40
3.1.2	Bloco 2 – Iceberg Cost	42
3.1.3	Bloco 3 – Participação no comércio bilateral (Modelo EK).....	44
3.1.4	Bloco 4 – Índice de Preço (Modelo EK)	46
3.1.5	Bloco 5 – Equilíbrio Walrasiano	48
3.1.6	Bloco 6 – <i>Static Exact-hat Algebra</i> (Modelo DEK).....	50
3.1.7	Bloco 7 – <i>Dybanic Exact-hat Algebra</i> (Modelo CDP)	51
3.2	ADAPTAÇÃO DO MODELO CDP PARA O RISCO CLIMÁTICO	54
3.2.1	Modelo Copeland e Taylor.....	54
3.2.2	Modelo Caliendo, Dvorking e Parro Adaptado (MCC)	55
3.2.3	Determinação do preço das Licenças de Poluição	59
3.3	ESCOLHA DE CENÁRIOS	60
3.4	ETAPAS DA SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	62
3.5	DADOS E PARAMETRIZAÇÃO	64
3.5.1	Dados.....	64
3.5.2	Parâmetros	66
4	RESULTADOS.....	73
4.1	RESULTADOS GERAIS.....	78
4.1.1	Valor Adicionado	78
4.1.2	Emprego.....	83
4.1.3	Produtividade.....	86
4.1.4	Emissões.....	87
4.2	SE A AGROPECUÁRIA NÃO FIZER PARTE DO MERCADO DE CARBONO?	89
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE A – SETORES ECONÔMICOS E AGRUPAMENTOS	101
	APÊNDICE B – RESUMO ESTATÍSTICO DAS VARIÁVEIS ECONÔMICAS	103
	APÊNDICE C – PARÂMETROS.....	108
	APÊNDICE D – PROPOSTA DE ESTIMATIVA DA ELASTICIDADE DE EMISSÃO.....	115
	APÊNDICE E – PROPOSTA DE EQUAÇÃO EXTRA (Variação do preço das emissões).....	120
	APÊNDICE F – MERCADO DE CARBONO E DECISÃO DAS FIRMAS.....	122
	APÊNDICE G – TESTE DE ROBUSTEZ DA ELASTICIDADE DE EMISSÃO	126
	APÊNDICE H – RESULTADOS ADICIONAIS (CONVERGÊNCIA)	128
	APÊNDICE I – DISPERSÃO DA PRODUTIVIDADE (COMPLEMENTO).....	129

1 INTRODUÇÃO

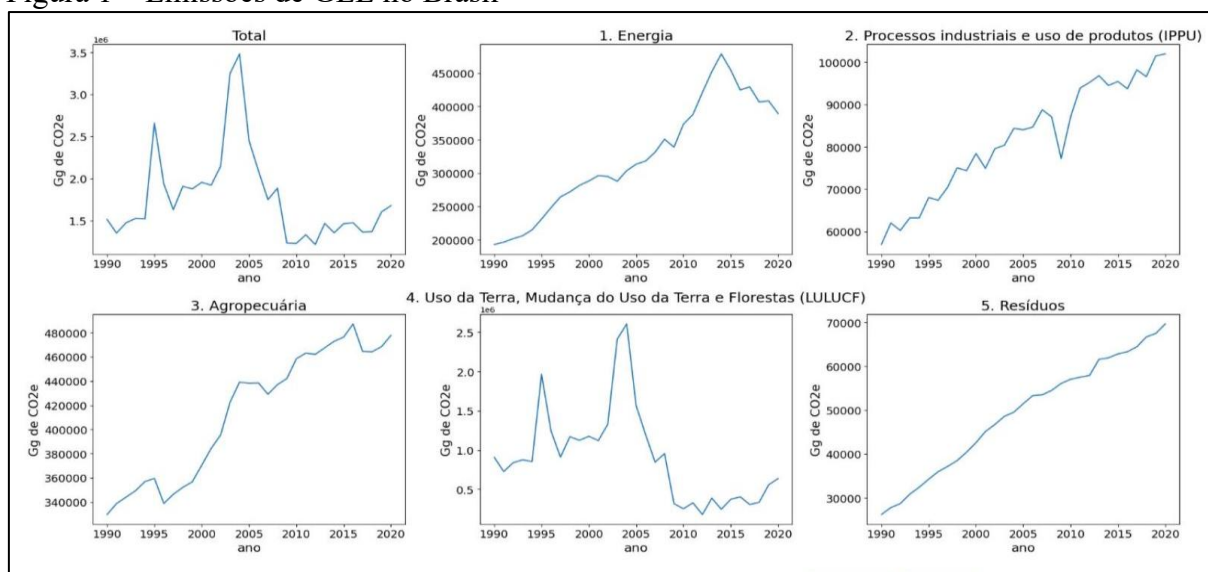
Esta introdução discute a relação entre decisões econômicas e emissões de gases de efeito estufa (GEE), apresenta evidências sobre os impactos econômicos e sociais das mudanças climáticas, revisa a evolução do arcabouço institucional e das metas climáticas brasileiras no contexto internacional e, por fim, justifica a escolha do mercado de carbono como instrumento de política ambiental e do modelo de Equilíbrio Geral Computável como abordagem metodológica desta tese.

O processo econômico se inicia com decisões dos agentes — o que produzir, onde produzir e quais métodos empregar. Essas escolhas não se restringem ao âmbito econômico: elas também geram efeitos diretos e indiretos sobre o meio ambiente. Em particular, a atividade econômica altera a concentração de GEE na atmosfera, seja por remoção, seja por emissão.

Os efeitos ambientais variam conforme a atividade. A silvicultura, por exemplo, contribui para a remoção de GEE da atmosfera. Segundo o MCTI (2022), a produção de produtos florestais madeireiros em 2020 esteve associada à remoção de 0,053 Gt de CO₂e (gigatoneladas de CO₂-equivalente). Ainda assim, a maior parte das atividades econômicas exerce efeito líquido adverso, elevando as emissões de GEE.

Conforme a 6ª edição das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil (MCTI, 2022), a agropecuária respondeu por 28,5% das emissões em 2020 (Figura 1). O desmatamento representou 38% e o setor de energia, 23,2%. Já resíduos e processos industriais e uso de produtos (IPPU) tiveram participações menores, de 4,2% e 6,1%, respectivamente.

Figura 1 – Emissões de GEE no Brasil



Fonte: elaboração própria, com dados do MCTI (MCTI, 2022).

O acúmulo de emissões de GEE na atmosfera tem produzido impactos climáticos cada vez mais evidentes. Enquanto estudos anteriores, como Marengo (2014a), apresentavam conclusões mais cautelosas, relatórios recentes do IPCC (2023) indicam que o aumento da temperatura global vem intensificando a frequência e a severidade de eventos associados a riscos físicos, como enchentes e secas. Esses eventos comprometem a atividade econômica e reduzem o bem-estar da população.

No Brasil, a ocorrência de eventos climáticos extremos nas últimas três décadas aumentou de forma significativa. Na Região Norte, destacam-se as grandes secas na Amazônia em 2005, 2010, 2023 e 2024, além de enchentes recordes em 2009, 2012, 2014 e 2021 (INPA, 2024; Marengo, 2014). No Nordeste, as secas de 2012 e 2015 geraram impactos severos; no Sudeste, a seca de 2014–2015 foi considerada a pior em 80 anos, afetando a segurança hídrica e energética de estados como São Paulo e Rio de Janeiro.

Um exemplo recente é a enchente de maio de 2024 no Rio Grande do Sul, considerada a maior tragédia climática da história do estado. O evento resultou na morte de 183 pessoas, afetou mais de 2,3 milhões de habitantes e deixou cerca de 79 mil desabrigados (Rio Grande do Sul, 2024). As perdas econômicas foram estimadas em R\$ 88,9 bilhões, abrangendo danos ao setor produtivo, ao social, à infraestrutura e ao meio ambiente, conforme relatório conjunto do BID, da CEPAL e Banco Mundial (BID, 2024). Esse episódio evidencia a relação entre atividades humanas, mudanças climáticas e impactos econômicos e sociais, reforçando a necessidade de políticas públicas voltadas à mitigação das emissões.

Diante do aumento dos riscos físicos e da natureza global das emissões de GEE, países têm buscado coordenação em fóruns internacionais para reduzir emissões. Um marco nesse processo foi o Acordo de Paris, firmado em 2015 na COP21, quando 195 países se comprometeram a limitar o aumento da temperatura média global a menos de 2 °C acima dos níveis pré-industriais, com objetivo de 1,5 °C (MMA, 2025a).

O Quadro 1 sintetiza os principais eventos relacionados às emissões de GEE no Brasil e as políticas adotadas para mitigá-las, evidenciando a evolução do arcabouço institucional climático nacional desde a Conferência de Estocolmo até a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE).

Quadro 1 – Marcos históricos das emissões de GEE no Brasil e ações de mitigação adotadas

Evento	Descrição
1972 Conferência de Estocolmo	Primeira grande conferência internacional sobre meio ambiente. O Brasil adotou posição desenvolvimentista, defendendo que o crescimento econômico deveria ser prioridade para países em desenvolvimento, mesmo que houvesse impactos ambientais (Vieira; Cader, 2007).
1988 Criação do IPCC	O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) é criado para estudar as mudanças climáticas e seus impactos. O Brasil apoiou a criação do painel científico (IPCC, 2025).
1992 ECO-92 (Rio-92)	Brasil sedia a conferência e assina a Convenção-Quadro das nações Unidas sobre mudança do Clima (UNFCCC, na sigla em inglês). Proposta com base nas avaliações do IPCC. Com isso o País reconhece que as mudanças climáticas são um problema global, se compromete a criar inventários nacionais de emissões de gases do efeito estufa e desenvolver políticas para mitigação e adaptação às mudanças climáticas (MMA, 2018).
1997 Protocolo de Quioto	Esse protocolo foi a principal medida adotada pela UNFCCC; estabeleceu metas de redução de emissões para países desenvolvidos. O Brasil assinou o protocolo em 1998 e ratificou em 2002, mas sem metas obrigatórias, por ser um país em desenvolvimento (MMA, 2025c).
2002 Primeiro Inventário Nacional	Primeira avaliação oficial das emissões (MCTI, 2025).
2004 PPCDAM	Plano para reduzir o desmatamento na Amazônia. Foi implementado em fases e alguns de seus principais resultados foram: criação do Sistema de Monitoramento do Desmatamento (PRODES e DETER/INPE), criação do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e estabelecimento de áreas protegidas (Unidades de Conservação e Terras Indígenas) (Mello; Artaxo Netto, 2017).
2009 NAMAs	Anúncio das Metas Nacionais de Mitigação (Ações de Mitigação Nacionalmente Adequadas-NAMAs), comprometendo-se a reduzir emissões projetadas em 36,1% a 38,9% até 2020 (MMA, 2025c).
2010 Planos Setoriais e Segundo Inventário	Expansão das ações climáticas (MCTI, 2025).
2010 Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (Fundo Clima)	Criado para financiar projetos de redução de emissões e adaptação climática (MMA, 2025b).
2012 Código Florestal	Nova legislação que estabelece normas gerais sobre diferentes atividades relacionadas às emissões — proteção da vegetação nativa, exploração florestal, desmatamento, controle da origem dos produtos florestais, controle e prevenção dos incêndios florestais, entre outras (Embrapa, 2025b).
2009 PNMC – lançamento do Plano Nacional sobre Mudança do Clima	Primeira política nacional específica para mudanças climáticas. Criada para garantir o cumprimento das metas voluntárias de redução de emissões com a promulgação da Lei n. 12.187/2009 (MMA, 2025d).
2015 Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono)	Incentiva práticas agrícolas sustentáveis para reduzir emissões (Embrapa, 2025a).
2015 Acordo de Paris	Adoção do Acordo de Paris na COP-21, com metas globais para limitar o aquecimento a 2 °C até 2100. O Brasil assinou e ratificou o Acordo, comprometendo-se a reduzir emissões em 37% até 2025 e 43% até 2030, com base nos níveis de 2005 (MMA, 2025a).
2019 Crise Ambiental	Aumento do desmatamento e pressão internacional.

Continua

Continuação

Evento	Descrição
2021 COP-26	COP-26 em Glasgow, onde países revisaram as suas metas climáticas. O Brasil apresentou novas metas, incluindo a neutralidade de carbono até 2050 e o fim do desmatamento ilegal até o ano de 2028.
2023 Revisão da PNMC	Fortalecimento das políticas climáticas. Foco em energias renováveis, redução do desmatamento e transição para uma economia de baixo carbono (CC, 2021).
2024 COP-29	COP-29 em Baku no Azerbaijão, onde o Brasil apresentou a sua Segunda Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), estabelecendo uma meta mais ambiciosa de redução de emissões entre 37% e 43% até 2035, em comparação aos níveis de 2005.
2024 Mercado de Carbono Brasileiro	Em 2024, foi sancionada a Lei n. 15.042 (MTE, 2024), que institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE). O SBCE cria um mercado regulado de carbono no País. O setor agropecuário (maior emissor de GEE da economia brasileira) ficou de fora dessa regulamentação, além disso, foi permitido a esse setor gerar créditos de carbono por meio da manutenção de Áreas de Preservação Permanente (APP).

Fonte: elaboração própria (2025).

Nesse contexto de intensificação dos compromissos internacionais relacionados à mitigação das emissões de gases de efeito estufa, o Brasil passou por sucessivas revisões de suas metas climáticas ao longo das últimas décadas. Essas revisões refletem tanto a evolução do arcabouço internacional de governança climática quanto o esforço doméstico de alinhar políticas públicas a objetivos de redução de emissões de longo prazo.

A Tabela 1 apresenta as sucessivas atualizações das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) assumidas pelo Brasil, detalhando as emissões no ano-base de 2005, as metas estabelecidas para 2025, 2030 e 2035, além das respectivas diferenças em relação às versões anteriores das NDCs. Observa-se que, apesar das atualizações realizadas em 2020 e 2022 terem resultado em leve redução nas emissões permitidas em comparação entre si, ainda assim, essas revisões representaram aumentos significativos em relação à NDC original de 2016, diminuindo, portanto, a ambição inicial do Brasil (Inteiro, 2022). Em 2024, foi lançada a Segunda Contribuição Nacionalmente Determinada, que estabelece uma meta mais ambiciosa para 2035, fixando a redução das emissões entre 59% e 67% abaixo dos níveis de 2005, correspondendo a emissões absolutas entre 1,05 e 0,85 tCO₂e. Essa última meta reflete aumento substancial na ambição climática do Brasil, alinhando-se mais estreitamente aos objetivos do Acordo de Paris.

Tabela 1 – Evolução das metas de redução de emissões de GEE assumidas pelo Brasil

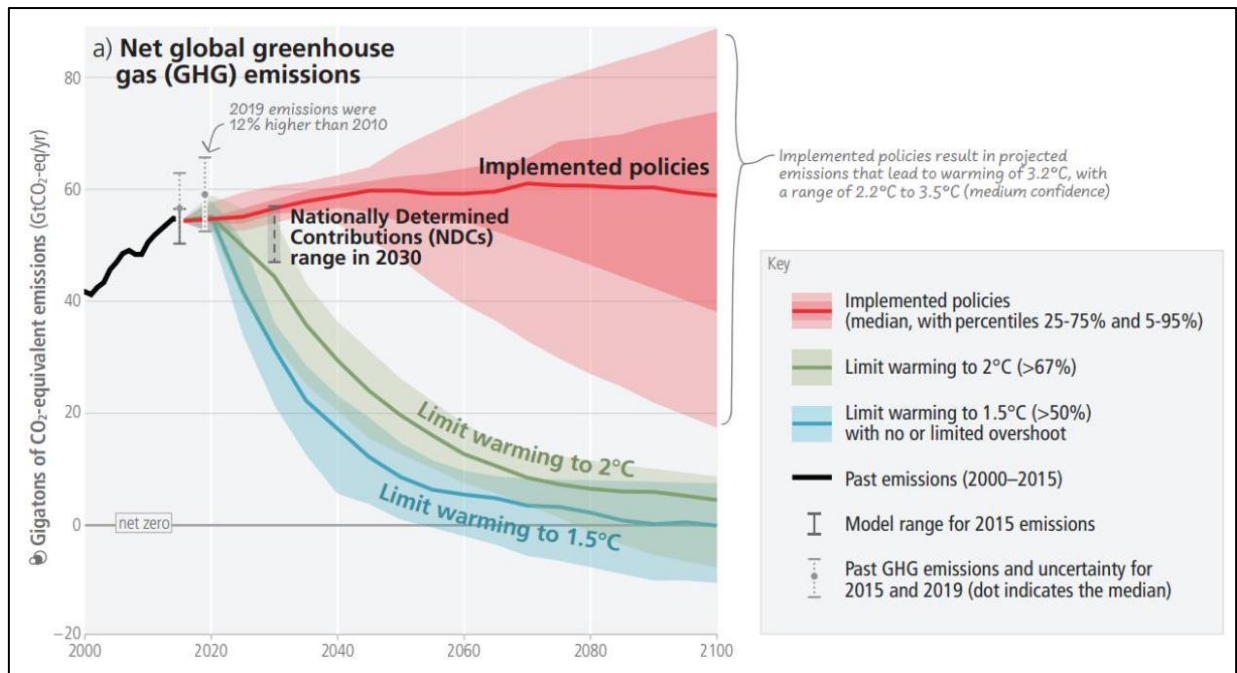
NDC	Inventário Nacional base	Ano base / emissões (Gt CO _{2e} (GWP-100, AR5))	Metas (valores em Gt CO _{2e} (GWP-100, AR5))	Diferença em relação à NDC 2016	Diferença em relação à Atualização de 2020
Original (NDC)	Próximo do Segundo	2005 / 2.10	2025: 1.30 2030: 1.20	-	-
Primeira Atualização (2020)	Terceiro	2005 / 2.84	2025: 1.79 2030: 1.62	2025: + 0.49 2030: + 0.42	-
Terceira Atualização (2022)	Quarto	2005 / 2.56	2025: 1.61 2030: 1.28	2025: + 0.31 2030: +0.08	2025: - 0.17 2030: - 0.34
Segunda Contribuição (2024)	Quinto	2005 / 2.56	2035: 1.05-0.85	-	-

Fonte: tabela adaptada de Inteiro (2022).

Nota: A unidade 'Gt CO_{2e} (GWP-100, AR5)' representa bilhões de toneladas (gigatoneladas) de dióxido de carbono equivalente, calculados com base no Potencial de Aquecimento Global em um horizonte de 100 anos conforme os fatores estabelecidos no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) indica que, para restringir o aumento da temperatura média global a 1,5 °C, as ações de mitigação devem ser implementadas de forma rápida, abrangente e, em muitos casos, imediata, envolvendo todos os setores da economia. Mantidas as políticas atualmente em vigor, as emissões globais tendem a seguir uma trajetória incompatível com as metas do Acordo de Paris, resultando em um aumento médio da temperatura global entre 2,2 °C e 3,5 °C (Figura 2).

Figura 2 – Evolução do aquecimento global segundo diferentes níveis de intervenção

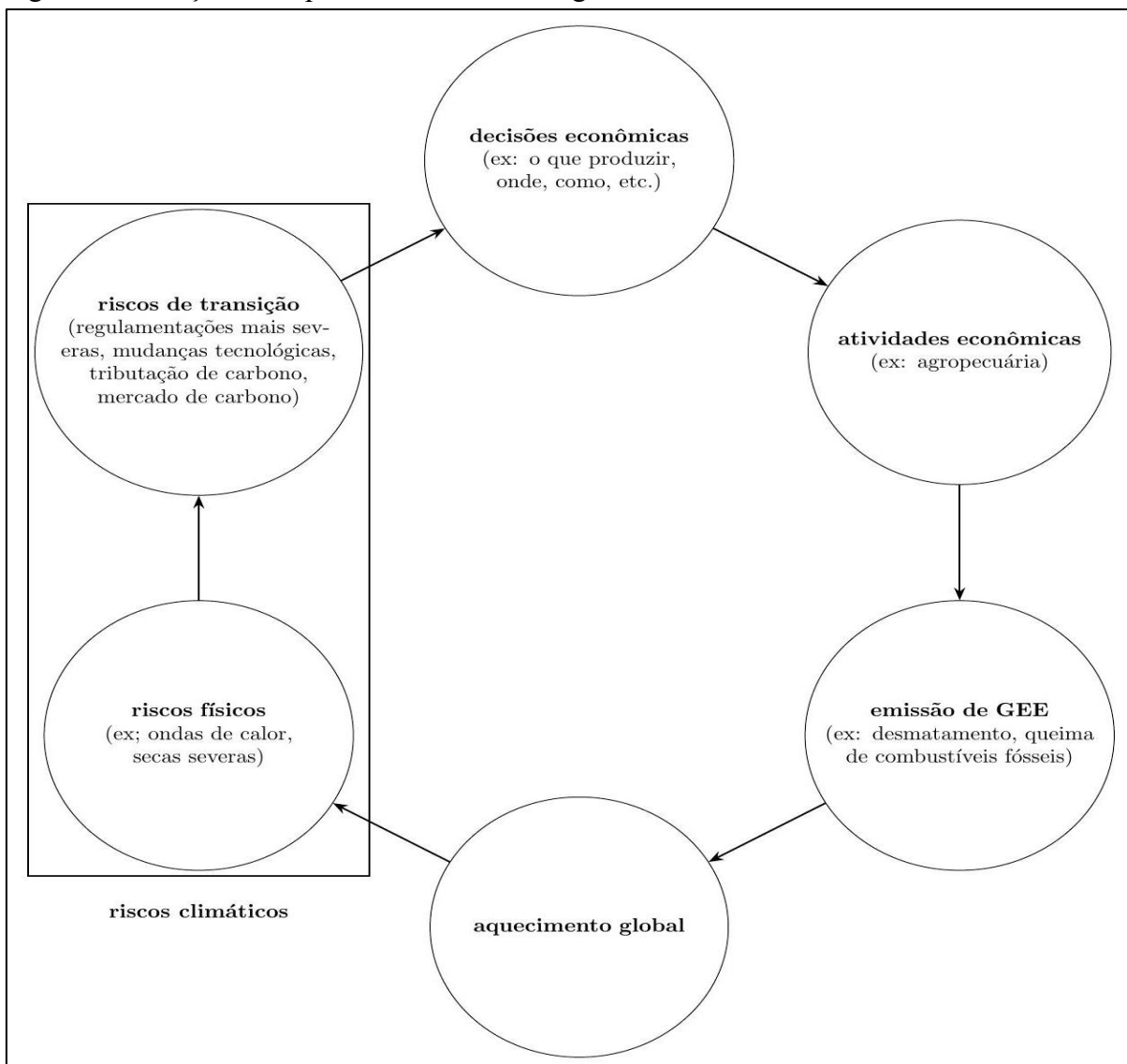


Fonte: IPCC (2023).

Do ponto de vista econômico, essa divergência evidencia uma falha de coordenação internacional e um subinvestimento global em mitigação, com potenciais externalidades negativas no longo prazo.

Políticas climáticas mais rigorosas são fundamentais para internalizar os custos sociais associados às emissões de GEE, mas também afetam diretamente os agentes econômicos ao gerar riscos de transição. Esses riscos se somam aos riscos físicos decorrentes do aquecimento global, como ondas de calor e secas severas. A Figura 3 sintetiza essas interações ao mostrar como decisões econômicas moldam atividades produtivas e emissões, que, por sua vez, intensificam riscos climáticos e induzem respostas regulatórias, retroalimentando o processo decisório de firmas e governos.

Figura 3 – Relação entre políticas ambientais, agentes econômicos e emissões de GEE



Fonte: elaboração própria (2025).

Uma das principais políticas adotadas para fazer frente aos riscos climáticos é a implementação de um mercado de carbono (MC). Ao atribuir um preço às emissões de gases de efeito estufa, esse instrumento cria incentivos econômicos para a redução das emissões e para a adoção de tecnologias menos intensivas em carbono, reduzindo progressivamente a dependência das firmas em relação às permissões de emissão (Stern; Coria, 2013). Além disso, o MC assegura certeza quanto ao volume total de emissões, característica particularmente relevante em contextos de elevada incerteza sobre os danos ambientais (Weitzman, 1974), ao mesmo tempo em que pode oferecer maior flexibilidade e capacidade de adaptação a novas informações (Murray; Newell; Pizer, 2009; Pizer, 2002). Diante dessas características, o mercado de carbono é um dos principais instrumentos de política climática adotados internacionalmente,

justificando sua escolha como objeto central de análise nesta tese. A seção seguinte aprofundará sobre as características desse instrumento e sua lógica de funcionamento.

1.1 MERCADO DE CARBONO

Nesta tese, o termo “mercado de carbono” não é utilizado no sentido usual de um mercado que surge espontaneamente a partir de interações descentralizadas entre agentes privados. Trata-se, na verdade, de um instrumento de política pública do tipo *cap and trade*, cuja existência depende da criação legal de limites quantitativos para as emissões, da definição de direitos de emissão negociáveis e de mecanismos de monitoramento e *enforcement*. Nesse arranjo, o *cap* é exógeno, as permissões de emissão são definidas por uma autoridade reguladora e o preço do carbono emerge endogenamente como resultado do equilíbrio sob restrição regulatória. Assim, sempre que o texto se referir a “mercado de carbono”, o leitor deve interpretá-lo como um mercado institucionalmente criado pela política ambiental, e não como um mercado voluntário, pré-existente ou descentralizado. Em resumo, não é o mercado que cria a política; é a política que cria o mercado.

É importante destacar que existem dois tipos principais de MC: o mercado voluntário e o mercado regulado, também conhecido como *cap and trade*. No mercado voluntário, empresas e indivíduos adquirem créditos de carbono de forma espontânea, com o objetivo de compensar as suas emissões de GEE e demonstrar compromisso com a sustentabilidade. Esses créditos são gerados por projetos que reduzem ou removem emissões, como reflorestamento ou energia renovável.

Já no sistema *Cap and trade*, uma autoridade reguladora estabelece um limite máximo (*Cap*) para as emissões de GEE em determinados setores ou regiões. Esse limite pode ser absoluto ou baseado na intensidade de emissões, como emissões por unidade de produto ou por unidade de PIB. As permissões de emissão (*allowances*) correspondentes a esse limite são distribuídas entre os agentes econômicos, podendo ser alocadas gratuitamente ou por meio de leilões (*auctioning*). As empresas que emitirem menos do que suas permissões podem vender o excedente, enquanto aquelas que excederem seus limites devem adquirir permissões adicionais no mercado. Dito isso, o foco da tese é o MC do tipo *Cap and trade*, e não do tipo voluntário.

Depois das análises de Pigou (2017)¹, que destacou a relevância da internalização das externalidades negativas por meio de instrumentos regulatórios, e das contestações trazidas por

¹ Texto original de 1920.

Coase (2013)², segundo as quais soluções de mercado podem revelar-se eficientes em determinadas condições, o debate sobre políticas ambientais foi amplamente aprofundado na literatura. Nesse contexto, Baumol (1972) foi um dos pioneiros ao discutir mecanismos alternativos para correção de externalidades, enfatizando o potencial do mercado de emissões como ferramenta eficaz sob determinadas condições institucionais e econômicas.

No início, essa discussão estava restrita ao campo teórico (Baumol, 1972; Weitzman, 1974; Pearce, 1976; Meade, 1973). Contudo, com o aumento da conscientização ambiental na década de 1980, impulsionado pelo relatório *Our Common Future*, da Comissão Brundtland, em 1987, diversos países começaram a implementar políticas climáticas, adotando uma abordagem ou outra. Nesse contexto, surgiram dados empíricos relevantes, como o Sistema de Comércio de Emissões da União Europeia (EU ETS), iniciado em 2005, e o programa de *Cap-and-trade* de dióxido de enxofre (SO_2) nos Estados Unidos, implementado em 1990.

O avanço da econometria nas décadas de 1970 e 1980 proporcionou nova dimensão analítica aos dados disponíveis. O mercado de licenças para a emissão de SO_2 nos Estados Unidos destacou-se como a primeira política ambiental de grande escala a apresentar resultados concretos, levando a uma concentração significativa de estudos nesse contexto. Um dos primeiros trabalhos a investigar essa questão foi realizado por Greenstone (2004), que, ao empregar regressão linear simples, não identificou impacto significativo da nova regulamentação na redução da concentração de SO_2 .

Com o passar do tempo, o campo da econometria assistiu à introdução de metodologias avançadas, como a utilização de dados em painel com efeitos fixos e aleatórios e a incorporação de variáveis instrumentais, permitindo análises mais profundas e abrangentes sobre os mecanismos de precificação das emissões (Greenstone, 2004). Estudos mais recentes têm se dedicado a aprofundar o entendimento sobre o funcionamento e a eficácia dos mercados de carbono, como evidenciado pelo trabalho de Goulder e Parry (2008). As suas principais conclusões indicam que, a partir de diferentes perspectivas — custo-eficácia, equidade distributiva, minimização de riscos sob incerteza e viabilidade institucional, por exemplo — o MC se revela alternativa estratégica, cuja eficiência pode ser potencializada quando combinada com outras políticas complementares. O Quadro 2 apresenta o resumo dos trabalhos de diversos autores que aprofundam essa discussão.

² Texto original de 1960.

Quadro 2 – Autores que discutem *Cap-and-trade*

Dimensão	Cap-and-trade	Autor(es) citado(s)
Questão de Weitzman	Em modelos econômicos com curva de dano (ex: emissões versus utilidade), caso a curva de dano marginal forma mais inclinada (inelástica), então é melhor optar por fixar a quantidade de carbono (ex: MC), ou seja, criar uma curva de demanda por carbono que seja vertical e mais parecida com a curva de dano marginal(1).	Weitzman (1974)
Flexibilidade de Mercado (Questão de Murray-Newell Pizer)	Um sistema de <i>Cap-and-trade</i> puro oferece certeza na quantidade (<i>cap</i>), mas preço incerto, o que pode levar a grandes flutuações no valor das permissões caso ocorram choques de demanda ou oferta (por exemplo, mudança tecnológica, crescimento econômico inesperado, etc.). Em uma versão mais flexível, com banco de permissões (<i>banking</i>) e até empréstimo (<i>borrowing</i>), as empresas podem gerenciar melhor custos ao longo do tempo: se o preço futuro esperado for alto, elas "guardam" permissões; se for baixo, podem "emprestar" do futuro. Essa flexibilidade intertemporal ajuda a suavizar volatilidade de preços e a equalizar custos no longo prazo.	Weitzman (1974); Pizer (2002); Murray, Newell e Pizer (2009)
Viabilidade Política	Frequentemente preferido politicamente, pois os custos para emissores são menos diretos.	Weitzman (1974); Strand (2013)
Certeza de Emissões	Fornece certeza nas emissões ao impor um limite total. Em cenários onde os danos causados pelas emissões são imprevisíveis, é preferível limitar as emissões e deixar o preço flutuar.	Weitzman (1974)
Estabilidade de Preço	Os preços podem ser voláteis devido à oferta fixa de permissões, especialmente sob a mudança de demanda.	Nordhaus (2007)
Cobertura Setorial	Partes interessadas buscam uma maior parte de permissões gratuitas em vez de exclusões, potencialmente aumentando o custo-efetividade.	Stavins (2007)
Reciclagem de Receita ⁽⁰⁾	Normalmente, o MC é gerido por um órgão com pouca experiência em arrecadação, o que pode dificultar a 'reciclagem de receita'.	Metcalf (2007) para o caso dos EUA.
Política Híbrida	A versão híbrida, que mescla características do sistema <i>Cap-and-trade</i> e do sistema taxa de carbono, cria mecanismos de estabilização de preço (por exemplo, a criação de reserva estratégica de permissões). Se o valor dos créditos subir acima de um teto definido, o governo libera permissões adicionais ou usa outras ferramentas para evitar uma disparada de preços.	Stavins (2007)

Continua

Continuação

Dimensão	Cap-and-trade	Autor(es) citado(s)
Transferência de Riqueza para Exportadores de Petróleo	Risco de transferência de riqueza para países exportadores de petróleo, caso manipulem a oferta de petróleo em resposta aos preços das permissões. <i>'the cartel could exploit a system of cap and trade by reducing oil quantity and raising oil prices until allowance prices were zero'</i> (Goulder; Schein, 2013).	Judd (2008)
Interação com Políticas Suplementares	Políticas adicionais podem não reduzir as emissões totais devido ao limite fixo ⁽²⁾ .	Shobe e Burtraw (2012); Fischer e Preonas (2010)
Offsets	Empresas em uma região podem comprar créditos de carbono de outra região, gerando problemas de <i>offset</i> , que podem ser mitigados com restrições.	Goulder e Schein (2013)
Percepção Pública	Em geral, MC recebe cobertura de mídia mais positiva em comparação com impostos sobre carbono.	Kosnik (2018)
Incentivos para Inovação	O incentivo em reduzir emissões irá depender do preço das emissões no mercado; deve ser alto o suficiente para que a firma tenha incentivos para abater suas emissões e vender o excedente de licenças.	—
Facilidade Administrativa	Exige monitoramento, cumprimento de limites de emissões, alocação de permissões e possivelmente supervisão de mercados de negociação.	—

Fonte: elaboração própria (2025).

Notas: (0) Reciclagem de Receita: significa aplicar a arrecadação em benefício da população, como em projetos de descarbonização;

- (1) Weitzman (2018) argumenta que, no caso de mudanças climáticas, o estoque de CO_2 na atmosfera (que efetivamente gera o dano) já é enorme. Se, ao longo de um período de cinco ou dez anos, emitirmos um pouco mais ou um pouco menos, isso representa uma fração ínfima do estoque total. Ou seja, segundo essa lógica, a curva de dano marginal deve ser mais horizontal (o dano adicional causado por uma pequena mudança no fluxo de emissões não varia muito), por isso a política de fixar o preço do carbono é mais eficiente do que a política de fixar a quantidade de carbono (MC);
- (2) Se uma nova política fizer as emissões caírem, então a demanda por permissões também cairá. O novo preço das licenças irá permitir que novas firmas entrem no mercado, mantendo assim as emissões totais constantes.

Nessa mesma direção, os modelos de CGE que surgiram na década de 1960 e se aprimoraram nas décadas de 1970 e 1980 começaram a ser utilizados nas décadas seguintes para a compreensão de problemas climáticos. Um dos primeiros modelos desenvolvidos foi o de Burniaux *et al.* (1992). No início dos anos de 1990, o modelo GTAP surgiu como referência para a investigação de questões ambientais.

Novos artigos teóricos, econométricos e envolvendo modelos CGE continuam a ser produzidos acerca desse tema. Portanto, considera-se que a discussão é extensa e já foi amplamente realizada por outros autores (mais recentemente, Robert N. Stavins, em 2022,

aborda novamente o tema). Para esta tese, consideram-se as conclusões gerais a seguir acerca do tema *Cap-and-trade* (MC):

- I Certeza sobre a emissão — como o volume de emissão é fixado pelo governo, há maior previsibilidade na emissão gerada pelo País;
- II Ajuste dinâmico — o preço do carbono varia juntamente com outras variáveis econômicas.

Vale destacar que esta tese se concentra na dinâmica do MC, afastando-se de abordagens tributárias. Embora diferentes instrumentos de precificação das emissões possam, em termos teóricos, gerar efeitos equivalentes sobre a mitigação da poluição, evidencia-se, na prática, preferência por parte dos agentes econômicos pelo modelo de *Cap-and-trade*. Tal inclinação é ilustrada por Kosnik (2018), que aponta os atributos distintivos desse sistema — sobretudo a sua flexibilidade operacional e a previsibilidade que oferece aos participantes — como fatores determinantes para a sua maior aceitação no contexto atual das políticas ambientais.

1.2 REGULAÇÃO DO MERCADO DE CARBONO NO BRASIL

Esta seção apresenta, de forma resumida, a criação do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE) no âmbito da Lei nº 15.042/2024, bem como os principais elementos que estruturam o mercado regulado de carbono no Brasil. São destacadas as diferenças entre a Cota Brasileira de Emissões (CBE), o Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE) e o mercado de carbono em sentido amplo, além dos aspectos centrais de organização do mercado, tributação dos ativos e da estrutura institucional e do período de transição previstos para a implementação do sistema.

O Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), instituído pela Lei nº 15.042/2024, constitui o mercado regulado de carbono no Brasil, mas não se confunde com a totalidade do mercado de carbono existente no País. O SBCE é um ambiente regulado no qual determinadas atividades, fontes e instalações emissoras de GEE estão sujeitas a limites de emissão e a obrigações periódicas de conformidade. Nesse sistema, a mitigação ocorre por meio da negociação de ativos reconhecidos oficialmente pelo Estado, sob regras uniformes e com governança pública definida. Já o mercado voluntário de créditos de carbono opera fora do SBCE, permitindo transações voluntárias de créditos gerados por projetos específicos, desde que respeitadas as salvaguardas e limitações impostas pela Lei. Assim, o SBCE é o núcleo do mercado regulado de carbono no Brasil, enquanto o mercado de carbono,

em sentido amplo, inclui também as transações voluntárias de créditos não utilizados para cumprimento de obrigações regulatórias.

No âmbito do SBCE, a Lei institui dois ativos ambientais distintos: a Cota Brasileira de Emissões (CBE) e o Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE). A CBE representa o direito de emitir uma tonelada de dióxido de carbono equivalente e é outorgada pelo órgão gestor do SBCE aos operadores regulados, podendo ser distribuída de forma gratuita ou onerosa. Já o CRVE representa a redução ou remoção efetiva e verificada de uma tonelada de CO₂ equivalente, obtida a partir de projetos ou programas que utilizam metodologias credenciadas e são registrados no sistema. Enquanto a CBE está associada ao teto de emissões do mercado regulado, o CRVE funciona como um instrumento complementar, limitado pelo Plano Nacional de Alocação, para o cumprimento das obrigações de conformidade.

Embora relacionados, CBEs, CRVEs e créditos de carbono possuem naturezas jurídicas e funções distintas. As CBEs e os CRVEs são ativos integrantes do SBCE, reconhecidos oficialmente pelo Estado brasileiro e utilizados para fins de cumprimento de obrigações regulatórias. Os créditos de carbono, por sua vez, são ativos transacionáveis gerados no mercado voluntário, a partir de projetos ou programas de redução ou remoção de emissões externos ao SBCE. Esses créditos não conferem, por si só, direito de emissão no mercado regulado, mas podem, em determinadas condições e mediante conversão, ser reconhecidos como CRVEs. Dessa forma, o SBCE estabelece uma separação clara entre direitos de emissão (CBEs), ativos de compensação (CRVEs) e créditos de carbono (créditos voluntários), evitando dupla contagem e preservando a integridade do sistema..

As CBEs, por serem ativos criados (outorgados) pelo órgão gestor do SBCE, podem ser distribuídas por meio de alocação gratuita ou onerosa, inclusive via leilões, e posteriormente negociadas no mercado secundário. Já os CRVEs, por serem gerados por projetos ou programas implementados por agentes privados ou públicos e apenas reconhecidos pelo Estado, não possuem mercado primário regulado, sendo sua comercialização restrita ao mercado secundário após o registro no SBCE.

O funcionamento do SBCE é operacionalizado por meio do Plano Nacional de Alocação (PNA), que constitui o principal instrumento de planejamento e previsibilidade do mercado regulado de carbono. O PNA define, para cada período de compromisso, (i) o limite máximo agregado de emissões, (ii) a quantidade total de CBEs a ser disponibilizada aos operadores, (iii) os critérios e formas de alocação das CBEs, gratuita ou onerosa, e (iv) o percentual máximo de CRVEs que pode ser utilizado para a conciliação periódica de obrigações, entendida como o

processo pelo qual os operadores devem comprovar, ao final de cada período de compromisso, a posse de ativos do SBCE — CBEs e, dentro dos limites estabelecidos, CRVEs — em quantidade equivalente às suas emissões líquidas efetivamente incorridas. Ao disciplinar simultaneamente a oferta de direitos de emissão (CBEs) e o uso de ativos de compensação (CRVEs), o Plano Nacional de Alocação estabelece a trajetória de redução de emissões ao longo do tempo, confere sinal econômico claro aos agentes regulados e assegura a coerência do SBCE com os objetivos da Política Nacional sobre Mudança do Clima.

A Lei estabelece que os ativos integrantes do SBCE e os créditos de carbono, quando negociados no mercado financeiro e de capitais, são classificados como valores mobiliários, submetendo-se ao regime jurídico da Comissão de Valores Mobiliários (CVM). Os ganhos decorrentes da venda de créditos de carbono, CBEs e CRVEs são tributados pelo Imposto de Renda conforme o regime aplicável ao contribuinte, podendo ser enquadrados como receita operacional, ganho líquido ou ganho de capital. A legislação autoriza a dedução de despesas relacionadas à geração desses ativos na apuração do imposto, desde que observados os critérios gerais de dedutibilidade. Ademais, as receitas provenientes dessas vendas não se sujeitam ao PIS/Pasep nem à Cofins, e a conversão de créditos de carbono em ativos do SBCE não configura fato gerador de tributos.

A governança do SBCE é estruturada em três instâncias complementares. O Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM) atua como órgão deliberativo, responsável por definir diretrizes gerais e aprovar o Plano Nacional de Alocação. O órgão gestor do SBCE exerce funções normativas, regulatórias e operacionais, incluindo a emissão de ativos, a gestão do registro central e a fiscalização do cumprimento das obrigações. O Comitê Técnico Consultivo Permanente, por sua vez, desempenha papel consultivo, oferecendo subsídios técnicos e recomendações, com participação do poder público, dos setores regulados, da academia e da sociedade civil.

Por fim, a Lei prevê um período de transição para a implementação plena do SBCE, estruturado em fases graduais. Esse período tem como finalidade permitir a adaptação dos agentes regulados, a consolidação dos sistemas de monitoramento, relato e verificação e o ajuste progressivo das regras de alocação e precificação. A cobrança pela outorga onerosa das CBEs somente será iniciada após essas etapas iniciais, assegurando previsibilidade regulatória e reduzindo riscos econômicos associados à introdução do mercado regulado de carbono.

Para evitar ambiguidades conceituais, é importante destacar que, no momento da modelagem das emissões, o termo “crédito de carbono” será utilizado em sentido analítico para

representar, do ponto de vista legal, apenas CBEs leiloadas a cada período, sem um mercado secundário.

1.3 OBJETIVOS

Nesse contexto, o objetivo central desta tese é desenvolver um modelo macroeconômico específico para o Brasil, consistente e capaz de analisar os riscos associados à transição climática, com ênfase nos impactos decorrentes da implementação de políticas de redução das emissões de GEE por meio de um mercado de carbono (MC). Entre as questões investigadas, destacam-se: quais setores econômicos tendem a ser mais impactados pela introdução de um MC; de que forma essa política afeta variáveis macroeconômicas como produto, renda, preços e emprego; e quais setores podem se beneficiar da nova configuração regulatória ³.

Para responder a essas questões, optou-se pela construção de um modelo de Equilíbrio Geral Computável (CGE - Computable General Equilibrium). Essa abordagem permite elevado nível de detalhamento setorial e regional, sendo particularmente adequada para a análise de problemas que transcendem fronteiras geográficas, como as emissões de GEE e o aquecimento global. A utilização de dados do Global Trade Analysis Project (GTAP) — um dos projetos mais antigos nessa área, iniciado em 1992 — contribui para a robustez da análise. O GTAP é amplamente empregado na formulação de modelos CGE que incorporam comércio internacional e emissões, o que garante consistência entre a estrutura teórica do modelo e a base de dados utilizada.

O modelo desenvolvido nesta tese incorpora as externalidades climáticas por meio da implementação de um mercado de carbono, concebido como instrumento central de precificação das emissões. A estrutura analítica adotada concentra-se exclusivamente na análise desse mecanismo, buscando compreender seus impactos econômicos e setoriais, sem recorrer à comparação com outros instrumentos de regulação ambiental.

A análise desses mecanismos, no entanto, exige uma estrutura capaz de capturar simultaneamente os efeitos setoriais, os encadeamentos produtivos e os ajustes dinâmicos induzidos por políticas climáticas. Nesse sentido, a escolha de modelos do tipo (CGE) também se justifica pelo avanço recente dessa literatura. Em 2019, Caliendo, Dvorkin e Parro apresentaram o primeiro modelo CGE dinâmico resolvido por meio da metodologia de exact-

³ Por exemplo, o setor silvícola brasileiro pode se beneficiar de um MC, pois possui emissões negativas e, possivelmente, não precisará adquirir créditos de carbono.

hat algebra, que permite estimar as equações do equilíbrio sem a necessidade de conhecer diretamente variáveis de difícil mensuração — como níveis tecnológicos setoriais —, preservando, ao mesmo tempo, a dinâmica do modelo (Caliendo; Parro, 2022). Essa abordagem torna possível concentrar a análise em variáveis de interesse para a política climática, como as emissões setoriais e seus efeitos macroeconômicos ao longo do tempo.

Em particular, esta tese utiliza-se como base o modelo desenvolvido por Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) — doravante denominado modelo CDP — devido as seguintes vantagens:

I evitar o pressuposto de Estado Estacionário — o modelo CDP não necessita assumir que a economia está em um estado estacionário. Essa característica é relevante, pois permite a análise de economias em transição, ao invés de pressupor que já se alcançou equilíbrio de longo prazo, o que torna o modelo mais aplicável a cenários reais, nos quais as economias, frequentemente, enfrentam flutuações e não permanecem em estados estacionários; especialmente em resposta a choques comerciais significativos, como a ascensão da China, que é o foco central na pesquisa dos autores;

II simplificação dos cálculos – ao evitar a suposição de estado estacionário, o modelo simplifica o cálculo do equilíbrio (não sendo necessário lidar com equações de estado estacionário), o que geralmente é complexo em modelos dinâmicos;

III condições iniciais realistas – o modelo pode ser inicializado com dados reais de produção, comércio, migração e emprego, sem precisar assumir que essas condições iniciais representam um estado estacionário, o que possibilita simulações e previsões mais precisas, especialmente ao analisar o impacto de choques temporais;

IV desenvolvimento de algoritmo – além da solução teórica do modelo, os autores propuseram um algoritmo para a solução do modelo utilizando dados reais; descrevem o que consideram a melhor estratégia passo a passo para resolver o modelo, tanto na versão de equilíbrio competitivo (dot) quanto na versão contrafactual (hat).

Essa é a base do modelo desenvolvido nesta tese e, até o momento, a adaptação do modelo CDP — que foi originalmente desenvolvido para analisar como o avanço da China entre os anos de 2000 e 2007 afetou o mercado de trabalho dos Estados Unidos. Essa adaptação representa a primeira aplicação para questões ambientais no contexto brasileiro. Apesar da existência de outras contribuições significativas (Han; Moon, 2021; Tian et al., 2022; Hübler; Pothen, 2021), a presente adaptação se destaca por alterar estruturas básicas do modelo, incluindo modificações na função de utilidade dos agentes e na função de produção. Na prática, o que foi feito substituiu a função de produção original por uma função que considera as

emissões de carbono, conforme o modelo sugerido por Copeland e Taylor (2013). Tal alteração possibilita a análise de políticas ambientais, como a implementação de um MC, abrindo novas perspectivas para a avaliação de estratégias de mitigação ambiental.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta tese é medir os impactos econômicos e setoriais da política de mercado de carbono no Brasil, por meio da adaptação e aplicação de um modelo de equilíbrio geral computável que incorpore as emissões de gases de efeito estufa.

1.3.2 Objetivos específicos

- I Adaptar o modelo de equilíbrio geral computável (modelo CDP) para incluir emissões de gases de efeito estufa, de modo a possibilitar a avaliação de políticas ambientais.
- II Construir cenários de implementação do mercado de carbono no Brasil, considerando diferentes arranjos de redução de emissões de GEE e horizontes temporais.
- III Mensurar os impactos macroeconômicos da política de mercado de carbono sobre variáveis como produto, renda, preços e emprego.
- IV Avaliar os efeitos setoriais da política, identificando quais setores apresentam maior esforço de mitigação, maiores custos de ajuste e potenciais oportunidades decorrentes da transição.
- V Validar empiricamente o modelo proposto, por meio da calibração e parametrização com dados nacionais e internacionais, verificando a robustez das simulações.

A organização da tese tem início com esta Introdução que apresentou os fundamentos teóricos do MC e o objetivo geral e os específicos relacionados à análise do MC no Brasil⁴. A segunda seção se dedica a revisão dos distintos tipos de modelos de CGE que se encontram disponíveis e que podem ser aplicados nesta tese; nesse contexto, argumenta-se em favor da seleção de um modelo do tipo CDP como a base teórica para a análise proposta.

Na sequência tem-se a Seção da Metodologia indicando os caminhos explorados por outros autores para a adaptação do modelo CDP às questões ambientais; discute também de que

⁴ Esta tese utilizou, em etapas específicas da redação e revisão, o suporte da ferramenta de inteligência artificial ChatGPT (OpenAI, modelo GPT-5). O emprego da ferramenta teve caráter instrumental, voltado ao aprimoramento da clareza textual, da coerência argumentativa e da correção linguística. Todos os resultados produzidos pela ferramenta foram cuidadosamente revisados pelo autor para garantir a acurácia e veracidade das informações. As decisões analíticas e conclusões permanecem de inteira responsabilidade do autor.

forma a modificação do modelo CDP representa avanços significativos na literatura existente. Faz, ainda, a apresentação do modelo CDP básico, que depende de quatro modelos diferentes: 1) o modelo ACM (Artuç; Chaudhuri; McLaren, 2010); 2) o modelo de custo *iceberg* (Krugman *et al.*; 1980); 3) o modelo EK para comércio internacional (Eaton; Kortum, 2002); 4) o modelo DEK (Dekle; Eaton; Kortum, 2008). Ainda nessa Seção é apresentada a adaptação feita nesta tese ao modelo CDP, utilizando-se o modelo de Copeland e Taylor (2013), que será denominado Modelo de Comércio de Carbono (MCC); aborda também os dados do modelo e como parametrizá-lo. Em seguida, na quarta Seção, são apresentados os resultados obtidos ao longo da pesquisa; na sequência, encontram-se as considerações finais com sugestões para pesquisas futuras, as Referências e os Apêndices.

2 MODELOS CGE E MEIO AMBIENTE

Uma das abordagens para analisar o RC de transição consiste na criação de cenários. Por exemplo, é possível desenvolver um cenário em que o Brasil atinge a meta de neutralidade de carbono (ou seja, emissões líquidas⁵ zero)⁶ até 2050 e outro em que essa meta é alcançada até 2030, permitindo comparação entre ambos. Essa metodologia proporciona aproximação consistente dos efeitos econômicos da meta original, além de avaliar o custo associado à antecipação dessa meta em 20 anos. Os modelos de CGE⁷ se destacam como uma das ferramentas econômicas mais adequadas para criar tais cenários.

Dada a escala do problema em análise, os modelos de CGE se configuram como ferramenta metodologicamente adequada, especialmente considerando a sua aplicabilidade em mudanças de políticas, como reformas tributárias, regulamentações ambientais e outras transformações de larga escala na estrutura econômica. Nesse contexto, surge a questão: qual tipo de modelo CGE deve ser empregado? Dado que as emissões afetam o planeta de forma abrangente, a utilização de um modelo com múltiplos setores e países é ideal, semelhante aos utilizados na modelagem do comércio internacional. Assim, os modelos CGE podem ser classificados em dois grupos principais: os modelos lineares, como o *Global Trade Analysis Project* (GTAP), e os modelos não lineares, como o modelo EK.

Os modelos lineares do tipo GTAP foram resumidos por Dixon e Jorgenson (2012). Uma característica essencial desses modelos é a aplicação da equação gravitacional para explicar o comércio bilateral. De acordo com essa equação, o volume de comércio entre dois países está diretamente relacionado à distância que os separa e ao tamanho das suas economias. As vantagens dos modelos gravitacionais incluem a sua capacidade de melhor representar os dados empíricos e a sua ampla utilização na literatura. No entanto, uma desvantagem significativa é que a equação gravitacional carece de base teórica sólida, o que limita a sua aplicabilidade em análises contrafactuais⁸.

Avanço considerável em relação a esses modelos foi introduzido pelo trabalho de Eaton e Kortum (2002). De maneira geral, os autores desenvolveram uma função que substitui a tradicional função gravitacional, porém com fundamentos microeconômicos, o que permite a

⁵ Emissões líquidas: quantidade de GEE emitida menos a quantidade removida da atmosfera.

⁶ Está além do escopo da tese a discussão sobre a possibilidade de se atingir emissões zero. Para mais detalhes, deve ser consultado o trabalho de Rogelj *et al.* (2021).

⁷ Para uma catalogação de modelos CGE envolvendo políticas ambientais, consulte An (2022).

⁸ Para mais detalhes, deve ser consultado o livro dos autores Caliendo e Parro (2022, cap. 2).

realização de análises contrafactuais. No modelo EK, o comércio bilateral considera a heterogeneidade de produtividade entre países e setores⁹.

Dada a diferença existente entre esses dois tipos de modelos, escolheu-se trabalhar com os modelos microfundamentados, uma vez que possibilitam as modificações desejadas. Nesse contexto, as firmas devem escolher a quantidade de emissões que minimiza os seus custos, tendo a opção de abater parte dessas emissões por meio de combinações de capital e trabalho. Outra vantagem de se utilizar um modelo microfundamentado é que, ao invés de tratar a tecnologia de abatimento como uma variável fixa, é possível assumir que depende dos investimentos realizados para reduzir as emissões geradas durante o processo produtivo¹⁰.

Para esclarecer a relação entre modelos de CGE e questões ambientais, a seguir serão apresentadas algumas adaptações realizadas por outros autores ao modelo CDP, visando a incorporar aspectos ambientais. Em seguida, será destacado como a proposta de modificação apresentada na tese representa avanço nessa linha de pesquisa. Ao longo desta seção, os termos Mercado de Carbono, MC e sistema de cap-and-trade serão usados de forma equivalente.

Os autores Colantone, Ottaviano e Schmitz (2023) utilizam o modelo CDP para investigar o impacto das regulações ambientais sobre a produção em diferentes estados norte-americanos. As emissões e a produção setorial são modeladas de forma análoga às abordagens de Copeland e Taylor (2013) e de Shapiro e Walker (2018), embora essa relação não seja detalhada explicitamente no texto. Nesse arcabouço, uma fração dos insumos é destinada ao abatimento das emissões, sendo essa fração utilizada como *proxy* para o grau de rigor regulatório do estado. Quanto mais rigorosa a regulação ambiental, maior é a quantidade de mão de obra requerida para o abatimento¹¹.

Os autores consideraram essa variável como exógena, utilizando-a como uma medida da intensidade da regulação ambiental em cada estado. O modelo desenvolvido incorpora um efeito externo das emissões sobre a produtividade dos setores, modelando essa produtividade como uma função que depende negativamente dos níveis de emissão na região. E calibraram o modelo com base nos resultados empíricos das regressões, determinando os principais

⁹ O modelo EK é um modelo de comércio internacional com competição perfeita e heterogeneidade de produtividade. Outro avanço foi o modelo de Melitz (2003), que considerou competição imperfeita e heterogeneidade entre firmas.

¹⁰ Choques de curto prazo, como os que serão abordados, permitem manter o *trade-off* entre produção e emissão constantes. Entretanto, no longo prazo, é necessário considerar os avanços tecnológicos. Observação importante: ver os modelos de crescimento endógenos de Romer (1994).

¹¹ Essa adaptação é uma interpretação interessante do modelo de Copeland e Taylor (2013), embora se desvie do modelo original, concebido para modelar taxas e mercados de carbono.

parâmetros, como as elasticidades que controlam a resposta da produtividade ao abatimento e o impacto das emissões na produção.

Os autores Han e Moon (2021) incorporam as emissões no modelo CDP de quatro maneiras distintas: 1) da mesma forma que Shapiro e Walker (2018) e Han e Moon (2021), ou seja, considerando que as emissões são proporcionais às quantidades produzidas¹²; 2) as emissões¹³ geram desutilidades, impactando negativamente o consumo das famílias; 3) existem restrições impostas às emissões de cada país¹⁴; 4) são consideradas taxas de emissão e preços de cotas de carbono.

O modelo proposto por Hübler e Pothén (2021) é um sistema de permissões negociáveis para a extração de areia, denominado *Sand Extraction Allowances Trading Scheme* (SEATS). Nesse esquema, é estabelecido um limite máximo para a extração de areia, e as permissões correspondentes podem ser comercializadas entre os agentes econômicos. Essa abordagem foi implementada em um modelo de CGE que integra as elasticidades de comércio do modelo de Caliendo e Parro (2015). O SEATS considera tanto a elasticidade de substituição entre insumos, como areia e outros materiais não metálicos, quanto o impacto sobre o bem-estar regional; o que permite análise detalhada de como a taxa e o limite de extração afetam a produção e o comércio de areia nos países exportadores e importadores.

Os autores (Tian *et al.*, 2022) desenvolveram um modelo para analisar os acordos comerciais entre países, com foco específico no Acordo de Parceria Econômica Regional (RCEP). Essa análise é realizada de maneira semelhante ao modelo que já utilizaram para o NAFTA, mas inclui uma avaliação dos efeitos do acordo sobre as emissões de CO₂. A incorporação das emissões no modelo é realizada por meio de coeficientes de emissão, que estabelecem relação direta entre as emissões e o nível de produção em cada região e setor.

Apesar de sua ampla utilização recente para a análise de choques comerciais, migração da força de trabalho e reorganização produtiva entre regiões e setores, o modelo CDP não foi originalmente concebido para tratar questões ambientais. Em particular, as emissões de gases de efeito estufa não fazem parte de sua estrutura produtiva básica, sendo ausentes como fator econômico explícito. Assim, aplicações ambientais existentes — como aquelas apresentadas nos parágrafos anteriores — tendem a tratar emissões de forma reduzida ou periférica, sem alterar os fundamentos microeconômicos do modelo.

¹² Han e Moon, (2021) não explicam como os valores da razão entre a quantidade produzida e a emissão foram estimadas; apenas os apresentam em uma tabela nos anexos.

¹³ Equação 1 do modelo.

¹⁴ Equação 6 do modelo.

Nesse contexto, uma das principais contribuições desta tese consiste em adaptar estruturalmente o modelo CDP para a análise de políticas ambientais, incorporando as emissões como fator de produção, à luz da abordagem de Copeland e Taylor (2013). Essa modificação altera elementos centrais do modelo — incluindo a função de produção e os mecanismos de precificação — permitindo que instrumentos como o mercado de carbono sejam analisados de forma endógena e consistente em um modelo dinâmico de equilíbrio geral. Trata-se, portanto, não de uma mera aplicação do CDP a um novo tema, mas de uma extensão teórica substantiva que amplia o seu domínio analítico para questões ambientais.

Na seção da metodologia, serão descritos os passos necessários para a implementação do modelo adaptado às questões ambientais, além da parametrização requerida para a realização das simulações.

3 METODOLOGIA

De maneira geral, o modelo CDP pode ser compreendido sob duas perspectivas. A primeira é temporal — na qual se busca explicar o modelo por meio das diferentes evoluções que o modelo original de David Ricardo passou para atender às críticas que lhe foram dirigidas. A segunda perspectiva consiste em dividir o modelo em partes menores, apresentando o modelo CDP como um modelo híbrido, composto por cinco módulos principais e uma modificação final no sistema de equações, a qual os autores Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) chamaram de *Dynamic exact-hat algebra*. Essa segunda abordagem é mais simples, presumindo que o leitor já possui conhecimento do modelo básico ricardiano¹⁵; portanto, será a perspectiva adotada nesta análise¹⁶.

Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) afirmam que o modelo se baseia em dois modelos principais: ACM e EK. Contudo, para fins de clareza didática, o modelo CDP pode ser decomposto em seis blocos: 1) decisão das famílias e migração (modelo ACM); 2) custo unitário (modelo *iceberg*); 3) comércio internacional (modelo EK); 4) equilíbrio walrasiano; 5) *static exact-hat algebra* (modelo DEK)¹⁷; 6) *dynamic exact-hat algebra*.

Outra maneira de compreender o modelo CDP é considerá-lo como um problema de otimização para encontrar os preços de equilíbrio. Depois da determinação desses preços, é possível estabelecer a participação de cada região e setor no comércio internacional, assim como o dispêndio total e os salários. A principal diferença desse modelo é que as suas equações estão

¹⁵ Esse modelo é amplamente utilizado em economia internacional, pois permite explicar o comércio entre países com base na teoria das vantagens comparativas de David Ricardo. Essa teoria destaca que, mesmo que uma economia seja menos eficiente que a outra na produção de todos os bens, ainda assim haverá produção daqueles em que é relativamente menos ineficiente. Fato que ocorre porque a vantagem comparativa está relacionada aos custos de oportunidade de produção: um país deve se especializar na produção dos bens para os quais sacrifica menos recursos na produção de outros bens. Dessa forma, cada região direciona os seus recursos para produzir aquilo em que é mais eficiente, promovendo o comércio internacional e aumentando o bem-estar econômico global.

¹⁶ Conforme os próprios autores, esse novo modelo quantitativo CDP pode ser entendido como um conjunto de *building blocks* (ou de ambientes econômicos), tais como: *production structure, preferences, number and type of sectors (tradable e non-tradable), market structure, economic geography, source (or absence) of dynamics, treatment of trade deficits, e the mobility of goods and people* (Caliendo; Parro, 2022).

¹⁷ Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) cometem um equívoco ao se referirem ao modelo DEK de 2008 (Dekle; Eaton; Kortum, 2008); na verdade, queriam se referir ao modelo DEK de 2007 (Dekle; Eaton; Kortum, 2007). Os próprios autores do modelo DEK afirmam que foi no modelo de 2007 que introduziram a questão do *hat algebra*: *We pursue a particular specification of gravity relationships, which we introduced in* (Dekle; Eaton; Kortum, 2007). *Rather than estimating such a model in terms of levels, we specify the model in terms of changes from the current equilibrium. This approach allows us to calibrate the model from existing data on production and trade shares. We thereby finesse having to assemble proxies for bilateral resistance (for example, distance, common language, etc.) or inferring parameters of technology. A particular virtue is that we do not have to impose the symmetry in bilateral trade flows implied by these measures but spurned by the data* (Dekle; Eaton; Kortum, 2007).

no formato *exact-hat algebra* (Dekle; Eaton; Kortum, 2007). Outros detalhes sobre o modelo também podem ser visualizados nos Apêndices E, F e I.

3.1 MODELO CDP

Conforme já mencionado, para facilitar a compreensão do modelo CDP, optou-se por apresentá-lo de forma segmentada. De início, são introduzidos os três modelos que o compõem — ACM, custo *iceberg* e EK. Em seguida, discute-se a parte relacionada ao CGE. Depois, é apresentado o modelo DEK, que serve de fundamento para o *static exact-hat algebra*, para, então, se abordar a contribuição de Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) — o *dynamic exact-hat algebra*. Somente na seção seguinte é introduzida a base do modelo de Copeland e Taylor (2013) e a sua incorporação ao modelo CDP, especificamente a inclusão das questões ambientais no modelo, o que será denominado de Modelo de Comércio de Carbono (MCC). Os mesmos símbolos foram utilizados para representar as variáveis e os parâmetros empregados por Caliendo, Dvorkin e Parro (2019). A derivação de cada um desses blocos pode ser encontrada no material suplementar desses autores.

O modelo considera um mundo composto por N localidades indexadas por n ou i . A economia também possui J setores indexados por j ou k . O tempo é discreto e indexado por t . A economia possui uma estrutura de ligações intersetoriais do tipo *input-output*¹⁸; consiste em famílias com expectativas racionais, que podem estar empregadas ou não empregadas. As famílias empregadas oferecem, de forma inelástica, uma unidade de trabalho, e recebem salário competitivo de mercado w_t^{nj} . As famílias são geograficamente móveis entre localidades e setores, mas enfrentam custos de mobilidade setoriais e espaciais $\tau^{nj,ik} \geq 0$. Esses custos são invariantes no tempo e aditivos. As famílias tomam decisões de migração baseadas na utilidade futura esperada e estão sujeitas a choques idiossincráticos ε_t^{ik} .

Existem também rentistas imóveis em cada região, e são eles que possuem as estruturas locais H^{nj} ; alugam essas estruturas para as firmas locais e recebem uma parcela de uma carteira global de aluguéis. O modelo não detalha explicitamente decisões de investimento no estoque de estruturas, já que as estruturas têm oferta fixa. As firmas tomam decisões de produção e as estruturas servem como um fator local de produção, juntamente com trabalho e materiais. É isso que será detalhado a seguir. Para uma melhor compreensão do modelo o leitor também

¹⁸ Na prática, o termo *input-output linkage* significa que a função de produção inclui, além dos insumos tradicionais (trabalho e estruturas), um fator adicional: os bens intermediários.

pode consultar a descrição de cada variável e parâmetro na Lista de Variáveis e Parâmetros presente no início desta tese.

Sobre o equilíbrio do modelo cabe resaltar que, em sua essência, o modelo CDP é focado na dinâmica do mercado de trabalho e na realocação de fatores. Portanto, o equilíbrio é alcançado através da oferta de mão de obra e da escolha gradual das famílias sobre onde se empregar ou se manter não-empregado, considerando custos de mobilidade. Sua aplicação principal visa quantificar os impactos de choques econômicos (como o aumento da competição comercial da China) sobre a distribuição de empregos e não-emprego em mercados de trabalho locais ao longo do tempo.

3.1.1 Bloco 1 – Migração (modelo ACM)

Considere N regiões ($n, i = 1, \dots, N$) e J setores de produção ($j, k = 0, \dots, J$). Por convenção, o setor 0 indica ausência de emprego. A família representativa empregada no mercado nj no instante t obtém utilidade a partir de uma cesta de bens finais locais,

$$U(C_t^{nj}) = U\left(\prod_{k=1}^J (c_t^{nj,k})^{\alpha^k}\right) \quad 1$$

onde $c_t^{nj,k}$ é a quantidade consumida do bem agregado do setor k (ou apenas bem do setor k) e $\alpha^k \in (0,1)$ é o peso desse bem no consumo final, com $\sum_k \alpha^k = 1$.

Se a família estiver desempregada ($j = 0$), consome o nível fixo $b^n > 0$ de produção doméstica. Quando empregada ($j \geq 1$), consome sua renda real $C_t^{nj} = w_t^{nj}/P_t^{nj}$, onde w_t^{nj} é o salário nominal e P_t^{nj} o índice de preços do mercado. A cada período, a família decide se permanece em nj ou migra para outro mercado ik , arcando com o custo $\tau^{nj,ik} \geq 0$. As expectativas intertemporais são descontadas pelo fator $\beta \in (0,1)$, enquanto a heterogeneidade nas preferências de localização é capturada por choques idiossincráticos ε_t^{ik} i.i.d. (independentes e identicamente distribuídos) do tipo Valor Extremo (com dispensação $v > 0$). Assim, o valor da utilidade esperada ao longo da vida (v) no mercado nj satisfaz:

$$v_t^{nj} = U(C_t^{nj}) + \max_{\{(i,k)\}_{i=1, k=0}^{N,J}} \left\{ \beta E[v_{t+1}^{ik}] - \tau^{nj,ik} + v \varepsilon_t^{ik} \right\} \quad 2$$

com restrição:

$$C_t^{nj} = \begin{cases} b^n, & j = 0; \\ \frac{w_t^{nj}}{p_t^{nj}}, & j \geq 1. \end{cases} \quad 3$$

Dada a função de utilidade intertemporal das famílias (eq. 2) e as restrições orçamentárias (eq. 3), as famílias farão duas escolhas: 1) mudar de região em que vivem atualmente — ou seja, da região n , e de setor j para a região i e setor k ; 2) alocar a sua renda entre os bens disponíveis.

O primeiro bloco do modelo CDP é composto por três equações resultantes da solução desse problema¹⁹: uma que representa a utilidade esperada ao longo da vida de um agente representativo no mercado de trabalho nj — tal que: $V_t^{nj} \equiv E[v_t^{nj}]$ — (eq. 4), outra que representa a matriz de migração dos agentes (eq. 5) e outra que descreve a oferta de trabalho (eq. 6). Essas três equações são fundamentadas no trabalho dos autores Artuç, Chaudhuri e McLaren (2010) – modelo ACM – e depende do choque idiossincrático ε_t^{ik} ser i.i.d. ao longo do tempo e ter distribuição Tipo I de Valor Extremo e média zero.

$$V_t^{nj} = U(C_t^{nj}) + v \log \left(\left(\sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^J \exp(\beta V_{t+1}^{ik} - \tau^{nj,ik}) \right)^{1/v} \right) \quad 4$$

$$\mu_t^{nj,ik} = \frac{\exp \left((\beta V_{t+1}^{ik} - \tau^{nj,ik})^{1/v} \right)}{\sum_{m=1}^N \sum_{h=0}^J \exp \left((\beta V_{t+1}^{mh} - \tau^{nj,mh})^{1/v} \right)} \quad 5$$

$$L_{t+1}^{nj} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^J \mu_t^{ik,nj} L_t^{ik} \quad 6$$

A equação (4) determina o valor esperado da utilidade intertemporal que cada agente atribui ao seu mercado atual, incluindo a utilidade presente e o valor da opção de migrar. A equação (5) transforma esses valores relativos (menos custos) em probabilidades concretas de

¹⁹ Os autores sugerem utilizar uma função de utilidade do tipo logarítmica para resolver esse problema de forma mais fácil: $U(C_t^{nj}) \equiv \log(C_t^{nj})$.

migração. Já a equação (6) usa essas probabilidades para atualizar a alocação de mão de obra no tempo, fechando a dinâmica de trabalho da economia. Mais informações sobre a derivação dessas equações — e de todas as demais equações do modelo — estão disponíveis no material suplementar dos autores do modelo CDP.

Uma das principais funções desse bloco no modelo CDP, como um todo, é garantir a dinâmica do modelo por meio da função de migração. Segundo Babatunde, Begum e Said (2017), a dinâmica nos modelos de CGE, em geral, é criada pela função de investimento — onde a variação no estoque de estruturas em t resulta do investimento realizado em $t - 1$. Contudo, no modelo CDP, a dinâmica é distinta; decorre das decisões das famílias em migrar ou não, com base nos salários oferecidos em cada região e setor.

3.1.2 Bloco 2 – Iceberg Cost

Considere o problema de otimização enfrentado por uma firma localizada na região n e atuante no setor j , que deseja produzir uma quantidade q_t^{nj} de uma variedade. Para isso, a firma escolhe as quantidades de estruturas h_t^{nj} , trabalho l_t^{nj} , e insumos intermediários $M_t^{nj,nk}$ — sendo $M_t^{nj,nk}$ a quantidade de insumo do setor k , proveniente da própria região n , utilizada na produção do bem j . O objetivo é minimizar o custo total de produção, que é composto pelo custo das estruturas, dado pela remuneração r_t^{nj} multiplicada pela quantidade de estruturas utilizadas, pelo custo do trabalho, $w_t^{nj} \cdot l_t^{nj}$, e pelo custo dos insumos intermediários, $\sum_{k=1}^J P_t^{nk} \cdot M_t^{nj,nk}$, em que P_t^{nk} é o índice de preço do bem k na região n .

O problema de minimização pode ser formulado como:

$$\min_{h_t^{nj}, l_t^{nj}, \{M_t^{nj,nk}\}} C_t^{nj} = r_t^{nj} \cdot h_t^{nj} + w_t^{nj} \cdot l_t^{nj} + \sum_{k=1}^J P_t^{nk} \cdot M_t^{nj,nk} \quad 7$$

Este problema está sujeito a uma função de produção com retornos constantes de escala. A produção q_t^{nj} depende de uma constante tecnológica z^{nj} , de uma produtividade total dos fatores A_t^{nj} , das estruturas h_t^{nj} , do trabalho l_t^{nj} , e dos insumos intermediários $M_t^{nj,nk}$. A alocação entre estruturas e trabalho é determinada pela participação das estruturas no valor adicionado, ξ^n , enquanto a elasticidade de produção em relação ao valor adicionado é γ^{nj} . A

participação dos insumos intermediários é representada por $\gamma^{nj,nk}$, tal que $\sum_{k=1}^J \gamma^{nj,nk} = 1 - \gamma^{nj}$, assegurando retornos constantes de escala.

$$q_t^{nj} = z^{nj} \left(A_t^{nj} (h_t^{nj})^{\xi^n} (l_t^{nj})^{1-\xi^n} \right)^{\gamma^{nj}} \prod_{k=1}^J (M_t^{nj,nk})^{\gamma^{nj,nk}} \quad 8$$

A solução desse problema de minimização leva à definição da função de custo unitário da firma. Supondo mercados perfeitamente competitivos, a firma define seu preço igual ao custo marginal. Portanto, o custo unitário $\frac{x_t^{nj}}{(z^{nj})(A_t^{nj})^{\gamma^{nj}}}$, que equivale ao custo médio e ao preço, é obtido dividindo-se o custo total pela quantidade produzida. Nesse contexto, a expressão do custo unitário é:

$$C_i^{nj} = q_t^{nj} \frac{x_t^{nj}}{(z^{nj})(A_t^{nj})^{\gamma^{nj}}} \quad 9$$

o termo x_t^{nj} representa o custo composto dos fatores de produção e é dado por:

$$x_t^{nj} = B^{nj} \left((r_t^{nj})^{\xi^n} (w_t^{nj})^{1-\xi^n} \right)^{\gamma^{nj}} \prod_{k=1}^J (P_t^{nk})^{\gamma^{nj,nk}} \quad 10$$

o coeficiente B^{nj} é uma constante que agrega os coeficientes de ponderação da função de produção e é definido como:

$$B^{nj} = \left(\frac{1}{\gamma^{nj} \xi^n} \right)^{\gamma^{nj} \xi^n} \left(\frac{1}{\gamma^{nj} (1 - \xi^n)} \right)^{\gamma^{nj} (1 - \xi^n)} \prod_{k=1}^J \left(\frac{1}{\gamma^{nj,nk}} \right)^{\gamma^{nj,nk}} \quad 11$$

Uma característica importante do modelo é que o preço unitário depende da tecnologia z^{ij} , a qual segue uma distribuição de Fréchet. Essa distribuição introduz uma componente aleatória nos preços das variedades. Sendo os mercados competitivos, o preço de uma variedade do bem j no mercado nj será igual ao menor preço oferecido entre todas as regiões i ,

considerando os custos de comércio $\kappa_t^{nj,ij}$, os custos compostos x_t^{ij} , a produtividade A_t^{ij} , e a tecnologia sorteada z^{ij} .

$$p_t^{nj}(z^j) = \min_i \left\{ \frac{\kappa_t^{nj,ij} x_t^{ij}}{z^{ij} \cdot (A_t^{ij})^{\gamma^{ij}}} \right\} \quad 12$$

$$z^j = (z^{1j}, z^{2j}, \dots, z^{Nj})$$

Nesse contexto, a fricção de comércio entre as regiões n e i é representada pelos chamados *Iceberg Costs*, denotados por $\kappa_t^{nj,ij}$. Esses custos refletem o fato de que apenas uma fração do bem enviado efetivamente chega ao destino, como se parte do produto “derretesse” no caminho. Assim, quanto maior o valor de $\kappa_t^{nj,ij}$, maior a perda no transporte e, portanto, maior o custo efetivo de comercializar entre as regiões.

No modelo de Caliendo, Dvorkin e Parro (2019), essa fricção de comércio $\kappa_t^{nj,ij}$ incorpora tanto barreiras tarifárias (observáveis em dados de tributação) quanto barreiras não tarifárias (de difícil mensuração). Ao aplicar a técnica de exact-hat algebra, barreiras constantes ao longo do tempo são eliminadas, permitindo que o modelo foque em barreiras tarifárias variáveis, que costumam ser mais fáceis de quantificar diretamente.

3.1.3 Bloco 3 – Participação no comércio bilateral (Modelo EK)

A terceira parte do modelo CDP baseia-se na estrutura proposta por Eaton e Kortum (2002), razão pela qual é conhecida como bloco EK. A ideia central desse bloco é modelar o comércio bilateral entre regiões a partir de fundamentos microeconômicos — mais precisamente, das diferenças de produtividade entre regiões e das vantagens comparativas de cada setor.

No modelo, considera-se que cada região i tem uma produtividade fundamental²⁰, A_t^{ij} , para produzir o bem j , e que essa produtividade é amplificada por uma variável aleatória z^{ij} que segue uma distribuição de Fréchet (veja a eq. 8). O custo unitário de entregar uma variedade produzida em ij para o mercado nj é então composto por três elementos principais:

²⁰ Pode ser entendida como a função de progresso tecnológico (FPT).

- (i) o custo de produção local, x_t^{ij} ; (ii) o custo de comércio (*iceberg*) entre as regiões, $\kappa_t^{nj,ij}$; e (iii) a produtividade efetiva, $z^{ij}(A_t^{ij})^{\gamma^{ij}}$ (veja a eq. 12).

A função de distribuição Fréchet permite derivar a distribuição dos preços das variedades em cada mercado nj como o valor mínimo entre os preços ofertados por todas as regiões i (eq. 12). Essa propriedade estatística é fundamental para obter a equação de participação no comércio bilateral (eq. 13). Com base nessas premissas, a equação que determina a participação de ij no mercado nj é:

$$\pi_t^{nj,ij} = \frac{(x_t^{ij} \kappa_t^{nj,ij})^{-\theta^j} (A_t^{ij})^{\theta^j \gamma^{ij}}}{\sum_{m=1}^N (x_t^{mj} \kappa_t^{nj,mj})^{-\theta^j} (A_t^{mj})^{\theta^j \gamma^{mj}}} \quad 13$$

A variável $\pi_t^{nj,ij}$ representa a participação da região i no fornecimento do bem j ao mercado n . Essa participação depende negativamente do custo total de entregar o bem — composto por $x_t^{ij} \kappa_t^{nj,ij}$ — e positivamente da produtividade fundamental A_t^{ij} , ajustada pelo parâmetro de elasticidade de substituição entre variedades θ^j , que governa a dispersão da distribuição Fréchet. O parâmetro θ^j capta, portanto, o grau de heterogeneidade das produtividades dentro de um setor j : quanto maior θ^j , mais intensamente os consumidores escolhem os produtores mais eficientes.

Essa condição de equilíbrio reflete que, quanto mais produtiva for a região ij , dado o custo dos fatores, menor será seu custo de produção e, portanto, maior será sua participação no fornecimento de bens j para a região n . Além disso, quanto menores forem os custos de comércio entre as regiões i e n (ou seja, quanto menor $\kappa_t^{nj,ij}$), maior será o volume de bens j que a região n adquire da região i . Essa relação direta entre produtividade, custos de comércio e fluxos de comércio bilateral dá à equação (13) uma estrutura análoga à de uma equação gravitacional.

Essa equação é o análogo microfundamentado da tradicional equação gravitacional usada em muitos modelos empíricos de comércio. Enquanto a equação gravitacional relaciona os fluxos de comércio ao tamanho das economias e à distância entre elas, o modelo EK fundamenta a participação no comércio em diferenças de produtividade e custos efetivos de entrega, proporcionando uma representação mais robusta dos mecanismos de vantagem comparativa.

Vale destacar que parte dos parâmetros dessa equação, como γ^{ij} (participação do valor adicionado), pode ser estimada a partir das tabelas insumo-produto. No entanto, a produtividade

fundamental A_t^{ij} e o componente não observável dos custos de comércio $\kappa_t^{nj,ij}$ (como barreiras não tarifárias) são de difícil estimação direta. Para contornar esse problema, aplica-se a metodologia conhecida como exact-hat algebra, que permite isolar variações marginais em variáveis econômicas sem precisar conhecer os níveis absolutos de A_t^{ij} e $\kappa_t^{nj,ij}$. Já o parâmetro θ^j pode ser estimado usando econometria²¹.

3.1.4 Bloco 4 – Índice de Preço (Modelo EK)

Os primeiros modelos de comércio internacional tratavam as variedades nacionais e importadas como perfeitamente substitutas. O problema dessa hipótese era que qualquer variação nos preços resultava em grande mudança no comércio bilateral — se o preço do bem j importado fosse ligeiramente mais baixo do que o preço do bem j produzido nacionalmente, o bem importado conquistaria todo o mercado. Esse fenômeno é conhecido como o problema *flip-flop*, que não tinha respaldo nos dados empíricos.

A primeira tentativa de solucionar o problema do *flip-flop* foi a especificação de Armington (1969), que considerava os bens entre as regiões como substitutos imperfeitos. Essa abordagem resolveu a questão do *flip-flop* e tornou os resultados mais aderentes aos dados empíricos. A suposição de Armington (1969) afirma que uma mesma variedade do bem agregado j produzida em duas regiões diferentes (nj e ij) é considerada substituta imperfeita para satisfazer a demanda do consumidor (final ou intermediário) da região n . Em outras palavras, na agregação do tipo Armington, as variedades de um bem agregado j de um mesmo país são consideradas iguais, mas se diferenciam das variedades de outros países. Por exemplo, todos os carros produzidos no Brasil são vistos como iguais (independentemente da marca, fábrica etc.), mas são considerados diferentes dos carros fabricados nos EUA ou em outro país.

Porém, como a hipótese de Armington considera todas as variedades de um mesmo mercado nj são idênticas entre si, ela ignora o benefício para o consumidor de ter acesso a um número maior de variedades de um bem — o chamado ganho de variedade. Ao deixar de modelar esse efeito, o modelo de Armington tende a gerar resultados pouco precisos ou ambíguos sobre o impacto da liberalização comercial. Por exemplo, a redução nas taxas de importação resulta em aumento das importações, o que, por sua vez, eleva a demanda por dólares e deprecia a moeda doméstica (BRL). Essa depreciação aumenta as exportações, mas a

²¹ Ver o novo método de estimar o parâmetro θ^j no trabalho de Caliendo e Parro (2015).

preço menor, de modo que o valor total das exportações pode ser inferior. Os efeitos positivos do aumento nas importações e exportações podem, dependendo da magnitude da desvalorização, ser menores do que as perdas associadas à desvalorização do bem exportado. No caso da agregação por Armington, esse efeito negativo predomina, gerando críticas, o que incentivou a busca por alternativas baseadas em concorrência monopolística, como a formulada por Dixit e Stiglitz (1977).

Dixit e Stiglitz (1977) também admitem que os bens são diferentes, mas essa diferenciação não depende da sua origem; o foco agora está na variedade, e não na origem. Isso deu origem a abordagens envolvendo a hipótese de *love-of-variety*: Krugman *et al.* (1980) e Melitz, (2003). A agregação proposta por Krugman *et al.* (1980) e Melitz, (2003), baseada na competição monopolística, permitiu resolver o problema associado ao modelo de Armington. Agora, redução unilateral das taxas de importação/exportação gera mais benefícios em termos de eficiência — como o acesso a mais mercados — do que prejuízos na forma de deterioração dos termos de troca.

Uma terceira forma de agregação para lidar com a questão da substituição imperfeita, mas sem necessariamente utilizar a hipótese de *love-of-variety*, foi proposta por Eaton e Kortum (2002). Nesse modelo, a dispersão dos bens j produzidos nas diferentes regiões N é explicada pela diferença tecnológica de cada região n na produção da variedade.

$$Q_t^{nj} = \left(\int \left(\tilde{q}_t^{nj}(z^j) \right)^{1-\frac{1}{\eta^{nj}}} d\phi^j(z^j) \right)^{\frac{\eta^{nj}}{\eta^{nj}-1}} \quad 14$$

Essa é uma perspectiva mais ricardiana, que afirma que a região com maior produtividade para o bem j — representada pela tecnologia z^j — terá participação maior na quantidade agregada Q_t^{nj} . Assim como as demais agregações (Armington, 1969; Melitz, 2003), essa agregação também utiliza a função CES (*Constant Elasticity of Substitution*) e é mais semelhante à função usada por Melitz. No entanto, emprega z^j para explicar a composição de Q_t^{nj} , ao invés de focar no grau de diferenciação entre os bens²².

Dada essa restrição na forma de equação CES, os agentes da região n irão escolher as quantidades dos bens j que minimizem o índice de preço. O resultado dessa minimização é o índice de preço P_t^{nj} que é consistente com a agregação (eq. 14) e pode ser expresso como:

²² Para mais detalhes, pode ser consultado o livro texto de Dixon e Jorgenson (2012, p. 1517).

$$P_t^{nj} = \Gamma^{nj} \left(\sum_{i=1}^N (x_t^{ij} \kappa_t^{nj,ij})^{-\theta^j} (A_t^{ij})^{\theta^{ij} \gamma^{ij}} \right)^{-1/\theta^j} \quad 15$$

onde: Γ^{ij} é a função estatística gamma²³.

Em suma, a trajetória teórica vai da substituição perfeita — cuja simplicidade gerava resultados irrealistas — à diferenciação por origem em Armington; passa pela concorrência monopolística, que enfatiza ganhos de variedade e seleção de firmas; e termina na abordagem ricardiana de Eaton-Kortum, na qual a heterogeneidade tecnológica explica o comércio. Cada forma de agregação — Armington, Krugman-Melitz ou Eaton-Kortum — resulta em um índice de preços distinto e, por consequência, leva a previsões diferentes sobre o impacto de mudanças nas barreiras comerciais²⁴.

3.1.5 Bloco 5 – Equilíbrio Walrasiano

O quinto bloco do modelo consiste nas condições de equilíbrio entre oferta e demanda nos três mercados: bens (finais e intermediários) (eq. 16), trabalho (eq. 17) e estruturas (eq. 18). Na prática, esse bloco captura a inter-relação entre os diferentes mercados da economia, refletindo como as variações em um mercado influenciam os demais, e assegurando que as quantidades demandadas e ofertadas se igualem em cada um desses setores.

A equação (16) representa o equilíbrio no mercado de bens, especificando que a despesa total da região n com o bem j , denotada por X_t^{nj} , é composta por duas fontes de demanda: a demanda intermediária e a demanda final das famílias e do rentista.

$$X_t^{nj} = \sum_{k=1}^J \gamma^{nk,nj} \sum_{i=1}^N \pi_t^{ik,nk} X_t^{ik} + \alpha^j \left(\sum_{k=1}^J w_t^{nk} L_t^{nk} + l^n \chi_t \right) \quad 16$$

A primeira parte do lado direito da equação corresponde à demanda intermediária por bens do tipo j em todos os setores k da região n . Cada mercado nk utiliza diferentes bens intermediários para sua produção, e a fração da receita de nk alocada ao bem j é determinada pelo parâmetro tecnológico $\gamma^{nk,nj}$. Essa demanda é multiplicada pela receita total de nk , a qual

²³ $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$.

²⁴ Para ver cada uma das equações, podem ser consultadas as notas de Eaton e Kortum (2002).

por sua vez resulta da soma da demanda por seus produtos em todos os mercados i , ponderada pela participação de mercado $\pi_t^{ik,nk}$. Ou seja, o termo $\sum_{i=1}^N \pi_t^{ik,nk} X_t^{ik}$ representa a receita total de nk , e a multiplicação por $\gamma^{nk,nj}$ fornece a parcela dessa receita gasta com insumos do mercado nj .

A segunda parte da equação (16) representa a demanda final por bens j na região n , sendo composta por dois grupos distintos: as famílias trabalhadoras e o rentista local. As famílias trabalhadoras consomem exclusivamente com base na renda do trabalho. Cada família destina uma fração fixa α^j de sua renda — dada pela soma dos salários $w_t^{nk} L_t^{nk}$ pagos em todos os setores k da região n — para o consumo de bens finais, incluindo o bem j . Já o rentista local, apesar de não migrar, envia sua renda para uma carteira global, χ_t , do qual recebem uma fração fixa ι^n . Assim como os trabalhadores, o rentista também consome apenas bens locais e destina uma fração α^j da sua renda com estruturas para a compra do bem j . Portanto, o segundo termo da equação reflete a soma dessas duas fontes de demanda final, garantindo que a produção do bem j na região n seja absorvida tanto pelo consumo das famílias quanto consumo do rentista local.

A equação (17) estabelece o equilíbrio no mercado de trabalho. A parcela da receita gasta com trabalho é determinada pelo parâmetro $\gamma^{nj}(1 - \xi^n)$. O termo $\sum_i \pi_t^{ij,nj} X_t^{ij}$ representa a demanda total pelos bens de nj oriunda de todos os mercados.

$$w_t^{nj} L_t^{nj} = \gamma^{nj}(1 - \xi^n) \sum_{i=1}^N \pi_t^{ij,nj} X_t^{ij} \quad 17$$

De maneira análoga à equação anterior, a equação (18) estabelece o equilíbrio no mercado de estruturas H^{nj} utilizadas no setor j da região n . A demanda por estruturas é determinada pela fração $\gamma^{nj}\xi^n$ do valor da produção.

$$r_t^{nj} H^{nj} = \gamma^{nj}\xi^n \sum_{i=1}^N \pi_t^{ij,nj} X_t^{ij} \quad 18$$

Nesta seção, é pertinente discutir a existência ou não desse equilíbrio, além de questionar se é único ou não. Os autores Antràs e Chor (2018) e Allen, Arkolakis e Takahashi, (2020) demonstraram que o equilíbrio existe em modelos de CGE com economia aberta; no entanto, essa conclusão não se aplica a modelos que incorporam fricções comerciais, como

tarifas. Segundo Han e Moon (2021), não há, de maneira geral, evidência da existência de equilíbrio em modelos de CGE de economia aberta que consideram tarifas. Em vista disso, muitos estudos, incluindo o modelo CDP, assumem a existência do equilíbrio e utilizam métodos computacionais para a sua análise.

No modelo CDP, a existência de equilíbrio está implícita na formulação do CGE computável sequencial e na metodologia proposta para a resolução do modelo.

Até aqui, o modelo foi apresentado em termos de suas estruturas econômicas fundamentais e das condições de equilíbrio em níveis. A partir do próximo bloco, altera-se o foco metodológico para a forma de solução do modelo: o que muda daqui em diante não é a estrutura econômica, mas a forma de escrever e resolver o sistema de equações. Para isso, serão utilizadas as estratégias *dot* e *hat*.

As estratégias *dot* e *hat* existem de forma independente na literatura. A notação *dot* é utilizada para descrever variações intertemporais de variáveis econômicas, enquanto a notação *hat* caracteriza variações contrafactuais entre dois equilíbrios distintos. A principal contribuição metodológica de Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) consiste em demonstrar que ambas podem ser combinadas em um único procedimento de solução — denominado *dynamic exact-hat algebra* — no qual as equações do modelo dinâmico são expressas diretamente nesse formato. Essa abordagem permite analisar simultaneamente a dinâmica competitiva da economia e os efeitos de choques de política, sem a necessidade de estimar os níveis dos fundamentos econômicos ou resolver explicitamente estados estacionários.

Nos blocos a seguir, essas estratégias são apresentadas de forma gradual: inicialmente na sua versão estática (*static exact-hat algebra*) e, em seguida, na sua extensão dinâmica, que integra as notações *dot* e *hat*.

3.1.6 Bloco 6 – *Static Exact-hat Algebra* (Modelo DEK)

Para elucidar o conceito de *exact-hat algebra*, considere-se um modelo composto por uma única equação simples:

$$z = ax^by^c \quad 19$$

Uma das formas de resolver esse modelo, sem a necessidade de conhecer alguns dos seus parâmetros, é por meio da solução contrafactual. Suponha uma segunda equação, na qual será aplicado um choque nas variáveis (x' e y'):

$$z' = a(x')^b(y')^c \quad 20$$

Dividindo a segunda equação pela primeira, o resultado é:

$$\hat{z} = (\hat{x})^b(\hat{y})^c, \text{ onde } \hat{y} = \frac{y'}{y} \quad 21$$

É possível notar que não é mais necessário conhecer o parâmetro a para resolver o modelo. Essa estratégia de solução foi apresentada inicialmente por Eaton e Kortum (2002) e é especialmente útil para encontrar a solução de modelos em que ocorrem choques de políticas como no modelo desenvolvido nesta tese, que aborda a criação do MC.

3.1.7 Bloco 7 – *Dynamic Exact-hat Algebra* (Modelo CDP)

Na seção anterior, foi apresentada a estratégia de solução contrafactual. A alternativa é a solução por diferença. Considere a mesma equação fictícia, mas agora com variáveis dinâmicas:

$$z_t = ax_t^b y_t^c \quad 22$$

Ao dividir essa equação em $t + 1$ pela equação em t , chega-se a uma versão mais simplificada do modelo, na qual novamente não é necessário estimar o parâmetro a :

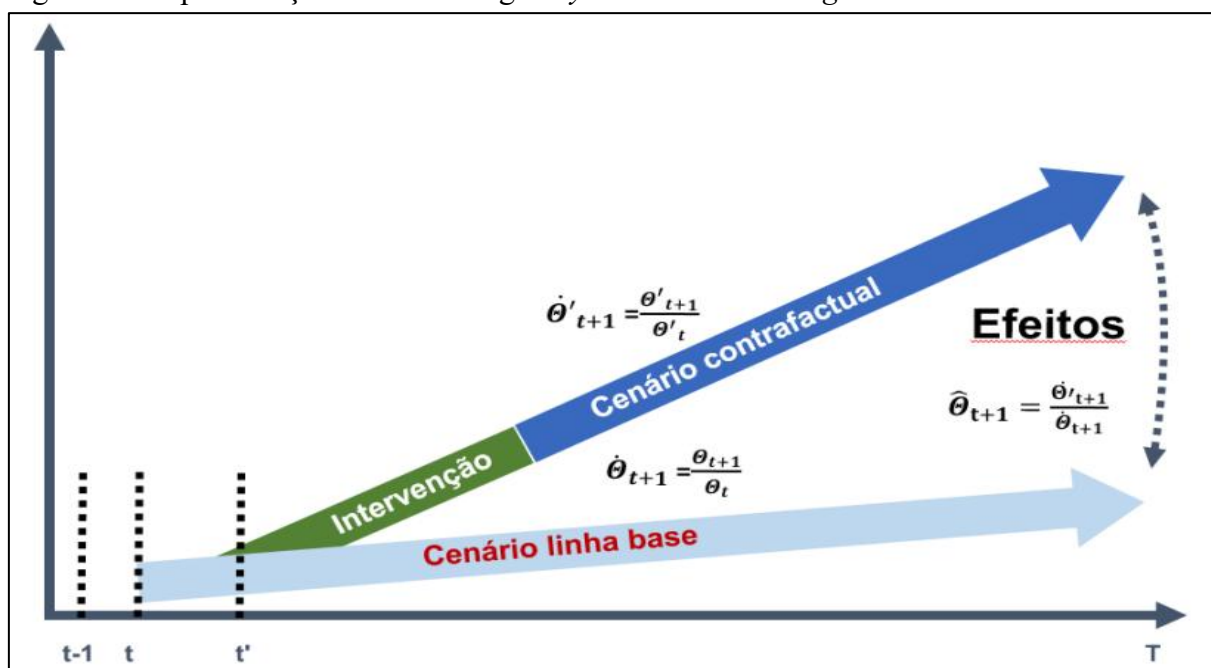
$$\dot{z}_t = \dot{x}_t^b \dot{y}_t^c, \text{ onde } \dot{z}_t = \frac{z_t}{z_{t-1}} \quad 23$$

Os autores do modelo CDP propuseram combinar essas duas estratégias de simplificação — dinâmica e contrafactual — e chamaram-na de *dynamic exact-hat algebra*. Suponha-se que a equação anterior represente o comportamento básico da economia e que exista uma segunda equação que represente algum choque na economia (contrafactual), nesse caso, chega-se à equação final, que é a simplificação contrafactual aplicada sobre variáveis em diferença:

$$\hat{z}_t = (\hat{x}_t)^b(\hat{y}_t)^c, \text{ onde } \hat{z}_t = \frac{\dot{z}_t'}{\dot{z}_t} \quad 24$$

A Figura 4 resume a lógica apresentada anteriormente sobre a *dynamic exact-hat algebra*, destacando a diferença entre o cenário base (sem intervenção) e o cenário contrafactual (com intervenção). A partir do instante da intervenção (t'), a trajetória da variável de interesse se altera, permitindo comparar o crescimento esperado em cada cenário e identificar os efeitos da política. Esse esquema ilustra de forma clara como a metodologia captura o impacto de choques sobre a dinâmica do modelo.

Figura 4 – Representação da metodologia: *dynamic exact-hat algebra*



Fonte: Oliveira (2020).

Essa explicação simples fornece toda a intuição necessária para compreender o modelo CDP. O que Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) se referem como solução por diferença é, na verdade, a solução de um sistema de equações que foi simplificado utilizando a estratégia *dot*. Por outro lado, a solução *hat* ocorre quando o sistema de equações é simplificado por meio da estratégia *hat*. A solução *dynamic hat* resulta da simplificação do sistema de equações, primeiramente utilizando a estratégia *dot* (em diferença) e, em seguida, aplicando a estratégia *hat* (contrafactual).

A seguir, apresenta-se simplificação *dot*²⁵ para as equações do modelo CDP:

²⁵ A simplificação *dot* + *hat* pode ser encontrada no artigo original de (Caliendo; Dvorkin; Parro, 2019).

$$\mu_{t+1}^{nj,ik} = \frac{\mu_t^{nj,ik} (\dot{u}_{t+2}^{ik})^{\beta/v}}{\sum_{m=1}^N \sum_{h=0}^J \mu_t^{nj,mh} (\dot{u}_{t+2}^{mh})^{\beta/v}} \quad 25$$

$$\dot{u}_{t+1}^{nj} = \dot{\omega}^{nj}(\dot{L}_{t+1}, \dot{\Theta}_{t+1}) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^J \mu_t^{nj,ik} (\dot{u}_{t+2}^{ik})^{\beta/v} \right)^v \quad 26$$

$$L_{t+1}^{nj} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^J \mu_t^{ik,nj} L_t^{ik} \quad 27$$

$$\dot{x}_{t+1}^{nj} = (\dot{L}_{t+1}^{nj})^{\gamma^{nj} \xi^n} = (\dot{w}_{t+1}^{nj})^{\gamma^{nj}} \prod_{k=1}^J (\dot{p}_{t+1}^{nk})^{nj,nk} \quad 28$$

$$\dot{p}_{t+1}^{nj} = \sum_{i=1}^N \left(\pi_t^{nj,ij} (\dot{x}_{t+1}^{ij} \dot{k}_{t+1}^{nj,ij})^{-\theta^j} (\dot{A}_{t+1}^{ij})^{\theta^j \gamma^{ij}} \right)^{-1/\theta^j} \quad 29$$

$$\pi_{t+1}^{nj,ij} = \pi_t^{nj,ij} \left(\frac{\dot{x}_{t+1}^{ij} \dot{k}_{t+1}^{nj,ij}}{\dot{p}_{t+1}^{nj}} \right)^{-\theta^j} (\dot{A}_{t+1}^{ij})^{\theta^j \gamma^{ij}} \quad 30$$

$$X_{t+1}^{nj} = \sum_{k=1}^J \gamma^{nk,nj} \sum_{i=1}^N \pi_{t+1}^{ik,nk} X_{t+1}^{ik} + \alpha^j \left(\sum_{k=1}^J \dot{w}_{t+1}^{nk} \dot{L}_{t+1}^{nk} w_t^{nk} L_t^{nk} + \iota^n \chi_{t+1} \right) \quad 31$$

onde:

$$\chi_{t+1} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^J \frac{\xi^i}{1 - \xi^i} \dot{w}_{t+1}^{ik} \dot{L}_{t+1}^{ik} w_t^{ik} L_t^{ik} \quad 32$$

3.2 ADAPTAÇÃO DO MODELO CDP PARA O RISCO CLIMÁTICO

As subseções a seguir apresentam a proposta de adaptação do modelo original de Caliendo, Dvorkin e Parro (2019), fundamentada no livro de Copeland e Taylor (2013). Nessa abordagem, as emissões, ε_t^{nj} , são tratadas como fator de produção, enquanto o preço das emissões, e_t^{nj} , é interpretado como parâmetro central para a formação do mercado. Ao considerar ε_t^{nj} como variável exógena, constrói-se um modelo de MC, no qual as empresas podem negociar licenças até que se alcance o preço de equilíbrio. Essa estrutura reflete as dinâmicas observadas em sistemas de *Cap-and-trade*, permitindo análise empírica consistente sobre os impactos setoriais e regionais da política climática. O que está marcado em vermelho nas equações representa a diferença entre o modelo original e o modelo adaptado.

3.2.1 Modelo Copeland e Taylor

Para realizar essa modificação, adotou-se como referência o modelo proposto por Copeland e Taylor (2013). Esse arcabouço baseia-se em dois elementos centrais: (i) uma função de produção homogênea de grau um, na qual parte dos fatores de produção é alocada para a mitigação das emissões; e (ii) uma função não linear da quantidade produzida que representa o nível de emissões. A combinação dessas duas funções resulta em uma função de produção na qual as emissões desempenham o papel de um fator produtivo. Nesse contexto, as emissões são modeladas como um fator de produção, e não como um bem indesejado.

O modelo de Copeland e Taylor (2013) possui duas equações principais: a função de produção e a função de emissão. A função de produção na região n e setor j é homogênea de grau um e utiliza diferentes fatores de produção $(F^{nj}(\cdot))$. Pode-se dizer que se esses fatores forem reduzidos em $(1 - \varphi)$ unidades, a produção também será reduzida nessa mesma proporção. O autor utiliza essa característica da função para definir $(1 - \varphi)$ como a parte dos fatores que não será aplicada no abatimento de emissões (consequentemente, φ é a proporção dos fatores utilizados no abatimento). Portanto, a quantidade produzida, q^{nj} , é definida como:

$$q^{nj} = (1 - \varphi^{nj}) \cdot F^{nj}(\cdot), \quad \varphi \in [0,1] \quad 33$$

A quantidade de emissões geradas na região n e setor j depende de dois fatores: a tecnologia de produção e a proporção de fatores alocados para o abatimento (φ). Caso $\varphi = 0$, a emissão será máxima, dado determinado nível tecnológico; caso $\varphi = 1$, será mínima. Uma forma de expressar essas relações é através da seguinte função:

$$\varepsilon^{nj} = (1 - \varphi^{nj})^{\frac{1}{g^{nj}}} F(\cdot), \quad g^{nj} \in (0,1) \quad 34$$

Note que a função de emissão, assim como a função de produção, é definida em nível de variedade e, portanto, depende da produtividade específica, z^{nj} , de cada variedade. Sendo assim, a quantidade de emissões, $\varepsilon^{nj}(z^{nj})$, é uma variável aleatória, uma vez que $z^{nj} \sim \text{Fr}(\theta^j)$. Para obter a quantidade total de emissões no setor j da região n , é necessário integrar essa função em relação à distribuição de z^{nj} , tal como é feito para os demais fatores produtivos. Ou seja, vale a mesma lógica de agregação:

$$E^{nj} = \int \varepsilon^{nj}(z^{nj}) \phi_j(z^{nj}) dz^{nj} \quad 35$$

Essa expressão define E^{nj} como a quantidade total de emissões no setor-região, análoga ao total de trabalho L^{nj} ou estruturas H^{nj} . Isso reforça o papel de ε^{nj} como um insumo produtivo sujeito às mesmas regras de agregação que os demais fatores.

Por fim, substituindo a equação 34 na equação 33 e resolvendo para a quantidade produzida, obtém-se:

$$q^{nj} = (\varepsilon^{nj})^{g^{nj}} (F(\cdot))^{1-g^{nj}} \quad 36$$

Nessa forma, o parâmetro g^{nj} passa a ter uma interpretação clara como elasticidade da produção em relação às emissões: ele mede o quanto a produção responde a variações na quantidade de emissões geradas.

3.2.2 Modelo Caliendo, Dvorking e Parro Adaptado (MCC)

Para integrar as emissões de gases de efeito estufa ao modelo CDP, este trabalho propõe uma modificação estrutural do modelo, o que constitui a principal contribuição desta tese e, por

isso optou-se por chamar o novo modelo de Modelo de Comércio de Carbono (MCC). Essa modificação baseia-se em duas modificações principais: (i) a inclusão de uma função de produção que incorpora explicitamente o fator emissão (eq. 37) e (ii) a introdução, na restrição de custo das firmas, do pagamento por unidade de emissão produzida (eq. 38).

Essas alterações permitem que o modelo reflita a dinâmica de um mercado de carbono, onde as firmas enfrentam custos adicionais associados à emissão de poluentes. Ao substituir essas novas equações no sistema original, obtém-se o conjunto de equações 37 e 38, que representam, respectivamente, a nova função de produção e a restrição de custo adaptadas ao contexto ambiental. Assim, a estrutura do modelo passa a capturar explicitamente o trade-off entre produção e emissão, conforme proposto por Copeland e Taylor (2013), ao mesmo tempo que mantém a base teórica do modelo CDP de Caliendo, Dvorkin e Parro (2019).

$$q_t^{nj} = (\varepsilon^{nj})^{g^{nj}} z^{nj} \left(\left(A_t^{nj} (h_t^{nj})^{\xi^n} (l_t^{nj})^{1-\xi^n} \right)^{\gamma^{nj}} \prod_{k=1}^J (M_t^{nj,nk})^{\gamma^{nj,nk}} \right)^{1-g^{nj}} \quad 37$$

$$C_t^{nj} = (e_t^{nj} \varepsilon_t^{nj}) + r_t^{nj} \cdot h_t^{nj} + w_t^{nj} \cdot l_t^{nj} + \sum_{k=1}^J P_t^{nk} \cdot M_t^{nj,nk} \quad 38$$

Feitas essas modificações, o sistema de equações será acrescido de mais uma equação — aquela que representa o equilíbrio do mercado de emissões. Segundo Copeland e Taylor (2013), essa equação pode ser interpretada da seguinte forma: ao fixar a quantidade total de emissões, o governo estabelece um teto, cabendo às firmas determinarem o valor dessas unidades por meio da negociação, resultando em um sistema de licenças negociáveis — um MC. Nesse contexto, o preço das emissões é formado endogenamente, refletindo as condições de oferta e demanda do setor produtivo.

$$r_t^{nj} \cdot h_t^{nj} = \gamma^{nj} \cdot (1 - g^{nj}) \cdot \xi^n \cdot C_t^{nj} \quad 39$$

$$w_t^{nj} \cdot l_t^{nj} = \gamma^{nj} \cdot (1 - g^{nj}) \cdot (1 - \xi^n) \cdot C_t^{nj} \quad 40$$

$$P_t^{nk} \cdot M_t^{nj,nk} = \gamma^{nj,nk} \cdot (1 - g^{nj}) \cdot C_t^{nj}, \quad k = 1, \dots, J \quad 41$$

$$e_t^{nj} \cdot \varepsilon_t^{nj} = g^{nj} C_t^{nj} \quad 42$$

As equações (39) a (42) representam as condições de primeira ordem do problema de maximização das firmas. Economicamente, essas condições igualam o custo marginal de cada fator produtivo ao seu respectivo produto marginal. A principal diferença em relação ao modelo CDP original é a introdução das emissões como fator de produção, cujo preço passa a ser determinado endogenamente pelo mercado de carbono. Como consequência, o custo marginal de produção incorpora explicitamente o custo das emissões, alterando os preços relativos dos insumos e os incentivos à realocação setorial.

Em termos matemáticos, com as alterações realizadas no modelo, houve incremento no número de equações em uma unidade e no número de variáveis em duas unidades (emissões e preço do crédito de carbono). Para resolver o modelo, torna-se necessário definir qual dessas variáveis será considerada exógena. A escolha dessa variável determinará se o modelo resultante se enquadra em um esquema de MC.

Vale destacar que é possível endogeneizar ambas as variáveis utilizando a função de utilidade das famílias; o que implica admitir que as emissões afetam negativamente a utilidade das famílias e que o governo escolherá a quantidade de emissões que maximiza a renda per capita das pessoas, dada essa restrição na utilidade. Copeland e Taylor (2013) demonstram como realizar essa abordagem. A importância dessa modificação é que permite abordar problemas como o paraíso poluidor.

Cabe lembrar que, na presente adaptação, optou-se por considerar a quantidade total de emissões para o Brasil como uma variável exógena — decidiu-se recriar o MC em função do direcionamento político mais recente do País. Também é importante destacar que, como as emissões não afetam diretamente a utilidade dos agentes, a mudança no bem-estar será medida em termos de redução no consumo.

Depois de resolver o modelo CDP com a nova função de produção e restrição, chega-se ao seguinte sistema de equações, já na forma *dot*:

$$\dot{e}_{t+1}^{nj} \cdot \dot{E}_{t+1}^{nj} = \dot{w}_{t+1}^{nj} \cdot \dot{L}_{t+1}^{nj} \quad 43$$

$$\dot{x}_{t+1}^{nj} = (\dot{e}_{t+1}^{nj})^{g^{nj}} \left(\left((\dot{L}_{t+1}^{nj})^{\xi^n} (\dot{w}_{t+1}^{nj}) \right)^{\gamma^{nj}(1-g^{ij})} \prod_{k=1}^J (\dot{p}_{t+1}^{nk})^{\gamma^{nj,nk}(1-g^{ij})} \right)^{(1-g^{nj})} \quad 44$$

$$\dot{P}_{t+1}^{nj} = \left(\sum_{i=1}^N \pi_t^{nj,ij} (\dot{x}_{t+1}^{ij} \kappa_{t+1}^{nj,ij})^{\frac{-\theta^j}{s^j}} (\dot{A}_{t+1}^{ij})^{\frac{\theta^j \gamma^{ij} (1-g^{ij})}{s^j}} \right)^{\frac{s^j}{\theta^j}} \quad 45$$

$$\pi_{t+1}^{nj,ij} \pi_t^{nj,ij} \left(\frac{\dot{x}_{t+1}^{ij} \dot{k}_{t+1}^{nj,ij}}{\dot{P}_{t+1}^{nj}} \right)^{\frac{-\theta^j}{s^j}} = (\dot{A}_{t+1}^{ij})^{\frac{\theta^j}{s^j}} \gamma^{ij} (1-g^{nj}) \quad 46$$

$$X_{t+1}^{nj} = \sum_{k=1}^J \gamma^{nk,nj} (1-g^{nk}) \sum_{i=1}^N \pi_{t+1}^{ik,nk} X_{t+1}^{ik} + \alpha^j \left(\sum_{k=1}^J \dot{w}_{t+1}^{nk} \dot{l}_{t+1}^{nk} w_t^{nk} L_t^{nk} + l^n \chi_{t+1} \right) \quad 47$$

Em que $\chi_{t+1} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^J \frac{\xi^i}{1-\xi^i} \dot{w}_{t+1}^{ik} \dot{l}_{t+1}^{ik} w_t^{ik} L_t^{ik}$

$$\dot{w}_{t+1}^{nj} \dot{l}_{t+1}^{nj} w_t^{nj} L_t^{nj} = \gamma^{nj} (1-\xi^n) (1-g^{nj}) \sum_{i=1}^N \pi_{t+1}^{ij,nj} X_{t+1}^{ij} \quad 48$$

Conforme mencionado anteriormente, a adaptação do modelo CDP para incluir emissões acrescenta duas variáveis: e^{nj} e E^{nj} . Por outro lado, essa adaptação resultou apenas em uma equação adicional — a equação de equilíbrio do mercado de emissões (eq. 43) —; o que, necessariamente, não é um problema, pois se trata uma dessas variáveis como exógena, dependendo do tipo de política que se deseja realizar.

Portanto, no modelo adaptado, as emissões de GEE são geradas endogenamente pelo processo produtivo das firmas. Diferentemente de abordagens em que as emissões são tratadas como coeficientes técnicos fixos, neste trabalho elas são incorporadas como um fator de produção que compõe o valor adicionado, à maneira de Copeland e Taylor (2013). Assim, para produzir, as firmas demandam emissões juntamente com trabalho, estruturas e insumos intermediários. A quantidade emitida resulta de uma decisão ótima de custo, condicionada à tecnologia setorial, à elasticidade de emissão e ao preço das permissões de carbono. Dessa forma, o nível agregado de emissões emerge do equilíbrio geral da economia, respondendo endogenamente a políticas climáticas, preços relativos, realocações setoriais e dinâmica econômica.

3.2.3 Determinação do preço das Licenças de Poluição

Seguindo Copeland e Taylor (2013), a oferta de poluição é tratada como uma variável de política exógena definida pelo governo — de forma semelhante a uma dotação de fatores, mas explicitamente determinada por objetivos ambientais. Na estrutura proposta por esses autores, o governo estabelece um teto fixo para as emissões, de modo que o setor privado vê as permissões como um recurso escasso.

Na prática, cria uma curva de oferta de poluição: o número total de permissões é determinado pela disposição governamental em tolerar danos ambientais, enquanto o preço dessas permissões surge endogenamente a partir da demanda das empresas em suas atividades produtivas.

O modelo da tese (modelo MCC) segue a mesma estratégia: a demanda por permissões de emissão decorre das atividades produtivas das empresas, enquanto a oferta provém do governo, que fixa a quantidade total de emissões permitidas a cada período. Por consequência, as empresas devem comprar essas permissões diretamente do governo — ou de quem inicialmente as detenha, podendo ser um setor ambiental — e não negociam permissões entre si. Essa abordagem simplifica o sistema ao concentrar-se na alocação ou venda "primária" de permissões pelo governo.

Optou-se por conceder o direito de propriedade das licenças aos rentistas, uma vez que já detêm o estoque fixo de estruturas. Portanto, pode-se recriar o estoque fixo de emissões por analogia — assim como a renda das estruturas é direcionada aos rentistas, a renda proveniente das licenças de emissões também é direcionada a eles.

Vantagem prática desse desenho é a facilidade de controle dinâmico da política — pode-se supor que o governo comece com número mais elevado de permissões e, ao longo do tempo, reduza gradualmente o teto, atenuando o choque de transição. Caso as empresas pudessem reter e negociar permissões indefinidamente em mercados secundários, a estrutura se tornaria mais complexa, dificultando o monitoramento e a execução eficaz das políticas ambientais.

Cabe esclarecer que, embora a política analisada seja interpretada como um sistema de mercado de carbono do tipo *cap-and-trade*, o modelo não representa explicitamente um mercado secundário de licenças de emissão, com negociação direta entre firmas, estoques de permissões ou mecanismos intertemporais de *banking* e *borrowing*. Em vez disso, o mercado de carbono é modelado de forma implícita, por meio da interação entre um limite de emissões e a demanda das firmas por emissões como fator de produção. O preço das emissões emerge endogenamente como um preço-sombra que equilibra essa oferta fixa com a demanda derivada

das decisões produtivas, desempenhando o papel econômico central do sistema de comércio de emissões. Essa representação reduzida permite capturar os principais incentivos econômicos do mercado de carbono sem a necessidade de modelar explicitamente a estrutura institucional e financeira da negociação de licenças.

3.3 ESCOLHA DE CENÁRIOS

Segundo a terceira atualização do NDC brasileiro, já apresentada na introdução da tese, a meta é reduzir 50% das emissões até o ano de 2030 em relação ao ano-base de 2005, considerando a unidade CO_2 e (GWP-100, AR5). Isso significa que, em 2030, as emissões do Brasil devem chegar a 1,28 Gt. No entanto, o governo não apresentou metas específicas para cada setor. Por isso, se propõe três cenários:

- **Cenário I** – redução proporcional. Os setores reduzem as emissões de forma proporcional e as emissões totais caem 50%. Nesse caso, o desmatamento cai 50% e as emissões dos demais setores (aqueles que são endógenos no modelo) também caem 50%. Esse cenário penaliza os outros setores em comparação ao desmatamento, uma vez que representou 61% das emissões em 2005 e não é uma atividade produtiva como as demais;
- **Cenário II** – redução desproporcional com ênfase no desmatamento (70%). Os setores não reduzem as emissões proporcionalmente, mas as emissões totais ainda caem 50%. As emissões por desmatamento caem 80%, enquanto as emissões dos demais setores caem 18%. Nesse cenário, setores produtivos não são tão penalizados, enquanto o desmatamento — por ser, em grande parte, ilegal — contribui mais para a diminuição das emissões;
- **Cenário III** – redução desproporcional com ênfase extrema no desmatamento (81.5%). Novamente, os setores não reduzem as emissões proporcionalmente, mas o total geral cai 50%. Agora, as emissões por desmatamento caem 81.5%, e as emissões dos outros setores não são reduzidas.

Embora o desmatamento ilegal seja relevante — dado que, segundo dados do MapBiomas (2023), mais de 93% do desmatamento no Brasil apresenta ao menos um indício de ilegalidade —, o desmatamento é incorporado ao modelo exclusivamente como uma fonte agregada de emissões de gases de efeito estufa, sem distinção entre desmatamento legal e ilegal.

Todos esses cenários serão comparados a um **cenário-base** — aquele sem MC ou qualquer meta de redução de emissões. A Tabela 2 resume os três cenários propostos.

Tabela 2 – Cenários de redução de emissões

Cenários	Setor	Emissões no ano base (2005)(Gt)	Redução (%)	Emissões no ano da meta (2030)(Gt)
Cenário I	Outros setores	0,99	50	0,49
	LULUCF	1,57	50	0,79
	Total	2,56	50	1,28
Cenário II	Outros setores	0,99	18	0,81
	LULUCF	1,57	70	0,47
	Total	2,56	50	1,28
Cenário III	Outros setores	0,99	0,0	0,99
	LULUCF	1,57	81.5	0,29
	Total	2,56	50	1,28

Fonte: elaboração própria (2025).

Nota: LULUCF é a sigla em inglês para "uso da terra, mudança no uso da terra e florestas" (*land use, land use change and forestry*).

O problema para recriar esses cenários é a ausência de dados de emissão para 2005. De acordo com o GTAP, os últimos dados disponíveis são de 2004, 2007, 2011, 2014 e 2019, considerando que a base é atualizada a cada três anos.

A alternativa seria utilizar dados do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI/Sirene) ou do Observatório do Clima (OC/SEEG) para substituir os dados do GTAP. A vantagem dessa estratégia é que se poderia trabalhar com séries históricas mais longas (OC/SEEG, de 1970 a 2023, e MCTI/Sirene, de 1990 a 2022). No entanto, há duas grandes desvantagens:

- I seria necessário desagregar os dados em 68 setores;
- II as emissões do Brasil não seriam mais consistentes com as dos outros países, inviabilizando comparações internacionais devido às diferentes metodologias de estimativa.

Diante desse impasse, optou-se por manter a base de emissões do GTAP11. Esse mercado passaria a vigorar no ano de 2026.

O limite temporal adotado no modelo (2017 a 2030 com choque apenas a partir de 2026) é fundamental para explicitar uma de suas principais hipóteses: a ausência de progresso tecnológico endógeno no processo de abatimento de emissões. Ao restringir a análise a um horizonte finito, assume-se que as tecnologias de produção e de mitigação permanecem essencialmente constantes ao longo do período considerado, de modo que as reduções de emissões decorrem exclusivamente de realocações produtivas, ajustes de preços relativos e mudanças na composição setorial. Essa escolha metodológica evita atribuir às firmas ganhos de eficiência no abatimento que não são explicitamente modelados, permitindo isolar os efeitos econômicos do mercado de carbono sob tecnologias dadas. Assim, os resultados devem ser interpretados como impactos de curto e médio prazo, nos quais a adaptação ocorre principalmente via ajustes econômicos, e não por inovações tecnológicas.

3.4 ETAPAS DA SOLUÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

- 1) Começa-se escolhendo um vetor inicial de variações da utilidade, $\{\dot{u}_t^{nj(0)}\}_{t=1}^{\infty}$, tipicamente unitário. O sobrescrito (0) indica o ‘chute’ inicial (ad hoc).
- 2) Usa-se esse “chute” $\{\dot{u}_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty}$ e a matriz de migração inicial na equação de mobilidade (eq.25) para obter o novo vetor de fluxos migratórios $\{\mu_t^{nj,ik}\}_{t=1}^{\infty}$.
- 3) O vetor de migração recém-estimado, combinado com o estoque inicial de trabalhadores, fornece o vetor de mão-de-obra por mercado $\{L_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty}$. (eq 6).
- 4) Dadas as trajetórias de variação do trabalho, $\{L_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty}$, e dos fundamentos $\{\dot{\theta}_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty} = \{\dot{A}_t^{nj}, \dot{k}_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty}$, aplica-se o bloco de condições de equilíbrio (equações 43-47) para resolver, por ponto fixo com amortecimento, o vetor de variações salariais $\{\dot{w}_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty}$.
- 5) Com $\{\dot{w}_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty}$, estima-se a variação real do salário $\{\dot{\omega}_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty} = \{\dot{w}_t^{nj} / \dot{P}_t^{nj}\}_{t=1}^{\infty}$ e calcula um novo vetor de utilidades, $\dot{u}^{(1)} = \{\dot{u}_t^{nj(1)}\}_{t=1}^{\infty}$, pela equação 26, que agrega salário, emprego e preferências. O sobrescrito (1) indica uma atualização da variável.
- 6) Verifica-se a norma máxima $\|\dot{u}^{(1)} - \dot{u}^{(0)}\|_{\infty}$. Se for pequena o suficiente, aceita-se a solução; caso contrário, retorna-se ao passo 2 e atualiza $\dot{u}$.

O esquema a seguir auxilia na compreensão desse algoritmo.

$$\begin{aligned}
& \mu_{t+1}^{nj,ik} = \frac{\mu_t^{nj,ik} (\dot{u}_{t+2}^{ik})^{\beta/v}}{\sum_{m=1}^N \sum_{h=0}^J \mu_t^{nj,mh} (\dot{u}_{t+2}^{mh})^{\beta/v}} \\
& L_{t+1}^{nj} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^J \mu_t^{ik,nj} L_t^{ik} \\
& \dot{e}_{t+1}^{nj} \cdot \dot{E}_{t+1}^{nj} = \dot{w}_{t+1}^{nj} \cdot \dot{L}_{t+1}^{nj} \\
& \dot{x}_{t+1}^{nj} = (\dot{e}_{t+1}^{nj})^{g^{nj}} \left(\left((\dot{L}_{t+1}^{nj})^{\xi^n} (\dot{w}_{t+1}^{nj}) \right)^{\gamma^{nj}(1-g^{ij})} \prod_{k=1}^J (\dot{p}_{t+1}^{nk})^{\gamma^{nj,nk}(1-g^{ij})} \right) \\
& \dot{p}_{t+1}^{nj} = \left(\sum_{i=1}^N \pi_t^{nj,ij} (\dot{x}_{t+1}^{ij} \kappa_{t+1}^{nj,ij})^{-\frac{\theta^j}{s^j}} (\dot{A}_{t+1}^{ij})^{\frac{\theta^j \gamma^{ij}(1-g^{ij})}{s^j}} \right)^{-\frac{s^j}{\theta^j}} \\
& \pi_{t+1}^{nj,ij} = \pi_t^{nj,ij} \left(\frac{\dot{x}_{t+1}^{ij} \dot{k}_{t+1}^{nj,ij}}{\dot{p}_{t+1}^{nj}} \right)^{-\frac{\theta^j}{s^j}} (\dot{A}_{t+1}^{ij})^{\frac{\theta^j}{s^j} \gamma^{ij}(1-g^{nj})} \\
& X_{t+1}^{nj} = \sum_{k=1}^J \gamma^{nk,nj} (1-g^{nk}) \sum_{i=1}^N \pi_{t+1}^{ik,nk} X_{t+1}^{ik} + \alpha^j \left(\sum_{k=1}^J \dot{w}_{t+1}^{nk} \dot{L}_{t+1}^{nk} w_t^{nk} L_t^{nk} + \iota^n \chi_{t+1} \right) \\
& \dot{w}_{t+1}^{nj} \dot{L}_{t+1}^{nj} w_t^{nj} L_t^{nj} = \gamma^{nj}(1-\xi^n) (1-g^{nj}) \sum_{i=1}^N \pi_{t+1}^{ij,nj} X_{t+1}^{ij} \\
& \dot{u}_{t+1}^{nj} = \dot{\omega}^{nj} (\dot{L}_{t+1}, \dot{\Theta}_{t+1}) \left(\sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^J \mu_t^{nj,ik} (\dot{u}_{t+2}^{ik})^{\beta/v} \right)^v
\end{aligned}
\tag{A} \left\{ \begin{array}{l} (B) \end{array} \right.$$

- (A) : Problema dinâmico (equilíbrio sequencial): dado $\{\dot{L}_t, \dot{\Theta}_t\}_{t=1}^{\infty}$, a solução do problema são as trajetórias $\{\dot{L}_t, \dot{\mu}_t, \dot{u}_t, \dot{\omega}^{nj}(\dot{L}_t, \dot{\Theta}_t)\}_{t=1}^{\infty}$ que resolvem as quatro equações. Método do ponto fixo com amortecimento.
- (B) : Problema estático (equilíbrio sucessivo): dado $(\dot{L}_t, \dot{\Theta}_t)$ a solução é a variação do salário de equilíbrio $\dot{w}(\dot{L}_t, \dot{\Theta}_t)$ que resolve as 5 equações. Método do ponto fixo com amortecimento.

O código utilizado para a implementação e solução do modelo foi inteiramente desenvolvido em Python, linguagem amplamente empregada em aplicações científicas e econômicas. Com o objetivo de garantir transparência e reprodutibilidade dos resultados, o código encontra-se publicamente disponível no repositório: <https://github.com/fms-1988>.

3.5 DADOS E PARAMETRIZAÇÃO

O modelo é calibrado para um conjunto finito de regiões e setores produtivos. Em particular, considera-se $N = 11$ regiões, indexadas por n e i , e $J = 46$ setores econômicos, indexados por j e k . A utilização de dois índices para regiões (n,i) e setores (j,k) reflete a distinção entre mercados de origem e destino, sendo fundamental para a representação de fluxos de comércio, migração da força de trabalho e encadeamentos intersetoriais. A relação completa das regiões e dos setores está apresentada no Apêndice A. O Apêndice B faz uma breve descrição dos dados iniciais do modelo. O Apêndice C resume os valores obtidos para os parâmetros.

3.5.1 Dados

Os dados essenciais para a implementação do modelo são: (i) a remuneração do trabalho e a remuneração das estruturas; (ii) a distribuição inicial do emprego por setor, incluindo o não-emprego, e as matrizes de migração entre setores ; (iii) as participações de comércio bilateral por setor e região; (iv) o valor do dispêndio setorial por região; e (iiv) os dados de emissão por setor para o Brasil.

Os dados de remuneração do trabalho, remuneração das estruturas e comércio bilateral são provenientes da base GTAP 11. Como o ano mais recente disponível nessa base corresponde a 2017, esse período também serve de referência para a calibração inicial do modelo e como período inicial.

Alocação da mão-de-obra trata-se do número de trabalhadores por setor. Esse dado é obtido usando a base de dados RAIS²⁶. Trabalhadores desempregados são contabilizados no setor zero. Os dados de migração entre setores produtivos no Brasil são produzidos pelo Ministério do Trabalho e Emprego e disponibilizados com o nome RAISMIGRA (MTE, 2024).

²⁶ Relação Anual de Informações Sociais (RAIS).

No entanto, até a última vez que foi consultada, essa base não estava disponível online . A solução foi utilizar os dados originais de Oliveira (2020).

A participação no comércio bilateral em $t = 0$ é estimada a partir dos dados de dispendio do GTAP. Depois, o próprio modelo estima essas participações nos períodos subsequentes²⁷.

$$\pi_t^{nj,ij} = \frac{X_t^{nj,ij}}{\sum_{m=1}^N X_t^{nj,mj}} \quad \text{se } t = 0 \quad 49$$

$$\pi_{t+1}^{nj,ij} = \pi_t^{nj,ij} \left(\frac{\dot{x}_{t+1}^{ij} \dot{k}_{t+1}^{nj,ik}}{\dot{p}_{t+1}^{nj}} \right)^{\frac{\theta^j}{s^j}} (A_{t+1}^{ij})^{\frac{\theta^j}{s^j} \gamma^{ij} (1-b^{ij})} \quad \text{se } t > 0 \quad 50$$

Sobre os dados de emissões, utilizou-se os valores anuais estimados pelo MCTI, mas ponderados pelos valores setoriais do GTAP. Dessa forma, o total de emissões — valor que fundamenta a meta de emissões — foi preservado. No entanto, optou-se por manter a distribuição das emissões entre os setores econômicos conforme o GTAP, de modo a garantir consistência com a estrutura setorial desse banco de dados.

Os dados de emissões setoriais do GTAP tiveram que ser convertidos para dióxido de carbono equivalente (CO_2e). O GTAP considera cinco fontes distintas de emissões: agropecuária, processos industriais, resíduos, fatores produtivos e mudança do uso da terra. Dentre essas fontes, apenas as emissões provenientes da mudança do uso da terra não são desagregadas por setor, enquanto as demais apresentam desagregação tanto setorial quanto regional 28.

Um avanço metodológico relevante para a compatibilização entre dados econômicos e ambientais é apresentado por Oliveira e Silva (2025), que propõem uma metodologia de desagregação das emissões do MCTI para a estrutura de 68 atividades das Tabelas de Recursos e Usos (TRU) do IBGE . Os autores partem das estimativas de emissões por processo produtivo segundo a metodologia do IPCC (SIRENE/MCTI) e realizam sua redistribuição setorial utilizando informações auxiliares específicas para cada fonte emissora, como matrizes de insumo-produto, dados energéticos, informações de uso da terra e estatísticas setoriais complementares.

²⁷ Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) encontraram dados negativos na matriz de comércio internacional. Para resolver esse problema, os números negativos foram substituídos por zero.

²⁸ É importante notar que as emissões geradas por animais são contabilizadas como emissões por fatores produtivos.

3.5.2 Parâmetros

A parametrização do modelo baseia-se em diferentes fontes da literatura e em estimações próprias. A elasticidade de migração do trabalho e o fator de desconto intertemporal foram aproveitados de João (2020). O parâmetro de dispersão da produtividade setorial foi aproveitado de Caliendo, Dvorkin e Parro (2019). No que se refere às emissões, parte das elasticidades de emissão segue a formulação proposta por Shapiro e Walker (2018), enquanto outras foram reestimadas nesta tese a partir de dados de abatimento de emissões reportados por firmas, como a Vale. Por fim, as demais elasticidades do modelo foram estimadas com base nos dados do GTAP referentes ao ano de 2017. As subseções seguintes detalham a definição, a fonte e o procedimento de estimação de cada parâmetro.

3.5.2.1 Elasticidade de migração

Para estimar a elasticidade de migração, Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) adaptam o método e os dados originalmente utilizados por Artuç, Chaudhuri e McLaren (2010). A metodologia parte de uma equação que relaciona os fluxos de migração correntes aos salários futuros e aos fluxos de migração futuros, capturando tanto os incentivos salariais quanto o valor da opção de mobilidade intersetorial.

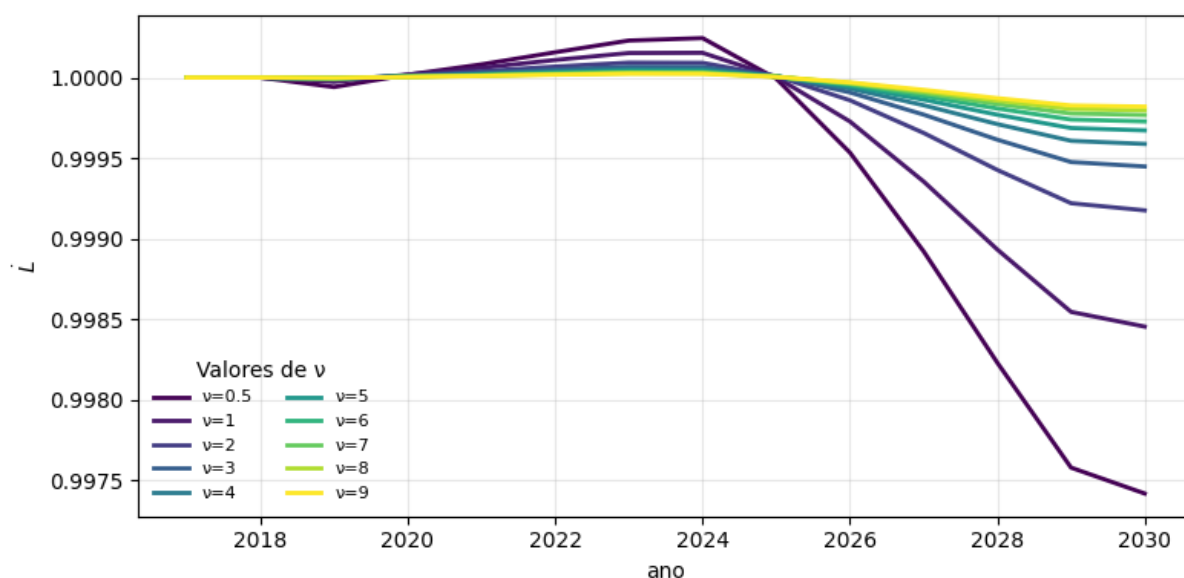
$$\ln\left(\frac{\mu_t^{nj,nk}}{\mu_t^{nj,nj}}\right) = \underbrace{\frac{-(1-\beta)}{v}}_{\text{intercepto}} \tau^{ij} + \frac{\beta}{v} \ln\left(\frac{w_{t+1}^{nk}}{w_{t+1}^{nj}}\right) + \beta \ln\left(\frac{\mu_{t+1}^{nj,nk}}{\mu_{t+1}^{nk,nk}}\right) + \varepsilon_{t+1}, \quad 51$$

A estimação dos parâmetros dessa equação é realizada por meio do método dos Momentos Generalizados (GMM). Como salários e fluxos de migração são determinados simultaneamente, eles tendem a estar correlacionados com choques não observados, o que tornaria uma regressão por mínimos quadrados viesada. Para contornar esse problema de endogeneidade, os autores utilizam as seguintes variáveis instrumentais: valores defasados dos salários e valores defasados dos fluxos de migração.

No contexto brasileiro, Oliveira (2020) aplica essa mesma estratégia empírica utilizando dados extraídos da RAIS identificada para construir fluxos migratórios e salários no período de 2007 a 2018. A partir dessa estimação, o autor encontra uma elasticidade de migração igual a 0,1131, o que implica um valor de $(v = 8,8417)$.

O parâmetro v escala a variância dos choques idiossincráticos que afetam as decisões de realocação das famílias. Em outras palavras, quanto menor o valor de v , maior é a sensibilidade dos agentes a eventos inesperados que alteram sua utilidade, o que se traduz em maior propensão à migração. O exercício de sensibilidade apresentado a seguir ilustra esse mecanismo. Diante do choque associado à criação do mercado de carbono (cenário 1), valores menores de v implicam que os agentes antecipam mais intensamente esse choque, resultando em um aumento do emprego antes de sua implementação. Após o choque, quanto menor o valor de v , mais rápida é a reversão do nível de emprego em direção ao novo equilíbrio.

Figura 5 Teste de sensibilidade para o parâmetro: inversa da elasticidade de migração



Fonte: elaboração própria (2025).

Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) estimam o parâmetro v para diferentes frequências temporais: anual ($v = 2,02$), quinquimestral ($v = 3,95$) e trimestral ($v = 5,34$). Observa-se que, quanto maior a frequência, maior o valor estimado de v . Esse resultado reflete o fato de que a mobilidade observada é menor em horizontes de tempo mais curtos: é relativamente mais fácil mudar de ocupação ou setor ao longo de um ano do que dentro de um trimestre. Para o caso brasileiro, Oliveira (2020) estima um valor anual de $v = 8,8417$. Assim, ainda que resguardadas as diferenças metodológicas e de base de dados, os resultados sugerem que a população brasileira apresenta menor mobilidade entre mercados de trabalho quando comparada à população norte-americana.

Cabe destacar que a elasticidade de migração estimada por Oliveira (2020) baseia-se exclusivamente em dados do emprego formal, provenientes da RAIS. Considerando que o

emprego informal — que representa parcela significativa do mercado de trabalho brasileiro — tende a apresentar menor mobilidade intersetorial, a elasticidade utilizada neste trabalho deve ser interpretada como um limite inferior (*lower bound*) da elasticidade verdadeira. Nesse sentido, a calibração adotada é considerada conservadora.

3.5.2.2 Participação do do trabalho e das estruturas na produção

Somando as duas primeiras CPOs (eq. 39 e eq. 40) e resolvendo para $(1 - g^{nj})\gamma^{nj}$, conclui-se que esse parâmetro representa a participação do trabalho e das estruturas em relação ao dispêndio:

$$(1 - g^{nj})\gamma^{nj} = \frac{w_t^{nj}L_t^{nj} + r_t^{nj}H_t^{nj}}{C_t^{nj}} \quad 52$$

Os dados sobre remuneração dos fatores foram obtidos do GTAP. O dispêndio foi estimado usando as matrizes de comércio bilateral construídas com dados do GTAP. Nesse último caso, o dispêndio da região n é igual ao somatório das vendas domésticas mais exportações (Caliendo; Dvorkin; Parro, 2019).

3.5.2.3 Participação dos insumos na produção

Esse parâmetro é definido ao se resolver a terceira CPO (eq. 41) para o parâmetro $(1 - g^{nj})\gamma^{nk,nj}$. Nesse caso, representa a participação do consumo intermediário no dispêndio:

$$(1 - g^{nj})\gamma^{nj,nk} = \frac{P_t^{nk} \cdot M_t^{nj,nk}}{C_t^{nj}}, \quad k = 1, \dots, J \quad 53$$

Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) denominaram esse parâmetro de *material shares*. O consumo intermediário é estimado utilizando os dados do GTAP. A estimativa do dispêndio é a mesma do parâmetro anterior.

3.5.2.4 Participação do trabalho no VA

A participação da remuneração do trabalho em relação ao VA, $(1 - \xi^n)$, é definida pela segunda CPO (eq. 40):

$$(1 - \xi^n) = \frac{w_t^{nj} \cdot l_t^{nj}}{\gamma^{nj} (1 - g^{nj}) \cdot C_t^{nj}} \quad 54$$

Pela equação (52), que também representa o VA total:

$$(1 - \xi^n) = \frac{w_t^{nj} \cdot l_t^{nj}}{w_t^{nj} L_t^{nj} + r_t^{nj} H_t^{nj}} \quad 55$$

O parâmetro ξ^n representa a participação das estruturas no VA e, por definição, é o complementar do parâmetro $(1 - \xi^n)$ já calculado:

$$\xi^n = \frac{r_t^{nj} H_t^{nj}}{w_t^{nj} L_t^{nj} + r_t^{nj} H_t^{nj}} \quad 56$$

3.5.2.5 Participação Local do Portfólio Global

Existe apenas um rentista para cada região n ; que possui todas as estruturas dessa região. Depois de ser remunerado por ter essas estruturas, envia esse valor para uma carteira global. Dessa carteira global, recebe de volta uma participação ι^n , que é gasta com consumo final na própria região n . A diferença entre o que envia para a carteira global e o que recebe de volta é chamada de desbalanço (D^n):

$$D^n = \sum_{k=1}^J r_t^{nk} H^{nk} - \iota^n \chi_t^n \quad 57$$

reescrevendo a receita com estruturas em função da participação das estruturas no VA ($r_t^{nk} H^{nk} = \xi^n VA_t^{nk}$) (eq. 36) e resolvendo a equação anterior para ι^n , tem-se:

$$\iota^n = \frac{\sum_{k=1}^J \xi^n V A_t^{nk} - D^n}{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^J \xi^n V A_t^{nk}} \quad 58$$

Vale ressaltar que o somatório dessa equação em relação a n é igual a um, uma vez que $\sum_{n=1}^N D^n = 1$.

3.5.2.6 Participação dos bens finais no consumo

O parâmetro α^j representa a participação do consumo final do bem j em relação à renda global. Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) estimaram α^j usando os dados iniciais de dispêndio e remuneração dos fatores. Esse parâmetro é estimado resolvendo-se a equação 47 do modelo MCC em função de α^j .

$$\alpha^j = \frac{\sum_{n=1}^N X^{nj} - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^J \gamma^{nk,nj} (1 - g^{nk}) \sum_{i=1}^N \pi^{ik,nk} X^{ik}}{\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^J w^{nk} L^{nk} + \sum_{n=1}^N \iota^n \chi} \quad 59$$

Nesse contexto, o termo $\sum_{n=1}^N X^{nj}$ representa o consumo total do bem j – incluindo consumo final e intermediário – agregado entre todas as regiões. O termo $\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^J \gamma^{nk,nj} \sum_{i=1}^N \pi^{ik,nk} X^{ik}$ corresponde especificamente ao consumo intermediário do bem j , também agregado entre regiões. Por fim, o termo $\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^J w^{nk} L^{nk} + \sum_{n=1}^N \iota^n \chi$ define a renda total gerada na economia.

3.5.2.7 Fator de Desconto

O parâmetro β é definido como o fator de desconto intertemporal, representando a taxa pela qual as famílias, que são forward-looking, descontam a utilidade esperada de períodos futuros ao tomarem decisões de migração e consumo. O valor utilizado para este parâmetro é o mesmo valor utilizado por Oliveira (2020), ou seja: 0,99 em uma base anual, o que implica uma taxa de juros anual de aproximadamente 4%.

3.5.2.8 Dispersão da Produtividade

Conforme Caliendo e Parro (2015), o parâmetro θ^j é interpretado como a elasticidade de comércio do setor j , podendo variar entre 0 e ∞ , uma vez que compõe um dos parâmetros da distribuição de Fréchet. Quanto maior esse parâmetro, maior será a dispersão da produtividade do setor j , ou seja, mais países conseguem produzir variedades desse setor com tecnologia similar. Na prática, isso significa que, se θ for elevado, maior será o efeito da mudança de taxas no comércio bilateral. Por exemplo, se a região n taxa a exportação do bem j e esse bem tem produtividade dispersa, então esse país perceberá uma redução significativa na exportação desse setor. O Quadro 3 resume essa explicação.

Quadro 3 – Comparação de Alta e Baixa Dispersão da Produtividade

Aspecto	Alta Dispersão da Produtividade	Baixa Dispersão da Produtividade
Elasticidades do Comércio (θ^j)	Valores menores de elasticidades do comércio.	Valores maiores de elasticidades do comércio.
Impacto das Mudanças Tarifárias	Pequenas mudanças nas tarifas causam grandes ajustes na participação de bens negociados.	Mudanças nas tarifas não alteram substancialmente a participação de bens negociados.
Substituibilidade de Bens	Bens são mais substituíveis.	Bens são menos substituíveis.
Mudanças de Fornecedores	Produtores têm maior probabilidade de mudar de fornecedores.	Produtores têm menor probabilidade de mudar de fornecedores.

Fonte: Adaptado de Caliendo, Parro (2015).

Como forma de determinar esse parâmetro, Caliendo e Parro (2015) propuseram a seguinte estratégia: por simplificação, considere apenas três regiões (n, i, h) e um único bem j , e utilize as equações 30 e 31 para montar a seguinte relação:

$$\left(\frac{X_{ni}^j X_{ih}^j X_{hn}^j}{X_{in}^j X_{hi}^j X_{nh}^j} \right) = \left(\frac{k_{ni}^j k_{ih}^j k_{hn}^j}{k_{in}^j k_{hi}^j k_{nh}^j} \right)^{-\theta^j} + \varepsilon^j \quad 60$$

Depois, utilize a forma log-linearizada do custo de transação (composto por tarifa e custo *iceberg*) para representar a expressão anterior em função das tarifas:

$$\ln \left(\frac{X_{ni}^j X_{ih}^j X_{hn}^j}{X_{in}^j X_{hi}^j X_{nh}^j} \right) = -\theta^j \ln \left(\frac{\tilde{\tau}_{ni}^j \tilde{\tau}_{ih}^j \tilde{\tau}_{hn}^j}{\tilde{\tau}_{in}^j \tilde{\tau}_{hi}^j \tilde{\tau}_{hn}^j} \right) + \varepsilon^j \quad 61$$

Por fim, o parâmetro θ^j é estimado através de uma regressão OLS simples, utilizando apenas dois conjuntos de informações: comércio bilateral e tarifas.

3.5.2.9 Elasticidade de emissões

A maioria das elasticidades de emissão utilizadas no modelo foi obtida de Shapiro e Walker (2018), que apresentam estimativas para diferentes atividades industriais. Para as atividades agricultura, pecuária e florestais, as elasticidades foram construídas a partir da literatura sobre custos de adoção do plantio direto, que indicam aumento de 0,47% no custo de produção em comparação com o plantio convencional (Rodrigues, 2005). No caso da mineração, empregou-se como proxy a razão entre os gastos da Vale (2025) com projetos de redução de emissões (R\$ 257 milhões em 2024) e sua receita total (R\$ 38,1 bilhões no mesmo ano). Para o setor de petróleo e gás (Agência Brasil, 2025), cuja despesa declarada com mitigação de emissões em 2024 foi de R\$ 600 milhões, frente a uma receita de R\$ 91,4 bilhões. Já no transporte terrestre, a elasticidade foi estimada a partir da razão entre o consumo de etanol e diesel no BEN (2023), ajustada pela eficiência relativa do etanol (60%), segundo a ANP (Brasil, 2022), resultando em 0,083. O Apêndice C mostra a elasticidade de emissão considerada para cada mercado, lembrando que estamos considerando Mercado de Carbono apenas para o Brasil, portanto, esse parâmetro é nulo para as demais regiões.

4 RESULTADOS

Esta Seção apresenta os resultados da aplicação de choques de MC em um modelo multissetorial e multirregional, adaptado para incorporar as emissões como fator de produção. A análise se concentra na implementação dos três cenários de MC: com teto de 0,49 Gt de CO_2e para os setores econômicos (Cenário I), no qual todos os setores reduzem suas emissões em 50%; com teto de 0,81 Gt de CO_2e (Cenário II), em que o desmatamento é responsável por uma redução de 70% enquanto os demais setores reduzem 18%; e com teto de 0,99 Gt de CO_2e (Cenário III), no qual o desmatamento é responsável pela redução de 81,5%, enquanto os demais setores mantêm suas emissões ao nível de 2005.

Os resultados apresentados são limitados a um horizonte de curto prazo de cinco anos, haja vista que a estrutura atual do modelo não foi projetada para análises de longo prazo, que exigiriam a incorporação do progresso tecnológico e da variação das estruturas.

A Tabela 3 apresenta indicadores de intensidade de emissões por trabalhador no Brasil em 2017. O objetivo é avaliar a intensidade de carbono da estrutura produtiva nacional, identificando quais grandes grupos setoriais concentram maiores emissões por trabalhador e, portanto, representam maiores desafios para a transição rumo a uma economia de baixo carbono.

Tabela 3 - Indicadores de intensidade de carbono por trabalhador nos principais setores da economia brasileira (2017)

Atividade	E (Gg CO2e)	L (número de trabalhadores)	VA (milhões de USD)	E/L	E/VA	L/VA	VA (%)
Alimentos	592.703	15.438.265	152.271	0,038	3.892,0	101	8,7
Agricultura	98.914	6.281.108	66.070	0,016	1.497,0	95	3,8
Bebidas	700	198.897	9.609	0,004	0,1	21	0,5
Refino Açúcar	2.125	161.476	3.874	0,013	0,5	42	0,2
Abate e Carnes	3.763	747.518	16.151	0,005	0,2	46	0,9
Outros Alimentos	1.995	1.252.977	21.524	0,002	0,1	58	1,2
Flor. Pesca Aquic.	3.623	837.997	8.156	0,004	0,4	103	0,5
Pecuária	481.584	5.958.292	26.887	0,081	17.911,0	222	1,5
Bens industriais	153.217	8.396.170	203.778	0,018	0,8	41	11,6
Automóveis	960	450.449	15.646	0,002	0,1	29	0,9
Ind. Diversas	-	1.233.012	24.026	-	-	51	1,4
Minerais Não Met.	45.117	589.354	8.135	0,077	5.546,0	72	0,5
Máq. Mecânicas	-	357.731	13.086	-	-	27	0,7
Eq. Elétricos	-	204.637	6.051	-	-	34	0,3
Comp. Eletrônicos	-	126.998	2.247	-	-	57	0,1
Metais Não Ferrosos	10.987	98.521	2.986	0,112	3.680,0	33	0,2
Ferro e Aço	53.105	114.848	7.380	0,462	7.195,0	16	0,4
Eq. Transporte	258	91.216	3.359	0,003	0,1	27	0,2
Borracha Plásticos	-	420.120	8.297	-	-	51	0,5
Prod. de Metal	1.992	663.203	11.055	0,003	0,2	60	0,6
Produtos Químicos	19.340	326.708	21.909	0,059	0,9	15	1,2
Petróleo e Gás	2.954	54.197	27.295	0,055	0,1	2	1,6
Mineração Metais	9.884	64.046	19.280	0,154	0,5	3	1,1
Têxteis	2.266	617.616	3.875	0,004	0,6	159	0,2
Vestuário	-	1.643.543	8.043	-	-	204	0,5
Mineração Carvão	592	115.052	69	0,005	8.570,0	1.667	-
Madeira	-	371.415	3.789	-	-	98	0,2
Papel Celulose	5.763	383.879	13.016	0,015	0,4	30	0,7
Couro Calçados	-	469.625	4.234	-	-	111	0,2
Monitorados	289.892	20.480.094	399.429	0,014	0,7	51	22,7
Saúde	316	5.339.297	85.606	-	0,0	62	4,9
Refino Petróleo	84.807	116.882	3.708	0,726	22.869,0	32	0,2
Elétric. e Gás	13.786	156.189	39.242	0,088	0,4	4	2,2
Água e Saneam.	290	534.083	12.912	0,001	0,0	41	0,7
Farmacêuticos	-	98.626	9.546	-	-	10	0,5
Transp. Terrestre	190.175	4.011.194	54.815	0,047	3.469,0	73	3,1
Serv. Empresariais	359	8.135.441	119.096	-	0,0	68	6,8
Apoio Transporte	47	793.127	20.993	-	0,0	38	1,2
Comunicações	112	1.295.255	53.510	-	0,0	24	3,0
Serviços	33.544	57.303.425	1.004.351	0,001	0,0	57	57,1
Imobiliário	25	438.257	213.539	-	-	2	12,1
Educação	214	6.681.823	109.852	-	0,0	61	6,2
Adm. Pública	408	4.819.505	162.302	-	0,0	30	9,2
Construção	-	7.692.147	87.670	-	-	88	5,0
Aloj. e Aliment.	141	5.675.571	42.724	-	0,0	133	2,4
Transp. Aéreo	16.743	60.873	2.248	0,275	7.448,0	27	0,1
Transp. Aquático	14.905	56.977	2.740	0,262	5.440,0	21	0,2
Comércio	889	18.858.801	215.615	-	0,0	88	12,3
Finanças Seguros	84	1.195.944	118.506	-	0,0	10	6,7
Artes e Outros	137	11.823.527	49.156	-	0,0	241	2,8
Total	1.069.356	101.617.954	1.759.828				100,0

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11 e Sirene.

Nota: E: emissões em Gg CO2e (GWP-AR5); VA: valor adicionado em milhões de dólares correntes (2017); L: número de trabalhadores.

O grupo de alimentos apresenta uma das maiores intensidades de emissões por trabalhador (E/L) da economia brasileira. Isso reflete o peso das atividades agropecuárias que concentram emissões associadas principalmente à fermentação entérica e ao manejo de dejetos

animais. Em contraste, as indústrias de alimentos e bebidas, embora dependam indiretamente de insumos agropecuários emissores, possuem emissões diretas muito menores por trabalhador, refletindo maior mecanização e menor uso de fontes emissoras no processo produtivo. Já a silvicultura e a pesca exibem intensidades intermediárias. Assim, o indicador E/L revela que o perfil emissivo do grupo “Alimentos” é fortemente determinado pela presença da agropecuária, enquanto as atividades industriais do grupo apresentam menor intensidade de carbono por trabalhador.

No grupo de bens industriais, as emissões por trabalhador são significativamente menores do que no grupo de alimentos, mas ainda representam uma parcela importante do total. As fontes predominantes incluem processos industriais intensivos em energia, como siderurgia, cimento e química. A alta mecanização e o uso intensivo de capital reduzem o número de trabalhadores empregados, o que, por consequência, tende a elevar o valor de E/L, mesmo em segmentos tecnologicamente avançados. Em contrapartida, setores de bens leves e manufaturas de maior valor agregado, como têxteis, alimentos processados e eletrônicos, apresentam menores emissões relativas por trabalhador. Ainda assim, a intensidade de carbono continua elevada em segmentos específicos, o que reforça a importância de políticas direcionadas de eficiência energética e substituição de insumos de alta emissão.

Os grupos classificados como monitorados (geralmente associados à produção e distribuição de energia elétrica, transporte e atividades reguladas por políticas econômicas) apresentam emissões expressivas por trabalhador, refletindo a natureza energética dessas atividades. Embora representem uma fração menor do emprego total, concentram parcela relevante das emissões nacionais, o que torna esse grupo estratégico para a mitigação. A transição para fontes renováveis, eletrificação da frota e melhoria da eficiência na geração e transmissão de energia podem reduzir substancialmente a intensidade E/L, com efeitos diretos sobre as metas nacionais de descarbonização.

O grupo de serviços exibe as menores emissões por trabalhador, caracterizando-se como o grupo menos intensivo em carbono da economia brasileira. As emissões nesse grupo estão associadas principalmente ao consumo indireto de energia elétrica e transporte urbano, e não à produção direta. A alta densidade de emprego e a baixa dependência de combustíveis fósseis explicam o baixo indicador E/L observado. Essa característica sugere que a expansão relativa dos serviços na estrutura produtiva nacional pode contribuir para reduzir a intensidade média de carbono da economia, sem comprometer a geração de renda e emprego.

Agora, quando se analisa a variação desses indicadores após a implementação da política de mercado de carbono (Cenário 1, mais restritivo), observa-se uma redução expressiva

nas emissões em todos os grupos setoriais, acompanhada por ajustes distintos na produção e no emprego. O grupo de alimentos apresenta forte queda simultânea em emissões e emprego, refletindo a retração de atividades agropecuárias intensivas em carbono. Nos bens industriais e monitorados, as emissões também recuam acentuadamente, mas o emprego cresce, indicando um processo de reorganização produtiva. Já os serviços mantêm estabilidade no valor adicionado e queda pronunciada na intensidade de carbono (-68% em E/L e -70% em E/VA), reforçando seu papel de amortecedor na transição de baixo carbono. Em conjunto, os resultados indicam que a política reduz emissões sem comprometer de forma estrutural o valor adicionado agregado, mas altera significativamente a composição e a intensidade emissiva do emprego entre setores.

Tabela 4 - variação dos indicadores de intensidade de carbono por trabalhador nos principais setores da economia brasileira após a implementação do MC (2017-2030)

Atividade	ΔE (%)	ΔL (%)	ΔVA (%)	$\Delta(E/L)$ (%)	$\Delta(E/VA)$ (%)	$\Delta(L/VA)$ (%)	$\Delta(VA)$ (%)
Alimentos	-53,7	-51,7	-38,6	-4,0	-24,5	-21,3	-38,5
Agricultura	-45,0	-73,0	-60,7	103,7	40,0	-31,3	-60,7
Bebidas	-59,9	32,5	-3,8	-69,8	-58,3	37,8	-3,7
Refino Açúcar	-86,7	197,9	-94,7	-95,5	150,0	5.504,1	-94,7
Abate e Carnes	-24,1	89,6	-27,4	-60,0	4,5	161,1	-27,3
Outros Alimentos	-67,0	24,4	-16,7	-73,4	-60,3	49,4	-16,6
Flor. Pesca Aquic.	-60,2	-58,4	-4,4	-4,3	-58,4	-56,5	-4,2
Pecuária	-55,4	-71,7	-23,4	57,4	-41,8	-63,0	-23,3
Bens industriais	-57,0	36,1	-0,9	-68,4	-56,6	37,3	-0,7
Automóveis	-62,8	83,9	2,4	-79,7	-63,6	79,6	2,5
Ind. Diversas		23,9	4,5			18,6	4,6
Minerais Não Met.	-52,3	41,8	7,6	-66,3	-55,6	31,7	7,8
Máq. Mecânicas		115,6	31,9			63,5	32,1
Eq. Elétricos		104,7	72,8			18,5	73,0
Comp. Eletrônicos	-4,2	85,7	391,2	-48,4	-80,5	-62,2	392,0
Metais Não Ferrosos	-61,9	88,5	-29,7	-79,8	-45,8	168,0	-29,5
Ferro e Aço	-55,0	87,2	-27,4	-76,0	-38,0	158,0	-27,3
Eq. Transporte	-72,0	73,3	-22,8	-83,8	-63,7	124,4	-22,7
Borracha Plásticos		105,6	21,8			68,8	22,0
Prod. de Metal	-66,6	51,6	22,6	-78,0	-72,8	23,6	22,8
Produtos Químicos	-65,0	84,6	30,6	-81,0	-73,2	41,3	30,8
Petróleo e Gás	-38,8	115,1	-26,6	-71,5	-16,6	193,1	-26,5
Mineração Metais	-71,2	189,9	-93,2	-90,1	326,2	4.185,0	-93,2
Têxteis	-66,8	-9,2	53,2	-63,4	-78,3	-40,8	53,5
Vestuário		-27,8	21,2			-40,4	21,4
Mineração Carvão	-59,0	70,2	1.776,7	-75,9	-97,8	-90,9	1.779,7
Madeira		-4,4	-48,0			83,8	-47,9
Papel Celulose	-51,4	50,8	-39,3	-67,8	-20,0	148,4	-39,2
Couro Calçados		27,1	-33,9			92,4	-33,8
Monitorados	-52,0	53,1	5,7	-68,7	-54,6	44,8	5,9
Saúde	-55,9	31,4	3,0	-66,4	-57,1	27,6	3,1
Refino Petróleo	-45,0	153,5	26,4	-78,3	-56,5	100,6	26,6
Elétric. e Gás	-41,9	62,3	-7,7	-64,2	-37,1	75,9	-7,6
Água e Saneam.	-56,9	47,5	1,3	-70,8	-57,5	45,6	1,5
Farmacêuticos		114,4	64,4			30,4	64,7
Transp. Terrestre	-55,9	6,4	-4,2	-58,5	-53,9	11,1	-4,0
Serv. Empresariais	-56,5	80,3	9,1	-75,9	-60,2	65,2	9,3
Apoio Transporte	-60,9	72,1	-2,7	-77,3	-59,8	76,9	-2,5
Comunicações	-63,2	91,4	14,9	-80,8	-68,0	66,6	15,0
Serviços	-69,2	-2,4	3,5	-68,4	-70,2	-5,7	3,7
Imobiliário	-44,6	-3,5	-1,6	-42,6	-43,7	-2,0	-1,4
Educação	-63,1	-6,4	4,7	-60,6	-64,7	-10,6	4,8
Adm. Pública	-64,6	142,3	4,4	-85,4	-66,1	132,0	4,6
Construção		-32,2	1,3			-33,1	1,5
Aloj. e Aliment.	-64,2	-24,2	23,1	-52,8	-70,9	-38,4	23,3
Transp. Aéreo	-74,3	53,8	71,7	-83,3	-85,0	-10,4	71,9
Transp. Aquático	-64,5	66,3	-16,6	-78,7	-57,5	99,3	-16,4
Comércio	-57,9	13,2	3,2	-62,8	-59,2	9,7	3,4
Finanças Seguros	-66,7	91,2	5,3	-82,6	-68,4	81,6	5,4
Artes e Outros	-59,3	-64,4	1,2	14,2	-59,8	-64,8	1,4
Total	-54,2	4,4	-0,2	-72,2	-52,6	25,1	-0,16

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11 e Sirene.

Nota: E: emissões em Gg CO₂e (GWP-AR5); VA: valor adicionado em milhões de dólares correntes (2017); L: número de trabalhadores.

4.1 RESULTADOS GERAIS

Esta subseção indica que a implementação de um MC no ano de 2026 apresenta efeitos distintos dependendo do teto de emissões estabelecido:

- Cenário 1 (teto de 0,49 Gt): provoca uma queda acumulada no VA de aproximadamente 0,83% no período analisado. O desemprego, em termos globais, não apresenta diferença significativa em relação ao cenário base, porém, há uma significativa mudança do número de trabalhadores entre setores. As emissões dos setores produtivos caem cerca de 58% entre 2026 e 2030, refletindo um esforço de mitigação mais rigoroso, embora ainda limitado pela baixa participação das emissões por desmatamento.
- Cenário 2 (teto de 0,81 Gt): resulta em redução acumulada do VA de 0,35% no período analisado, sem muita variação no desemprego total, apenas mudanças setoriais moderadas da força de trabalho. A queda nas emissões dos setores produtivos é de aproximadamente 30% entre 2026 e 2030, também condicionada à contribuição restrita da redução do desmatamento.
- Cenário 3 (teto de 0,99 Gt): gera impacto mais moderado, com queda acumulada no VA de cerca de 0,15%, sem aumento do desemprego total e redução nas emissões dos setores produtivos de próxima de 15% entre 2026 e 2030. A suavização dos efeitos decorre do teto mais permissivo, que reduz as pressões imediatas de ajuste sobre a economia.

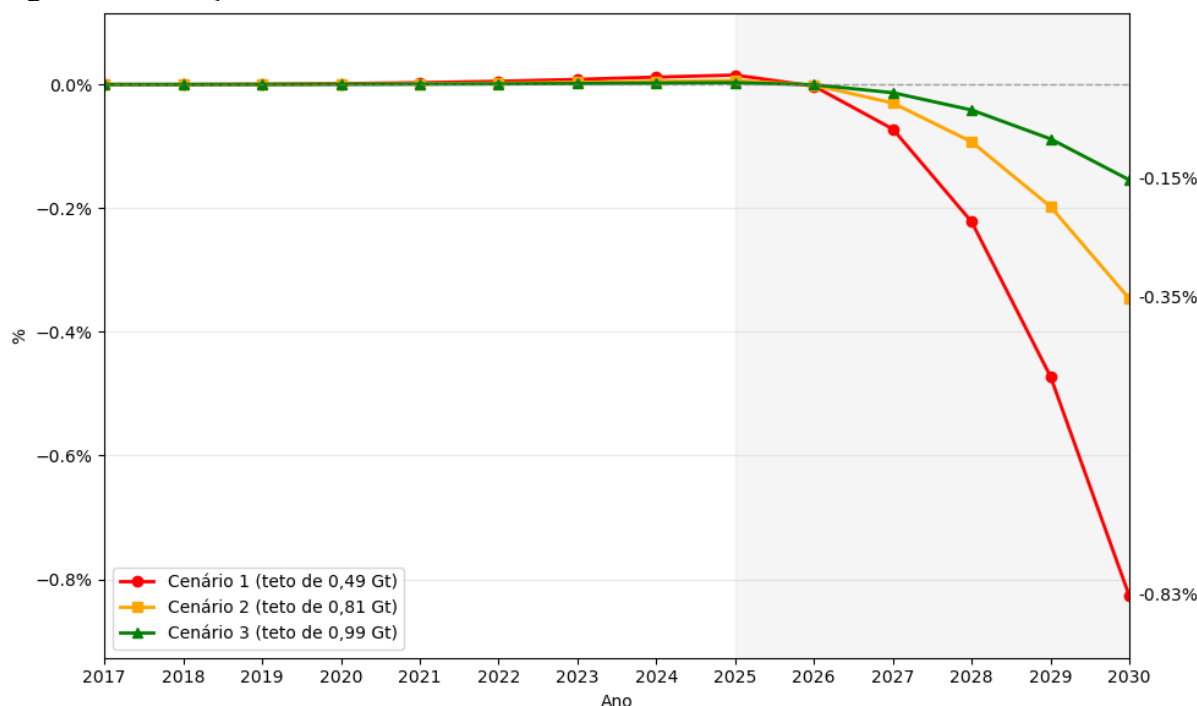
Em todos os cenários, observa-se que o resultado da política depende fortemente do desenho do MC e da incorporação das emissões por desmatamento. Se mal desenhado, o mecanismo pode não abranger as principais fontes de emissão, limitando os benefícios ambientais

Os valores monetários apresentados no modelo estão expressos em milhões de dólares americanos (USD), permitindo comparação clara e consistente com outras análises econômicas e dados internacionais.

4.1.1 Valor Adicionado

A Figura 6 apresenta a variação anual acumulada do VA para a economia brasileira sob os três cenários em relação ao cenário-base: o cenário-base, no qual não há regulação sobre emissões, e os cenários com a implementação de MC, conforme simulado pelo modelo de CGE desenvolvido nesta pesquisa. Os resultados revelam efeitos distintos ao longo do tempo, especialmente a partir de 2026, ano em que o MC é introduzido na modelagem.

Figura 6 – Variação anual acumulada do VA – Cenário-base versus cenários com MC



Fonte: elaboração própria (2025).

No período de 2017 a 2025, observa-se variações pequenas nos três cenários. Essa pequena coincidência se justifica pelo fato de que o MC ainda não foi implementado nesse intervalo, funcionando como um período de calibração da trajetória econômica. Em outras palavras, o VA de 2017 é o único observado através dos dados GTAP 11, os VAs entre 2018 e 2025 são estimados pelo modelo sem choque, enquanto os VAs para 2026 a 2030 são os resultados estimados pelo modelo com choque.

A partir de 2026, quando o MC passa a vigorar — limitando as emissões a 0,49 Gt (cenário 1), 0,81 Gt (cenário 2) ou 0,99 Gt (cenário 3) — observa-se uma queda do VA em todos os cenários. As diferenças entre os cenários tornam-se evidentes já no primeiro ano de implementação: no cenário 1, o impacto adicional é de -0,003 pp em relação ao cenário base; no cenário 2, de -0,001 pp; e no cenário 3, de apenas -0,0004 pp no segundo ano da política.

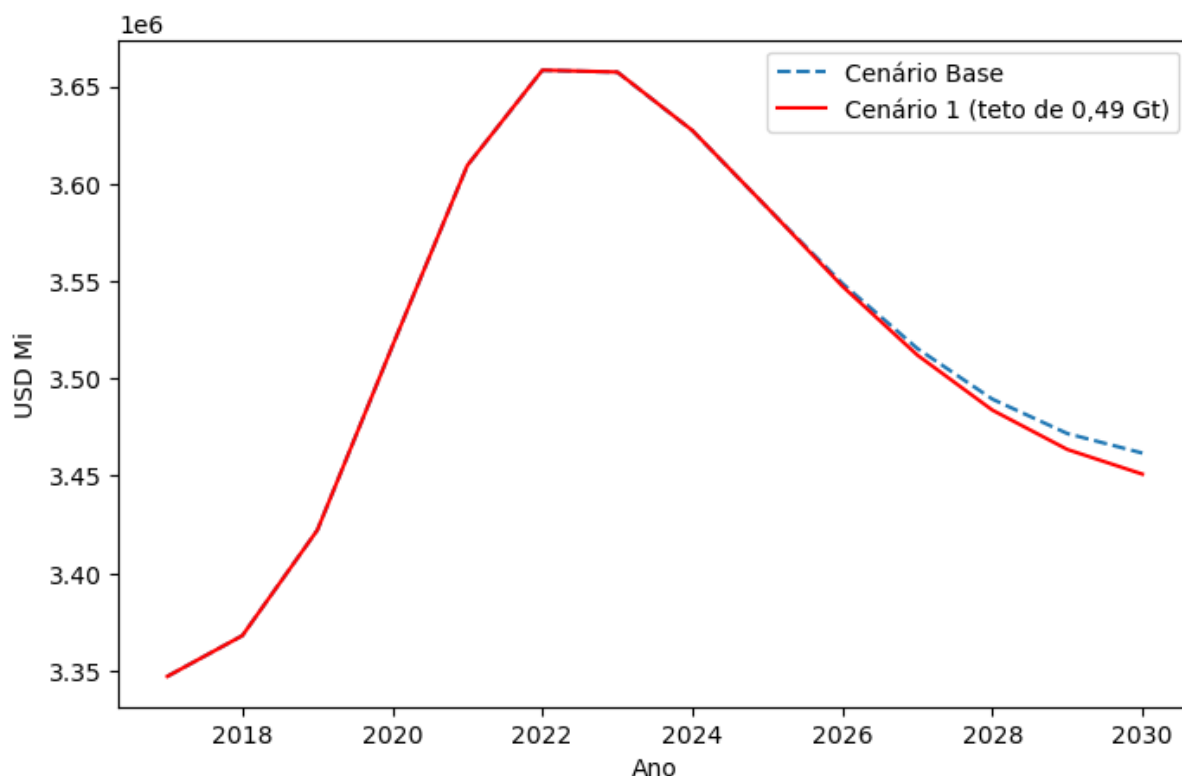
A diferença de -0,003 pp evidencia o impacto imediato da política de regulação das emissões, refletindo o aumento dos custos de produção decorrentes da obrigatoriedade de aquisição de permissões de emissão e da realocação de fatores de produção. Como o modelo não considera progresso tecnológico, toda redução de emissões resultará em perdas de VA. Tal impacto inicial negativo é consistente com a literatura sobre riscos de transição climática, que destaca os custos econômicos advindos de alterações súbitas no regime regulatório ambiental.

No horizonte acumulado de 2026 a 2030, os impactos sobre o VA se aprofundam conforme a ambição dos tetos de emissões. O cenário 1 apresenta a maior contração, com -0,83 pp em relação ao cenário base, refletindo o elevado rigor da meta de 0,49 Gt. O cenário 2 mostra um efeito intermediário, com -0,35 pp, associado ao teto de 0,81 Gt, enquanto o cenário 3 registra uma perda mais modesta de -0,15 pp, compatível com a maior flexibilidade de 0,99 Gt. Esses resultados evidenciam que, embora o MC seja eficaz na redução das emissões, os custos econômicos cumulativos diferem substancialmente entre os cenários, reforçando o trade-off entre rigor regulatório e impacto sobre a atividade econômica.

Por que, nesse caso, a redução de emissões implica nessa redução de produção? como foi apresentado, no modelo adotado as emissões de GEE são tratadas como um fator de produção. Nessa formulação não há progresso tecnológico endógeno nem mecanismos explícitos de abatimento ao longo do tempo. Além disso, não há substituição direta entre emissões e os demais fatores produtivos, como trabalho e estruturas, sendo a elasticidade de substituição limitada pela forma funcional da tecnologia. Em consequência, a firma não consegue manter o mesmo nível de produção reduzindo emissões sem incorrer em custos adicionais, tampouco substituir livremente emissões por capital ou trabalho. Diante da elevação do custo do pacote de insumos provocada pela precificação do carbono, o principal canal de ajuste disponível no modelo ocorre via redução de escala da produção, o que explica a associação entre políticas de redução de emissões e queda do nível de produção observada nos resultados contrafactuais.

Nos anos subsequentes (2026 a 2030), tanto o cenário-base quanto o cenário com MC apresentam trajetórias semelhantes para o VA, movendo-se praticamente em paralelo (Figura 7). Isso indica que, uma vez absorvido o choque inicial em 2026, a economia mantém uma dinâmica de crescimento próxima nos dois casos, sem recuperação relativa no cenário com MC. Ainda assim, o nível do VA permanece sistematicamente inferior ao do cenário-base ao longo de todo o período, refletindo a persistência dos custos associados à restrição de emissões, que, nesse modelo, não são compensados por ganhos de eficiência no curto prazo.

Figura 7 – Valor anual do VA – Cenário-base versus cenário 1



Fonte: elaboração própria (2025).

Esses resultados demonstram que, embora a introdução de um MC imponha custos de transição à economia brasileira no curto prazo, não há sinais de ajustamento dinâmico e de convergência parcial ao longo do tempo. A persistência da diferença entre os três cenários, portanto, sugere a necessidade de políticas complementares, como investimentos em inovação tecnológica e compensações setoriais, para mitigar os efeitos distributivos e acelerar a transição para uma economia de baixo carbono.

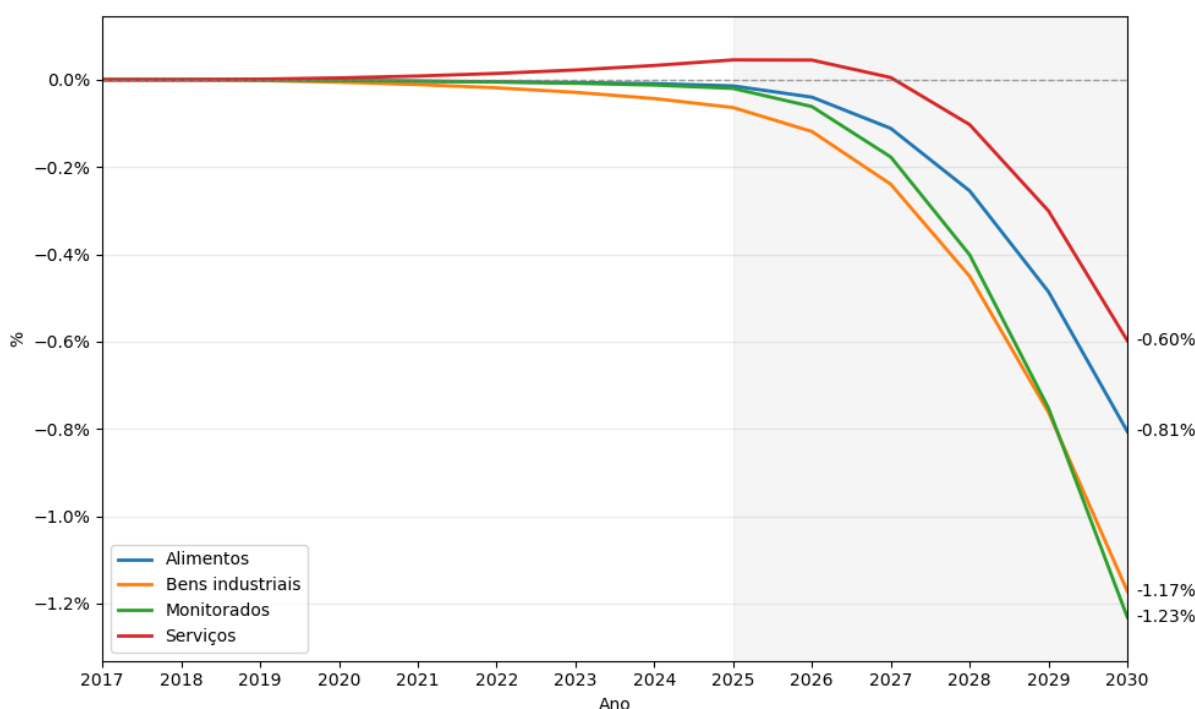
O comportamento descendente do VA a partir de 2022 contrasta com a trajetória observada na economia real. Esse resultado decorre da forma de solução adotada no modelo. Conforme explicado na seção metodológica, utilizamos apenas as condições iniciais do sistema para resolver a dinâmica, partindo do pressuposto de que essas condições incorporam os elementos estruturais que determinam a evolução futura da economia — como o nível tecnológico, custos relativos e estrutura produtiva vigente. Uma alternativa seria “ancorar” o modelo a alguma trajetória histórica conhecida, como o próprio VA observado, forçando a solução a seguir mais de perto os dados empíricos. Optou-se, porém, pela primeira abordagem, pois ela permite visualizar melhor certos mecanismos econômicos, especialmente a antecipação dos agentes frente à futura implementação do MC. Caso a trajetória de variáveis como a

migração setorial fosse amarrada aos dados históricos, esses movimentos de ajuste comportamental perderiam clareza na interpretação dos resultados.

Quando os dados são analisados de forma mais agregada, considerando apenas quatro grandes setores (grupos setoriais), verifica-se que os efeitos do mercado de carbono (MC) sobre o Valor Adicionado (VA) são inicialmente reduzidos, tornando-se mais perceptíveis ao longo do tempo. Até 2026, as variações são próximas de zero, mas a partir de 2027 as reduções se acentuam, atingindo valores entre -0,6% e -1,2% em 2030, dependendo do grupo.

A Figura 8 mostra que todos os grandes grupos econômicos registraram queda no VA em relação ao cenário-base, mas com intensidades distintas. Os grupos de bens industriais e monitorados apresentam as maiores reduções ao final do período (-1,23% e -1,17%, respectivamente), enquanto o grupo de serviços sofre a menor retração (-0,60%), refletindo sua menor exposição direta à precificação de carbono. O grupo de alimentos também é afetado, mas de forma intermediária, com queda de cerca de -0,81%.

Figura 8 – Queda acumulada do VA por grupo setorial (em %) depois da implementação do MC



Fonte: elaboração própria (2025).

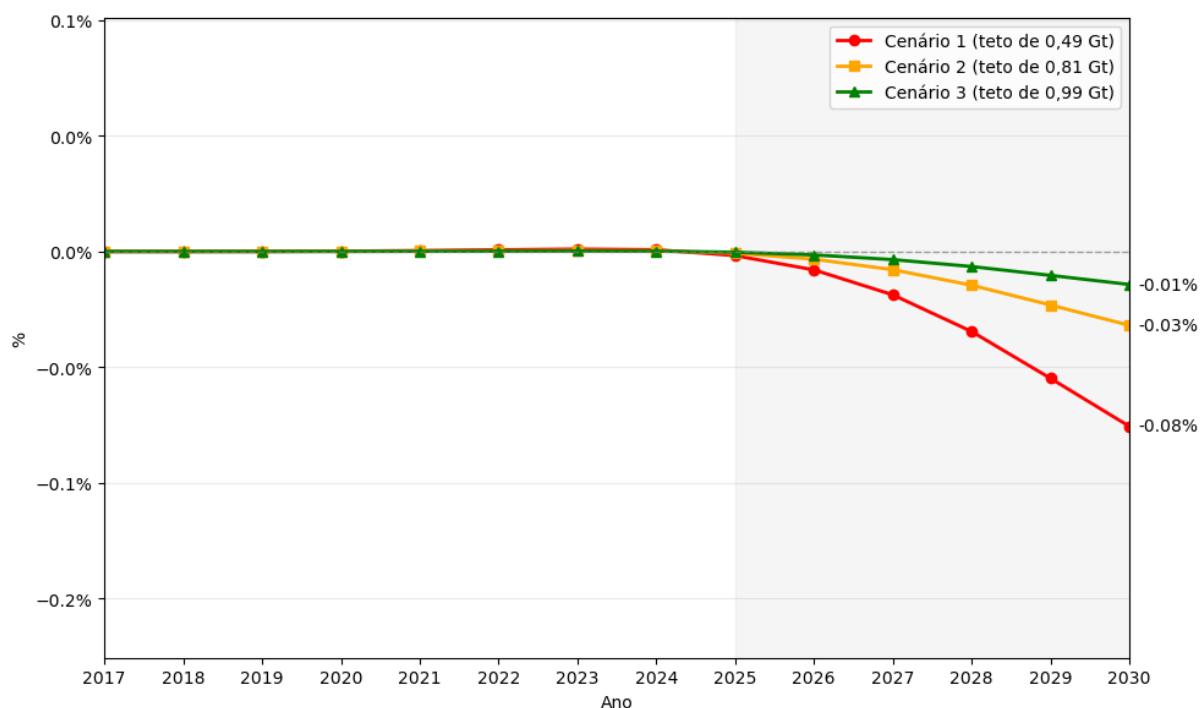
Esses resultados indicam que o impacto do MC é gradual e setorialmente diferenciado, evidenciando o caráter redistributivo da política. Setores mais intensivos em emissões ou com maior uso de insumos energéticos tendem a apresentar perdas mais expressivas, enquanto atividades menos intensivas sofrem efeitos mais limitados.

No longo prazo, a capacidade de recuperação dependerá da rapidez com que cada setor se adapta tecnologicamente e da forma como se posiciona politicamente. A agropecuária, em particular, é altamente intensiva em emissões²⁹ (Figura 8) o que a torna mais vulnerável à precificação de carbono.

4.1.2 Emprego

Mesmo após a introdução das restrições de emissões em 2026, o nível de emprego total praticamente não se altera em relação ao cenário-base, indicando que os efeitos de transição climática sobre o fator trabalho são reduzidos no agregado da economia (Figura 9); com apenas 30 mil empregos a menos em 2030 no cenário 1, mais restritivo, frente ao cenário-base. Assim, para compreender melhor os efeitos distributivos da política climática sobre o mercado de trabalho, a análise foi desdobrada em dois níveis: (i) por atividade econômica (Figura 10) e (ii) por grupo de setores produtivos (Figura 11).

Figura 9– Variação anual acumulada do Estoque do Emprego– Cenário-base versus cenários com MC

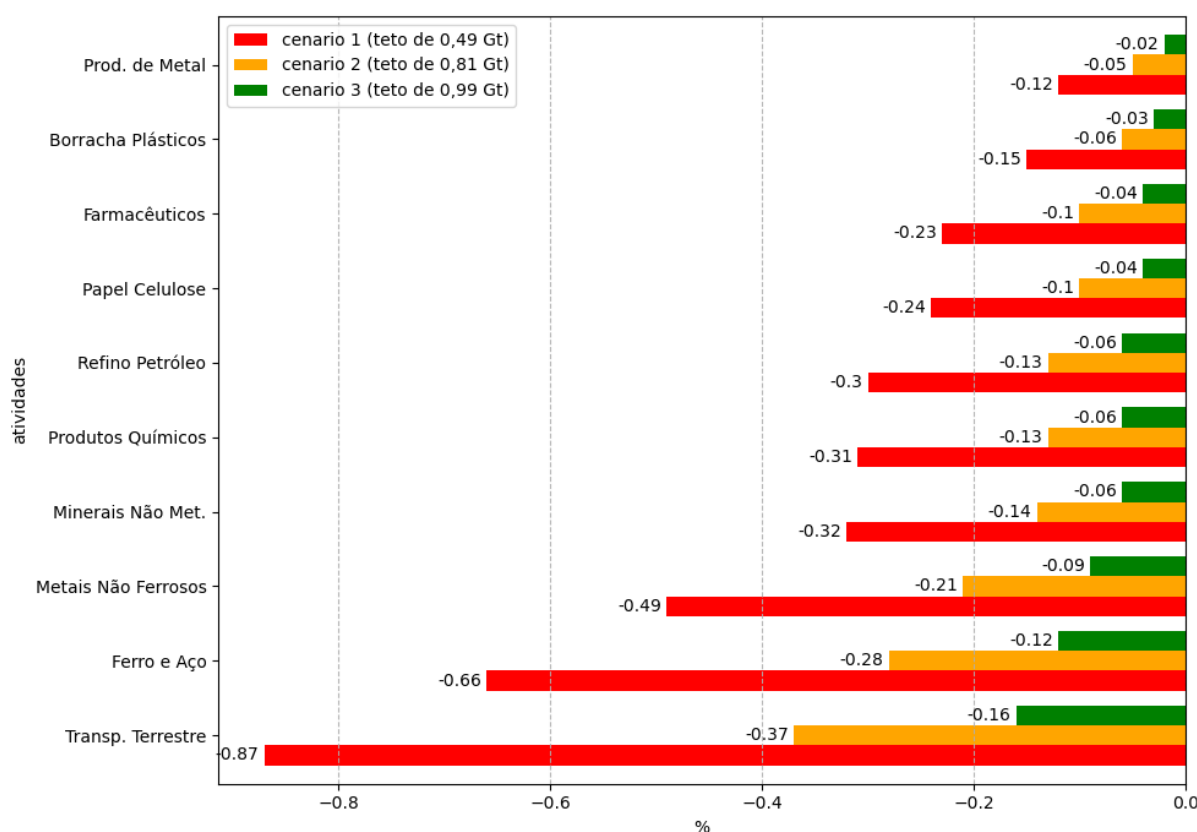


Fonte: elaboração própria (2025).

²⁹ Essa dependência é representada pela elasticidade de emissões.

A Figura 10 apresenta as dez atividades mais afetadas em termos de variação acumulada do emprego entre 2025 e 2030. Nota-se que os impactos negativos concentram-se em atividades intensivas em energia e emissões, como transporte terrestre, ferro e aço, e metais não ferrosos. A magnitude das reduções cresce com o rigor do teto de emissões, variando de $-0,87\%$ no transporte terrestre no cenário mais restritivo a $-0,16\%$ no cenário intermediário. Esses resultados sugerem que a política climática tende a deslocar emprego de setores mais poluentes para setores menos intensivos em carbono, sem, contudo, gerar perdas significativas no total de empregos da economia.

Figura 10 – Top 10 Setores mais afetadas - variação acumulada do Emprego (2025 a 2030)



Fonte: elaboração própria (2025).

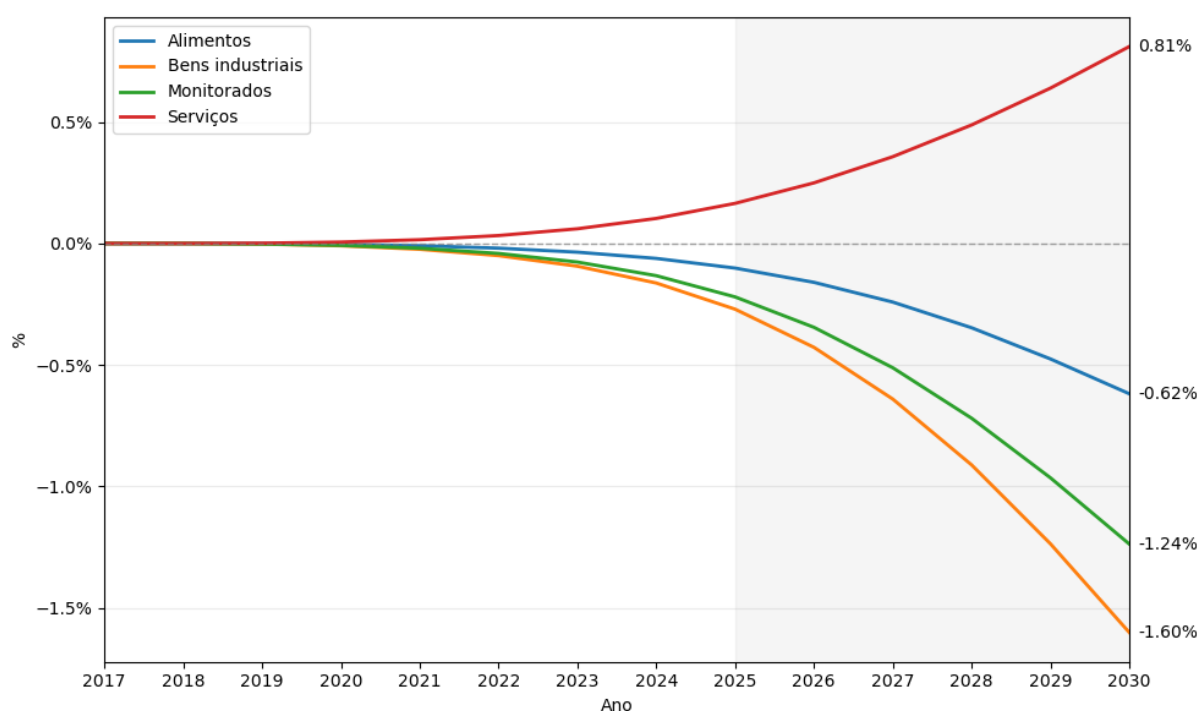
A Figura 11 aprofunda a análise da variação acumulada do número de empregados ao agregar os setores em quatro grupos de setores (ou apenas grupos): alimentos (A), bens industriais (I), monitorados (M) e serviços (S)³⁰. Observa-se que os grupos industriais e monitorados concentram as maiores reduções de emprego, alcançando $-1,60\%$ e $-1,24\%$ até

³⁰ Verificar no Apêndice A a composição de cada setor. Alguns exemplos de cada categoria incluem:

(i) Alimentos (A): agricultura e pecuária; (ii) Indústria (I): têxteis e fabricação de veículos; (iii) Serviços (S): comércio e transporte aquático; (iv) Monitorados (M): eletricidade e comunicação.

2030, respectivamente. Em contrapartida, o grupo de serviços apresenta trajetória positiva, com aumento acumulado de 0,81% no mesmo período. Em termos absolutos, a diferença no número de empregados entre o cenário base e o cenário mais restritivo (cenário 1) em 2030 é: aumento de 141 mil empregos no grupo de serviços contra redução de 14 mil empregos no grupo de alimentos, 54 mil no grupo de bens industriais e 104 mil no grupo de monitorados. Essa redistribuição indica um processo de realocação setorial da força de trabalho em resposta às mudanças no regime de emissões, com expansão relativa do emprego em serviços e retração nos grupos mais emissores.

Figura 11 – Variação acumulada do número de empregados por grupo de setores depois da implementação do MC



Fonte: elaboração própria (2025).

Esses achados indicam que, apesar do risco de transição imposto pelo novo regime climático, o MC não produz efeitos adversos persistentes sobre o emprego agregado, ao menos no horizonte temporal analisado. Essa evidência reforça a viabilidade política da política climática, especialmente se acompanhada de políticas compensatórias e programas de qualificação profissional para setores mais afetados.

Além desse mecanismos de realocação setorial, o reduzido custo macroeconômico da política decorre também da própria estrutura do modelo. Em particular, as emissões entram na função de produção como um fator adicional cuja participação no valor adicionado é relativamente pequena na maioria dos setores. Isso implica uma baixa elasticidade da produção

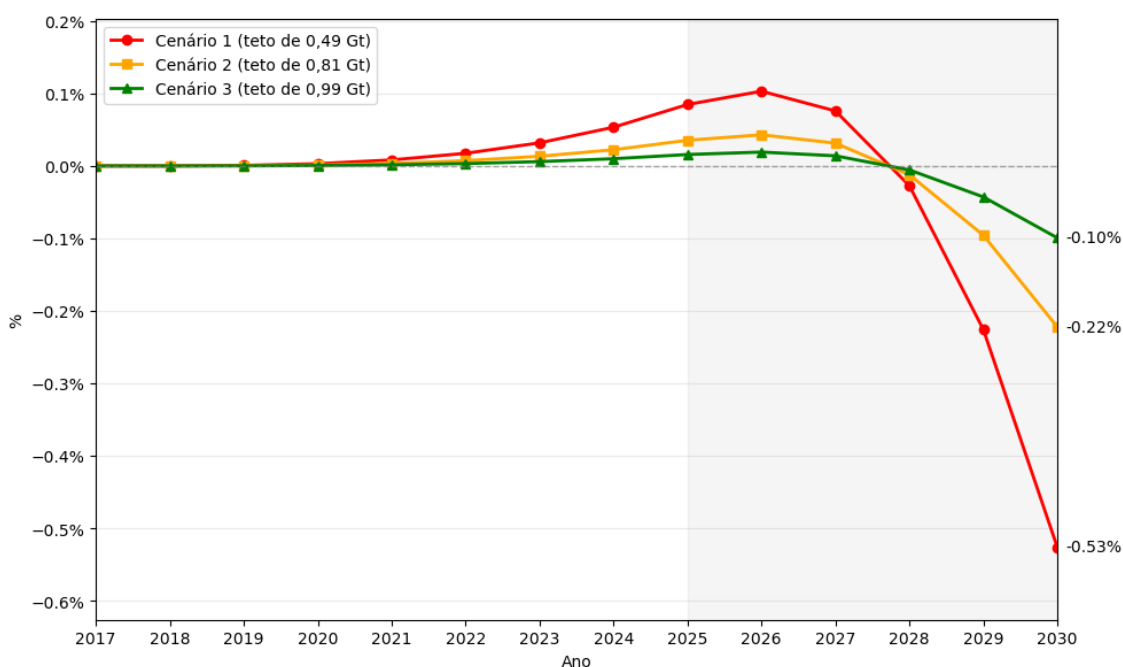
em relação ao custo das emissões, de modo que aumentos no preço do carbono elevam os custos marginais de forma limitada. Como consequência, mesmo políticas que impõem reduções expressivas nas emissões geram efeitos moderados sobre o valor adicionado agregado.

Em outras palavras, o modelo não transforma o choque ambiental em um choque produtivo de grande magnitude, uma vez que a elasticidade de emissão calibrada impõe um canal de transmissão relativamente fraco entre o preço do carbono e a produção.

4.1.3 Produtividade

A produtividade do trabalho, medida pela razão entre o valor adicionado e o número de trabalhadores, apresenta aumento em relação ao cenário-base até o momento de implementação do mercado de carbono. A partir dessa data, observa-se reversão na tendência e queda acumulada de 0,53% no cenário mais restritivo (Figura 12).

Figura 12 – Variação anual acumulada da produtividade (VA/L) – Cenário-base versus cenários com MC



Fonte: elaboração própria (2025).

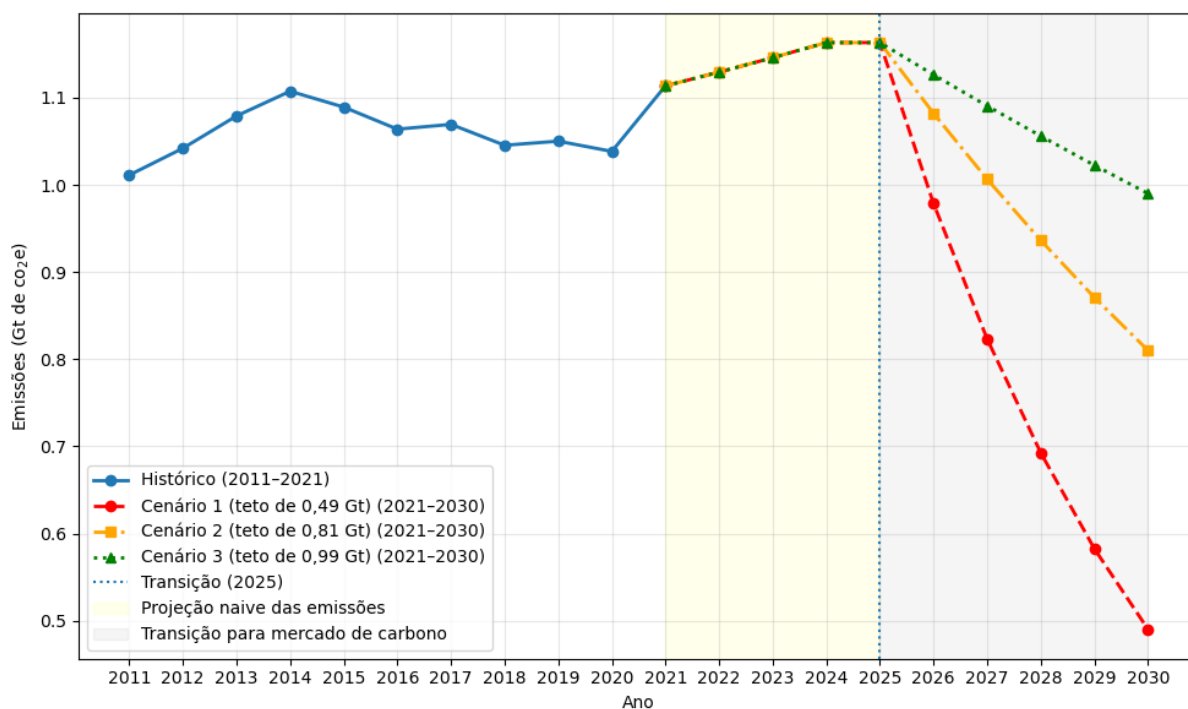
O aumento prévio à implementação da política é explicado pelo comportamento antecipatório dos trabalhadores, único grupo forward-looking no modelo. Antecipando os efeitos negativos da nova regulação, como elevação do custo de vida, menor demanda por trabalho e queda no salário real, os trabalhadores expandem sua oferta de trabalho nos períodos

anteriores ao choque, direcionando-se para grupos de setores menos expostos à política (como serviços). Esse movimento eleva temporariamente a produtividade agregada, pois parte da força de trabalho migra para setores com remunerações médias mais altas. Após a implementação da política, entretanto, o aumento de custos reduz o valor adicionado, e a produtividade do trabalho passa a cair de forma persistente.

Uma segunda interpretação possível para o comportamento de alta seguida de queda seria uma “corrida por eficiência”, em que os agentes aumentam investimentos e inovações limpas no período pré-política, mas reduzem esses esforços após o início da regulação, devido ao peso dos novos custos. Contudo, no modelo utilizado, o capital é fixo ao longo do tempo e não há progresso tecnológico, as firmas não ajustam suas emissões por unidade de produto. Assim, a hipótese de “corrida por eficiência” não se aplica aqui, embora possa se tornar relevante em extensões futuras do modelo que incorporem acumulação de capital e mudança tecnológica endógena.

4.1.4 Emissões

No que se refere às emissões de GEE, a Figura 13 mostra que entre os anos de 2021 e 2025, todos os cenários apresentam trajetórias idênticas, refletindo a ausência de instrumentos regulatórios adicionais no período. Nesse intervalo, as emissões apresentam aumentos progressivos em todos os cenários devido à projeção feita para os dados usando a média da variação das emissões nos últimos 5 anos (2017 a 2021).

Figura 13 – Evolução anual das Emissões de CO_2e – histórico e projeções

Fonte: elaboração própria (2025).

A mudança estrutural ocorre em 2026, ano em que o MC é introduzido no modelo. Nesse ponto, a diferença entre os cenários torna-se evidente: enquanto no cenário 1 as emissões caem cerca de 16%, no cenário 2 a redução é de 7% e no cenário 3 de apenas 3%. Esse resultado demonstra que a política de regulação por meio do MC altera efetivamente os incentivos econômicos das firmas, gerando uma resposta comportamental robusta com relação ao volume de emissões logo no primeiro ano de implementação da política.

Entre 2025 e 2030, os efeitos de cada regime regulatório tornam-se ainda mais claros. No cenário 1, a redução acumulada atinge 58%, refletindo o teto mais restritivo de emissões. No cenário 2, a queda é de 30%, evidenciando um ajuste mais moderado. Já no cenário 3, a redução chega a apenas 15%, sinalizando que tetos menos ambiciosos resultam em respostas mais tímidas ao longo do tempo.

Entretanto, a partir de 2030, as emissões no cenário com MC se estabilizariam, com variações anuais iguais de zero. Esse comportamento é explicado pelo próprio desenho do sistema de *Cap-and-trade* modelado na tese, no qual o volume total de permissões de emissão é fixado — uma vez que o teto global de emissões é alcançado, o volume total de CO_2e não se reduz automaticamente, a menos que o governo reduza progressivamente o limite de permissões disponíveis ao longo do tempo. Na ausência desse ajuste, as emissões permanecerão constantes no novo nível imposto pela política.

A estabilização pode refletir a limitação técnica e econômica de curto prazo para novos cortes adicionais. Depois do ajuste inicial, os setores mais intensivos em carbono já terão realizado as principais mudanças de processo viáveis com a tecnologia atual. Para continuar reduzindo emissões além desse ponto, seriam necessários investimentos adicionais em inovação, substituição de equipamentos ou mudanças mais estruturais, cujos custos marginais são crescentes e cuja adoção pode requerer prazos mais longos.

Esse resultado, portanto, reforça dois aspectos importantes. Em primeiro lugar, o MC mostra-se eficaz para promover redução rápida e significativa nas emissões, principalmente ao induzir os cortes mais “fáceis” ou de menor custo marginal. Tanto é verdade, que o cenário 3 mantém trajetória de reduções graduais, porém inferiores ao cenário 1. Em segundo lugar, a estabilização das emissões revela a importância do ajuste dinâmico do teto de permissões para que o sistema continue promovendo reduções ao longo do tempo. A ausência dessa calibragem pode comprometer o alinhamento com metas climáticas mais ambiciosas e de longo prazo.

Uma análise complementar da sensibilidade dos resultados à elasticidade de emissão é apresentada no Anexo F, no qual se discute a robustez do modelo sob diferentes valores de g^{nj} .

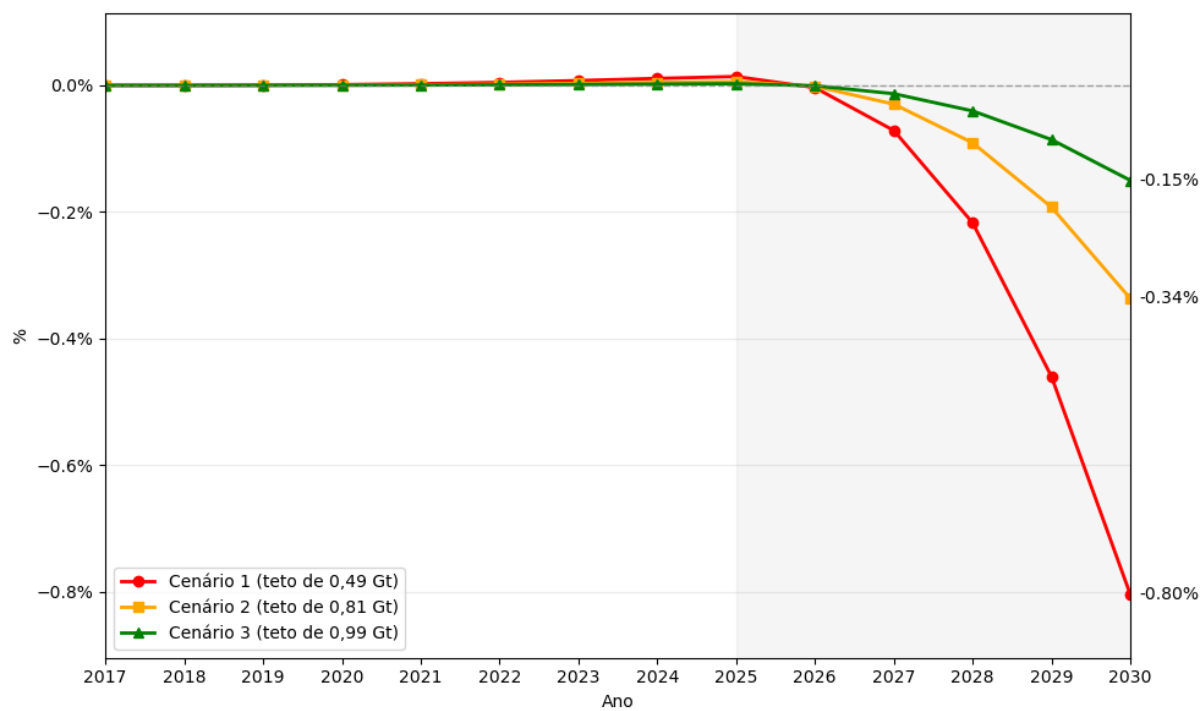
4.2 SE A AGROPECUÁRIA NÃO FIZER PARTE DO MERCADO DE CARBONO?

É provável que a agropecuária não faça parte do MC regulado, mesmo sendo um dos principais emissores de CO₂e no Brasil (Câmara dos Deputados, 2023). Se esse setor puder emitir livremente, as implicações serão significativas.

Os limites de emissões totais permanecem os mesmos; porém, à medida que o setor agropecuário cresce, impõe mais pressão sobre os outros setores que terão de cumprir metas de emissões cada vez maiores a um custo cada vez maior de trabalho e estruturas.

A Figura 14 mostra que o valor adicionado (VA) total cai menos quando a agropecuária é excluída do mercado de carbono, 0,83% com a inclusão do setor, contra 0,80% sem ele. Há três fatores que ajudam a explicar essa diferença. Primeiro, ao ficar fora do mercado de carbono, a agropecuária não enfrenta aumento direto de custos de produção associados à compra de permissões de emissão, o que evita uma queda mais acentuada no VA agregado. Segundo, como a agropecuária é um setor altamente intensivo em emissões, sua exclusão implica que os demais setores precisam reduzir ainda mais suas emissões para que o país alcance a meta de 0.8 Gt de CO₂e — o que eleva seus custos de ajustamento. Por fim, o primeiro efeito prevalece sobre o segundo: a redução de custos diretos na agropecuária mais do que compensa o esforço adicional exigido dos outros setores, resultando em uma queda menor do VA total.

Figura 14 – Variação anual do VA acumulada – Cenário-base versus cenário com MC



Fonte: elaboração própria (2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tese adaptou o modelo teórico CDP para analisar questões de risco de transição envolvendo políticas ambientais, especificamente ao incorporar as emissões das firmas como fator de produção. O modelo teórico desenvolvido permite a análise detalhada dos mercados de carbono como instrumento central de precificação das emissões. Uma proposta de metodologia para definição do novo parâmetro do modelo — a elasticidade das emissões — também foi apresentada, juntamente com análise prévia das restrições do modelo quando o mercado de carbono (MC) é implementado. Observou-se que o impacto sobre o VA não foi tão significativo quanto se antecipava, possivelmente devido à possibilidade de mitigar emissões por meio do uso de trabalho e estruturas, uma vez que incorporou-se as emissões no modelo como um fator de produção e não como um insumo; além de ser utilizada uma função de produção que possibilitasse essa substituição de fatores.

A introdução do MC em 2026 gera um impacto inicial moderado sobre a atividade econômica, mas promove reduções expressivas nas emissões de gases de efeito estufa. No cenário mais restritivo (teto de 0,49 Gt CO₂e), o Valor Adicionado (VA) nacional recua cerca de 0,83% até 2030, enquanto as emissões caem aproximadamente 58%. Nos cenários intermediário (0,81 Gt) e flexível (0,99 Gt), as perdas acumuladas de VA são menores — 0,35% e 0,15%, respectivamente — acompanhadas por reduções de 30% e 15% nas emissões. Em todos os casos, o emprego agregado se mantém praticamente estável, embora ocorram realocações entre setores: atividades intensivas em carbono, como transporte e metalurgia, perdem postos, enquanto serviços crescem. Assim, o MC impõe custos de transição de curto prazo, mas assegura cortes significativos de emissões e não impede a continuidade do crescimento econômico, reforçando seu papel como instrumento eficiente para alinhar desenvolvimento e mitigação climática.

Cabe ressaltar que os custos econômicos moderados associados à implementação do MC neste estudo refletem não apenas mecanismos de ajuste setorial, mas também hipóteses estruturais do modelo. Em particular, a baixa elasticidade de emissão limita o repasse do custo ambiental para a produção, o que contribui para amortecer os impactos macroeconômicos da política. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como condicionais à estrutura tecnológica e às elasticidades calibradas.

Diante dos resultados apresentados, pode-se afirmar que o Brasil dispõe de espaço para adotar políticas públicas capazes de reduzir emissões com custos econômicos relativamente modestos no curto prazo. Além disso, outras políticas complementares ao mercado de carbono

poderiam reduzir ainda mais o custo marginal de mitigação e suavizar os efeitos negativos sobre o Valor Adicionado e o emprego, tais como a destinação da receita do mercado para compensações setoriais, programas de qualificação profissional e estímulo ao desenvolvimento tecnológico. No que diz respeito à agropecuária, os resultados indicam que sua exclusão do mercado de carbono pode reduzir ligeiramente a perda agregada de VA, mas, ao mesmo tempo, aumenta a pressão sobre os demais setores e compromete a efetividade da política, dado o peso das emissões do setor no país. Por fim, é importante destacar que, embora metas mais ambiciosas envolvam custos econômicos de transição — como evidenciado nos cenários mais restritivos — esses custos tendem a ser compensados por benefícios de longo prazo, como maior segurança climática e redução de riscos físicos. Portanto, políticas públicas bem desenhadas, implementadas de forma gradual e acompanhadas de instrumentos compensatórios, permitem ao Brasil avançar rumo a metas climáticas robustas sem impor perdas substanciais ao crescimento econômico.

Apesar de o modelo teórico possibilitar diversas abordagens empíricas, a análise preditiva desta pesquisa está direcionada exclusivamente para implementação de um MC, instrumento central na avaliação dos efeitos econômicos associados à precificação das emissões. Essa decisão baseia-se na direção política do Brasil em prol de um MC e no alto custo envolvido na tradução do modelo teórico para código.

O modelo teórico atual não está adaptado para choques que não sejam de curto prazo (cinco anos à frente) — uma vez que não há dinâmica de investimento no modelo e, portanto, o estoque de estruturas é fixo. Da forma como o modelo se encontra, toda a redução de emissões resultará em queda na produção. Para representar o MC no longo prazo, é necessário que as firmas se adaptem para emitir menos CO₂e.

No modelo, a adaptação pode ser feita de duas formas: 1) permitir que a quantidade de fatores, como trabalho e estruturas, nas regiões aumente; 2) possibilitar o progresso tecnológico, que se traduz na redução da elasticidade de emissões que representa a dependência das firmas por emissões.

Caliendo, Dvorkin e Parro (2019, p. 745) explicam que é possível adaptar o modelo atual para que as estruturas possa variar, afirmando:

“Such an extension would require departing from the perfect foresight assumption. Our approach will not necessarily fail if one were to relax the assumption of perfect foresight, but adding rational expectations would imply solving the model for every possible realization of fundamentals in the future, which in our

application, with more than 1000 endogenous state variables, is a computational constraint.”

Acredita-se que não se enfrentará limitações computacionais ao implementar o progresso estocástico no modelo desenvolvido, uma vez que incorpora melhorias que aceleram o processo computacional. No entanto, caso as adaptações não se revelem adequadas, ainda será viável alterar a metodologia utilizada para a resolução do modelo. Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) recorrem à técnica de substituição iterativa para encontrar a solução, que é reconhecida por demandar número maior de iterações em comparação com outras abordagens metodológicas.

Outra limitação do modelo é a simplificação do MC ao tratar a oferta de permissões de poluição como exogenamente determinada pelo governo, com as firmas comprando diretamente e sem permitir negociação secundária. A receita obtida com essas permissões é direcionada exclusivamente aos rentistas, o que pode não refletir a dinâmica real dos mercados.

Com relação à possibilidade da criação de um MC no Brasil — que levaria à migração da produção de bens intensivos em emissões para outras regiões —, a teoria sugere que sim; mas o exercício empírico não capturou esse efeito. De modo geral, quando o MC afeta de forma negativa a produção de um bem j no Brasil, a produção desse bem também é impactada negativamente no exterior.

Então, para aumentar a precisão do modelo, é preciso redefinir as condições iniciais. O uso de dados reais da atualização das relações comerciais, ao menos para o período entre 2018 e 2020, pode ajudar a evitar resultados que se desviem significativamente da realidade observada.

Outros pontos de melhoria do modelo incluem: regionalização (desagregar os dados brasileiros por Ufs), incorporar dinâmica do uso da terra (algo mais desafiador pois engloba atividades ilegais de desmatamento), dinâmica de investimento (o que possibilitaria variações no estoque de estruturas) e progresso tecnológico no abatimento de emissões. Ao abordar esses pontos, trabalhos futuros poderão refinar ainda mais o modelo e fornecer *insights* mais robustos acerca dos impactos das políticas climáticas no Brasil.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **Emissão de CO₂ pela Petrobras tem redução de 40% em relação a 2015**. 2025. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2025-05/emissao-de-co2-pela-petrobras-tem-reducao-de-40-em-relacao-2015> . Acesso em: 8 nov. 2025.

ALLEN, Treb; ARKOLAKIS, Costas; TAKAHASHI, Yuta. Universal gravity. **Journal of Political Economy**, v. 128, n. 2, p. 393–433, 2020.

AN, Kangxin. **CGEStudyOnLowCarbonPolicy**. Zenodo, , 26 out. 2022. Disponível em: <<https://zenodo.org/record/7252409>>. Acesso em: 13 jul. 2025.

ANTRÀS, Pol; CHOR, Davin. On the measurement of upstreamness and downstreamness in global value chains. **World trade evolution: Growth, productivity and employment**, v. 5, p. 126–194, 2018.

ARMINGTON, Paul S. A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production (Une théorie de la demande de produits différenciés d’après leur origine) (Una teoría de la demanda de productos distinguiéndolos según el lugar de producción). **Staff Papers-International Monetary Fund**, p. 159–178, 1969.

ARTUÇ, Erhan; CHAUDHURI, Shubham; MCLAREN, John. Trade shocks and labor adjustment: A structural empirical approach. **American economic review**, v. 100, n. 3, p. 1008–1045, 2010.

BABATUNDE, Kazeem Alasinrin; BEGUM, Rawshan Ara; SAID, Fathin Faizah. Application of computable general equilibrium (CGE) to climate change mitigation policy: A systematic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 61–71, 2017.

BAUMOL, William J. On taxation and the control of externalities. **The American Economic Review**, v. 62, n. 3, p. 307–322, 1972.

BID. BID, CEPAL e Grupo Banco Mundial estimam que atuação tempestiva evitou impacto de 1,1 ponto percentual do PIB no Rio Grande do Sul. *[S.l.]*: Banco Interamericano de Desenvolvimento, Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe, Grupo Banco Mundial, 2024. Disponível em: <<https://www.iadb.org/pt-br/noticias/bid-cepal-e-grupo-banco-mundial-estimam-que-atuacao-tempestiva-evitou-impacto-de-11-ponto>>. Acesso em: 12 jul. 2025.

BOARD, Financial Stability. Task force on climate-related financial disclosures. **Final Report: Recommendations of the Task Force on Climate-Related Financial Disclosures**, 2017.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Fatores de conversão 2022**. Brasília: ANP. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais->

de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2022/outras-pecas-documentais/fatores-conversao-2022.pdf . Acesso em: 8 nov. 2025.

BURNIAUX, Jean-Marc *et al.* GREEN a Multi-Sector, Multi-Region General Equilibrium Model for Quantifying the Costs of Curbing CO2 Emissions: A Technical Manual: OECD Economics Department Working Papers. *[S.l.]*: Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), 1 jan. 1992. Disponível em: <https://www.oecd.org/en/publications/green-a-multi-sector-multi-region-general-equilibrium-model-for-quantifying-the-costs-of-curbing-co2-emissions_744101452772.html>. Acesso em: 13 jul. 2025.

CALIENDO, Lorenzo; DVORKIN, Maximiliano; PARRO, Fernando. Trade and labor market dynamics: General equilibrium analysis of the china trade shock. **Econometrica**, v. 87, n. 3, p. 741–835, 2019.

CALIENDO, Lorenzo; PARRO, Fernando. Estimates of the Trade and Welfare Effects of NAFTA. **The Review of Economic Studies**, v. 82, n. 1, p. 1–44, 2015.

CALIENDO, Lorenzo; PARRO, Fernando. Chapter 4 - Trade policy. *In*: GOPINATH, Gita; HELPMAN, Elhanan; ROGOFF, Kenneth (Orgs.). **Handbook of International Economics: International Trade, Volume 5**. Handbook of International Economics. *[S.l.]*: Elsevier, 2022. v. 5 p. 219–295.

CÂMARA DOS DEPUTADOS. **Governo conclui proposta de regulamentação do mercado de carbono e espera aprovação até a COP 30**. , 2023. Disponível em: <<https://www.camara.leg.br/noticias/979585-GOVERNO-CONCLUI-PROPOSTA-DE-REGULAMENTACAO-DO-MERCADO-DE-CARBONO-E-ESPERA-APROVACAO-ATE-A-COP-30>>

CARDENETE, Manuel Alejandro; GUERRA, Ana-Isabel; SANCHO, Ferran. **Applied general equilibrium**. *[S.l.]*: Springer, 2017.

CC. **Brasil se compromete a reduzir emissões de carbono em 50% até 2030**. Casa Civil da Presidência da República, , 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2021/novembro/brasil-se-compromete-a-reduzir-emissoes-de-carbono-em-50-ate-2030>>

COASE, Ronald Harry. The problem of social cost. **The journal of Law and Economics**, v. 56, n. 4, p. 837–877, 2013.

COLANTONE, Italo; OTTAVIANO, Gianmarco IP; SCHMITZ, Tom. Regional and Aggregate Economic Consequences of the Green Transition. **Available at SSRN 4562341**, 2023.

COPELAND, Brian R.; TAYLOR, M. Scott. **Trade and the environment: Theory and evidence**. *[S.l.]*: Princeton university press, 2013.

DEKLE, Robert; EATON, Jonathan; KORTUM, Samuel. Unbalanced trade. **American Economic Review**, v. 97, n. 2, p. 351–355, 2007.

DEKLE, Robert; EATON, Jonathan; KORTUM, Samuel. Global rebalancing with gravity: Measuring the burden of adjustment. **IMF Staff Papers**, v. 55, n. 3, p. 511–540, 2008.

DIXIT, Avinash K.; STIGLITZ, Joseph E. Monopolistic Competition and Optimum Product Diversity. **The American Economic Review**, 1977.

DIXON, Peter B.; JORGENSON, Dale. **Handbook of computable general equilibrium modeling**. [S.l.]: Newnes, 2012. v. 1

EATON, Jonathan; KORTUM, Samuel. Technology, geography, and trade. **Econometrica**, v. 70, n. 5, p. 1741–1779, 2002.

EMBRAPA. **Entenda o Código Florestal**. , 2025b. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/codigo-florestal/entenda-o-codigo-florestal>>

EMBRAPA. **Agricultura de Baixo Carbono - Sobre o Tema**. , 2025a. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-agricultura-de-baixo-carbono/sobre-o-tema>>

EPE. **Balanco energético nacional**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>.

FISCHER, Carolyn; PREONAS, Louis. Combining policies for renewable energy: Is the whole less than the sum of its parts? **Resource for the future discussion paper**, n. 10–19, 2010.

GLOTOT, Xavier; BENGIO, Yoshua. Understanding the difficulty of training deep feedforward neural networks. *In*: JMLR Workshop and Conference Proceedings, 2010.

GOULDER, Lawrence H.; PARRY, Ian WH. Instrument choice in environmental policy. **Review of environmental economics and policy**, 2008.

GOULDER, Lawrence H.; SCHEIN, Andrew R. Carbon taxes versus cap and trade: a critical review. **Climate Change Economics**, v. 4, n. 03, p. 1350010, 2013.

GREENSTONE, Michael. Did the Clean Air Act cause the remarkable decline in sulfur dioxide concentrations? **Journal of environmental economics and management**, v. 47, n. 3, p. 585–611, 2004.

HAN, Minsoo; MOON, Jin-Young. New Computable General Equilibrium Analysis of the Effects of Greenhouse Gas Emissions Reduction Policies. **Environmental and Resource Economics Review**, v. 30, n. 2, p. 169–205, 2021.

HE, Kaiming *et al.* Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on imagenet classification. *In*: 2015

HÜBLER, Michael; POTHEN, Frank. Can smart policies solve the sand mining problem? **Plos one**, v. 16, n. 4, p. e0248882, 2021.

INPA. Secas e cheias devem tornar-se mais intensas e frequentes na Amazônia nas próximas décadas, aponta pesquisador do Inpa — Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA. Disponível em: <<https://www.gov.br/inpa/pt-br/assuntos/noticias/secas-e-cheias-devem-se-tornar-mais-intensas-e-frequentes-na-amazonia-nas-proximas-decadas-aponta-pesquisador-do-inpa>>. Acesso em: 13 jul. 2025.

INTEIRO, Política por. **NDC: Analysis of the 2022 update submitted by the Government of Brazil**. Disponível em: <https://www.politicaporinteiro.org/wp-content/uploads/2022/04/Brazils-NDC-2022-analysis_V0.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2024.

IPCC. **IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change**. Intergovernmental Panel on Climate Change, , 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch>>

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), , 2025. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch>>

JUDD, Kenneth L. **Climate policies and oil producer market power**. Stanford, California: Stanford University, abr. 2008.

KOSNIK, Lea-Rachel. Cap-and-trade versus carbon taxes: which market mechanism gets the most attention? **Climatic Change**, v. 151, n. 3, p. 605–618, 2018.

KRUGMAN, Paul; OTHERS. Scale economies, product differentiation, and the pattern of trade. **American economic review**, v. 70, n. 5, p. 950–959, 1980.

MAPBIOMAS. **Relatório Anual de Desmatamento 2023 (RAD 2023) - Versão Completa**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <https://alerta.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/17/2024/10/RAD2023_COMPLETO_15-10-24_PORTUGUES.pdf>.

MARENGO, José A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25, 22 nov. 2014.

MCTI. **6ª Edição das Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa**. [S.l.]: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>>.

MCTI. **Relatórios de Referência Setorial - SIRENE**. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, , 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-de-referencia-setorial>>

MEADE, James Edward. The theory of economic externalities: The control of environmental pollution and similar social costs. [S.l.]: Brill Archive, 1973. v. 2

MELITZ, Marc J. The impact of trade on intra-industry reallocations and aggregate industry productivity. **econometrica**, v. 71, n. 6, p. 1695–1725, 2003.

MELLO, Natália Girão Rodrigues de; ARTAXO NETTO, Paulo Eduardo. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. **Revista do Instituto de Estudos Brasileiros**, p. 108, abr. 2017.

METCALF, Gilbert E. A Proposal for a US Carbon Tax Swap: An Equitable Tax Reform to Address Global Climate Change," The Hamilton Project, Brookings Institution. , 2007.

MMA. **Compromissos Estabelecidos na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Ministério do Meio Ambiente, , 2018. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/15142-contribui%C3%A7%C3%B5es-para-o-documento-base.html>>

MMA. **Acordo de Paris**. Ministério do Meio Ambiente, , 2025a. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>

MMA. **Linha do Tempo das Medidas Envolvendo Mudanças Climáticas**. Ministério do Meio Ambiente, , 2025c. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/component/k2/item/15164-linha-do-tempo-das-medidas-envolvendo-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas.html>>

MMA. **Fundo Nacional sobre Mudança do Clima**. Ministério do Meio Ambiente, , 2025b. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/secex/dfre/fundo-nacional-sobre-mudanca-do-clima>>

MMA. **Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)**. Ministério do Meio Ambiente, , 2025d. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima.html>>

MTE. **Perguntas Frequentes: Qual é a definição da base RAISMIGRA?** , 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/estatisticas-trabalho/perguntas-frequentes>>. Acesso em: 20 maio. 2024

MURRAY, Brian C.; NEWELL, Richard G.; PIZER, William A. Balancing cost and emissions certainty: An allowance reserve for cap-and-trade. **Review of Environmental Economics and Policy**, 2009.

NORDHAUS, William D. To tax or not to tax: Alternative approaches to slowing global warming. **Review of Environmental Economics and policy**, 2007.

OLIVEIRA, João Maria de. Efeitos da equalização tributária regional/setorial no Brasil: uma aplicação de equilíbrio geral dinâmico. , 2020.

PEARCE, David. THE LIMITS OF COST-BENEFIT ANALYSIS AS A GUIDE TO ENVIRONMENTAL POLICY. **Kyklos**, v. 29, n. 1, 1976.

PIGOU, Arthur. **The economics of welfare**. [S.l.]: Routledge, 2017.

PIZER, William A. Combining price and quantity controls to mitigate global climate change. **Journal of public economics**, v. 85, n. 3, p. 409–434, 2002.

RIO GRANDE DO SUL. DEFESA CIVIL. **Boletins sobre o impacto das chuvas no RS - Portal do Estado do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<https://www.estado.rs.gov.br/boletins-sobre-o-impacto-das-chuvas-no-rs>>. Acesso em: 13 jul. 2025.

RODRIGUES, Waldecy. Valoração econômica dos impactos ambientais de tecnologias de plantio em região do cerrado. *Rev. Econ. Sociol. Rural* 43 (1) • Mar 2005. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032005000100008>. Acesso em 7 nov. 2025.

ROGELJ, Joeri *et al.* Net-zero emissions targets are vague: three ways to fix. **Nature**, v. 591, n. 7850, p. 365–368, 2021.

ROMER, Paul M. The Origins of Endogenous Growth. **Journal of Economic Perspectives**, v. 8, n. 1, p. 3–22, 1 fev. 1994.

SHAPIRO, Joseph S.; WALKER, Reed. Why is pollution from US manufacturing declining? The roles of environmental regulation, productivity, and trade. **American Economic Review**, v. 108, n. 12, p. 3814–3854, 2018.

SHOBE, William M.; BURTRAW, Dallas. Rethinking environmental federalism in a warming world. **Climate Change Economics**, v. 3, n. 04, p. 1250018, 2012.

SOUZA, Gustavo de; LI, Haishi. Robots, Tools, and Jobs: Evidence from Brazilian Labor Markets. **Chicago Fed Working Paper**, n. 2023–42, nov. 2023.

SPIPKER, Gregor; NUGENT, Nick. Voluntary carbon market derivatives: Growth, innovation & usage. **Borsa Istanbul Review**, v. 22, p. S109–S118, dez. 2022.

STAVINS, Robert N. **A US cap-and-trade system to address global climate change**. Washington, DC: The Brookings Institution, 2007.

STERNER, Thomas; CORIA, Jessica. Policy instruments for environmental and natural resource management. **Routledge**, 2011.

STRAND, Jon. Strategic climate policy with offsets and incomplete abatement: Carbon taxes versus cap-and-trade. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 66, n. 2, p. 202–218, 2013.

TIAN, Kailan *et al.* Regional trade agreement burdens global carbon emissions mitigation. **Nature communications**, v. 13, n. 1, p. 408, 2022.

VALE. **Decarbonization strategy and management**. 2025. Disponível em: <https://vale.com/esg/decarbonization-strategy-and-management> . Acesso em: 8 nov. 2025.

VIEIRA, Liszt; CADER, Renato. A política ambiental do Brasil ontem e hoje. **Revista Eco**, v. 21, p. 129, 2007.

WEITZMAN, Martin L. Prices vs. Quantities. **The Review of Economic Studies**, v. 41, n. 4, p. 477–491, 1974.

WEITZMAN, Martin L. **Prices or quantities dominate banking and borrowing**. [S.l.]: National Bureau of Economic Research, 2018.

APÊNDICE A – SETORES ECONÔMICOS E AGRUPAMENTOS

O Quadro 4 apresenta a agregação dos setores do modelo GTAP com base nas suas similaridades econômicas. Os códigos originais do GTAP foram organizados em grandes grupos representativos da estrutura produtiva brasileira, contemplando as atividades de alimentos (A), bens industriais (I), serviços (S) e bens monitorados (M). Essa classificação visa facilitar análises setoriais.

Quadro 4 – Agregação Setorial dos Códigos GTAP

Setor	Códigos GTAP9 (39 atividades)	Códigos GTAP11 (46 atividades)	Descrição	Agrupamento Setorial
Agricultura.	pdr, wht, gro, v_f, osd, c_b, pfb, ocr	pdr, wht, gro, v_f, osd, c_b, pfb, ocr	Arroz, trigo, grãos, hortaliças, oleaginosas, cana, fibras, outros cultivos.	A
Pecuária.	ctl, oap, wol	ctl, oap, wol	Gado, produtos animais, lã.	A
Floresta/Pesca/Aquicultura	frs, fsh	frs, fsh	Silvicultura, pesca.	A
Mineração de Carvão.	coa	coa	Carvão.	I
Petróleo e Gás.	oil, gas	oil, gas	Petróleo, gás.	I
Mineração de Metais.	omn	renomeado para: oxt	Outros minerais.	I
Produção Animal.	rmk, cmt, omt, mil	rmk, cmt, omt, mil	Leite cru, carnes, laticínios.	A
Refino de Açúcar.	sgr	sgr	Açúcar.	A
Alimentos Processados.	vol, pcr, ofd	vol, pcr, ofd	Óleos vegetais, arroz processado, outros alimentos.	A
Bebidas e Fumo.	b_t	b_t	Bebidas e produtos de tabaco.	A
Têxteis.	tex	tex	Têxteis.	I
Vestuário.	wap	wap	Vestuário.	I
Couro.	lea	lea	Produtos de couro.	I
Madeira.	lum	lum	Produtos de madeira.	I
Papel e Gráfica.	ppp	ppp	Papel e impressão.	I
Refino/Biocombustíveis.	p_c	p_c	Produtos de petróleo e carvão.	M
Químicos/Plásticos/Borracha.	crp	desagregados em: chm, bph, rpp	Produtos químicos, plásticos e borracha.	I
Fabricação Min. Não-Metal.	nmm	nmm	Produtos minerais não metálicos.	I
Fabricação Ferro e Aço.	i_s	i_s	Metais ferrosos.	I
Fabricação Metais não Ferrosos.	nfm	nfm	Metais não ferrosos.	I

Continua

Continuação

Setor	Códigos GTAP9 (39 atividades)	Códigos GTAP11 (46 atividades)	Descrição	Agrupamento Setorial
Produtos Metálicos.	fmp	fmp	Produtos metálicos.	I
Componentes Eletrônicos.	ele	ele	Fabricação de Equipamentos eletrônicos.	I
Equipamentos Eletrônicos.	-	eeq	Fabricação de componentes eletrônicos.	I
Máquinas e Equipamentos.	ome	ome	Máquinas e equipamentos diversos.	I
Veículos e Peças.	mvh	mvh	Veículos e peças.	I
Equipamentos Transporte.	otn	otn	Equipamentos de transporte.	I
Diversos Manufaturados.	omf	omf	Manufaturas diversas.	I
Eletricidade e Gás.	ely, gdt	ely, gdt	Eletricidade e gás.	M
Água e Esgoto.	wtr	wtr	Água e esgoto.	M
Construção.	cns	cns	Construção civil.	S
Comércio.	trd	trd	Comércio.	S
Transporte Terrestre.	otp	otp	Transporte terrestre.	M
Transporte Aquático.	wtp	wtp	Transporte aquático.	S
Transporte Aéreo.	atp	atp	Transporte aéreo.	S
Transporte Auxiliar.	-	whs	Transporte Auxiliar.	S
Alojamento.	-	asf	Alojamento.	S
Comunicação/TIC.	cmn	cmn	Comunicações.	M
Financeiro e Seguros.	ofi, isr	ofi, isr	Serviços financeiros e seguros.	S
Imobiliário.	dwe	desagregado em: dwe, rsa	Serviços imobiliários.	S
Serviços Empresariais.	obs	obs	Serviços empresariais.	M
Administração Pública.	osg	desagregado em: osg, edu, hht	Administração pública, defesa, saúde, educação.	S
Serviços Domésticos/Outros.	ros	ros	Serviços domésticos e outros.	M

Fonte: elaboração própria (2025).

Nota: Agrupamento Setorial: Alimentos = A; Indústria = I; Serviços = S; Monitorados = M.

APÊNDICE B – RESUMO ESTATÍSTICO DAS VARIÁVEIS ECONÔMICAS

Esta seção apresenta o resumo estatístico das principais variáveis econômicas utilizadas como condições iniciais no modelo, com base nos dados do GTAP 11. As variáveis representam, respectivamente, o valor da produção, a remuneração do trabalho e a remuneração do capital; todas medidas em milhões de dólares norte-americanos (USD) no ano base de 2017. Os resultados são reportados por região e permitem identificar a heterogeneidade estrutural entre economias desenvolvidas e em desenvolvimento.

A Tabela 5 correspondente ao valor inicial da produção e evidencia a elevada concentração da atividade econômica nas grandes economias, como China, Estados Unidos e União Europeia, que apresentam médias de produção superiores a 600 mil milhões de USD por atividade. As regiões emergentes — como Brasil e Mercosul — exibem valores médios significativamente menores, refletindo diferenças de escala e produtividade. A alta dispersão dos dados (desvios padrão elevados) sugere heterogeneidade relevante entre atividades dentro de cada região, especialmente nas economias mais diversificadas.

Tabela 5 - Valor inicial da produção em 2017 em milhões de USD (X^{nj})

País/ Região	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º quartil	Mediana	3º quartil	Máximo
Brasil	72.761	75.337	2.297	21.645	40.453	92.432	348.560
China	661.293	563.835	23.620	263.754	582.891	877.288	3.127.742
Estados Unidos	710.445	940.981	38.830	174.579	311.239	757.837	4.393.548
Mercosul	24.637	24.797	167	7.893	14.982	36.361	107.405
União Europeia	724.493	747.145	22.273	245.050	420.835	846.302	3.058.572
Ásia	607.362	529.085	48.428	229.875	406.555	832.661	2.571.181
Assoc. Mercosul	36.179	33.182	1.151	13.370	22.520	52.278	148.636
Resto das Américas	139.938	144.509	3.458	41.701	84.530	189.219	643.386
Oriente Médio	102.975	93.563	1.113	34.785	86.545	136.565	517.767
África	84.189	71.294	13.540	34.571	58.663	109.828	329.945
Resto do Mundo	239.583	257.419	11.401	83.729	149.063	273.143	1.052.283

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Nota: número de observações igual a 46 por região.

Os resultados para a remuneração do trabalho demonstrados na Tabela 6, indicam que Estados Unidos, União Europeia e China concentram a maior parcela da renda do trabalho global. O valor médio da massa salarial dos setores nos Estados Unidos ultrapassa 200 mil milhões de USD, contrastando com médias inferiores a 10 mil milhões de USD em regiões

menores, como o Mercosul e a África. O desvio padrão elevado nas economias desenvolvidas reflete a variação substancial entre setores intensivos e menos intensivos em trabalho. Em contraste, nas regiões de menor renda, a distribuição é mais homogênea, ainda que em níveis absolutos mais baixos.

Tabela 6 – Valor inicial da remuneração do trabalho em 2017 em milhões de USD (wL^{nj})

País / Região	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º quartil	Mediana	3º quartil	Máximo
Brasil	22.708	33.749	15	3.368	7.962	27.526	138.947
China	125.262	147.846	929	32.046	65.211	131.241	587.730
Estados Unidos	214.730	384.112	2.832	19.051	50.559	164.850	1.900.935
Mercosul	7.322	10.242	1	1.144	2.550	8.903	40.588
União Europeia	169.557	233.487	2.272	25.730	76.340	183.436	935.727
Ásia	131.645	169.332	5.079	27.766	53.344	175.272	722.631
Assoc. Mercosul	9.354	11.787	477	1.957	4.049	11.925	45.298
Resto das Américas	36.571	51.885	1.069	6.899	11.808	43.009	182.871
Orientes Médio	21.204	27.312	67	4.532	11.969	24.317	111.044
África	20.535	26.317	1.224	4.059	7.826	28.893	134.667
Resto do Mundo	54.253	79.068	1.354	10.254	21.665	58.427	321.342

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Nota: número de observações igual a 46 por região.

A remuneração do capital apresenta padrão semelhante ao observado na renda do trabalho, mas com valores médios ainda mais elevados em economias desenvolvidas, indicando maior intensidade de capital na estrutura produtiva. Estados Unidos, União Europeia e China lideram novamente em termos absolutos, enquanto regiões como África e Mercosul mantêm níveis moderados (Tabela 7). A dispersão significativa (com máximos acima de 2 trilhões de USD) reflete a forte heterogeneidade na acumulação de capital e na rentabilidade setorial entre as regiões analisadas.

Tabela 7 – Valor inicial da remuneração do capital em 2017 em milhões de USD (rH^{nj})

País / Região	Média	Desvio padrão	Mínimo	1º quartil	Mediana	3º quartil	Máximo
Brasil	15.097	30.861	53	1.374	4.615	13.103	185.994
China	106.825	115.883	2.044	34.710	68.080	126.258	544.816
Estados Unidos	167.626	338.775	264	20.805	54.643	134.891	2.013.019
Mercosul	7.156	13.940	3	1.381	2.881	8.307	91.533
União Europeia	159.620	262.816	4.105	28.348	66.415	144.834	1.459.760
Ásia	147.479	198.394	7.100	47.955	69.282	152.592	949.544
Assoc. Mercosul	9.602	11.124	433	2.313	5.673	13.351	53.524
Resto das Américas	37.987	57.112	1.966	8.650	17.960	38.235	276.320
Orient Médio	40.220	79.859	87	5.249	23.399	42.895	523.522
África	23.138	27.366	2.007	5.383	11.108	29.961	119.397
Resto do Mundo	62.115	98.042	1.680	11.560	21.324	53.129	512.934

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Nota: número de observações igual a 46 por região.

A Tabela 8 apresenta indicadores de intensidade de emissões e estrutura produtiva por região e grande grupo setorial. As razões E/wL e E/VA medem, respectivamente, as emissões de gases de efeito estufa (em Gg CO₂e) por unidade de massa salarial e por unidade de valor adicionado, permitindo avaliar a eficiência ambiental relativa das economias. Já a coluna VA(%) indica a participação de cada grupo setorial no valor adicionado total, evidenciando o peso econômico de cada atividade. Essa combinação de indicadores permite identificar quais regiões e grupos setoriais apresentam maior intensidade de carbono e, simultaneamente, maior relevância na geração de renda, fornecendo subsídios para compreender os desafios da transição produtiva em direção a uma economia de baixo carbono.

Na Tabela 8 o grupo Monitorados reúne atividades econômicas sujeitas a maior regulação estatal, muitas delas relacionadas à oferta de infraestrutura essencial — como energia, transporte e saneamento. Nesse conjunto, destacam-se os setores de refino de petróleo, eletricidade e gás e transporte terrestre, que respondem por grande parte das emissões totais do grupo. Essas atividades são caracterizadas por uso intensivo de energia e combustíveis fósseis. Maiores detalhes sobre os setores que compõem o grupo de setores monitorados pode ser consultado na Tabela 3.

Tabela 8 - Intensidade de emissões e estrutura produtiva por região e grande grupo setorial (cenário-base, 2017)

País / Região	total			Alimentos			Bens industriais			Monitorados			Serviços		
	E/wL	E/VA	VA (%)	E/wL	E/VA	VA (%)	E/wL	E/VA	VA (%)	E/wL	E/VA	VA (%)	E/wL	E/VA	VA (%)
Brasil	1,17	0,69	2,37	6,16	3,46	0,21	2,02	1,16	0,27	1,67	1,04	0,54	0,06	0,04	1,35
China	2,19	1,16	14,76	1,33	0,59	1,72	4,41	2,02	3,57	5,07	2,77	3,00	0,14	0,08	6,47
Estados Unidos	0,55	0,31	23,89	2,02	0,88	0,67	0,94	0,48	2,90	0,85	0,55	7,99	0,14	0,07	12,34
Mercosul União	1,31	0,66	0,91	5,64	2,68	0,10	1,95	0,84	0,11	1,74	1,07	0,19	0,09	0,04	0,50
Europeia	0,54	0,27	20,68	1,68	0,79	0,89	0,68	0,37	3,17	0,85	0,46	6,50	0,17	0,08	10,13
Ásia	1,50	0,70	17,59	2,86	1,31	1,68	2,55	1,04	3,17	3,01	1,52	3,98	0,17	0,08	8,76
Assoc. Mercosul	1,19	0,58	1,19	2,85	1,27	0,15	1,68	0,63	0,22	2,38	1,11	0,29	0,13	0,07	0,53
Resto Américas	1,17	0,57	4,68	2,89	1,15	0,33	3,31	1,17	0,74	1,96	1,08	1,09	0,19	0,10	2,51
Oriente Médio	3,08	1,05	3,86	1,41	0,70	0,21	6,45	1,17	1,38	5,93	2,45	0,86	0,31	0,13	1,41
África	2,96	1,38	2,74	5,00	1,99	0,63	7,11	2,06	0,47	5,49	2,60	0,53	0,25	0,14	1,11
Resto do Mundo	1,89	0,87	7,32	3,90	1,67	0,46	4,41	1,42	1,29	2,78	1,55	2,14	0,27	0,12	3,43

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Nota: E: emissões em Gg CO₂e (GWP-AR5); VA: valor adicionado em milhões de dólares correntes (2017); wL: massa salarial em milhões de dólares correntes (2017). Para saber quais setores compõem cada grupo setorial consulte a Tabela 3.

Observa-se forte heterogeneidade entre as regiões na intensidade de emissões por massa salarial (E/wL) e por valor adicionado (E/VA). Países desenvolvidos, como EUA e União europeia, apresentam valores reduzidos de E/VA (0,31 e 0,27, respectivamente), indicando maior eficiência na geração de valor com menor emissão. Em contraste, China e África exibem intensidades elevadas (1,16 e 1,38), refletindo estruturas produtivas mais emissoras e uso intensivo de energia fóssil. O Brasil situa-se em posição intermediária, com E/VA de 0,69, sugerindo desempenho relativamente eficiente, porém ainda distante dos padrões europeus. Regiões agregadas como Resto do Mundo e Oriente Médio mantêm níveis altos de emissões, sinalizando dependência de setores intensivos em carbono.

Os setores industriais e de monitorados concentram as maiores intensidades de emissões (E/wL acima de 2,0 e 3,0 em várias regiões), destacando-se China, África e Oriente Médio como os principais emissores relativos. Já os serviços exibe baixos índices de emissões, especialmente no Brasil e nos EUA, o que reforça a característica de baixa intensidade de carbono dessas atividades. O grupo de alimentos mostra resultados intermediários, variando conforme a base agrícola regional, por exemplo, América do Sul e Ásia possuem E/wL elevados

devido à agropecuária e ao uso de energia em processamento de alimentos. Essa heterogeneidade entre grupos desetores explica parte das diferenças agregadas entre regiões.

A relação entre emissões e valor adicionado evidencia o papel da estrutura produtiva e tecnológica na intensidade de carbono das economias. Regiões com maior participação de bens industriais e monitorados no VA, como China e Ásia, tendem a apresentar emissões mais elevadas, ao passo que aquelas com predominância de serviços (EUA, União Européia) alcançam emissões menores. Para o Brasil e o Mercosul, os resultados indicam potencial de ganhos expressivos com políticas de eficiência energética e descarbonização industrial. Assim, a análise conjunta de E/wL , E/VA e $VA(\%)$ revela que a transição para economias de baixo carbono requer não apenas reduzir emissões absolutas, mas também alterar a composição setorial e a produtividade relativa de setores intensivos em carbono.

A interpretação do indicador de emissões por valor adicionado requer cautela, especialmente no caso dos Estados Unidos. À primeira vista, poderia-se supor que a razão relativamente baixa entre emissões e valor adicionado decorre de um descasamento territorial entre essas variáveis. No entanto, tanto as emissões quanto o valor adicionado são conceitos estritamente geográficos na base de dados utilizada para criar o indicador. A explicação correta reside na fragmentação internacional da produção. Em economias fortemente integradas às cadeias globais de valor, como a dos Estados Unidos, etapas produtivas mais intensivas em emissões são frequentemente realizadas no exterior, associadas à produção de bens intermediários e finais importados. Como as emissões são contabilizadas no local onde a produção ocorre fisicamente, as emissões incorporadas nas importações não são atribuídas ao território americano, enquanto o valor adicionado doméstico permanece elevado, sobretudo em setores de serviços e atividades menos intensivas em carbono. Como resultado, o indicador de emissões por valor adicionado tende a ser relativamente baixo quando baseado exclusivamente em emissões territoriais.

APÊNDICE C – PARÂMETROS

Tabela 9 – Participação da demanda final do mercado nj na demanda total (α^{nj})

Setores	Brasil	China	Estados Unidos	Mercosul	União Europeia	Ásia	Assoc. Mercosul	Resto Américas	Oriente Médio	África	Resto do Mundo
Agricultura	0.038	0.054	0.007	0.03	0.009	0.044	0.041	0.02	0.021	0.092	0.02
Pecuária	0.015	0.017	0.003	0.02	0.004	0.005	0.014	0.007	0.005	0.02	0.006
Flor. Pesca	0.005	0.015	0.002	0.003	0.003	0.012	0.011	0.005	0.001	0.028	0.005
Aquic.											
Mineração											
Carvão	0.0	0.009	0.001	0.0	0.001	0.004	0.005	0.001	0.0	0.005	0.011
Petróleo e Gás	0.016	0.003	0.008	0.015	0.002	0.005	0.029	0.032	0.202	0.05	0.055
Mineração											
Metais	0.011	0.009	0.007	0.004	0.003	0.007	0.028	0.011	0.012	0.02	0.022
Abate e Carnes	0.009	0.006	0.005	0.018	0.009	0.012	0.016	0.013	0.009	0.043	0.014
Refino Açúcar	0.002	0.0	0.001	0.002	0.0	0.001	0.003	0.002	0.0	0.004	0.001
Outros Alimentos	0.012	0.02	0.007	0.031	0.013	0.016	0.027	0.017	0.015	0.029	0.012
Bebidas	0.006	0.008	0.004	0.013	0.006	0.006	0.016	0.009	0.003	0.018	0.006
Têxteis	0.002	0.012	0.001	0.004	0.003	0.007	0.007	0.002	0.003	0.007	0.004
Vestuário	0.005	0.009	0.001	0.006	0.003	0.006	0.006	0.004	0.004	0.011	0.003
Couro											
Calçados	0.002	0.003	0.0	0.004	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001	0.003	0.001
Madeira	0.002	0.004	0.002	0.005	0.003	0.003	0.007	0.003	0.003	0.005	0.004
Papel	0.007	0.01	0.006	0.011	0.01	0.008	0.009	0.006	0.003	0.005	0.004
Celulose											
Refino Petróleo	0.002	0.004	0.002	0.003	0.001	0.004	0.009	0.007	0.02	0.006	0.003
Produtos Químicos	0.013	0.015	0.011	0.013	0.013	0.015	0.01	0.014	0.022	0.007	0.007
Farmacêuticos	0.005	0.016	0.006	0.004	0.011	0.006	0.005	0.003	0.005	0.002	0.009
Borracha Plásticos	0.005	0.009	0.005	0.01	0.01	0.009	0.005	0.007	0.007	0.004	0.004
Minerais Não Met.	0.005	0.026	0.003	0.006	0.006	0.008	0.011	0.005	0.016	0.009	0.006
Ferro e Aço	0.004	0.02	0.003	0.003	0.006	0.011	0.002	0.005	0.016	0.003	0.007
Metais Não Ferrosos	0.002	0.012	0.003	0.005	0.004	0.006	0.028	0.005	0.012	0.012	0.011
Prod. de Metal	0.006	0.013	0.009	0.005	0.015	0.011	0.006	0.007	0.01	0.005	0.007
Comp. Eletrônicos	0.001	0.013	0.015	0.002	0.013	0.027	0.003	0.009	0.009	0.005	0.009
Eq. Elétricos	0.003	0.029	0.004	0.001	0.01	0.009	0.003	0.008	0.003	0.002	0.004
Máq. Mecânicas	0.008	0.021	0.009	0.003	0.021	0.018	0.009	0.01	0.013	0.004	0.007
Automóveis	0.009	0.013	0.007	0.01	0.013	0.014	0.004	0.014	0.014	0.005	0.004
Eq. Transporte	0.002	0.004	0.005	0.002	0.006	0.004	0.003	0.005	0.004	0.007	0.004
Ind. Diversas	0.014	0.013	0.023	0.009	0.012	0.008	0.01	0.008	0.009	0.005	0.007
Elétric. e Gás	0.023	0.02	0.012	0.012	0.014	0.019	0.024	0.019	0.031	0.022	0.035
Água e Saneam.	0.007	0.002	0.006	0.008	0.01	0.007	0.009	0.005	0.016	0.008	0.007
Construção	0.05	0.068	0.048	0.044	0.056	0.069	0.09	0.077	0.07	0.068	0.07
Comércio	0.124	0.088	0.092	0.101	0.1	0.13	0.082	0.128	0.067	0.113	0.115
Transp. Terrestre	0.032	0.05	0.019	0.023	0.029	0.038	0.036	0.038	0.024	0.034	0.033
Transp. Aquático	0.002	0.003	0.001	0.002	0.004	0.006	0.002	0.002	0.002	0.003	0.004
Transp. Aéreo	0.001	0.003	0.005	0.004	0.003	0.004	0.004	0.004	0.003	0.005	0.004
Apoio Transporte	0.012	0.002	0.004	0.008	0.013	0.008	0.012	0.005	0.006	0.01	0.011
Aloj. e Aliment.	0.025	0.019	0.034	0.044	0.039	0.027	0.027	0.033	0.02	0.024	0.021
Comunicações	0.031	0.023	0.041	0.04	0.064	0.04	0.033	0.034	0.031	0.035	0.043
Finanças Seguros	0.068	0.066	0.075	0.075	0.049	0.054	0.05	0.059	0.042	0.044	0.043
Imobiliário	0.123	0.063	0.121	0.147	0.105	0.082	0.075	0.107	0.059	0.048	0.106
Serv. Empresariais	0.068	0.066	0.162	0.05	0.113	0.066	0.082	0.074	0.038	0.038	0.097
Adm. Pública	0.093	0.072	0.069	0.063	0.061	0.055	0.05	0.06	0.052	0.043	0.055
Educação	0.063	0.039	0.048	0.035	0.048	0.044	0.044	0.048	0.038	0.032	0.039
Saúde	0.049	0.026	0.086	0.066	0.064	0.04	0.039	0.051	0.054	0.041	0.058
Artes e Outros	0.028	0.028	0.028	0.044	0.032	0.034	0.028	0.024	0.018	0.03	0.019

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Tabela 10 – Participação das emissões no valor adicionado no mercado nj (g^{nj})

Setores	Brasil	China	Estados Unidos	Mercosul	União Europeia	Ásia	Assoc. Mercosul	Resto Américas	Oriente Médio	África	Resto do Mundo
Agricultura	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
Pecuária	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
Flor. Pesca	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
Aquic.	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
Mineração	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068
Carvão	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066	0.0066
Petróleo e Gás	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068
Metais	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Abate e Carnes	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Refino Açúcar	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Outros	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Alimentos	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
Bebidas	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
Têxteis	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
Vestuário	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
Couro Calçados	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
Madeira	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103	0.0103
Papel Celulose	0.0223	0.0223	0.0223	0.0223	0.0223	0.0223	0.0223	0.0223	0.0223	0.0223	0.0223
Refino Petróleo	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212
Produtos	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205
Químicos	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205
Farmacêuticos	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048
Borracha	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048	0.0048
Plásticos	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303	0.0303
Minerais Não Met.	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557
Ferro e Aço	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557	0.0557
Metais Não Ferrosos	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019
Prod. de Metal Comp.	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023
Eletrônicos	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023	0.0023
Eq. Elétricos	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015
Máq. Mecânicas	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016
Automóveis	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019	0.0019
Eq. Transporte	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047	0.0047
Ind. Diversas	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Elétric. e Gás	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Água e Saneam.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Construção	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Comércio	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083	0.083
Transp. Terrestre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transp. Aquático	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Transp. Aéreo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Apoio Transporte	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Aloj. e Aliment.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Comunicações	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Finanças	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Seguros	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Imobiliário	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Serv. Empresariais	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Adm. Pública	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Educação	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Saúde	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Artes e Outros	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Tabela 11 – Participação das estruturas no valor adicionado (ξ^{nj})

Setores	Brasil	China	Estados Unidos	Mercosul	União Europeia	Ásia	Assoc. Mercosul	Resto Américas	Oriente Médio	África	Resto do Mundo
Agricultura	0.44	0.61	0.69	0.53	0.48	0.482	0.497	0.477	0.43	0.649	0.513
Pecuária	0.44	0.61	0.69	0.53	0.534	0.511	0.492	0.467	0.43	0.645	0.508
Flor. Pesca Aquic.	0.464	0.34	0.418	0.624	0.723	0.658	0.719	0.674	0.728	0.581	0.768
Mineração	0.779	0.667	0.811	0.77	0.618	0.845	0.889	0.742	0.565	0.786	0.845
Carvão	0.824	0.816	0.91	0.846	0.912	0.845	0.934	0.911	0.926	0.968	0.92
Petróleo e Gás	0.74	0.558	0.627	0.599	0.677	0.754	0.712	0.72	0.769	0.649	0.721
Mineração Metais	0.384	0.478	0.44	0.519	0.483	0.5	0.524	0.61	0.517	0.434	0.531
Abate e Carnes	0.332	0.687	0.443	0.465	0.625	0.583	0.459	0.611	0.589	0.499	0.503
Refino Açúcar	0.354	0.51	0.434	0.487	0.479	0.598	0.581	0.679	0.563	0.617	0.574
Outros Alimentos	0.601	0.607	0.716	0.537	0.647	0.647	0.617	0.764	0.622	0.719	0.711
Bebidas	0.161	0.435	0.268	0.53	0.394	0.529	0.337	0.485	0.655	0.571	0.603
Têxteis	0.065	0.359	0.026	0.588	0.41	0.431	0.538	0.408	0.359	0.506	0.495
Vestuário	0.232	0.375	0.286	0.419	0.476	0.362	0.293	0.513	0.336	0.37	0.591
Couro	0.243	0.474	0.33	0.489	0.405	0.63	0.459	0.399	0.512	0.496	0.447
Calçados	0.355	0.483	0.4	0.517	0.451	0.525	0.405	0.454	0.467	0.538	0.523
Madeira	0.79	0.702	0.861	0.767	0.667	0.869	0.853	0.846	0.844	0.843	0.795
Papel Celulose	0.402	0.627	0.709	0.592	0.622	0.707	0.618	0.74	0.836	0.61	0.545
Refino Petróleo	0.502	0.608	0.791	0.679	0.758	0.766	0.62	0.653	0.752	0.72	0.483
Produtos Químicos	0.209	0.464	0.405	0.352	0.368	0.489	0.399	0.477	0.638	0.445	0.448
Farmacêuticos	0.247	0.57	0.442	0.446	0.396	0.609	0.563	0.564	0.703	0.633	0.543
Borracha	0.442	0.661	0.576	0.51	0.384	0.713	0.615	0.681	0.891	0.639	0.65
Plásticos	0.52	0.574	0.516	0.5	0.444	0.655	0.72	0.671	0.72	0.555	0.557
Minerais Não Met.	0.262	0.435	0.338	0.567	0.348	0.428	0.471	0.384	0.514	0.496	0.407
Ferro e Aço	0.255	0.292	0.515	0.502	0.446	0.623	0.442	0.417	0.514	0.586	0.383
Metais Não Ferrosos	0.171	0.511	0.402	0.473	0.41	0.565	0.362	0.65	0.555	0.508	0.413
Prod. de Metal	0.256	0.422	0.402	0.421	0.379	0.488	0.366	0.57	0.645	0.629	0.321
Comp. Eletrônicos	0.196	0.58	0.518	0.591	0.466	0.476	0.287	0.585	0.665	0.602	0.405
Eq. Elétricos	0.183	0.339	0.432	0.448	0.396	0.444	0.193	0.389	0.424	0.707	0.308
Máq. Mecânicas	0.335	0.602	0.274	0.47	0.415	0.452	0.424	0.522	0.51	0.557	0.443
Automóveis	0.785	0.613	0.664	0.744	0.736	0.534	0.841	0.646	0.801	0.724	0.554
Eq. Transporte	0.486	0.459	0.412	0.478	0.42	0.546	0.535	0.494	0.606	0.476	0.504
Ind. Diversas	0.309	0.282	0.337	0.603	0.423	0.324	0.467	0.438	0.441	0.532	0.538
Eletric. e Gás	0.387	0.475	0.427	0.399	0.478	0.568	0.363	0.585	0.693	0.408	0.53
Água e Saneam.	0.274	0.555	0.34	0.397	0.429	0.475	0.516	0.553	0.676	0.489	0.587
Construção	0.422	0.617	0.539	0.507	0.685	0.659	0.615	0.538	0.659	0.554	0.561
Comércio	0.445	0.575	0.442	0.48	0.501	0.605	0.645	0.523	0.574	0.538	0.45
Transp. Terrestre	0.437	0.297	0.256	0.56	0.575	0.634	0.613	0.533	0.676	0.61	0.643
Transp. Aquático	0.246	0.429	0.343	0.321	0.374	0.437	0.35	0.512	0.463	0.29	0.418
Transp. Aéreo	0.487	0.552	0.57	0.536	0.584	0.627	0.587	0.614	0.649	0.63	0.609
Apoio Transporte	0.599	0.499	0.448	0.354	0.514	0.634	0.58	0.508	0.712	0.346	0.553
Aloj. e Aliment.	0.871	0.807	0.948	0.937	0.918	0.892	0.819	0.751	0.901	0.822	0.908
Comunicações	0.291	0.291	0.335	0.313	0.454	0.417	0.484	0.368	0.506	0.406	0.382
Finanças	0.144	0.231	0.31	0.314	0.359	0.353	0.194	0.204	0.428	0.318	0.268
Seguros	0.042	0.249	0.077	0.152	0.177	0.254	0.137	0.15	0.23	0.215	0.184
Imobiliário	0.155	0.181	0.172	0.175	0.19	0.295	0.24	0.178	0.29	0.344	0.138
Serv. Empresariais	0.082	0.241	0.332	0.43	0.453	0.491	0.35	0.388	0.473	0.24	0.39
Adm. Pública											
Educação											
Saúde											
Artes e Outros											

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Tabela 12 – Participação do valor adicionado na produção do setor j na região n (γ^{nj})

Setores	Brasil	China	Estados Unidos	Mercosul	União Europeia	Ásia	Assoc. Mercosul	Resto Américas	Oriente Médio	África	Resto do Mundo
Agricultura	0.56	0.679	0.491	0.657	0.571	0.717	0.698	0.602	0.633	0.689	0.587
Pecuária	0.427	0.513	0.382	0.471	0.435	0.448	0.526	0.462	0.361	0.527	0.346
Flor. Pesca Aquic.	0.714	0.628	0.618	0.585	0.502	0.657	0.514	0.544	0.555	0.734	0.536
Mineração Carvão	0.308	0.533	0.503	0.653	0.5	0.65	0.7	0.604	0.663	0.478	0.555
Petróleo e Gás	0.475	0.535	0.598	0.791	0.673	0.707	0.764	0.688	0.818	0.772	0.717
Mineração Metais	0.429	0.418	0.584	0.592	0.462	0.503	0.455	0.609	0.742	0.459	0.518
Abate e Carnes	0.172	0.187	0.186	0.26	0.244	0.419	0.294	0.311	0.314	0.58	0.276
Refino Açúcar	0.227	0.137	0.246	0.509	0.312	0.272	0.397	0.321	0.331	0.329	0.252
Outros Alimentos	0.221	0.208	0.252	0.346	0.279	0.244	0.313	0.356	0.397	0.334	0.288
Bebidas	0.291	0.257	0.38	0.44	0.306	0.427	0.514	0.457	0.329	0.499	0.378
Têxteis	0.243	0.185	0.301	0.422	0.297	0.311	0.431	0.364	0.539	0.361	0.356
Vestuário	0.385	0.206	0.507	0.429	0.294	0.343	0.288	0.397	0.533	0.403	0.269
Couro	0.323	0.194	0.388	0.369	0.291	0.314	0.417	0.373	0.616	0.393	0.296
Calçados	0.381	0.19	0.306	0.388	0.274	0.342	0.457	0.346	0.572	0.43	0.327
Madeira	0.297	0.215	0.34	0.451	0.337	0.319	0.385	0.31	0.388	0.349	0.318
Papel Celulose	0.041	0.072	0.059	0.1	0.027	0.079	0.23	0.186	0.206	0.206	0.062
Refino Petróleo	0.202	0.194	0.311	0.351	0.232	0.212	0.19	0.336	0.458	0.26	0.235
Produtos Químicos	0.416	0.227	0.561	0.533	0.406	0.392	0.338	0.436	0.576	0.401	0.346
Farmacêuticos	0.257	0.192	0.297	0.503	0.359	0.284	0.266	0.343	0.558	0.33	0.318
Borracha Plásticos	0.271	0.281	0.396	0.468	0.307	0.33	0.439	0.342	0.588	0.417	0.306
Minerais Não Met.	0.171	0.206	0.232	0.324	0.17	0.175	0.156	0.268	0.484	0.167	0.207
Ferro e Aço	0.125	0.161	0.216	0.424	0.167	0.199	0.482	0.176	0.53	0.201	0.201
Metais Não Ferrosos	0.368	0.232	0.39	0.397	0.352	0.323	0.379	0.375	0.459	0.302	0.338
Prod. de Metal	0.138	0.16	0.64	0.29	0.293	0.253	0.571	0.259	0.518	0.354	0.377
Comp. Eletrônicos	0.24	0.191	0.409	0.344	0.328	0.295	0.522	0.391	0.427	0.225	0.257
Eq. Elétricos	0.278	0.213	0.348	0.365	0.354	0.326	0.558	0.441	0.625	0.229	0.327
Máq. Mecânicas	0.217	0.154	0.211	0.415	0.202	0.205	0.378	0.183	0.504	0.236	0.195
Automóveis	0.252	0.2	0.406	0.489	0.272	0.23	0.526	0.402	0.494	0.499	0.333
Eq. Transporte	0.436	0.386	0.595	0.473	0.339	0.312	0.456	0.403	0.407	0.291	0.369
Ind. Diversas	0.459	0.369	0.489	0.446	0.455	0.368	0.568	0.534	0.438	0.461	0.444
Elêtric. e Gás	0.609	0.439	0.533	0.686	0.525	0.47	0.679	0.615	0.715	0.459	0.466
Água e Saneam.	0.477	0.231	0.558	0.514	0.368	0.392	0.534	0.499	0.386	0.491	0.375
Construção	0.624	0.641	0.569	0.706	0.534	0.644	0.516	0.685	0.684	0.704	0.585
Comércio	0.417	0.442	0.384	0.425	0.339	0.45	0.377	0.492	0.452	0.498	0.404
Transp. Terrestre	0.207	0.367	0.245	0.441	0.285	0.329	0.293	0.308	0.281	0.335	0.368
Transp. Aquático	0.223	0.346	0.364	0.388	0.184	0.28	0.275	0.283	0.259	0.338	0.239
Transp. Aéreo	0.556	0.349	0.464	0.655	0.441	0.508	0.523	0.639	0.538	0.508	0.461
Apoio Transporte	0.503	0.367	0.531	0.656	0.429	0.389	0.41	0.5	0.516	0.465	0.336
Aloj. e Aliment.	0.508	0.501	0.53	0.66	0.471	0.515	0.565	0.555	0.58	0.616	0.553
Comunicações	0.633	0.555	0.539	0.71	0.449	0.647	0.645	0.534	0.718	0.649	0.58
Finanças Seguros	0.845	0.709	0.725	0.907	0.724	0.786	0.795	0.805	0.857	0.766	0.723
Imobiliário	0.629	0.389	0.642	0.664	0.561	0.599	0.663	0.683	0.652	0.467	0.542
Serv. Empresariais	0.7	0.532	0.645	0.746	0.64	0.669	0.644	0.59	0.753	0.625	0.617
Adm. Pública	0.792	0.716	0.788	0.854	0.75	0.73	0.782	0.824	0.809	0.674	0.695
Educação	0.623	0.427	0.592	0.741	0.586	0.561	0.552	0.656	0.721	0.516	0.65
Saúde	0.639	0.523	0.609	0.549	0.584	0.608	0.651	0.645	0.55	0.62	0.569
Artes e Outros											

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Tabela 14 – Participação constante das receitas totais no portfólio global recebida pelos rentistas na região n (τ^n)

Regiões	τ_n
Brasil	0.02
China	0.148
Estados Unidos	0.197
Mercosul	0.009
União Europeia	0.21
Ásia	0.19
Assoc. Mercosul	0.013
Resto Américas	0.048
Oriente Médio	0.054
África	0.028
Resto do Mundo	0.082

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

Tabela 15 – Parâmetro de dispersão da produtividade específico do setor, derivado da distribuição de Fréchet, também referido como elasticidade comercial para o setor (θ^j)

Setores	θ_j
Agricultura	0.123
Pecuária	0.123
Flor. Pesca Aquic.	0.123
Mineração Carvão	0.073
Petróleo e Gás	0.02
Mineração Metais	0.073
Abate e Carnes	0.123
Refino Açúcar	0.392
Outros Alimentos	0.392
Bebidas	0.392
Têxteis	0.18
Vestuário	0.18
Couro Calçados	0.2
Madeira	0.092
Papel Celulose	0.11
Refino Petróleo	0.02
Produtos Químicos	0.209
Farmacêuticos	0.209
Borracha Plásticos	0.602
Minerais Não Met.	0.073
Ferro e Aço	0.125
Metais Não Ferrosos	0.125
Prod. de Metal	0.125
Comp. Eletrônicos	0.094
Eq. Elétricos	0.094
Máq. Mecânicas	0.658
Automóveis	0.99
Eq. Transporte	0.99

Continua

Continuação

Setores	θ_j
Ind. Diversas	0.233
Eletric. e Gás	0.2
Água e Saneam.	0.2
Construção	0.2
Comércio	0.2
Transp. Terrestre	2.703
Transp. Aquático	2.703
Transp. Aéreo	2.703
Apoio Transporte	2.703
Aloj. e Aliment.	0.2
Comunicações	0.141
Finanças Seguros	0.2
Imobiliário	0.2
Serv. Empresariais	0.2
Adm. Pública	0.2
Educação	0.2
Saúde	0.2
Artes e Outros	0.2

Fonte: elaboração própria, a partir dos dados do Gtap 11.

APÊNDICE D – PROPOSTA DE ESTIMATIVA DA ELASTICIDADE DE EMISSÃO

Para estimar os parâmetros (g^{nj}) , segundo a estratégia proposta por Shapiro e Walker (2018), o primeiro passo é calcular a intensidade de emissão $\left(\frac{\varepsilon^{nj}}{q^{nj}}\right)$. Portanto, ao dividir a equação (34) pela equação (33) e log-linearizar, obtém-se:

$$\log\left(\frac{\varepsilon^{nj}}{q^{nj}}\right) = \left(\frac{1}{g^{nj}} - 1\right) \log(1 - \varphi^{nj}) \quad (64)$$

O passo seguinte envolve a utilização de uma regressão de dados em painel para determinar cada coeficiente (g^{nj}) . No estudo de Shapiro e Walker (2018), embora os autores disponham de todos os dados necessários (emissões, quantidade produzida e proporção de gastos com abatimento (φ)), optam por agrupar os dados e estimar um único parâmetro (g^n) .

A estratégia de agrupar os dados e estimar um único coeficiente foi justificada pela limitação dos dados disponíveis. No entanto, essa abordagem gera outro problema: se não é possível estimar cada coeficiente (g^{nj}) individualmente usando dados em painel, é necessário recorrer a uma solução heurística. Nesse contexto, a solução adotada pelos autores foi a seguinte: admitindo que a diferença entre a intensidade de emissão e seu valor esperado depende da diferença entre os coeficientes de cada grupo, podem-se estimar esses coeficientes da seguinte forma³¹:

$$g^{nj} = g^n \cdot \frac{\left(\frac{\varepsilon^{nj}}{q^{nj}}\right)}{E\left[\frac{\varepsilon^{nj}}{q^{nj}}\right]} \quad (65)$$

Para utilizar o método de Shapiro e Walker (2018), é necessário dispor de dados sobre emissões, produção e gastos com abatimento de emissões. Infelizmente, no Brasil, não há levantamentos que cubram os gastos das firmas com abatimento, o que impossibilita a estimativa direta de (g^{nj}) usando dados em painel. Nesse contexto, a alternativa é aproveitar

³¹ Essa explicação não está clara no texto de Shapiro e Walker (2018), mas, em linhas gerais, foi isso que fizeram.

as informações disponíveis para estimar um valor para (g^n) . Existem duas informações que podem auxiliar nessa tarefa: a equação (65) e a restrição $(g^{nj} \in (0,1))^{32}$. Portanto, é possível utilizar algum algoritmo para estimar um valor de (g^n) que satisfaça essas duas restrições.

O algoritmo utilizado foi o gradiente descendente. A função de perda escolhida foi uma função de barreira, dado que se quer valores de g^n entre zero e um:

$$L(g^{nj}) = \sum_{j=1}^J \begin{cases} \lambda(g^{nj} - 1)^2 & \text{se } g^{nj} \geq 1 \\ \lambda(g^{nj})^2 & \text{se } g^{nj} \leq 0 \\ 0 & \text{se } 0 < g^{nj} < 1 \end{cases} \quad (66)$$

Substituindo a equação (65) na função perda e diferenciando em relação à (g^n) para encontrar o gradiente:

$$G(g^n) = \sum_{j=1}^J \begin{cases} 2\lambda(g^n - 1) \cdot \frac{\left(\frac{\varepsilon^{nj}}{q^{nj}}\right)}{E\left[\frac{\varepsilon^{nj}}{q^{nj}}\right]} & \text{se } g^n \geq 1 \\ 2\lambda g^n \cdot \frac{\left(\frac{\varepsilon^{nj}}{q^{nj}}\right)}{E\left[\frac{\varepsilon^{nj}}{q^{nj}}\right]} & \text{se } g^n \leq 1 \\ 0 & \text{se } 0 < g^n < 1 \end{cases} \quad (67)$$

O passo seguinte é utilizar o gradiente para encontrar novos valores de g de forma iterativa, finalizando a iteração apenas quando a diferença entre os valores estimados for menor que a tolerância δ , dada uma taxa de aprendizado α .

$$b_{new}^n = b_{old} - \delta \cdot G(g) \quad (68)$$

Para a inicialização do valor de (g^n) , utilizou-se as metodologias de HE (He *et al.*, 2015) e Glorot e Bengio (2010), ambas amplamente utilizadas para a inicialização de pesos em redes neurais.

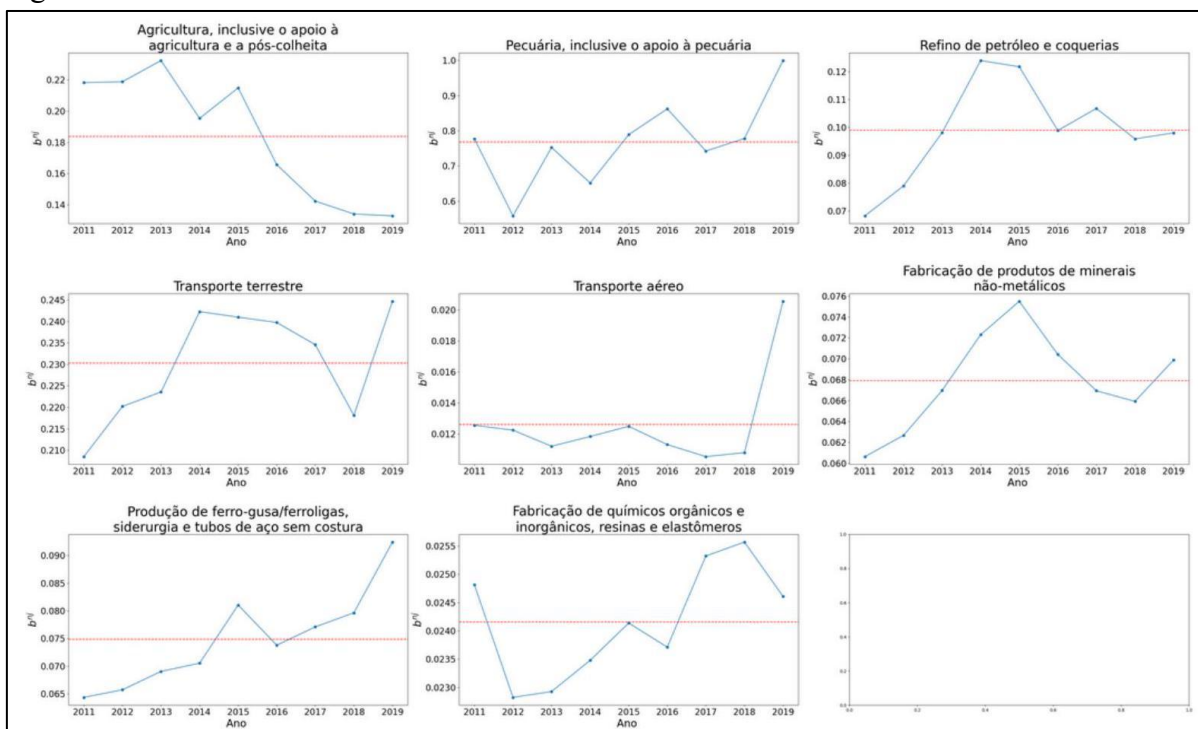
³² Existe uma terceira informação que pode contribuir para definir (g^{nj}) . Uma das condições de primeira ordem do nosso modelo CGE completo é dada por: $w_t^{nj} \cdot l_t^{nj} = \gamma^{nj} \cdot (1 - g^{nj}) \cdot (1 - \xi^n) \cdot C_t^{nj}$. Isso implica que $0 \leq \gamma^{nj} \cdot (1 - g^{nj}) \cdot (1 - \xi^n)$.

Como resultados desta estimativa, se o valor inicial de (g^n) é negativo, ou muito próximo de zero, a trajetória converge para ($g^n = 0$). Se o valor inicial de g é ligeiramente positivo, então a trajetória converge para 0.0227. Isso está de acordo com o modelo básico, no qual tanto 0 quanto 0.0227 satisfazem as restrições; contudo, apenas 0.0227 possui sentido econômico.

Em resumo, 0,0227 é a elasticidade agregada das emissões (g^n), estimada por meio de um processo de otimização. Esse resultado funciona como etapa intermediária para calcular as elasticidades específicas por setor (g^{nj}), fundamentais para analisar o impacto das políticas de carbono no modelo teórico. O valor de 0,0227 indica quão sensível é, em média, a produção brasileira às emissões, dadas a metodologia adotada e as limitações dos dados disponíveis.

O passo seguinte foi utilizar a solução encontrada e a equação (65) para estimar os parâmetros para cada setor (j) da economia brasileira ($n = 1$). A Figura 15 ilustra o comportamento da elasticidade de emissão para diferentes setores (aqueles com maiores elasticidades) ao longo dos anos.

Figura 15 – Elasticidade de emissão



Fonte: elaboração própria (2025).

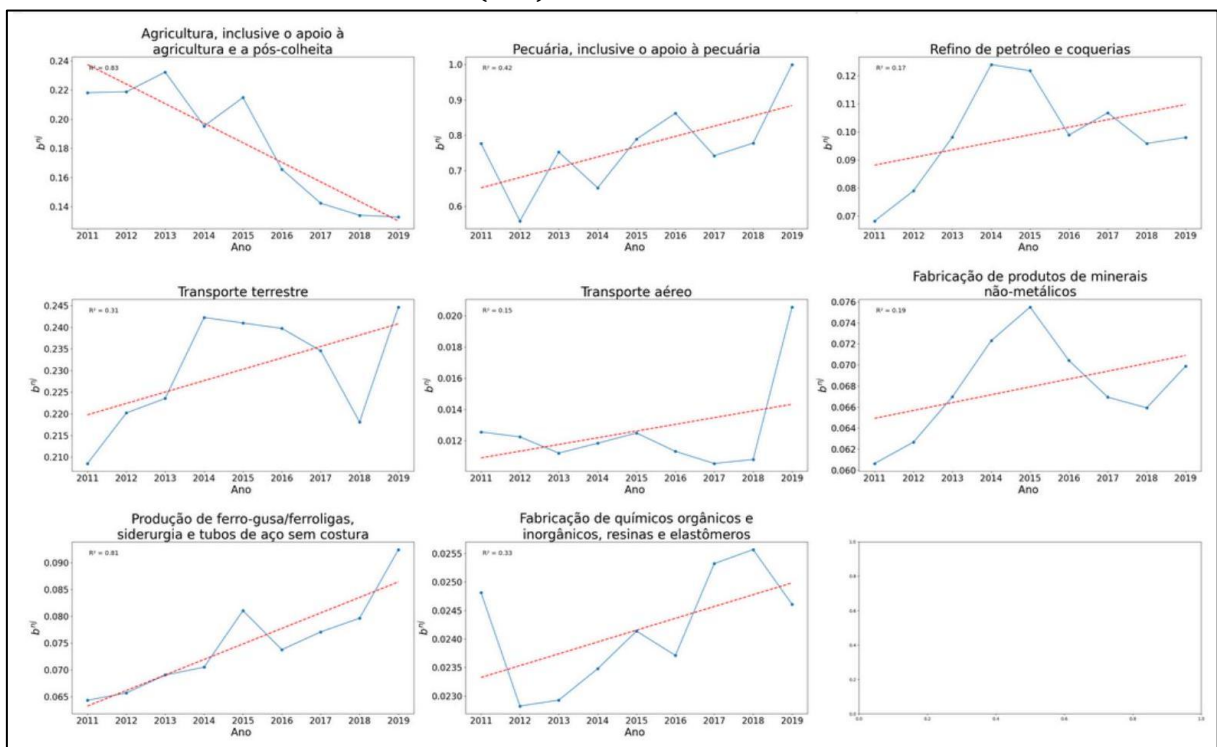
A elasticidade varia entre setores devido a diferentes dinâmicas de emissão e produção. Em alguns setores, aumenta e depois diminui, enquanto em outros, como o transporte aéreo, há aumento significativo, o que pode ser interpretado de maneira simplificada pelo coeficiente g^{nj} , que representa a participação das emissões na quantidade produzida. Assim, um aumento

em g^{nj} indica maior emissão de CO_2e para a mesma quantidade produzida. No caso específico do setor de transportes, é necessário exame mais detalhado, pois pode ser um ponto fora da curva (*outlier*) ou um reflexo de fatores específicos em 2019. A princípio, acreditava-se em uma possível redução no consumo de etanol e aumento significativo no uso de combustíveis fósseis, talvez decorrente de uma quebra na safra de cana-de-açúcar. Porém, o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2019 não corrobora com essa suposição, pelo contrário, nesse ano o consumo de etanol aumentou 11.3% enquanto o consumo de óleo diesel aumentou apenas 1.9% e o de gasolina caiu 0.5% (em base energética, não volume) (EPE, 2020). O que reforça a hipótese de *outlier*.

Admitindo que se comporta de forma aleatória e segue distribuição normal, pode-se estimar um único valor para representar a elasticidade de emissão de cada setor, ou seja, a média desses coeficientes ao longo dos anos.

Caso seja considerado que a elasticidade não segue uma distribuição normal e que uma tendência de baixa indica que o setor está progredindo tecnologicamente em suas atividades de abatimento de emissões (ou seja, necessita de uma proporção menor de fatores para abater a mesma quantidade de emissões), então a tendência desse parâmetro pode refletir o esforço de cada setor em adotar tecnologia mais limpa (Figura 16).

Figura 16 – Elasticidade de emissão (g^{nj}) e linha de tendência



Fonte: elaboração própria (2025).

APÊNDICE E – PROPOSTA DE EQUAÇÃO EXTRA (Variação do preço das emissões)

O sistema de equações estava subdeterminado para capturar o MC, uma vez que havia duas variáveis novas, mas apenas uma equação adicional. Como a solução do modelo de Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) utiliza Substituição iterativa como solução, foi necessário encontrar uma equação adicional para tornar o sistema determinado. A equação necessária é:

$$\dot{e}_t^{nj} = \dot{x}_t^{nj} (\dot{A}_t^{nj})^{-\gamma^{nj}(1-g^{nj})} \quad (69)$$

O passo a passo para derivar a nova equação é substituir as condições de primeira ordem na função de produção e resolver para C_t^{nj} :

$$C_t^{nj} = \frac{q_t^{nj}}{z^{nj} (\dot{A}_t^{nj})^{\gamma^{nj}(1-g^{nj})}} B^{nj} x_t^{nj} \quad (70)$$

Aplicando a transformação *dot* tem-se:

$$\dot{C}_t^{nj} = \frac{\dot{q}_t^{nj}}{(\dot{A}_t^{nj})^{\gamma^{nj}(1-g^{nj})}} \dot{x}_t^{nj} \quad (71)$$

Pelo modelo de Copeland e Taylor (2013) temos que $\dot{q}_t^{nj} = \dot{\varepsilon}_t^{nj}$. Portanto:

$$\dot{C}_t^{nj} = \frac{\dot{\varepsilon}_t^{nj}}{(\dot{A}_t^{nj})^{\gamma^{nj}(1-g^{nj})}} \dot{x}_t^{nj} \quad (72)$$

Usando as condições de primeira ordem temos $\dot{C}_t^{nj} = \dot{w}_t^{nj} \dot{L}_t^{nj}$. Portanto:

$$\dot{w}_t^{nj} \dot{L}_t^{nj} = \frac{\dot{\varepsilon}_t^{nj}}{(\dot{A}_t^{nj})^{\gamma^{nj}(1-g^{nj})}} \dot{x}_t^{nj} \quad (73)$$

Ainda usando as condições de primeira ordem, temos que $\dot{w}_t^{nj} \dot{L}_t^{nj} = \dot{e}_t^{nj} \dot{E}_t^{nj}$. Portanto:

$$\dot{e}_t^{nj} \dot{E}_t^{nj} = \frac{\dot{E}_t^{nj}}{(\dot{A}_t^{nj})^{\gamma^{nj}(1-g^{nj})}} \dot{x}_t^{nj} \quad (74)$$

Resolvendo para $\dot{e}_t^{nj}$:

$$\dot{e}_t^{nj} = \dot{x}_t^{nj} (\dot{A}_t^{nj})^{-\gamma^{nj}(1-g^{nj})} \quad (75)$$

→ **Modelo Copeland e Taylor**

Lembrando o modelo de Copeland e Taylor (2013):

$$q_t^{nj} = (1 - \varphi^{nj}) F_t^{nj}(\cdot) \quad (76)$$

$$E_t^{nj} = \psi^{nj} F_t^{nj}(\cdot) \quad (77)$$

$$\psi^{nj} = (1 - \varphi^{nj})^{g^{nj}} \quad (78)$$

APÊNDICE F – MERCADO DE CARBONO E DECISÃO DAS FIRMAS

No modelo que incorpora o MC, as emissões das firmas não podem ultrapassar o limite estabelecido, o que implica na introdução de uma nova restrição ao problema de otimização das firmas. Ao resolver esse problema considerando as condições de Karush-KuhnTucker (KKT), é possível verificar se essa restrição será ativa (vinculante) ou não no equilíbrio. Essa condição depende diretamente dos parâmetros e das variáveis específicas do modelo.

Em determinadas circunstâncias, após resolver o problema, observa-se que a restrição pode não ser ativa. Isso significa que, no ponto ótimo, o multiplicador de Lagrange associado à restrição de emissões (λ_2) é igual a zero, indicando que a restrição não exerce influência direta sobre as decisões ótimas de produção e uso de insumos. Nesse caso específico, a restrição é satisfeita estritamente como uma desigualdade ($\varepsilon + \varepsilon_i - 100 < 0$), indicando que as emissões totais se encontram abaixo do limite estabelecido. Portanto, a inclusão dessa restrição não necessariamente modifica as decisões ótimas das firmas, já que sua ativação depende exclusivamente das condições do modelo.

O problema de otimização da firma é maximizar a função de produção (simplificada para esse exemplo):

$$q = \varepsilon^g \cdot z \left[(Ah^\xi l^{1-\xi})^\gamma \prod_{i=1}^I M_i^{\gamma_i} \right]^{1-g} \quad (79)$$

Sujeito às restrições:

1. Restrição de custo (igualdade):

$$rh + wl + e\varepsilon + \sum_{i=1}^I P_i M_i - C = 0 \quad (80)$$

2. Restrição de emissões (desigualdade):

$$\varepsilon + \varepsilon_i - 100 \leq 0$$

Ao formular o Lagrangiano, o resultado é:

$$L = q - \lambda_1 \left(rh + wl + e\varepsilon + \sum_{i=1}^I P_i M_i - C \right) - \lambda_2 (\varepsilon + \varepsilon_i - 100) \quad (81)$$

O multiplicador λ_1 está associado à restrição de custo e pode ser interpretado como o custo marginal de aumentar o orçamento disponível para a firma; reflete o impacto de uma unidade adicional de custo na função objetiva (maximização da produção). Já o multiplicador λ_2 está associado à restrição de emissões. Quando $\lambda_2 = 0$, isso indica que a restrição de emissões não está afetando a decisão ótima da firma, pois já está operando abaixo do limite de emissões. Se $\lambda_2 > 0$, isso significaria que a restrição é vinculante e que a firma está no limite de emissões permitido, o que afetaria suas decisões de produção e uso de insumos. Por exemplo, caso $\lambda_2 = 5$, isso significa que, se a firma pudesse aumentar seu limite de emissões em uma unidade, estaria disposta a pagar até cinco unidades monetárias para isso.

As condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) incluem:

$$\frac{\partial L}{\partial h} = 0, \frac{\partial L}{\partial l} = 0, \frac{\partial L}{\partial M_i} = 0, \frac{\partial L}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (82)$$

Para a solução encontrada ser viável ela tem que satisfazer todas as restrições, inclusive as restrições que compõem o próprio problema de otimização, que são chamadas de condições de viabilidade primária. Nesse caso, as restrições são:

$$rh + wl + e\varepsilon + \sum_{i=1}^I P_i M_i - C = 0, \quad \varepsilon + \varepsilon_i - 100 \leq 0 \quad (83)$$

→ Condições de viabilidade dual:

As condições de viabilidade dual garantem que a solução encontrada seja matematicamente consistente, mas também economicamente válida. Na prática essa condição é feita da seguinte forma: os multiplicadores de Lagrange associados a restrições de

desigualdade devem ser não negativos ($\lambda \geq 0$); já os multiplicadores de Lagrange associados a restrições de igualdade devem ser livres (podem ser positivos, negativos ou zero).

$$\lambda_1 \text{ livre}, \lambda_2 \geq 0 \quad (84)$$

Sobre a interpretação econômica, os multiplicadores de Lagrange (λ) representam o custo marginal de relaxar uma restrição. Por exemplo, como λ_2 está associado à restrição de emissões, mede o impacto na função objetiva (produção, lucro, etc.) de aumentar o limite de emissões em uma unidade (basta visualizar a função de Lagrange na forma de uma derivada total para entender isso). A condição de viabilidade dual ($\lambda \geq 0$) garante que esse custo marginal seja não negativo. Se λ fosse negativo, isso significaria que violar a restrição traria um benefício (aumento na função objetiva), o que não faz sentido nesse problema de maximização com restrições. Sobre o λ_1 , mede o impacto marginal de aumentar o orçamento disponível para a firma.

→ Condição de complementaridade (para cada restrição de desigualdade, ou a restrição é válida com igualdade ($\varepsilon + \varepsilon_i - 100 = 0$), ou seu multiplicador de Lagrange associado é zero ($\lambda_2 = 0$) ou ambos):

$$\lambda_2(\varepsilon + \varepsilon_i - 100) = 0 \quad (85)$$

→ Análise dos casos:

Analisando apenas a variável ε (as emissões sob controle da firma), nota-se que a produção tem a forma

$$q = \varepsilon^g \cdot Y \quad (86)$$

onde:

$$Y = z \left[(Ah^\xi l^{1-\xi})^\gamma \prod_{i=1}^I M_i^{\gamma_i} \right]^{1-g} \quad (87)$$

A derivada de q em relação a ε é:

$$\frac{\partial q}{\partial \varepsilon} = g\varepsilon^{g-1}Y \quad (89)$$

A condição de primeira ordem (CPO) para ε fica então:

$$g\varepsilon^{g-1}Y = \lambda_1 e + \lambda_2. \quad (90)$$

Nesse caso, a condição de complementaridade $\lambda_2(\varepsilon + \varepsilon_i - 100) = 0$ implica que:

→ Caso 1: Se $\varepsilon + \varepsilon_i < 100$, então o multiplicador λ_2 deve ser zero. Nesse caso, a restrição não é vinculante. Assim, a CPO para ε se torna:

$$g\varepsilon^{g-1}Y = \lambda_1 e \quad (91)$$

→ Caso 2: Se $\varepsilon + \varepsilon_i = 100$, então λ_2 pode ser (e geralmente será) estritamente positivo. Aqui a restrição de emissões atua, "limitando" a escolha de ε , e a CPO fica:

$$g\varepsilon^{g-1}Y = \lambda_1 e + \lambda_2 \text{ com } \lambda_2 > 0 \quad (92)$$

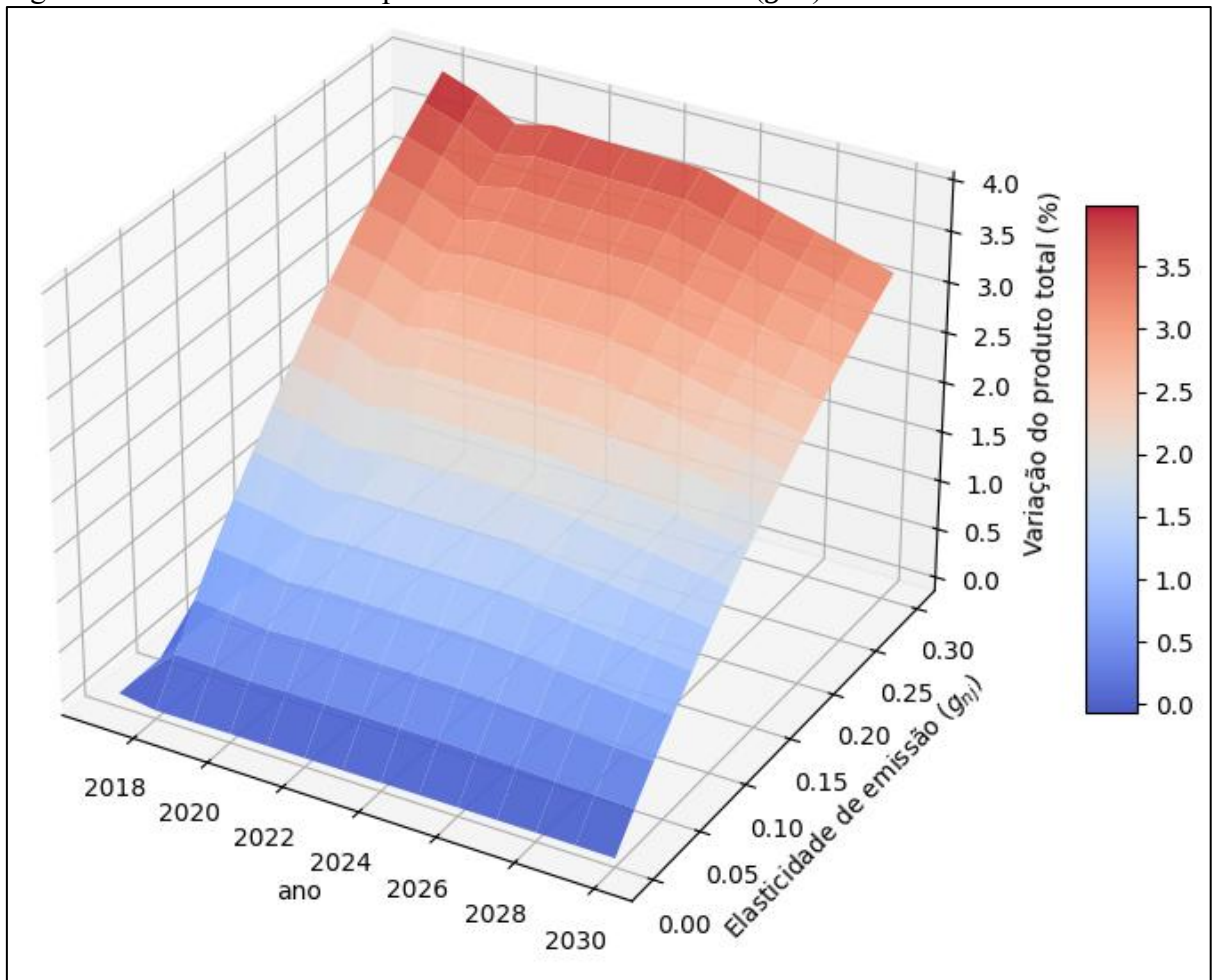
A restrição de emissões é vinculante se o nível ótimo de emissões, que seria escolhido sem o limite, exceder 100 unidades (descontando ε_i). Caso contrário, se o nível ótimo natural for inferior a 100, a restrição não é ativa (tem que resolver a CPO com valores reais para saber qual caso realmente prevalece). Essa análise reforça a importância de verificar a viabilidade dual e a condição de complementaridade ao aplicar as condições KKT em problemas de otimização com restrições de desigualdade.

APÊNDICE G – TESTE DE ROBUSTEZ DA ELASTICIDADE DE EMISSÃO

Os parâmetros de elasticidade de emissão são difíceis de serem obtidos de forma direta, tanto pela ausência de dados reportados pelas empresas quanto pela heterogeneidade tecnológica entre setores. Diante dessa limitação, foram realizadas simulações adicionais com valores no intervalo entre 0 e 0,3 (aplicados igualmente a todas as atividades). Esse procedimento permite avaliar a robustez do modelo frente a diferentes hipóteses, bem como observar como os resultados variam de acordo com níveis mais baixos ou mais altos de esforço relativo de abatimento de emissões.

A Figura 17 mostra que, quanto maior o valor atribuído à elasticidade g^{nj} , maior é o salto inicial necessário para que a economia alcance equilíbrio. Esse comportamento pode ser interpretado como evidência de que valores muito elevados de g^{nj} não são plausíveis em um contexto anterior à regulação, dado que o salto inicial é apenas resultado de uma má parametrização. Portanto, não se deve interpretar que “quanto maior g^{nj} , maior o salto positivo”, já que g^{nj} é mantido constante desde o primeiro período. O que se observa, de fato, é que valores mais altos de g^{nj} amplificam os efeitos do choque de mercado de carbono a partir de 2026.

Nota-se que o impacto desse parâmetro sobre o produto total é relativamente limitado: mesmo em cenários extremos, com elasticidade de emissão igual a 0,3, a variação do produto não ultrapassa 4% em relação ao cenário base. Isso sugere que, embora g^{nj} afete a intensidade dos choques, o efeito econômico agregado permanece moderado.

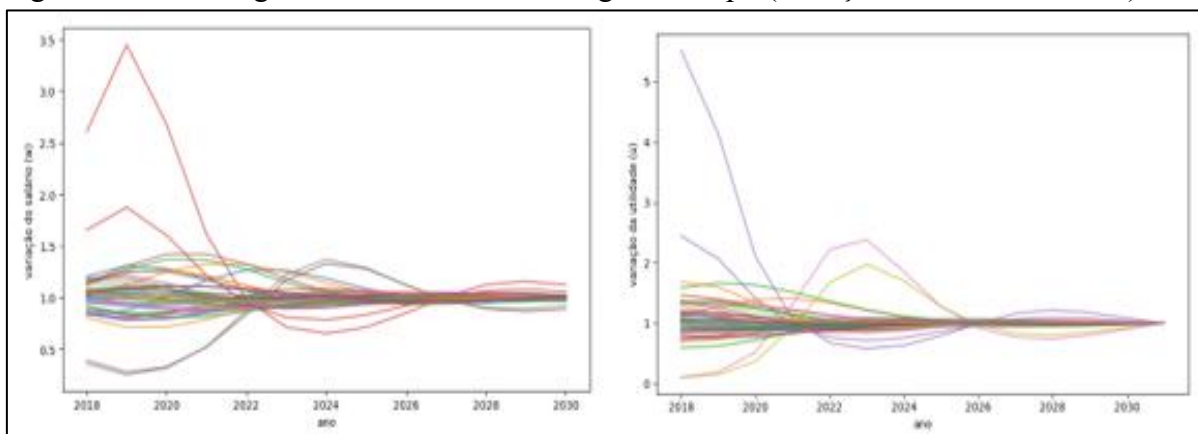
Figura 17 – Teste de estresse para elasticidade de emissão (g^{nj})

Fonte: elaboração própria (2025).

APÊNDICE H – RESULTADOS ADICIONAIS (CONVERGÊNCIA)

O modelo de Caliendo, Dvorkin e Parro (2019) não requer que as variáveis estejam em estado estacionário no início, permitindo que a condição inicial seja não estacionária. Contudo, ao longo do tempo, essas variáveis devem convergir para o estado estacionário, o que, na prática, implica que as variáveis *dot* devem convergir para 1 (Figura 18).

Figura 18 – Convergência das variáveis ao longo do tempo (variação salarial e utilidade)



Fonte: elaboração própria (2025).

Uma maneira de aprimorar o modelo é redefinir as condições iniciais. Podem-se utilizar os dados reais da TRU para fornecer as entradas iniciais do modelo, pelo menos para o período entre 2018 e 2020; o que ajudará a evitar resultados que se afastem significativamente da realidade observada.

APÊNDICE I – DISPERSÃO DA PRODUTIVIDADE (COMPLEMENTO)

No artigo de 2015, Caliendo e Parro focaram em como a mudança nas tarifas com o surgimento do NAFTA afetaria o comércio bilateral entre os países membros; por isso, ignorou que a produtividade do bem j pudesse ser afetada por essa mudança de tarifas e tratou a produtividade setorial como uma constante. No entanto, em uma nota de rodapé na página 3, sugeriu trabalhos futuros que considerassem como as tarifas poderiam afetar a produtividade. Uma das formas de fazer isso no nosso modelo é assumir que $s^j = \theta^j$:

$$q_t^{nj} = (\varepsilon_t^{nj})^{g^{nj}} (z^{nj})^{\theta^j} \left((A_t^{nj} (h_t^{nj})^{\xi^n} (l_t^{nj})^{1-\xi^n})^{\gamma^{nj}} \prod_{k=1}^J (M_t^{nj,nk})^{\gamma^{nj,nk}} \right)^{(1-g^{nj})} \quad 62$$

Na prática, isso significa que existe um impacto do comércio sobre a produtividade. Em outras palavras, θ nesse caso representa também a resposta da produtividade ao grau de integração comercial do setor j .

A grande vantagem de considerar $s^j = \theta^j$ é que não é necessário estimar o parâmetro θ^j ao trabalhar com a versão do modelo em mudanças relativas:

$$\dot{e}_{t+1}^{nj} \dot{E}_{t+1}^{nj} = \dot{w}_{t+1}^{nj} \dot{L}_{t+1}^{nj}$$

$$\dot{x}_{t+1}^{nj} = (\dot{e}_{t+1}^{nj})^{g^{nj}} \left((\dot{L}_{t+1}^{nj})^{\xi^n} \dot{w}_{t+1}^{nj} \right)^{\gamma^{nj}(1-g^{nj})} \prod_{k=1}^J (\dot{P}_{t+1}^{nk})^{\gamma^{nj,nk}(1-g^{nj})}$$

$$\dot{P}_{t+1}^{nj} = \left(\sum_{i=1}^N \pi_t^{nj,ij} (\dot{x}_{t+1}^{ij} \dot{k}_{t+1}^{nj,ij})^{-\frac{\theta^j}{\theta^j}} (\dot{A}_{t+1}^{ij})^{\frac{\theta^j \gamma^{ij}(1-g^{nj})}{\theta^j}} \right)^{-\frac{\theta^j}{\theta^j}}$$

$$\pi_{t+1}^{nj,ij} = \pi_t^{nj,ij} \left(\frac{\dot{x}_{t+1}^{ij} \dot{k}_{t+1}^{nj,ij}}{\dot{P}_{t+1}^{nj}} \right)^{-\frac{\theta^j}{\theta^j}} (\dot{A}_{t+1}^{ij})^{\frac{\theta^j \gamma^{ij}(1-g^{nj})}{\theta^j}}$$

$$X_{t+1}^{nj} = \sum_{k=1}^J \gamma^{nk,nj} (1-g^{nk}) \sum_{i=1}^N \pi_{t+1}^{ik,nk} X_{t+1}^{ik} + \alpha^j \left(\sum_{k=1}^J \dot{w}_{t+1}^{nk} \dot{L}_{t+1}^{nk} w_t^{nk} L_t^{nk} + \iota^n \chi_{t+1} \right)$$

$$\dot{w}_{t+1}^{nj} \dot{L}_{t+1}^{nj} w_t^{nj} L_t^{nj} = \gamma^{nj} (1 - \xi^n) (1 - b^{nj}) \sum_{i=1}^N \pi_{t+1}^{ij,nj} X_{t+1}^{ij}$$

$$\text{Em que } \chi_{t+1} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^J \frac{\xi^i}{1 - \xi^i} \dot{w}_{t+1}^{ik} \dot{L}_{t+1}^{ik} w_t^{ik} L_t^{ik}$$

Como o objetivo não é anualizar o efeito das tarifas sobre a produtividade, mas considerando que essa adaptação simplifica significativamente o modelo, trabalhos futuros podem construir ambas as versões e compará-las, com o intuito de identificar o modelo mais adequado.