ASPECTOS MACROECONÔMICOS DA DESCARBONIZAÇÃO DA ECONOMIA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: UMA ANÁLISE DE INSUMO-PRODUTO

Marcos Albuquerque Zappa

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientadores: Amaro Olímpio Pereira Junior,
Emilio Lèbre La Rovere.

Rio de Janeiro
Março de 2025

ASPECTOS MACROECONÔMICOS DA DESCARBONIZAÇÃO DA ECONOMIA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: UMA ANÁLISE DE INSUMO-PRODUTO

Marcos Albuquerque Zappa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA EM ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Orientadores: Amaro Olímpio Pereira Junior,
Emilio Lèbre La Rovere.

Aprovada por: Prof. Amaro Olímpio Pereira Junior,
Prof. Emilio Lèbre La Rovere,
Prof. Edmilson Moutinho dos Santos,
Prof. Sergio Pacca,
Dr. William Wills.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MARÇO DE 2025

Zappa, Marcos Albuquerque.

Aspectos Macroeconômicos da Descarbonização da Economia do Estado do Rio de Janeiro: uma Análise de Insumo-Produto / Marcos Albuquerque Zappa -- Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2025.

XIII, 92 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Amaro Olímpio Pereira Junior

Emilio Lèbre La Rovere.

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Planejamento Energético, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 83-91.

1. Matriz Insumo-Produto. 2. Programação Linear. 3. Impactos Macroeconômicos. 4. Gases de efeito estufa. 5. Estado do Rio de Janeiro. I. Pereira Junior, Amaro Olímpio *et al*. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ASPECTOS MACROECONÔMICOS DA DESCARBONIZAÇÃO DA ECONOMIA DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO: UMA ANÁLISE DE INSUMO-PRODUTO

Marcos Albuquerque Zappa

Março/2025

Orientadores: Amaro Olímpio Pereira Junior,
Emilio Lèbre La Rovere.

Programa: Planejamento Energético.

As mudanças climáticas, intensificadas pelo modelo de desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis, representam um grave desafio ao meio ambiente, à humanidade e ao desenvolvimento econômico global, gerando eventos extremos que ameaçam ecossistemas, infraestrutura e populações. A transição para uma economia de baixa emissão de carbono requer inovação tecnológica e políticas públicas eficazes e ações em nível subnacional são cruciais para se alcançar as metas climáticas nacionais do Acordo de Paris. Este estudo busca abordar os aspectos macroeconômicos de políticas de restrição de emissões de gases de efeito-estufa na economia fluminense, por meio de uma matriz insumo-produto híbrida elaborada para o estado do Rio de Janeiro em 2019 e otimizada por meio de um modelo de programação linear, para mapear setores-chave e simular cenários de mitigação, buscando avaliar o impacto de políticas públicas de descarbonização sobre o produto interno bruto (PIB) e sobre o nível de emprego. Destacam-se os seguintes setores: saneamento, agropecuária, florestas e outros usos do solo (AFOLU), as indústrias siderúrgica e cimenteira, a geração de energia elétrica e a exploração e produção de óleo e gás e são simulados dois cenários: o de referência, com metas e ações vigentes, e um restritivo, com limites adicionais. Apesar do maior custo, no cenário restritivo, a redução de emissões foi mais significativa, com impacto limitado no PIB e no emprego.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MACROECONOMIC ASPECTS OF THE DECARBONIZATION OF RIO DE JANEIRO STATE'S ECONOMY: AN INPUT-OUTPUT ANALYSIS

Marcos Albuquerque Zappa

March/2025

Advisors: Amaro Olímpio Pereira Junior,
Emilio Lèbre La Rovere.

Department: Energy Planning.

Climate change, intensified by a development model reliant on fossil fuels, poses a significant challenge to the environment, humanity and global economic development, triggering extreme events that threaten ecosystems, infrastructure, and populations. Transitioning to a low-carbon economy requires technological innovation and effective public policies, with subnational actions playing a crucial role in achieving the national climate targets set by the Paris Agreement. This study addresses the macroeconomic aspects of greenhouse gas emissions restriction policies on the economy of Rio de Janeiro through a hybrid input-output matrix developed for the state in 2019 and optimized using a linear programming model. The objective is to identify key sectors and simulate mitigation scenarios to assess the impact of decarbonization policies on gross domestic product (GDP) and employment levels. The following sectors are highlighted: sanitation, agriculture, forest and other land use (AFOLU), the steel and cement industries, electricity generation, and oil and gas exploration and production. Two scenarios are simulated: a reference scenario, based on existing targets and actions, and a restrictive scenario, with additional limits. While the restrictive scenario incurs higher costs, it achieves more significant emissions reductions with a limited impact on GDP and employment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1

2 CONTEXTUALIZAÇÃO 4

2.1. PANORAMA HISTÓRICO DA QUESTÃO AMBIENTAL E CLIMÁTICA 4

2.2. SISTEMAS DE COMÉRCIO DE EMISSÕES 8

2.3. O ESTADO DO RIO DE JANEIRO 11

2.3.1. Arcabouço Normativo Estadual 15

3 METODOLOGIA 25

3.1. MATRIZ INSUMO-PRODUTO 30

3.1.1. Estrutura Básica da Análise de Insumo-Produto 31

3.1.2. Abordagem Produto por Setor (*Commodity-by-Industry*) 36

3.1.3. Multiplicadores no Modelo de Insumo-Produto 39

3.1.4. Extensão da MIP para Análises Ambientais 41

3.2. MIP HÍBRIDA PARA O ERJ EM 2019 43

3.3. MODELO ESTÁTICO DE OTIMIZAÇÃO 48

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 51

4.1. SETORES-CHAVE PARA A DESCARBONIZAÇÃO NO ERJ 54

4.2. EMISSÕES, MITIGAÇÃO E CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO NOS -CHAVE 57

4.2.1. Saneamento 58

4.2.2. AFOLU 60

4.2.3. Setor Industrial 63

4.2.4. Geração de Energia Elétrica 66

4.2.5. Exploração e Produção de Óleo e Gás (E&P) 69

4.3. IMPLICAÇÕES MACROECONÔMICAS DE CENÁRIOS FUTUROS DE DESCARBONIZAÇÃO 71

5 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES 77

5.1. CONCLUSÕES 77

5.2. LIMITAÇÕES.....79

5.3. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....81

REFERÊNCIAS 83

ANEXO I – MIP HÍBRIDA PARA O ERJ EM 2019 92

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Tabela de agregação dos produtos.....44
Tabela 02 – Emissões absolutas de GEE por setor.....51
Tabela 03 – Multiplicadores de Emissões (gCO_2e/R$) 52
Tabela 04 – Multiplicadores de Valor Adicionado Bruto.....52
Tabela 05 – Multiplicadores de Ocupações (pessoas/milhões de R$) 53
Tabela 06 – Multiplicadores de Produção.....53
Tabela 07 – Intensidade de carbono por setor.....54
Tabela 08 – Emissões de GEE por pessoa empregada por setor.....56

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Tabela de transações da MIP.....32
Quadro 02 – Transações intersetoriais na MIP.....34
Quadro 03 – Tabela de fluxos da MIP para uma economia de dois setores.....35
Quadro 04 – Tabela Produto por Setor para uma economia de dois produtos e dois setores.....37

LISTA DE SIGLAS

AFOLU	*Agriculture, forest and other land use*
AGE	*Applied General Equilibrium*
Agenersa	Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro
AGIP	Análise Generalizada de Insumo-Produto
BOF	*Basic oxygen furnace*
CAC	Captura e armazenamento de carbono
CBE	Cotas Brasileiras de Emissões
CCS	*Carbon capture and storage*
CCU	*Carbon capture and use*
CEE	Cadastro Estadual de Emissões
CEI	Contas Econômicas Integradas
CES	Cadastro Estadual de Sumidouros
CND	Contribuições Nacionalmente Determinadas
CNUMAD	Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento
COOCLIM	Coordenadoria de Mudanças do Clima
COP	*Conference of the Parties* ou Conferência das Partes
CQNUMC	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
CRVE	Certificado de Redução ou Remoção Verificada de Emissões
CUC	Captura e uso do carbono
E&P	Exploração e produção de óleo e gás
ER	Entidade Relatora
ERJ	Estado do Rio de Janeiro
EGA	Equilíbrio Geral Aplicado
EGC	Equilíbrio Geral Computável
ETS	*Emissions Trading System*
FBN	Fixação Biológica do Nitrogênio
FEA	Forno Elétrico a Arco
FECAM	Fundo Estadual de Conservação Ambiental
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente

FMA	Fundo da Mata Atlântica
FRJMC	Fórum Rio de Janeiro de Mudanças Climáticas
FUNDRHI	Fundo Estadual de Recursos Hídricos
GDP	*Gross domestic product*
GEE	Gases de efeito estufa
GEF	*Global Environmental Fund*
GERAR	Gerência de Qualidade do Ar
GGP	*Greenhouse Gas Protocol*
GIOA	*Generalized Input–Output Analysis*
GIOM	*Generalized Input–Output Models*
GTL	*Gas-to-liquids*
GWP	*Global Warming Potential*
HRSG	*Heat recuperator steam generator*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFE	Inventário Florestal Estadual
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
Inea	Instituto Estadual do Ambiente
IPCC	*International Pannel on Climate Change*
IPPU	*Industrial processes and product use*
MCS	Matriz de Contabilidade Social
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações
MIPG	Modelos de Insumo-Produto Generalizados
NGCC	*Natural gas combined cycle*
NDC	*Nationally Determined Contributions*
NOP	Norma Operacional
NUGEE	Núcleo de Gases de Efeito Estufa
OC	Observatório do Clima
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
O&G	Óleo e gás
OI	Organização Inventariante
ONU	Organização das Nações Unidas
OMM	Organização Meteorológica Mundial
OVV	Organismo Validador e Verificador
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento

PEMC	Plano Estadual sobre Mudança do Clima
PEMCDS	Política Estadual Sobre Mudança Global do Clima e Desenvolvimento Sustentável
PERS/RJ	Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro
PGEE	Protocolo de Gases de Efeito Estufa
PIB	Produto interno bruto
PIMC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
Plano ABC	Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura
PNA	Plano Nacional de Alocação
PNB	Produto Nacional Bruto
PNMC	Política Nacional Sobre Mudança do Clima
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PRE	Programa de Relato de Emissões de Gases de Efeito Estufa
PSA	Pagamento de Serviços Ambientais
PT	Produção Total
RNB	Renda Nacional Bruta
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SAF	Sistemas Agroflorestais
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SCE	Sistema de Comércio de Emissões
SEAS	Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SEIMC	Sistema Estadual de Informações sobre Mudança do Clima
SEPLAG	Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão do Rio de Janeiro
SERVAR	Serviço de Avaliação da Qualidade do Ar
SPD	Sistema Plantio Direto
STC	Sistema de Tributação de Carbono
SUBCLIM	Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade
SUPCLIF	Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas

TGRBF	*Top gas recycling blast furnace*
TRT	*Top pressure recovery turbine*
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UNCED	*United Nations Convention on Environment and Development*
UNFCCC	*United Nations Framework Convention on Climate Change*
URV	Unidade de recuperação de vapor
UTE	*Usina termelétrica*
WTE	*Waste-to-energy*
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios atuais ao meio ambiente, à humanidade e ao desenvolvimento econômico das nações. O crescimento econômico global, impulsionado pela industrialização e o consumismo, tem se apoiado na exploração desenfreada de recursos naturais e no uso intensivo de combustíveis fósseis, resultando em elevados níveis de degradação ambiental e de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Esse modelo de desenvolvimento, embora tenha promovido avanços tecnológicos e socioeconômicos significativos, intensificou os impactos antrópicos ao meio ambiente, provocando destruição generalizada dos ecossistemas e aquecimento global. Os eventos climáticos extremos, como: secas, inundações, ondas de calor e tempestades severas, e a elevação do nível do mar representam uma ameaça direta à humanidade e ao próprio desenvolvimento econômico, especialmente em países e regiões mais vulneráveis. Secas extremas levam os rios a níveis tão baixos que eles deixam de ser produtivos e navegáveis, tempestades severas e inundações provocam incontáveis prejuízos à atividade agropecuária e destroem a infraestrutura urbana, viária, elétrica e de telecomunicações, ondas de calor e baixa umidade relativa do ar provocam mortes dentre os mais vulneráveis e incêndios florestais, com destruição de paisagens naturais, plantações e habitações e degradação severa da qualidade do ar pela fumaça, com danos irreparáveis à saúde da população, e o aumento do nível do mar ameaça as regiões costeiras, com perda de infraestrutura e de território, desabrigando populações e colocando em risco a existência de cidades litorâneas e nações insulares. Torna-se urgente, portanto, repensar os caminhos do desenvolvimento, buscando a transição para uma economia mais sustentável, de baixa emissão de carbono. Esse novo paradigma requer investimentos em inovação tecnológica e em políticas públicas que sejam capazes de conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação ambiental, garantindo um futuro sustentável para as próximas gerações.

No contexto da transição para uma economia de baixa emissão de carbono, é preciso desenvolver tecnologias e políticas públicas que sejam capazes de promover o desenvolvimento econômico e a redução das emissões líquidas de GEE ao mesmo tempo. No campo da tecnologia, os avanços giram em torno dos processos industriais e do uso da energia, passando por aumento de eficiência, fontes renováveis e captura

e armazenamento de carbono. No campo das políticas públicas, por sua vez, é necessário compreender como a produção econômica se relaciona com as emissões de GEE, para poder definir onde devem se concentrar os esforços do governo, no sentido de estimular o desenvolvimento econômico sustentável. Assim, é possível restringir as emissões de GEE de maneira mais eficiente e entender como as políticas de descarbonização podem impactar o crescimento da economia e a geração de empregos ao longo dos anos.

O enfrentamento das mudanças climáticas tem sido estimulado em nível global pela Organização das Nações Unidas (ONU) desde a década de 1980, com a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (PIMC), do inglês: *International Pannel on Climate Change (IPCC)*, em 1988, por meio da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Os esforços globais culminaram com o Acordo de Paris, em 2015, em que os signatários (195 países e a União Europeia) se comprometeram com metas nacionais voluntárias de redução de emissões chamadas de Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND), do inglês: *Nationally Determined Contributions (NDC)*, ressaltando a importância do comprometimento de cada país para o atingimento de um objetivo global. No mesmo sentido, é preciso destacar a importância do engajamento das instâncias subnacionais para o atingimento das metas nacionais de cada país.

Esta dissertação busca tomar o Estado do Rio de Janeiro (ERJ) como caso de estudo para explorar os aspectos macroeconômicos de políticas ambientais e energéticas em nível subnacional que possam contribuir para o atingimento das metas nacionais de mitigação de emissões estabelecidas para a década de 2020 em diante, por meio do Acordo de Paris. Para tanto, é construída uma Matriz Insumo-Produto (MIP) agregada em 11 setores representativos da economia fluminense e compatíveis com os dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), com posterior extensão dessa matriz com vetores de emissões de GEE, remunerações e valor agregado, para a formação de uma matriz híbrida ambiental. Primeiramente, são identificados os setores-chave para as políticas estaduais de descarbonização, para depois interpretar os impactos macroeconômicos de variações nos níveis de produção e emissão dos diferentes setores em dois cenários: um cenário de referência, que supõe o cumprimento das metas já

estabelecidas e concretização das ações em andamento, e um cenário restritivo, que inclui metas específicas para os setores-chave identificados.

O trabalho está organizado em cinco capítulos, incluindo esta Introdução (capítulo 01), além das seções de Referências Bibliográficas e Anexo. O capítulo 02, Contextualização, apresenta o panorama histórico da questão ambiental e climática, desde a década de 1960 até o novo regime climático, instituído pelo Acordo de Paris, em 2015, e as *NDC* brasileiras, mostra a evolução dos Sistemas de Comércio de Emissões (SCE) como instrumento econômico de políticas ambientais e energéticas, e discorre sobre o ERJ nesse contexto, suas oportunidades de desenvolvimento sustentável e o desafio da transição energética. O capítulo 03, Metodologia, mostra a evolução dos modelos de Equilíbrio Geral Aplicado (EGA) para análise econômica de políticas ambientais e energéticas a partir dos choques do petróleo, na década de 70, e apresenta a metodologia utilizada neste estudo, baseada em uma matriz insumo-produto híbrida construída para o ano de 2019 e compatibilizada com os dados do SEEG. O capítulo 04 traz a discussão dos resultados e o capítulo 05 encerra com as conclusões, limitações e recomendações.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1. PANORAMA HISTÓRICO DA QUESTÃO AMBIENTAL E CLIMÁTICA

Com a globalização da produção industrial e da degradação ambiental após a Segunda Guerra Mundial, o debate sobre a Ecologia Social se difundiu a partir da década de 1960, com intensa produção teórica sobre esse tema, que teve como marco a publicação do livro “Primavera Silenciosa”, da bióloga Rachel Carson, em 1962. O livro, que denuncia os impactos ambientais do uso de agrotóxicos nos Estados Unidos, provocou forte comoção da opinião pública e popularizou o debate sobre a questão ambiental (Lago & Pádua, 1984).

Na década de 1970, cresce o interesse dos economistas pela ecologia e avança a consciência sobre os limites que o calculismo e o mecanicismo da economia clássica encontram na natureza humana e na biosfera. Um dos marcos dessa época foi a obra “*The Entropy Law and the Economic Process”*, do estatístico e economista romeno Nicholas Georgescu-Roegen, publicada em 1971. O livro explica, com base na segunda lei da termodinâmica, que o crescimento econômico é limitado pela inevitável deterioração da matéria no processo de transformação dos recursos naturais (Georgescu-Roegen, 1971). Outro expoente desse movimento é o economista francês René Passet. Em sua obra “*L’économique et le vivant”*, de 1979, ele insere a esfera econômica na esfera das atividades humanas e essa última dentro da biosfera, enfatizando como a economia deve servir ao ser humano e não o contrário e como as atividades econômicas são limitadas pela disponibilidade dos recursos naturais da biosfera (Passet, 1979).

Foi também na década de 1970 que ocorreram as primeiras conferências internacionais a respeito das questões ambientais. Em 1972, ocorreu a primeira grande reunião de chefes de estado da ONU, em Estocolmo, Suécia, para tratar da degradação ambiental: a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, do inglês: *United Nations Conference on the Human Environment*, que ficou conhecida como a Conferência de Estocolmo (ONU, 1972). Finalmente, em 1979, ocorreu a Primeira Conferência Mundial do Clima, em Genebra, Suíça, promovida pela OMM (Bodansky, 2001).

Ao longo da década de 1980, com o aumento da disponibilidade de dados, a identificação de novos gases de efeito estufa e o avanço da capacidade analítica e de

modelagem promovida pela evolução da computação, emerge o consenso científico em torno do tema das mudanças climáticas. A extensão e a importância do impacto causado pelas emissões antropogênicas de gases de efeito estufa passa a preocupar a comunidade científica e o assunto começa a permear a esfera política. O marco inicial do desenvolvimento do regime de governança das mudanças climáticas foi a descoberta do buraco na camada estratosférica de ozônio e a publicação, em 1987, do Relatório da Comissão de Brundtland: Nosso Futuro Comum, do inglês: *Our Common Future*, da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, do inglês: *World Comission on Environment and Development* (Bodansky, 2001).

A importância do problema do ozônio na governança das questões climáticas está relacionada ao fato do buraco na camada de ozônio ter sido a primeira evidência dramática dos graves impactos globais das atividades humanas sobre a atmosfera, que trouxe destaque para a discussão das questões atmosféricas globais como um todo. Um ano depois, em 1988, a OMM e o PNUMA criam o PIMC *(IPCC)*, para reafirmar o papel dos governos no controle das questões climáticas (Bodansky, 2001).

Em 1990, o crescimento da importância da questão climática no cenário político internacional culmina com a Segunda Conferência Mundial do Clima, em Genebra, Suíça. É na década de 1990 que surgem as primeiras conferências mundiais e acordos internacionais para o controle das emissões de GEE pelos países. Em 1992, 20 anos após a Conferência de Estocolmo, ocorre a segunda Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), do inglês: *United Nations Convention on Environment and Development (UNCED)*, no Rio de Janeiro, Brasil, também conhecida como Eco-92. Foi nessa conferência que se firmou a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (CQNUMC), do inglês: *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, ratificada por 50 países (Bodansky, 2001).

A CQNUMC entrou em vigor em 21 de março de 1994 e, um ano depois, ocorreu a primeira reunião da Conferência das Partes (COP), do inglês*: Conference of the Parties (COP)*, a COP-01, em Berlin, Alemanha, em 1995 (Bodansky, 2001). A partir de então, a COP passou a se reunir anualmente, instituindo o regime climático. O regime climático pode ser definido, portanto, como uma forma específica de regime internacional para a governança do tema das mudanças climáticas, buscando sua normatização, regulamentação e controle em escala internacional, para a redução das emissões dos GEE em escala global (Souza & Corazza, 2017).

As primeiras negociações do regime climático culminaram com a adoção, por consenso, em 1997, durante a COP-03, em Kyoto, Japão, de um protocolo para a redução das emissões combinadas de GEE dos países desenvolvidos em pelo menos 5% até 2008 a 2012, relativamente aos níveis de 1990 (MCTI, 1998). Esse compromisso, legalmente vinculante, do inglês: *legally binding*, ficou conhecido como o Protocolo de Kyoto e entrou em vigor no ano seguinte, em 1998, após a ratificação mínima necessária pelas partes (MCTI, 1998).

Os Estados Unidos nunca chegaram a ratificar o acordo, que foi revogado em 2001 pelo governo de George W. Bush (Viola, 2002). No entanto, as negociações internacionais se intensificaram nos anos 2000, com a consolidação do conhecimento científico sobre as mudanças climáticas, suas causas, efeitos e as recomendações para o seu controle, o que rendeu ao IPCC o Prêmio Nobel da Paz, em 2007 (Souza & Corazza, 2017).

Em 29 de dezembro de 2009, o Brasil instituiu a Política Nacional Sobre Mudança do Clima (PNMC), por meio da Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 (Brasil, 2009). Por conseguinte, os estados passaram a publicar suas próprias políticas estaduais e o Rio de Janeiro foi um dos pioneiros (Rio de Janeiro, 2024), instituindo sua própria política estadual de mudanças climáticas, por meio da Lei nº 5690, de 14 de abril de 2010 (Rio de Janeiro, 2010).

Em 2011, após a COP-17, em Durban, África do Sul, o Canadá se retirou definitivamente do Protocolo de Kyoto, temendo ser alvo de punições por não ter cumprido as metas de redução das emissões de GEE. O aumento das emissões do Canadá estava relacionado à extração do petróleo de areias betuminosas na província de Alberta, que teria reservas colossais de óleo, que muito interessavam ao governo canadense (Peliz, 2011).

Em 2012, 20 anos depois da Eco-92 e passados 40 anos desde a primeira conferência, a de Estocolmo, ocorreu a terceira Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável: a Rio +20, novamente no Rio de Janeiro (ONU, 2012). No mesmo ano, em Doha, Qatar, durante a COP-18, o Protocolo de Kyoto, que deveria terminar em 2012, foi prorrogado até 2020, por meio do Acordo de Doha, do inglês: *Doha Amendment*, que estabeleceu um segundo período de compromisso: 2013 a 2020 e simplificou a adoção voluntária de compromissos unilaterais mais restritivos por cada parte, individualmente. Países sem compromissos pendentes sob o Protocolo de Kyoto adotaram metas voluntárias de ação climática até 2020. Para além

de 2020, um novo regime climático internacional foi estabelecido, com base em um novo acordo, aplicável a todos os países, durante a COP-21, em Paris, França, em dezembro de 2015: o Acordo de Paris (Erbach, 2015).

Até o acordo de 2015, as iniciativas transnacionais foram crescendo junto com o fortalecimento de compromissos da política doméstica para a mitigação das mudanças climáticas, com destaque para a China, que se tornou, em 2006, o maior emissor mundial de dióxido de carbono (CO_2), mas estabeleceu, internamente, a redução da intensidade energética e climática da economia como metas estratégicas, a partir de seu 12º Plano Quinquenal (2011 a 2015) (Falkner, 2016).

As negociações da COP-21 certamente se beneficiaram de uma habilidosa diplomacia, por parte da França, mas o sucesso só foi possível por causa de uma diferença fundamental em relação ao regime anterior: dessa vez, as partes buscaram uma governança descentralizada, do tipo *bottom-up*, com compromissos voluntários. O Protocolo de Kyoto, que era do tipo *top-down*, com metas obrigatórias e legalmente vinculantes, acabou enfrentando uma forte resistência dos grandes emissores, que bloquearam o progresso das negociações, a exemplo dos Estados Unidos, que nunca ratificaram o acordo, e do Canadá, que o abandonou. Na COP-21, com a abordagem *bottom-up* voluntária, os grandes emissores se mostraram abertos a apoiar o novo acordo (Falkner, 2016).

O Acordo de Paris, que institui o novo regime climático, vigente desde 2020, tem como principais objetivos:

a) conter o aumento da temperatura média da terra a níveis bem abaixo de 2°C e buscar limitar esse aumento a no máximo 1,5°C, em relação aos níveis pré-industriais;
b) incrementar a habilidade de adaptação às mudanças climáticas, promover o desenvolvimento de baixa emissão de GEE e aumentar a resiliência ao clima, de uma maneira que não afete a produção de alimentos;
c) manter fluxos financeiros consistentes com uma transição para um desenvolvimento de baixa emissão de GEE e resiliente ao clima. (ONU, 2015).

O esforço de limitação do aquecimento global, pelo Acordo de Paris, é feito por meio de compromissos voluntários, porém ambiciosos, denominados Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND). As CND são progressivas, determinadas a cada cinco anos, e reconhecem a necessidade de apoio técnico e financeiro dos países

desenvolvidos aos países em desenvolvimento, para uma implementação efetiva. Ademais, o acordo estabelece que as partes devem conservar e aumentar os reservatórios e sumidouros de GEE, como as florestas, inclusive por meio de pagamento, conforme os resultados obtidos. O acordo prevê um primeiro balanço das ações de mitigação em 2023 e, a partir de então, a cada cinco anos (ONU, 2015).

A primeira *NDC* brasileira define 2005 como ano-base para as metas de redução de emissões de GEE, quando as emissões totais do país somaram 2,56 $GtCO_2eq$ (Brasil, 2024). As metas iniciais para o Acordo de Paris incluíam: reduzir as emissões para o conjunto da economia em 37% até 2025, 50% até 2030 e zerar as emissões líquidas até 2050 (Brasil, 2022). Em 2024, essas metas foram atualizadas para 59 a 67% de redução das emissões líquidas de GEE para o conjunto da economia até 2035, em relação aos níveis de 2005, quando as emissões líquidas foram de 2,56 $GtCO_2eq$, de acordo com o inventário mais recente, no padrão internacional GWP AR5. Ademais, foi mantida a meta de zerar as emissões líquidas até 2050 (Brasil, 2024).

Para contribuir com as metas do Brasil até 2050, recentemente, em 11 de dezembro de 2024, foi instituído o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE), por meio da Lei nº 15.042 (Brasil, 2024).

2.2. SISTEMAS DE COMÉRCIO DE EMISSÕES

O Banco Mundial apoia a implementação de Sistemas de Comércio de Emissões (SCE), do inglês: *emissions trading systems* (*ETS*), como instrumento econômico de precificação do carbono, para estimular a redução das emissões de gases de efeito estufa. Os *ETS* funcionam pela imposição de um limite (do ingês: *cap*) sobre as emissões de GEE, associado a um sistema de negociação de permissões (do inglês: *trade*) para emitir, criando um mercado de carbono. O objetivo desse esquema, conhecido como *cap-and-trade*, é criar um incentivo econômico para que os agentes reduzam suas emissões, seja pela adoção própria de tecnologias de abatimento, seja pela compra de créditos de carbono oriundos da redução de emissões alcançada por outros agentes. O esquema começa pela alocação inicial de uma determinada quantidade de permissões aos participantes, que podem recebê-las gratuitamente ou mediante compra. Ao final de um período de controle, se um participante emitir menos do que a quantidade de permissões que detém, ele pode

vender suas permissões excedentes para outros participantes que tenham ultrapassado o seu próprio limite de emissões. Esse sistema agrega eficiência e flexibilidade ao processo, permitindo a definição de um preço de mercado ao carbono, que sinaliza as melhores opções de mitigação disponíveis dentre todos os agentes participantes, levando ao abatimento pretendido (definido pelo limite de emissões) a um custo menor. O Banco Mundial também apoia outros mecanismos de precificação de carbono, como os Sistemas de Tributação de Carbono (STC), que consistem na imposição de taxas diretamente aplicadas às emissões de GEE (Banco Mundial, 2024).

Atualmente, existem 36 *ETS*, e 39 STC em operação no mundo, implementados em 89 jurisdições diferentes, principalmente nos países desenvolvidos. No entanto, países de renda média, como Brasil, Índia e Turquia também têm avançado na implementação da precificação do carbono, a exemplo do SBCE. A implementação também progrediu em nível subnacional, apesar de alguns desafios importantes, e os instrumentos de precificação de carbono cobrem hoje cerca de 24% das emissões globais de GEE, ou quase 13 $GtCO_2eq$, sendo 19% por meio de SCE e 5% por meio de STC. Novos SCE e STC estão sendo considerados ou desenvolvidos em diversas outras jurisdições, o que pode elevar essa cobertura para quase 30% das emissões globais, caso haja suficiente compromisso político. No entanto, apesar de uma década de forte crescimento, os preços do carbono ainda são insuficientes para se alcançar as metas do Acordo de Paris, e existe uma lacuna importante entre os compromissos nacionais e as políticas efetivamente implementadas (Banco Mundial, 2024).

Em 2023, as receitas da precificação do carbono ultrapassaram pela primeira vez os 100 bilhões de dólares, impulsionadas pelos altos preços na União Europeia e um ajuste nas receitas do ETS alemão. Os sistemas de comércio de emissões continuam a representar a maior parte dessas receitas, e mais de 50% foi destinado a programas climáticos e ambientais. No entanto, a contribuição para os orçamentos nacionais permanece baixa. Os governos têm utilizado múltiplos instrumentos de precificação paralelamente para expandir a cobertura ou elevar os preços e embora a precificação do carbono seja aplicada principalmente nos setores de energia e indústria, ela vem sendo considerada em outros setores, como transporte marítimo e resíduos. Além disso, os governos permitem o uso de créditos de carbono para compensar obrigações, aumentando a flexibilidade e estendendo o sinal de preço a

setores não cobertos e a precificação do carbono continua a oferecer benefícios além da mitigação, como uma importante ferramenta fiscal (Banco Mundial, 2024).

No Brasil, foi instituído recentemente o SBCE: um ambiente regulado, submetido ao regime de limitação das emissões de GEE e de comercialização de ativos representativos de emissão, redução de emissão ou remoção de GEE. Esse sistema, do tipo *ETS*, funciona basicamente como um esquema de *cap-and-trade*, onde os agentes regulados têm suas emissões de GEE limitadas e precisam implementar tecnologias de abatimento para mitigar suas emissões, ou compensar as emissões que ultrapassam o limite estipulado, por meio da compra de ativos (créditos de carbono) que representem a redução de emissões ou remoção de GEE realizada por outros agentes. As permissões, divididas em cotas definidas como Cota Brasileira de Emissões (CBE), cada uma representativa do direito de emissão de 1 tCO_2eq, serão outorgadas pelo órgão gestor do SBCE, de forma gratuita ou onerosa (conforme regulamentação futura), para as instalações ou as fontes reguladas (Brasil, 2024).

O SBCE se aplica a atividades, fontes e instalações localizadas no território nacional que emitam ou possam emitir gases de efeito estufa, e tem como objetivo dar cumprimento à PNMC e aos compromissos assumidos sob a CQNUMC, por meio da negociação de ativos. Os operadores responsáveis pelas instalações e pelas fontes que emitam mais de 10.000 tCO_2eq/ano deverão submeter plano de monitoramento à apreciação do órgão gestor do SBCE e enviar relato de emissões e remoções de GEE, conforme o plano de monitoramento aprovado, e aqueles que emitam acima de 25.000 tCO_2eq/ano deverão enviar também relato de conciliação periódica de obrigações. Essas exigências se aplicam apenas às atividades para as quais existam metodologias consolidadas de mensuração, relato e verificação e excetuam-se as unidades de tratamento e destinação final de resíduos sólidos e efluentes líquidos que adotem sistemas e tecnologias para neutralizar suas emissões (Brasil, 2024).

Para atender aos compromissos ambientais definidos no âmbito do SBCE, ao final de cada período de compromisso, o operador deverá dispor de ativos em quantidade equivalente às suas emissões. A lei também prevê um mercado voluntário de créditos de carbono gerados a partir de projetos ou programas que impliquem na redução de emissão ou remoção de GEE, com exceção do programa estatal de REDD+, que não gera créditos de carbono ou Certificados de Redução ou Remoção Verificada de Emissões (CRVE) que possam ser comercializados ou transferidos.

Ademais, os créditos de carbono decorrentes de atividades de manutenção ou de manejo florestal sustentável só poderão ser convertidos em CRVE se for reconhecida a efetiva redução de emissão ou remoção de GEE por meio de metodologia credenciada pelo SBCE (Brasil, 2024).

O SBCE será implementado em cinco fases, a partir da entrada em vigor da lei. A primeira fase consiste na regulamentação da Lei, no período de doze meses, prorrogável por mais doze. A segunda fase consiste na operacionalização dos instrumentos para o relato de emissões, ao longo de mais um ano. A terceira fase consiste em um período de dois anos, em que os operadores estarão sujeitos somente ao dever de submeter seus planos de monitoramento e apresentar seus relatos de emissões e remoções de GEE ao órgão gestor do SBCE. A quarta fase marca a vigência do primeiro Plano Nacional de Alocação (PNA), com distribuição não onerosa das chamadas Cotas Brasileiras de Emissões (CBE) e implementação do mercado de ativos do SBCE. A última fase é a implementação plena do SBCE, ao fim da vigência do primeiro PNA, que deve começar em cinco anos (a partir de 2030).

A instituição do SBCE mostra as implicações que os compromissos nacionais junto ao Acordo de Paris podem ter sobre os estados da federação. No Rio de Janeiro, por exemplo, as indústrias siderúrgica, cimenteira, de óleo e gás e de geração de energia elétrica serão impactadas pela nova regulação, cabendo avaliar suas consequências macroeconômicas.

2.3. O ESTADO DO RIO DE JANEIRO

O Rio de Janeiro possui uma ampla diversidade de recursos naturais, como fontes de energia renovável, florestas e biodiversidade, além de infraestrutura logística, turismo e polos de alta tecnologia, que viabilizam a transição para uma economia descarbonizada. Para impulsionar um desenvolvimento sustentável, é essencial valorizar e integrar esses ativos à agenda econômica do estado, fomentando a inovação, o empreendedorismo e o desenvolvimento de indústrias de baixa emissão de carbono. Essa nova economia deve seguir os princípios da economia circular, da redução de emissões e do avanço tecnológico, garantindo um desenvolvimento sustentável e competitivo. Além disso, o uso estratégico desses ativos deve se apoiar na excelência dos centros de pesquisa e universidades presentes no estado do Rio, que constituem um hub de conhecimento e inovação. O

planejamento territorial é essencial para esse novo ciclo de desenvolvimento e ferramentas como o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) e a governança metropolitana, estabelecida pelo Estatuto das Cidades, são fundamentais para direcionar esse processo. É crucial valorizar os mais de 1,3 milhão de hectares de áreas protegidas, transformando as Unidades de Conservação em polos regionais de ecoturismo, esportes de aventura e turismo especializado, sendo necessário investir em infraestrutura segura e na profissionalização dos serviços de recepção (Ramos et al, 2022).

A universalização do saneamento, incluindo o abastecimento de água e a coleta e o tratamento de esgoto, anteriormente sob gestão da CEDAE, receberam um forte impulso com as concessões realizadas a partir de 2021, mas ainda é preciso estruturar novas concessões para os demais municípios que ficaram de fora das rodadas iniciais. O êxito desse processo e a expansão do saneamento dependem de uma regulação eficaz por parte da Agência Reguladora de Energia e Saneamento Básico do Estado do Rio de Janeiro (Agenersa). Além de atrair investimentos e gerar empregos, a universalização do saneamento é essencial para reverter a degradação ambiental de rios, lagoas e baías. O fim dos lixões, determinado pelo novo marco do saneamento (Lei 14.026/2020), deve ser acompanhado da valorização de resíduos por meio da reciclagem e recuperação energética, de forma a reduzir as emissões de GEE. Diante das mudanças climáticas e da pressão sobre os recursos hídricos, o estado também precisa fortalecer sua segurança hídrica, reduzindo a dependência do rio Paraíba do Sul. Para viabilizar a implementação das políticas de desenvolvimento sustentável, é essencial ter fontes estáveis de recursos e o estado do Rio de Janeiro já conta com o Fundo Estadual de Conservação Ambiental (FECAM) e o Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FUNDRHI), que podem ser utilizados em ações de recuperação ambiental, além do Fundo da Mata Atlântica (FMA), formado pelos recursos das compensações ambientais de empreendimentos de alto impacto ambiental, que devem ser aplicados nas unidades de conservação do ERJ (Ramos et al, 2022).

O Instituto Estadual do Ambiente (Inea), órgão do poder executivo estadual que se encarrega das políticas ambientais, deve ter um papel de planejamento ambiental, orientando a iniciativa privada no desenvolvimento de seus projetos, a fim de compatibilizá-los com a preservação do meio ambiente, minimizando seus impactos negativos. Projetos pontuais e desconexos acabam gerando uma demanda

desorganizada, transformando o órgão ambiental do estado em um gargalo ao desenvolvimento. É preciso também utilizar os ativos ambientais do estado para alavancar um modelo de desenvolvimento sustentável e esse papel de planejamento, central no desenvolvimento econômico do estado, cabe justamente ao Inea (Ramos et al, 2022). A governança climática, por sua vez, hoje está organizada no ERJ em nível de secretaria de governo, da seguinte forma: o Fórum Rio de Janeiro de Mudanças Climáticas (FRJMC), a Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS), a Subsecretaria de Mudanças do Clima e Conservação da Biodiversidade (SUBCLIM), a Superintendência de Mudanças do Clima e Florestas (SUPCLIF) e a Coordenadoria de Mudanças do Clima (COOCLIM) (Rio de Janeiro, 2024).

O desenvolvimento do Rio deve se fundamentar na inovação tecnológica, com base na valorização da ciência e de seus capitais humano e natural. Com uma das maiores concentrações de universidades e centros de pesquisa do país, o ERJ tem grande potencial para o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para a sustentabilidade e a adaptação às mudanças climáticas (Ramos et al, 2022). Por ser extremamente dependente dos recursos da indústria de óleo e gás (O&G), o Rio de Janeiro precisa estar muito atento à transição energética, monitorando a transição global e promovendo políticas industriais voltadas para a inovação tecnológica nos processos produtivos, visando à redução das emissões de GEE (Ramos et al, 2022). Esta dissertação de mestrado, inspirada no problema prático da transição energética no estado do Rio de Janeiro, busca unir a academia e o governo do estado no uso da ciência e de evidências empíricas para orientar o desenvolvimento de políticas públicas efetivas para a mitigação de emissões de GEE, em nível subnacional, em tempo hábil para que o Rio de Janeiro possa contribuir, com sua implementação, para o atingimento das metas nacionais estabelecidas para o Acordo de Paris, conforme disposto em sua Política Estadual Sobre Mudança Global do Clima e Desenvolvimento Sustentável (PEMCDS), alterada pela Lei nº 9.072, de 27 de outubro de 2020.

O mundo e o Brasil já se movem na direção da redução da intensidade de carbono da matriz energética e essa transição envolve desafios tecnológicos complexos e pressões evidentes sobre o mercado de petróleo e gás, com redução do investimento global nessa indústria. Face à transição energética, portanto, a janela de oportunidades de aproveitamento do potencial do ERJ como supridor de serviços e produtos relacionados à exploração de óleo e gás é muito limitada, mas ainda existem

possibilidades a jusante e a montante dessa cadeia de valor. Assim, interessa ao estado do Rio de Janeiro que a exploração e produção de óleo e gás (E&P) ocorram o mais brevemente possível, para que seja possível capitalizar os recursos de royalties e participações especiais decorrentes dessa atividade antes da restrição crescente ao uso dos combustíveis fósseis, que se espera de 2020 em diante (Fernandes et al, 2022). Além de captarem recursos para os cofres estaduais e municipais, as atividades de exploração e produção de óleo e gás induzem um movimento econômico expressivo relacionado à produção de outros bens necessários para a extração desses recursos, diretamente, ou à logística operacional de produção. Portanto, o maior desafio do governo do estado para as próximas décadas é estender os benefícios da produção de óleo e gás ao longo de uma cadeia de valor que possa utilizar o gás natural como fonte de energia ou como insumo para a produção industrial. Mesmo que o Rio de Janeiro não se beneficie necessariamente do ICMS sobre a geração de eletricidade e ainda não possa receber créditos por eventual redução das emissões de CO_2 do estado, o gás natural pode ser utilizado na geração de energia termoelétrica, pode substituir o carvão importado nas grandes usinas siderúrgicas do estado ou pode servir de insumo na indústria de plásticos, fertilizantes ou outros derivados de petróleo (Fernandes et al, 2022).

As oportunidades econômicas do estado do Rio de Janeiro não se limitam à indústria de O&G e a melhoria do ambiente de negócios, o investimento em conhecimento e inovação e o desenvolvimento da logística de transportes e dos setores de entretenimento e turismo podem fazer emergir diversas outras atividades, inclusive a agricultura. A agenda de meio ambiente e de descarbonização reforça as políticas de reflorestamento, de recuperação de áreas degradadas e de proteção de mananciais hídricos, além do desenvolvimento de setores como o de bioenergia, no norte do estado, com base na produção de cana de açúcar. Ademais, o desenvolvimento do turismo pode criar novos mercados para os pequenos produtores rurais e o desenvolvimento da logística de transportes pode reduzir os custos e o tempo de transporte da produção, aumentando a capacidade de fornecer produtos frescos, como hortaliças, para os mercados consumidores urbanos (Fernandes et al, 2022).

2.3.1. Arcabouço Normativo Estadual

O Rio de Janeiro já conta com sua própria Política Estadual Sobre Mudança do Clima, instituída pela Lei n° 5.690, de 14 de abril de 2010 (Rio de Janeiro, 2010), que foi alterada pela Lei nº 9.072, de 27 de outubro de 2020, recebendo a nova denominação de Política Estadual Sobre Mudança Global do Clima e Desenvolvimento Sustentável (PEMCDS) (Rio de Janeiro, 2020). Essa política foi concebida para assegurar a contribuição do Estado do Rio de Janeiro no cumprimento do propósito da CQNUMC, de alcançar a estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera em nível seguro para o sistema climático e em tempo hábil para uma adaptação natural dos ecossistemas às mudanças do clima, garantindo a produção de alimentos e propiciando um desenvolvimento econômico sustentável (Rio de Janeiro, 2010). A nova redação dada pela Lei 9.072/2020 acrescenta, como propósito específico: nortear a contribuição do ERJ para o cumprimento das metas estabelecidas pelo Brasil em 2015, no âmbito do Acordo de Paris (Rio de Janeiro, 2020).

A PEMCDS estabelece princípios, objetivos, diretrizes e instrumentos para a prevenção, a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas e para propiciar o estabelecimento de uma economia de baixo carbono no estado do Rio, fundamentada no princípio da economia circular e pautada na transição energética, com migração para uma matriz energética limpa (Rio de Janeiro, 2020). São princípios norteadores: a precaução, a participação pública no processo de decisão (democracia participativa), o desenvolvimento sustentável, a autonomia federativa e a vedação ao retrocesso, destacando-se o dever de atuação de todos em prol da mitigação dos impactos antrópicos sobre o clima. A PEMCDS ressalta também a importância de se considerar, na aplicação das medidas tomadas, os diferentes contextos socioeconômicos e as responsabilidades de cada parte interessada, de modo equitativo e equilibrado, sopesando a origem das fontes emissoras e seus efeitos sobre o clima (Rio de Janeiro, 2020).

É de competência do ERJ integrar as políticas públicas de transporte, energia, saúde, saneamento, indústria, agricultura e atividades florestais, além das políticas econômicas e fiscais, visando ao cumprimento dos seguintes objetivos, que devem estar alinhados com as CND brasileiras, do Acordo de Paris, os 17 Objetivos de

Desenvolvimento Sustentável (ODS), da Agenda 2030 da ONU, e as Convenções Mundiais de Florestas e de Biodiversidade (Rio de Janeiro, 2020):

> Art. 3° São objetivos da Política Estadual sobre Mudança do Clima:
> I - estimular mudanças de comportamento da sociedade a fim de modificar os padrões de produção e consumo, visando à redução da emissão de gases de efeito estufa e ao aumento de sua remoção por sumidouros;
> II - fomentar a participação do uso de fontes renováveis de energia no Estado;
> III - promover mudanças e substituições tecnológicas que reduzam o uso de recursos e as emissões por unidade de produção, bem como a implementação de medidas que reduzam as emissões de gases de efeito estufa e aumentem as remoções antrópicas por sumidouros de carbono no território estadual;
> IV - identificar as necessidades e as medidas requeridas para favorecer a adaptação aos efeitos adversos da mudança do clima nos municípios no Estado do Rio de Janeiro;
> V - fomentar a competitividade de bens e serviços que contribuam para reduzir as emissões de gases de efeito estufa;
> VI - preservar, conservar e recuperar os recursos ambientais, considerando a proteção da biodiversidade como elemento necessário para evitar ou mitigar os efeitos da mudança climática;
> VII - identificar e alinhar os instrumentos de ação governamental já estabelecidos, para a consecução dos objetivos desta Política, devendo consolidar e expandir as áreas legalmente protegidas e incentivar a recuperação de ecossistemas degradados de forma a permitir sua funcionalidade ecológica, bem como garantir a funcionalidade ecológica dentro das áreas urbanas e melhoria da qualidade de vida das pessoas;
> VIII - atualizar as metas de mitigação e adaptação previstas em regulamento;
> IX – VETADO. (Rio de Janeiro, 2010, 2020).

Ademais, a PEMCDS conta com diretrizes setoriais, que devem ser incorporadas às estratégias dos planos, programas, políticas, metas e ações vinculadas a atividades públicas ou privadas emissoras de gases de efeito estufa, para estimular a economia circular e contribuir para o estabelecimento de uma economia de baixo carbono (Rio de Janeiro, 2020). Essas diretrizes estão listadas no Artigo 6º, Capítulo III, da Lei nº 5690/2010:

> I - energia – promoção da melhoria da eficiência na oferta, na distribuição e no uso de energia, o aumento do uso de combustíveis com baixo teor de carbono, ou ainda, do de biocombustíveis, bem como apoiar as ações que promovam seqüestro de carbono e o uso de fontes de energias renováveis;
> II – transportes: compreende o que segue:
> a) incentivar a melhoria do transporte de massa e a integração dos sistemas de transportes;
> b) aumentar o uso de veículos eficientes;
> c) expandir o uso de sistemas sobre trilhos e aquaviários;
> d) renovar as frotas veiculares com utilização de alternativas de baixo carbono;
> e) incentivar o transporte coletivo em detrimento do individual;
> f) incentivar a redução da mobilidade através do estímulo ao compartilhamento de veículos individuais e o teletrabalho;

g) incentivar a construção de ciclovias como transporte de massa e logradouros públicos para fomentar o passeio dos transeuntes;
h) incentivar a implantação de equipamentos de mobilidade urbana que ofereça aos transeuntes a opção de caminhar;
III – resíduos: abarca o que segue:
a) minimizar a geração de resíduos;
b) maximizar o reuso e a reciclagem de materiais;
c) maximizar a implantação de sistemas de disposição final de rejeitos com recuperação energética, após o cumprimento da ordem de gerenciamento prevista no art. 9º, caput, e observadas as condicionantes previstas no § 1º, do art. 9º, ambos da Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010;
d) promover a recuperação do metano de aterros sanitários e nas estações de tratamento de esgoto;
IV - construção civil: compreende o que segue:
a) estimular o uso de:
1. critérios de eficiência energética na seleção e aquisição de equipamentos e aparelhos eletrodomésticos, na arquitetura e na construção civil;
2. sustentabilidade de materiais e de recursos naturais, fomentando o uso de madeira certificada, a utilização água da chuva para fim não potável nas edificações unifamiliares, multifamiliares, hospitalares, industriais e comerciais, o reuso de água cinza clara e a utilização, na forma de regulamento, de água subterrânea de poço artesiano para consumo humano;
b) incentivar as edificações ambientalmente sustentáveis, inclusive não permitindo que as concessionárias de serviço público de água e esgoto se utilizem do critério de consumo mínimo de água para fazer cobrança de tarifa, em consonância a Lei 8.984, de 21 de agosto de 2020;
c) introduzir nos catálogos estaduais de compras públicas os materiais e listas sustentáveis que representam menor emissão de GEE e melhores condições para adaptação aos impactos advindos das mudanças climáticas;
d) incentivar as edificações ambientalmente sustentáveis, inclusive a disseminação da hidrometração e o combate as perdas físicas de água com forma de preservar a água e evitar a sua escassez.
V - indústria: incentivar o uso de equipamentos e processos mais eficientes, de sua reciclagem e substituição, reuso de recursos naturais e reuso de materiais, bem como o controle das emissões de gases de efeito estufa, e o sequestro de carbono;
VI - agricultura e pecuária : incentivar manejo agroecológico, melhorar as práticas de cultivo para reduzir emissões de óxido nitroso (N2O) e outros gases, bem como promover a ampliação de culturas energéticas, especialmente em áreas degradadas, o controle de queimadas e a recuperação do metano resultante da degradação de matéria orgânica de resíduos agrícolas e da criação de animais, e reduzir a pressão dessas atividades sobre florestas e outros ecossistemas naturais, principalmente através do aumento da produtividade e prevenir a erosão e incêndios florestais;
VII - ambiente florestal: compreende o que segue:
a) promover a recuperação das áreas degradadas no Estado, mediante o estímulo a práticas de silvicultura, que adotem manejo florestal sustentável, e favoreçam o uso de produtos e subprodutos florestais, visando o fortalecimento da bioeconomia no Estado, inclusive para geração de energia, e incentivar a restauração e regeneração da Mata Atlântica, em consonância com a Lei Estadual nº 8.538, de 27 de setembro de 2019;
b) realizar o financiamento, de forma prioritária, de projetos de reflorestamento, restauração, preservação de áreas naturais do bioma de Mata Atlântica, garantindo a provisão das suas funções ecossistêmicas, incluindo a manutenção da biodiversidade, a redução da proliferação de doenças, o controle de enchentes, a proteção de encostas, o controle da erosão e outras medidas de enfrentamento aos eventos extremos e/ou vulnerabilidades climáticas para o Estado do Rio de Janeiro;

> c) criar mobilização social permanente com treinamento de pessoal e disponibilização de equipamentos para o combate continuado das queimadas no Estado do Rio de Janeiro sob supervisão de um sistema efetivo de defesa civil.
> VIII – serviços: criar programas específicos para o setor de serviços, dentre eles, Hospitais, Hotéis, Shopping Centers, Supermercados, Clubes, Escolas, a fim de reduzir a emissão de GEE, e prepará-los para a adaptação aos impactos previstos para as mudanças climáticas;
> IX – turismo: Criar programa setorial para fortalecer o turismo sustentável por meio de “selos verdes”, pagamentos por serviços ambientais e de programas de premiação ao turismo que evita a emissão de GEE;
> X – V E T A D O.
> XI – saneamento básico: incentivar o uso de tecnologias ecológicas, com similaridades ao ecossistema local, para tratamento de esgoto e revitalização de rios, priorizando as técnicas de fitorremediação e de terras úmidas (wetlands) construídas, incluindo modelos descentralizados em áreas de grande adensamento populacional.
> (Rio de Janeiro, 2010, 2020).

A PEMCDS também estabelece que o ERJ deve definir medidas reais, mensuráveis e verificáveis de redução das emissões antrópicas de GEE em seu território, conforme o Capítulo VII da Lei n° 5.690/2010. Essas metas podem ser de estabilização ou redução de emissões isoladamente ou em conjunto com outras regiões do Brasil ou do mundo, metas de eficiência setoriais ou mecanismos adicionais de troca de direitos obtidos (Rio de Janeiro, 2010). O ERJ deve ainda fomentar o desenvolvimento de um mercado de carbono, estimulando iniciativas capazes de gerar Reduções Certificadas de Emissão e outros créditos de carbono, preservados os princípios de adicionalidade, voluntariedade e viabilidade econômica dos projetos de redução e remoção de carbono (a exemplo do SBCE). Ademais, o capital proveniente da alienação dos créditos de carbono de benefício ou titularidade do Estado do Rio de Janeiro deve ser aplicado em favor das populações mais vulneráveis residentes no entorno dos empreendimentos que geraram os recursos ou, no caso de aterros sanitários, da população que historicamente mais sofreu os impactos negativos da disposição inadequada dos resíduos sólidos (Rio de Janeiro, 2020).

Para atingir os seus objetivos, a PEMCDS conta com os seguintes dez instrumentos, listados no Capítulo IV da Lei nº 5690/2010:

a) Plano Estadual sobre Mudança do Clima (PEMC): foi elaborado pela primeira vez em 2012 e passa por um processo contínuo de revisão, ponderando os resultados dos inventários de emissões e as orientações do Plano Nacional de Mudança do Clima (Rio de Janeiro, 2024). Tem como propósito criar metas para que o ERJ possa contribuir com as CND

brasileiras do Acordo de Paris e fortalecer iniciativas de preservação das unidades de conservação e da cobertura vegetal remanescente no estado, que são importantes reservatórios de biodiversidade e funcionam como sumidouros de carbono. Além disso, o PEMC tem o papel de integrar as agendas dos setores de recursos hídricos, saúde humana, drenagem urbana, riscos de deslizamentos, transportes, zona costeira, recursos naturais, agropecuária, biodiversidade e ecossistemas (Rio de Janeiro, 2020)

b) Fórum Rio de Mudanças Climáticas: foi instituído pela primeira vez ainda em 2007, pelo Decreto nº 40.780 de 23 de maio de 2007, com o objetivo geral de conscientizar e mobilizar a sociedade e o governo do Estado do Rio de Janeiro, para discussão e apoio sobre o fenômeno das mudanças climáticas globais (Rio de Janeiro, 2007, a). Funciona com o apoio material e administrativo da Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS), como ente consultivo, para monitorar o PEMC e engajar a sociedade e o Governo do ERJ para discutir e apoiar as ações de controle das mudanças climáticas (Rio de Janeiro, 2020b). Conta com reuniões periódicas, registradas em atas oficiais, com a participação de secretarias do governo e membros da academia e da sociedade civil (Rio de Janeiro, 2024).

c) Cadastro Estadual de Emissões (CEE): é regulamentado pela Norma Operacional (NOP) INEA 52/2022, que estabelece os procedimentos, requisitos gerais e critérios para atendimento ao Programa de Relato de Emissões de Gases de Efeito Estufa (PRE), para fins de Licenciamento Ambiental. A NOP se aplica a empreendimentos em operação no ERJ, seja por adesão voluntária ou mandatória. Uma resolução conjunta da Secretaria de Estado do Ambiente (SEA) e da extinta Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) determinou às empresas, ainda em 2007, a inclusão de inventário de emissão de gases de efeito estufa nos procedimentos de Licenciamento Ambiental, por meio da Resolução Conjunta nº 22, de 8 de junho de 2007 (Rio de Janeiro, 2022). Mais recentemente, a Resolução INEA/PRES nº 64, de 12 de dezembro de 2012, passou a regulamentar a apresentação de inventário de emissões de gases de efeito estufa para fins de licenciamento ambiental no Estado do Rio de

Janeiro, com base na metodologia de cálculo do Protocolo de Gases de Efeito Estufa (PGEE), do inglês: *Greenhouse Gas Protocol (GGP)* (Rio de Janeiro, 2012). A ABNT NBR ISO 14064:1: Gases de efeito estufa: Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa serve como referência para a elaboração dos relatórios de emissões das empresas (ABNT, 2007). Cabe à Gerência de Qualidade do Ar (GERAR), por meio do Núcleo de Gases de Efeito Estufa (NUCGEE), do Serviço de Emissões Atmosféricas e Gases de Efeito Estufa (SERVEA), vincular os empreendimentos poluidores ao PRE e avaliar o atendimento ao que dispõe a NOP 52/2022. Os dados devem ser medidos e registrados por uma Organização Inventariante (OI) contratada pela Entidade Relatora (empreendimento) e os resultados devem ser verificados por um Organismo Validador e Verificador (OVV) independente (Rio de Janeiro, 2022).

d) Cadastro Estadual de Sumidouros (CES): é um instrumento para preservação e ampliação de sumidouros estabelecidos voluntariamente por agentes públicos ou privados, cujos resultados também devem ser medidos, registrados e verificados por certificadores independentes (Rio de Janeiro, 2010). Sumidouros podem ser ecossistemas naturais, alterados ou em regeneração, capazes de absorver e armazenar o dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, reduzindo sua concentração no ar (Rio de Janeiro, 2024). As florestas, por exemplo, são sumidouros naturais de carbono e as áreas em processo de restauração florestal da Mata Atlântica do ERJ podem desempenhar um papel importante no combate às mudanças climáticas. O CES prevê sumidouros terrestres, ou seja, florestas e solos manejados, compreendendo as fitofisionomias florestais existentes no território fluminense: florestas ombrófilas densa, florestas estacionais deciduais e semideciduais, restingas e manguezais. Os responsáveis pelo cadastro são os gestores das unidades de conservação, os proprietários de áreas florestadas ou em regeneração no território fluminense, além de instituições com projetos de restauração florestal ou ecológica (Rio de Janeiro, 2024). Apesar de algumas iniciativas e estudos a respeito dos sumidouros naturais, como: “Potencial de Absorção de CO_2 pela Restauração Florestal no Estado do Rio de Janeiro” (IVIG, 2023) e “Potencial de Remoção de CO_2 e

Produção de Bioenergia pela Implantação / Expansão das Florestas Energéticas nos Distritos Florestais do Estado do Rio de Janeiro" (Rio de Janeiro, 2021), o cadastro desses sumidouros em si ainda não está estruturado.

e) Estimativas Anuais de Emissões de GEE: passaram a ser entregues anualmente pelo ERJ a partir de 2024, em parceria com o SEEG (Rio de Janeiro, 2024), uma iniciativa do Observatório do Clima (OC), coalizão de organizações da sociedade civil brasileira para discussão das mudanças climáticas (OC, 2024). Os dados do SEEG são apresentados no padrão internacional GWP AR5, o mesmo utilizado para as CND do Brasil. As estimativas apresentadas incluem todos os gases do efeito estufa, tais como: gás carbônico (CO_2), metano (CH_4), dióxido de carbono (N_2O) e hidrofluorcarbonos (HFC), agrupados em diferentes temas, em painéis que podem ser visualizados, analisados e baixados gratuitamente (SEEG, 2024). O Inventário Estadual de Emissões de GEE, por sua vez, deveria ser elaborado a cada 5 anos, a partir de 2010, conforme a Lei Nº 5690, de 14 de abril de 2010. Entretanto, após a elaboração do inventário inicial para o ano de 2005 e sua atualização para 2010 (Centro Clima, 2017), o último inventário de emissões de GEE realizado pelo ERJ foi o de 2015, publicado em 2017, em parceria com o laboratório Centro Clima, da COPPE/UFRJ (Rio de Janeiro, 2024).

f) Sistema Estadual de Informações sobre Mudança do Clima (SEIMC): foi estabelecido pela SEAS por meio do Portal de Mudanças Climáticas do Estado do Rio de Janeiro[1], um sistema de monitoramento climático estadual criado para organizar e comunicar todos os dados e informações relevantes a respeito das mudanças climáticas no ERJ (Rio de Janeiro, 2024).

g) Zoneamento Econômico Ecológico do Estado do Rio de Janeiro (ZEE): estabelecido pela Lei nº 5067, de 09 de julho de 2007, tem por objetivo organizar, de forma vinculada, as decisões dos agentes públicos e privados quanto a planos, programas, projetos e atividades que, direta ou indiretamente, utilizem recursos naturais, assegurando a plena manutenção

[1] O Portal de Mudanças Climáticas do Estado do Rio de Janeiro está disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br/portal/apps/sites/#/portal-de-mudancas-climaticas-do-estado-do-rio-de-janeiro>.

do capital e dos serviços ambientais dos ecossistemas (Rio de Janeiro, 2007, b).

h) Inventário Florestal Estadual (IFE): tem como objetivo produzir informações quinquenais sobre o grau de conservação da biodiversidade, a fragmentação florestal, a dinâmica da cobertura florestal e o monitoramento da estocagem de carbono por atividades de restauração florestal e desmatamento evitado (Rio de Janeiro, 2024). Os inventários florestais do ERJ são extraídos dos resultados dos Inventários Florestais Nacionais elaborados pelo Serviço Florestal Brasileiro, do Ministério do Meio Ambiente, que publicam relatórios parciais para cada estado brasileiro. O inventário mais recente é de 2018 (SFB/MMA, 2018).

i) Fundo Estadual de Conservação Ambiental e Desenvolvimento Urbano (FECAM): foi criado pela Lei nº 1060, de 10 de novembro de 1986, para estimular um desenvolvimento econômico que pudesse ser conciliado com a preservação da fauna e da flora e a proteção do meio ambiente, preservando-o de alterações físicas, químicas ou biológicas nocivas à saúde, à segurança ou ao bem-estar das populações (Rio de Janeiro, 1986). Esse fundo, mais recentemente alterado pela Lei nº 10.164, de 31 de outubro de 2023 (Rio de Janeiro, 2023), financia programas e projetos ambientais e de desenvolvimento urbano em todo o ERJ e pode ter seus recursos empregados na implementação dos objetivos da PEMCDS (Rio de Janeiro, 2024). Seus recursos consistem em: 5% da participação no resultado ou compensação financeira pela exploração de petróleo ou gás natural, de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica e de outros recursos minerais no território, plataforma continental, mar territorial ou zona econômica exclusiva do ERJ; multas e indenizações referentes a infrações ambientais; taxas ou contribuições arrecadadas pela utilização de recursos ambientais; dotações e créditos adicionais atribuídos pelo ERJ; repasses, doações ou qualquer outra transferência de pessoas físicas ou jurídicas de direito público ou privado e rendimentos provenientes de suas operações e aplicações financeiras (Rio de Janeiro, 1986).

j) Licenciamento Ambiental: o licenciamento de empreendimentos com significativa emissão de gases de efeito estufa também é um instrumento da PEMCDS e a concessão ou renovação de licenças de instalação ou de

> operação para esse tipo de empreendimento está sujeita à apresentação de inventário de emissões de gases de efeito estufa e plano de mitigação de emissões e medidas de compensação. Ademais, as licenças de instalação podem ser condicionadas à obrigação de neutralização total ou parcial das respectivas emissões de gases de efeito estufa (Rio de Janeiro, 2010).

A regulamentação da Lei nº 5.690/2010 se deu pelo Decreto nº 43.216, de 30 de setembro de 2011, que estabeleceu normas para a sua execução, particularmente quanto à redução das emissões de GEE e a adaptação às mudanças climáticas. Esse decreto definiu metas para a redução das emissões de GEE no ERJ, tendo como base os anos de 2005 ou 2010 e tendo como horizonte o ano de 2030. Ademais, o decreto criou o Conselho Estadual de Mudanças Climáticas para acompanhar a implantação do Plano Estadual de Mudança Climática e fiscalizar a execução da Política Estadual de Mudanças Climáticas. Esse conselho é composto por representantes do governo estadual, das prefeituras municipais e da sociedade civil, tem caráter deliberativo e é coordenado pela Secretaria Estadual do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS) (Rio de Janeiro, 2011).

O ERJ contabiliza as emissões de CO_2, CH_4 e N_2O, em unidades de CO_2 equivalente (CO_2e), provenientes dos setores de energia (indústria de energia, indústria de manufatura, transportes, comércio, setor público, residências, agropecuária e emissões fugitivas), processos industriais e uso de produtos, do inglês: *industrial processes and product use (IPPU)* (minerais não metálicos, indústria química, minerais metálicos, uso de produtos não energéticos de combustíveis fósseis e uso de anestésicos), agricultura, floresta e outros usos do solo, do inglês: *agriculture, forests and other land use (AFOLU)* (variação nos estoques de carbono associados a mudanças no uso do solo e práticas pecuárias e agrícolas) e resíduos (disposição de resíduos sólidos urbanos e industriais e tratamento de esgotos domésticos e de efluentes industriais). A meta estadual de redução de emissões de GEE é definida com base na intensidade de carbono, calculada em termos de toneladas de CO_2e emitidas por unidade de Produto Interno Bruto (PIB): tCO_2eq/PIB. Para o setor de saneamento, a meta é de 65% de redução das emissões per capita até 2030, em relação a 2005, tanto para esgoto sanitário quanto para resíduos sólidos. As emissões de GEE provenientes do tratamento e despejo de efluentes domésticos deverão diminuir de 31 $kgCO_2e/hab/ano$ em 2005 para 11 $kgCO_2e/hab/ano$ em 2030 e as emissões resultantes da disposição de resíduos sólidos deverão ser reduzidas de 241

$kgCO_2e$/hab/ano em 2005 para 84 $kgCO_2e$/hab/ano em 2030. Para o setor de energia, a meta é de 30% de redução no subsetor de transportes, em relação a 2010 e 30% de redução no consumo de energia pelo setor público, em relação a 2005. Por fim, o decreto estabelece que a intensidade de carbono do Estado do Rio de Janeiro em 2030 deve ser inferior à de 2005 (Rio de Janeiro, 2011).

Em sua política de descarbonização, o governo do ERJ não pode deixar de considerar, além da redução das emissões de GEE, o crescimento do PIB e a geração de empregos. Portanto, é imprescindível construir modelos econômicos capazes de fundamentar as decisões do governo e orientar a elaboração de políticas públicas mais assertivas, que ajudem a estabelecer medidas concretas de redução de emissões de GEE, ponderando seus efeitos macroeconômicos. É preciso desenvolver modelos quantitativos capazes de mensurar os impactos que as políticas de descarbonização podem ter sobre a economia do estado, para calibrar as metas e os instrumentos necessários para atingi-las, como taxas, impostos ou subsídios, ou mesmo simular os efeitos da instituição de um mercado de carbono. Esta dissertação contribui com um primeiro passo para esse objetivo, com a elaboração de um modelo de insumo-produto, conforme a metodologia descrita no próximo capítulo.

3 METODOLOGIA

O primeiro choque do petróleo, em 1973, evidenciou a relevância da energia para a economia e provocou um aumento significativo do interesse pelo setor energético (Bhattacharyya, 1996). Esse cenário impulsionou o desenvolvimento de diversos modelos econômicos voltados para a análise de políticas energéticas, na década de 1970. Alguns desses modelos se concentraram principalmente nas questões de oferta e demanda de energia e nas tecnologias associadas, enquanto outros passaram a explorar a interação entre energia e economia. Como as políticas energéticas envolvem múltiplos aspectos econômicos, como a formação de preços, a determinação da produção, a geração e distribuição de renda, o comportamento de consumo, o funcionamento do governo etc., os modelos de Equilíbrio Geral Aplicado (EGA), do inglês: Applied General Equilibrium (AGE) ganharam popularidade entre os especialistas em modelagem de energia, oferecendo um mecanismo coerente e sistemático para esse tipo de análise (Bhattacharyya, 1996).

A análise de Equilíbrio Geral Aplicado envolve o uso de um modelo de equilíbrio geral especificado numericamente para a avaliação de políticas econômicas. Apesar de ter o uso bastante difundido na economia moderna, o termo "equilíbrio geral" muitas vezes não está claramente definido, mas existe um consenso em torno da seguinte característica: um modelo de equilíbrio geral é aquele em que ocorre o equilíbrio de todos os mercados, embora haja menos acordo em relação aos elementos estruturais essenciais que sustentam essa formulação de equilíbrio (Shoven & Whalley, 1984).

A primeira aplicação de um modelo de EGA em estudos energéticos foi realizada por Hudson e Jorgenson, em 1974, inaugurando a abordagem dos modelos econométricos na modelagem de EGA. Nesse modelo, uma estrutura de produção intersetorial sensível aos preços foi integrada a um modelo de demanda agregada de longo prazo, representando um avanço metodológico significativo. Ele foi utilizado para projetar a demanda de energia para o período de 1975 a 2000 e para analisar os impactos das políticas tributárias no consumo de energia. O modelo de Manne e Richels (1977) seguiu uma linha semelhante, mas com uma abordagem diferente: adotaram uma descrição detalhada das tecnologias energéticas e uma representação agregada para o restante da economia. Esses primeiros trabalhos incentivaram outros pesquisadores a empregar modelos macroeconômicos em estudos de energia, o que levou ao desenvolvimento de novos modelos econômico-energéticos baseados no

EGA, a partir da década de 1980. Embora a estrutura e o foco desses modelos variem consideravelmente, o ponto comum reside na análise das interações entre os setores energético e não energéticos (Bhattacharyya, 1996).

Na década de 1980, com o crescente destaque das questões ambientais, o foco passou a incluir a redução e o controle das emissões de gases poluentes decorrentes do uso de energia. Esforços crescentes passaram a ser realizados para compreender os diversos impactos da poluição e desenvolver políticas para conter a degradação ambiental. Como o setor energético é a principal fonte de poluição ambiental no mundo, muitos desses novos modelos evoluíram a partir dos modelos energéticos anteriores e os modelos de EGA entraram em uma fase de crescimento. Com sua capacidade de captar as complexidades econômicas, os modelos EGA se revelaram úteis para a análise dos impactos econômicos associados ao controle da poluição e dos gases de efeito estufa. Tendo em vista a natureza dos problemas de poluição ambiental e aquecimento global, os analistas passaram a adaptar os seus modelos, o que resultou no desenvolvimento de modelos de EGA globais e de longo prazo. (Bhattacharyya, 1996).

Segundo Boreo et al. (1991), apud Bhattacharyya (1996), as questões abordadas na análise ambiental podem ser agrupadas em duas categorias principais:

a) consequências do aquecimento global sobre a economia e o bem-estar social;

b) impactos econômicos do controle dos níveis de emissões de gases de efeito estufa.

Os modelos de EGA geralmente focam na segunda categoria e buscam estimar os custos de mitigação das emissões de GEE, comparando dois cenários: um de referência, sem implementação de estratégias de limitação das emissões, e outro restritivo, com imposição de limites de emissão de carbono. Essas questões podem ser exploradas nos níveis regional, nacional, multinacional ou global e é possível encontrar muitas variações desse tipo de estudo na literatura. É possível avaliar, por exemplo, como a economia será afetada (em termos de perda do PIB ou de bem-estar social) se a quantidade de emissões de gases de efeito estufa for restringida a um determinado nível dentro de um prazo específico ou investigar os impactos da adoção de um determinado valor de imposto sobre o carbono na economia. Os problemas típicos analisados por esses estudos incluem: definição de taxas de imposto, distribuição de receitas, natureza do imposto (consumo ou produção) e incertezas e

ambiguidades relacionadas. Em modelos globais, podem ser considerados fatores como os efeitos da tributação sobre o comércio e as diferenças marcantes nos padrões de produção e consumo de fontes de energia baseadas em carbono etc., buscando capturar também o fenômeno da "fuga de carbono", que está ligado ao comércio internacional (Bhattacharyya, 1996).

Não é uma tarefa simples classificar os diferentes tipos de modelos de EGA e podem ser utilizados diversos critérios, dentre os quais a tradição de modelagem. Ademais, cada tipo de modelagem pode ser classificado de acordo com sua abrangência espacial (regional, nacional, multinacional, global), desagregação setorial, periodicidade (período único ou múltiplos períodos), natureza (estática ou dinâmica), entre outros critérios (Bhattacharyya, 1996).

Modelo de Equilíbrio Geral Aplicado (EGA) é, portanto, uma denominação ampla, que se refere ao uso de modelos de equilíbrio geral para o estudo de questões econômicas específicas, particularmente associadas à relação entre economia e energia, a partir da década de 70, devido à crise do petróleo. Na década de 1980, com o crescente destaque das questões ambientais, os modelos passaram a incluir a redução e o controle das emissões de gases poluentes decorrentes do uso de energia e de gases de efeito estufa.

Uma classe importante de modelo de equilíbrio geral que se desenvolveu a partir dessa época foi a dos modelos de Equilíbrio Geral Computável (EGC), que utilizam os dados empíricos de uma MCS para calibrar e simular o funcionamento de uma economia, representando matematicamente todas as interações e interdependências entre consumidores, produtores, governo e o setor externo. Esses modelos requerem técnicas numéricas e programas computacionais para resolver as equações simultâneas que caracterizam o equilíbrio geral. Assim, EGC é uma denominação específica de modelos que realizam análises computacionais, com base em dados empíricos, exigindo técnicas numéricas para a solução do modelo de equilíbrio geral, enquanto EGA se refere a modelos de equilíbrio geral utilizados em análises aplicadas, podendo ou não envolver soluções computacionais complexas.

Para os modelos de EGC, portanto, a base empírica é a Matriz de Contabilidade Social (MCS), uma tabela estática, para um determinado ano, que apresenta todos os fluxos de trocas entre os agentes. A MCS se baseia no princípio do equilíbrio entre usos e recursos, igualdade contábil que é verificada não apenas em nível global, mas também para cada agente: empresas, famílias, governo e resto do mundo. Ademais,

as famílias também podem ser divididas em setores ou categorias sociais. Assim, a MCS é uma generalização das Matrizes Insumo-Produto (MIP), que representam as trocas intersetoriais. A MCS, por si só, já fornece informações interessantes e é possível deduzir, a partir dela, multiplicadores que se assemelham aos dos modelos insumo-produto tradicionais e possuem as mesmas propriedades: correspondem a um modelo keynesiano em uma situação de oferta excedente. Dessa forma, as transações são determinadas pela demanda e os preços são fixos. Se tornarmos esses preços endógenos, na hipótese de preços fixos, passamos a ter um modelo de EGC propriamente dito (Suwa, 1991).

Desde o final da década de 1960, a estrutura básica da MIP tem sido ampliada por muitos pesquisadores para considerar a geração ou a mitigação de poluição ambiental associada à produção intersetorial (Miller & Blair, 2009) e, a partir da década de 70, houve uma evolução para a abordagem macroeconômica das questões ambientais, a partir do desenvolvimento prévio de modelos econômicos de EGA voltados para a análise de políticas energéticas. Essa abordagem macroeconômica das questões ambientais e energéticas, por sua vez, parte do desenvolvimento de uma MCS, a partir da construção prévia de uma MIP que represente as trocas intersetoriais, com nível de agregação adequado para a análise que se pretende fazer.

Os modelos de EGC permitem representar toda a estrutura macroeconômica de um país, caracterizada pela interação entre o comportamento de consumidores e produtores no mercado. Os consumidores demandam bens e serviços, que são pagos com a renda obtida pela oferta dos seus fatores de produção, buscando maximizar sua utilidade. Os produtores, por sua vez, buscam maximizar seus lucros, ofertando bens e serviços produzidos a partir de insumos primários e intermediários. Um mecanismo de ajustamento de preços permite equilibrar a demanda dos consumidores e a oferta dos produtores e todos os agentes do mercado estão sujeitos às políticas econômicas fiscais e monetárias definidas pelo governo. Ademais, consumidores e produtores podem comercializar seus fatores de produção, bens e serviços com o resto do mundo, pagam impostos e podem receber subsídios ou transferências do governo. Essa estrutura macroeconômica funciona como um fluxo circular de bens, serviços e renda, que pode ser representado na forma de uma matriz com todas as transações da economia. Essa representação é conhecida como Matriz de Contabilidade Social (MCS), que é uma forma expandida da Matriz Insumo-Produto (MIP), contemplando, além dos insumos e produtos, a remuneração pelos fatores de

produção (trabalho, capital e terra) de cada um dos setores produtivos e instituições (famílias, governo, empresas e resto do mundo). O modelo de EGC é formulado para equilibrar a MCS e projetar sua evolução ao longo do tempo, de acordo com diversas premissas, por meio de equações que otimizam a alocação de recursos, a partir do mecanismo de formação de preços entre agentes e setores e entre instituições domésticas e estrangeiras (Pereira Junior et al, 2024).

Em sua Tese de Doutorado, Wills (2013) desenvolveu o Modelo de Equilíbrio Geral Computável IMACLIM-S BR para analisar o impacto de políticas climáticas como a taxação de carbono ou o mercado de cota de emissões de GEE sobre a economia do Brasil, utilizando indicadores macroeconômicos como: PIB, dívida pública, inflação e taxa de desemprego, além do nível de produção dos principais setores da economia brasileira. O modelo foi calibrado para o ano-base de 2005, com base em uma matriz insumo-produto híbrida e uma matriz de contabilidade social, com alto nível de desagregação, para representar a economia brasileira e o sistema fiscal de maneira detalhada. A inovação desse modelo está na integração de dados bottom-up (informações setoriais) com uma abordagem do tipo top-down (arcabouço de equilíbrio geral), que agrega demais informações relevantes a respeito da economia brasileira. Essa metodologia permite avaliar melhor os efeitos macroeconômicos de políticas climáticas, especialmente se comparada à abordagem tradicional dos modelos EGC baseados em funções de produção com elasticidades de substituição constantes. Os resultados da tese indicam que a forma como o governo utiliza as receitas de carbono influencia bastante o impacto que a política climática exerce sobre a economia e as emissões de GEE.

Este trabalho toma o ERJ como caso de estudo para analisar os aspectos macroeconômicos, em nível subnacional, de políticas públicas de mitigação de emissões de GEE, avaliando o impacto de metas de descarbonização estabelecidas para os principais setores emissores da economia fluminense, a exemplo do que Wills (2013) fez em nível nacional, para o Brasil. O primeiro passo para a elaboração de um modelo de EGC como o IMACLIM-S BR para o ERJ é a construção de uma Matriz de Insumo-Produto híbrida (com dados monetários relativos às transações econômicas e dados físicos relacionados às emissões de GEE), com nível de desagregação suficiente para uma boa representação da economia fluminense e das emissões de GEE pelos setores mais relevantes e que seja compatível com a fonte oficial de informações a respeito de emissões de GEE no ERJ: o SEEG.

3.1. MATRIZ INSUMO-PRODUTO

Matriz Insumo-Produto (MIP) é o nome que se dá a um arcabouço analítico desenvolvido pelo Professor Wassily Leontief em seu artigo: "*Quantitative Input-Output Relations in the Economic System of the United States"*, publicado no volume número 18 da revista científica *Review of Economics and Statistics*, em 1936, que lhe rendeu o Prêmio Nobel de Ciências Econômicas, décadas depois, em 1973. A MIP também pode ser chamada de Modelo de Leontief, em homenagem ao autor, ou Análise Intersetorial, porque relaciona a interdependência entre os diferentes setores de uma economia (Miller & Blair, 2009). A MIP consiste, basicamente, em um sistema de equações lineares que descrevem a distribuição dos produtos pela economia, permitindo compreender como a produção de bens e serviços em um setor depende diretamente da produção de bens e serviços em outros setores, oferecendo uma visão detalhada das interdependências entre os diferentes setores de uma economia. Extensões aplicadas a esse modelo são capazes de incorporar detalhes a respeito da atividade econômica no tempo ou no espaço, acomodar limitações da base de dados ou mesmo conectar a MIP com outras ferramentas de análise econômica. Além disso, é possível detalhar os fluxos inter-regionais e internacionais de produtos e serviços e contabilizar o consumo de energia e a emissão de poluentes associados às atividades intersetoriais. O uso de modelos baseados em matrizes insumo-produto não era prático antes da computação moderna, porque os cálculos eram muito demandantes, mas a difusão dos computadores permitiu a popularização da análise de insumo-produto, que hoje é vastamente aplicada em níveis local, regional, nacional e internacional, para análise e planejamento econômico (Miller & Blair, 2009).

A MIP é construída com base em dados econômicos coletados para uma determinada região geográfica, como o Brasil, a Região Sudeste, o estado do Rio de Janeiro ou qualquer outra divisão para a qual se tenha os dados necessários. Interessam, particularmente, os dados relativos a setores econômicos (grupos de indústrias) que tanto produzam bens ou serviços (produtos) quanto consumam bens ou serviços de outros setores (insumos) em seus processos produtivos. O número de setores produtivos analisados pode variar conforme o nível de agregação dos produtos e indústrias. A abordagem Produto por Setor (Commodity-by-Industry) relaciona os produtos (*commodities*) com os setores (*industries*) que os produzem. Cada setor produz uma certa quantidade de cada produto e a matriz insumo-produto

registra essa relação. Os setores não só produzem bens e serviços, como consomem produtos de outros setores, que servem como insumos em seus processos produtivos. A abordagem Produto por Setor captura esses fluxos de insumos e produtos entre os setores produtivos e considera também a demanda final por produtos, representada pelo consumo das famílias, gastos do governo, investimentos e exportações. Ao examinar como as indústrias estão interconectadas através dos produtos que produzem e consomem, essa abordagem ajuda a estimar tanto os efeitos diretos quanto indiretos de mudanças na produção de uma indústria sobre as outras (Miller & Blair, 2009). Por exemplo, um aumento ou redução na demanda de aço pode impactar não apenas a indústria siderúrgica, mas também as indústrias que fornecem insumos para a sua produção, como os setores de mineração ou energia.

A MIP também pode fazer parte de um arcabouço mais completo, que integra os fluxos de renda entre os agentes, como salários, lucros, impostos, transferências e consumo, aos dados de produção dos diversos setores econômicos, para formar uma Matriz de Contabilidade Social (MCS) (Miller & Blair, 2009). A MCS, por sua vez, é o principal conjunto de dados de entrada de um Modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) e pode ser construída com os dados da MIP e das Contas Econômicas Integradas (CEI), publicadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (Pereira Junior et al, 2024). No entanto, por uma questão de limitação de escopo, este trabalho se concentra na construção de uma MIP, para uma abordagem preliminar da questão, com base em um modelo de insumo-produto.

3.1.1. Estrutura Básica da Análise de Insumo-Produto

O modelo de insumo-produto é desenvolvido a partir da informação básica contida em uma tabela de transações intersetoriais. As linhas da tabela descrevem a distribuição dos produtos de um produtor pela economia e as colunas descrevem a composição de insumos necessários para a produção de uma determinada indústria. Essas trocas intersetoriais de bens constituem o consumo intermediário, representado pela parte sombreada da tabela ilustrada no quadro 01. As colunas adicionais, denominadas Demanda Final, registram as vendas de cada setor para os mercados finais de sua produção, como consumo das famílias, formação bruta de capital fixo, consumo do governo e exportações líquidas de bens e serviços. As linhas adicionais, chamadas de Valor Adicionado, contabilizam os demais insumos (não industriais)

necessários à produção, como remunerações, depreciação de capital, impostos e importações. As trocas de bens entre os setores são, na verdade, vendas e compras de bens físicos, mas é possível registrar essas trocas em termos físicos ou monetários, ao contabilizar as transações entre todos os setores (Miller & Blair, 2009).

Quadro 01 – Tabela de transações da MIP

		Produtores como consumidores											Demanda final			
		AFOLU	Óleo e gás	Outras indústrias extrativas	Derivados de petróleo e biocombustíveis	Minerais não-metálicos	Metalurgia	Outras indústrias de transformação	Eletricidade e gás	Saneamento	Transporte	Serviços	Despesas de consumo pessoal (consumo das famílias)	Investimento Bruto Privado Interno	Compras governamentais de bens e serviços (consumo do governo)	Exportações líquidas de bens e serviços
Produtores	AFOLU															
	Óleo e gás															
	Outras indústrias extrativas															
	Derivados de petróleo e biocombustíveis															
	Minerais não-metálicos															
	Metalurgia															
	Outras indústrias de transformação															
	Eletricidade e gás															
	Saneamento															
	Transporte															
	Serviços															
Valor Adicionado	Empregados	Remunerações											Produto Interno Bruto (PIB)			
	Empresários e capital	Lucro e depreciação do capital														
	Governo	Impostos indiretos sobre empresas														

Fonte: Elaboração própria, com base em Miller & Blair, 2009.

Um conjunto essencial de dados para o modelo de insumo-produto são os valores monetários das transações entre pares de setores, ou seja, de cada setor i para cada setor j, designados como z_{ij}. A demanda do setor j por insumos de outros setores está relacionada à quantidade de bens produzidos pelo setor j no mesmo período; por exemplo: a demanda do setor automobilístico pela produção do setor siderúrgico está intimamente relacionada ao nível de produção de automóveis. Ademais, existem vendas que são feitas para agentes exógenos aos setores industriais (famílias, governo e comércio exterior), cujas demandas geralmente não estão relacionadas ao nível de produção setorial; por exemplo: a demanda do governo por aeronaves estará relacionada a mudanças na política nacional, níveis orçamentários ou necessidades de defesa. Como esses agentes externos tendem a demandar bens de consumo e não insumos de produção, essa demanda geralmente é chamada de demanda final (Miller & Blair, 2009).

Para uma economia de n setores, sendo x_i a produção total do setor i e f_i a demanda final total pelos produtos do setor i, a equação que descreve a distribuição dos produtos do setor i para outros setores e a demanda final é:

$$x_i = z_{i1} + \cdots + z_{ij} + \cdots + z_{in} + f_i = \sum_{j=1}^{n} z_{ij} + f_i \quad (1)$$

Os termos z_{ij} representam as transações intersetoriais do setor i para o setor j, também chamadas de consumo intermediário, e existe uma equação como essa para cada setor n:

$$\begin{bmatrix} x_1 = z_{11} + \cdots + z_{1j} + \cdots + z_{1n} + f_1 \\ \vdots \\ x_i = z_{i1} + \cdots + z_{ij} + \cdots + z_{in} + f_i \\ \vdots \\ x_n = z_{n1} + \cdots + z_{nj} + \cdots + z_{nn} + f_n \end{bmatrix} (2)$$

Sendo $\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdots & z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix}$ e $\boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix}$,

$$\boldsymbol{x} = \boldsymbol{Zi} + \boldsymbol{f} \ (3)$$

Onde **i** representa um vetor coluna unitário de dimensão n (vetor soma). A pós-multiplicação de uma matriz por **i** resulta em um vetor coluna cujos elementos são os somatórios das linhas da matriz. Analogamente, **i`** é um vetor linha unitário e a pré-multiplicação de uma matriz por **i`** cria um vetor linha cujos elementos são os somatórios das colunas da matriz. Os elementos da j'ésima coluna de z_{ij} são as vendas para o setor j (insumos de j) (Miller & Blair, 2009). O quadro 02 mostra o fluxo de bens nas transações intersetoriais, conforme a formulação apresentada.

Quadro 02 – Transações intersetoriais na MIP

		Setor comprador				
		1	…	*j*	…	*n*
Setor vendedor	1	z_{11}	…	z_{1j}	…	z_{1n}
	⋮	⋮		⋮		⋮
	i	z_{i1}	…	z_{ij}	…	z_{in}
	⋮	⋮		⋮		⋮
	n	z_{n1}	…	z_{nj}	…	z_{nn}

Fonte: Elaboração própria, com base em Miller & Blair, 2009.

O vetor Demanda Final é composto pelo consumo das famílias (C), investimentos (I), consumo do governo (G) e exportações (E). Assim, $f_i = c_i + i_i + g_i + e_i$. O vetor Valor Agregado (**v'**), por sua vez, é composto pelas remunerações do trabalho (l) e impostos, juros, aluguéis, lucros etc. (n). Assim, $v_i = l_i + n_i$. Finalmente, existem os produtos importados (m), que servem de insumos para alguns setores. Esses insumos (Valor Agregado e Importações) representam as aquisições do setor de pagamentos, enquanto os termos z_{ij} representam as aquisições do setor de processamento (insumos intermediários). A produção bruta total X é resultado da soma da coluna de produção total (**x**): $X = x_1 + x_2 + L + N + M$ ou da linha de desembolso total (**x'**): $X = x_1 + x_2 + C + I + G + E$. Igualando as duas equações, temos: $L + M + N = C + I + G + E$ ou $L + N = C + I + G + (E - M)$, sendo o lado esquerdo da equação igual à Renda Nacional Bruta (RNB) e o lado direito igual ao Produto Nacional Bruto (PNB) (Miller & Blair, 2009). O quadro 03 mostra o esquema de fluxos da MIP para uma economia de dois setores.

Quadro 03 – Tabela de fluxos da MIP para uma economia de dois setores

		Setores de transformação		Demanda final				Produção Total (x)
		1	2					
Setores de transformação	1	z_{11}	z_{12}	$c1$	$i1$	$g1$	$e1$	x_1
	2	z_{21}	z_{22}	$c2$	$i2$	$g2$	$e2$	x_2
Setores de pagamento	Valor Agregado (v')	l_1	l_2	l_C	l_I	l_G	l_E	L
		n_1	n_2	n_C	n_I	n_G	n_E	N
	Importações	m_1	m_2	m_C	m_I	m_G	m_E	M
Desembolso total (x')		x_1	x_2	C	I	G	E	X

Fonte: Elaboração própria, com base em Miller & Blair, 2009.

A análise de insumo-produto se baseia no conceito de coeficientes técnicos (a_{ij}). Dado z_{ij} e x_j, sendo i um insumo e j um setor,

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \therefore a_{ij}x_j = z_{ij} \quad (4)$$

O coeficiente técnico a_{ij}, portanto, é igual ao valor de insumo i adquirido pelo setor j, dividido pelo valor total da produção do setor j. Ademais, o modelo de insumo-produto pressupõe que essas proporções de uso dos insumos i pelos setores j são fixas. Substituindo-se z_{ij} por $a_{ij}x_j$, temos:

$$\begin{bmatrix} x_1 = a_{11}x_1 + \cdots + a_{1i}x_i + \cdots + a_{1n}x_n + f_1 \\ \vdots \\ x_i = a_{i1}x_1 + \cdots + a_{ii}x_i + \cdots + a_{in}x_n + f_i \\ \vdots \\ x_n = a_{n1}x_1 + \cdots + a_{ni}x_i + \cdots + a_{nn}x_n + f_n \end{bmatrix} (5)$$

$$\therefore$$

$$\begin{bmatrix} (1 - a_{11})x_1 - \cdots - a_{1i}x_i - \cdots - a_{in}x_n = f_1 \\ \vdots \\ x_i - a_{i1}x_1 - \cdots + (1 - a_{ii})x_i - \cdots - a_{in}x_n = f_i \\ \vdots \\ x_n - a_{n1}x_1 - \cdots - a_{ni}x_i - \cdots + (1 - a_{nn})x_n = f_n \end{bmatrix} (6)$$

Na forma matricial, sendo $\hat{x}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{x_1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{x_n} \end{bmatrix}$, a matriz de coeficientes técnicos A é dada por:

$$\boldsymbol{A = Z\hat{x}^{-1}} \text{ (7)}$$

E a equação 6 é dada por:

$$\boldsymbol{x = Ax + f} \text{ (8)}$$

Sendo I a matriz identidade n x n, a equação 7 é dada por:

$$\boldsymbol{(I - A)x = f} \text{ (9)}$$

$$\therefore$$

$$\boldsymbol{x = (I - A)^{-1}f = Lf} \text{ (10)}$$

Onde $\boldsymbol{(I - A)^{-1} = L = [l_{ij}]}$ é a Inversa de Leontief ou matriz de requisitos totais (Miller & Blair, 2009):

$$\begin{bmatrix} x_1 = l_{11}f_1 + \cdots + l_{1i}f_i + \cdots + l_{1n}f_n \\ \vdots \\ x_i = l_{i1}f_1 + \cdots + l_{ii}f_i + \cdots + l_{in}f_n \\ \vdots \\ x_n = l_{n1}f_1 + \cdots + l_{ni}f_i + \cdots + l_{nn}f_n \end{bmatrix} (11)$$

3.1.2. Abordagem Produto por Setor (*Commodity-by-Industry*)

Na abordagem Produto por Setor, a matriz de transações intersetoriais **Z**, é substituída, inicialmente, pela Matriz de Uso **U** (ou matriz de insumos), de dimensão produto por setor, sendo $\boldsymbol{U_{(c\,x\,i)} = [u_{ij}]}$, onde u_{ij} é o valor das aquisições do produto i pelo setor j. Sendo **x** a produção total do setor, analogamente aos coeficientes técnicos a_{ij}, temos:

$$b_{ij} = \frac{u_{ij}}{x_j} \therefore b_{ij}x_j = u_{ij} \therefore \boldsymbol{B} = \boldsymbol{U}\hat{\boldsymbol{x}}^{-1} \quad (12)$$

Por sua vez, a Matriz de Produção **V** (matriz de produtos), de dimensão setor por produto, mostra o valor do produto j que é produzido pelo setor i (v_{ij}) (Miller & Blair, 2009). O quadro 04 exemplifica a construção da matriz para uma economia hipotética simplificada com apenas dois produtos e dois setores:

Quadro 04 – Tabela Produto por Setor para uma economia de dois produtos e dois setores

		Produtos		Setores		Demanda final	Produção Total
		1	2	1	2		
Produtos	1			12	6	80	100
	2			10	7	83	100
				U		e	q
Setores	1	90	0				90
	2	10	100				110
		V					x
Valor agregado		60	95			163	
		v'					
Insumos totais		100	100	90	110		
		q'		x'			

Fonte: Elaboração própria, com base em Miller & Blair, 2009.

Nesse esquema, tanto a produção total dos setores (**x**) quanto a produção total dos insumos (**q**) são contabilizados. Na Matriz de Produção (**V**), a produção total de um setor é dada pela soma de todos os seus produtos (somatórios das linhas de **V**), ou seja:

$$x_j = v_{j1} + \cdots + v_{jn} \therefore \boldsymbol{x} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{i} \quad (13)$$

Analogamente, a produção total de um insumo é dada pela soma da produção de todos os setores que o produzem (somatório das colunas de **V** ou linhas de **V'**), ou seja:

$$q_j = v_{1j} + \cdots + v_{nj} \therefore \boldsymbol{q}' = \boldsymbol{i}'\boldsymbol{V} \quad (14)$$

$$\therefore$$

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{V'i}\ (15)$$

Ou, com base na Matriz de Uso U:

$$q_j\ =\ u_{j1} + \cdots + u_{jn} + e_j\ \therefore\ \boldsymbol{q} = \boldsymbol{Ui} + \boldsymbol{e}\ (16)$$

A partir da equação 13, temos: $\boldsymbol{U} = \boldsymbol{B\hat{x}}$, portanto:

$$\boldsymbol{q} = \boldsymbol{Bx} + \boldsymbol{e}\ (17)$$

Dividindo cada elemento da coluna j de **V** pelo somatório da respectiva coluna, temos a fração do produto j produzida pelo setor i: $d_{ij} =\ v_{ij}/q_j$. Na forma matricial $\boldsymbol{D_{(i\,x\,c)}} = \left[\boldsymbol{d_{ij}}\right]$, temos:

$$\boldsymbol{D} =\ \boldsymbol{V\hat{q}^{-1}}\ (18)$$

A partir da equação 19, $\boldsymbol{D\hat{q}} = \boldsymbol{V}\ \therefore\ \boldsymbol{D\hat{q}i} = \boldsymbol{Vi}$**,** e a partir da equação 14, $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{Vi}$**,** temos:

$$\boldsymbol{Dq} = \boldsymbol{x}\ \therefore\ \boldsymbol{q} = \boldsymbol{D^{-1}x}\ (19)$$

Substituindo o $\boldsymbol{x}$, na equação 18, por $\boldsymbol{Dq}$, da equação 20, temos: $\boldsymbol{q} = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{Dq}) + \boldsymbol{e} = (\boldsymbol{BD})\boldsymbol{q} + \boldsymbol{e}$**.** Portanto:

$$\boldsymbol{q} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{BD})^{-1}\boldsymbol{e}\ (20)$$

A matriz inversa $(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{BD})^{-1}$ é chamada de Matriz de Requisitos Totais Produto por Produto e relaciona a demanda final dos produtos com a sua produção total, funcionando como a matriz $(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}$ na estrutura básica da análise de insumo-produto (Miller & Blair, 2009).

A Matriz de Requisitos Totais Produto por Produto deriva da equação $\boldsymbol{q} = (\boldsymbol{BD})\boldsymbol{q} + \boldsymbol{e}$ e $\boldsymbol{BD}$ funciona como a matriz de coeficientes técnicos $\boldsymbol{A}$, relacionando produtos consumidos na forma de insumos por unidade de valor da produção de produtos. Essa abordagem parte do pressuposto de que os produtos utilizados como insumos para a produção do produto j são médias ponderadas dos produtos utilizados

como insumos de cada setor que produz o produto j (matriz $\boldsymbol{B}$), e os pesos são as proporções da contribuição de cada setor para o total da produção do produto j (matriz $\boldsymbol{D}$). Um determinado produto pode ter diferentes requisitos de insumos quando produzido por um setor ou por outro, mas se presume que todos os produtos de um setor têm o mesmo requisito de insumos, conforme a coluna desse setor na matriz $\boldsymbol{B}$. É por esse motivo que se diz que a matriz $\boldsymbol{BD}$ utiliza a Tecnologia Baseada nos Setores (*Industry-Based Technology*) e, como está na dimensão Produto por Produto, pode ser denotada como $\boldsymbol{A_{I(cxc)} = BD}$. Assim, $(\boldsymbol{I - BD})^{-1}$ pode ser chamada, de maneira mais completa, de Matriz de Requisitos Totais Produto por Produto sob a Tecnologia Baseada nos Setores (Miller & Blair, 2009).

3.1.3. Multiplicadores no Modelo de Insumo-Produto

Uma das principais informações que as matrizes insumo-produto podem fornecer é o efeito que as mudanças em fatores exógenos ao modelo têm sobre a economia. Essa informação é dada pelos multiplicadores da MIP, por exemplo: multiplicadores de produção são capazes de quantificar a combinação dos efeitos diretos e indiretos que uma mudança na demanda final tem sobre a produção dos diferentes setores econômicos. Em uma análise de impactos, podemos examinar uma mudança na demanda de um pequeno grupo de setores, no curto prazo. Por outro lado, em uma análise de projeções e previsões, é possível examinar mudanças mais abrangentes, no longo prazo. Por exemplo: podemos utilizar a inversa de Leontief para prever o nível de produção de cada setor que será necessário para atender a uma mudança nos níveis de demanda dos setores da economia de uma forma geral, daqui a cinco anos. Entretanto, quando o período de projeção é muito longo, a precisão desse tipo de análise tende a diminuir, porque fica mais difícil prever os níveis de demanda final em um futuro distante e a estrutura da economia, representada pelos coeficientes da matriz A, pode acabar mudando ao longo dos anos, alterando a inversa de Leontief (Miller & Blair, 2009). Isso ocorre especialmente quando se simulam cenários de transição. Ademais, não só a estrutura da economia tende a mudar, como as tecnologias disponíveis em cada setor tendem a evoluir.

O conceito de multiplicadores simples deriva da diferença entre o efeito inicial de uma mudança exógena e os efeitos totais dessa mudança, que podem ser efeitos

diretos ou indiretos. Os principais multiplicadores utilizados na MIP são: multiplicadores de produção, multiplicadores de ocupações (número de empregos) e multiplicadores de valor agregado (valor adicionado bruto). Em uma MIP estendida para análises ambientais, com dados de emissões de GEE, por exemplo, também é possível deduzir multiplicadores de emissões. Como visto anteriormente, $\boldsymbol{x = Lf}$, portanto: $\boldsymbol{\Delta x_j = L\Delta f_j}$ e a pré-multiplicação de uma matriz por **i`** cria um vetor linha cujos elementos são os somatórios das colunas da matriz. Assim, sendo Δf_j=1, a formulação geral dos multiplicadores simples de produção é a seguinte:

$$m(p)_j = \boldsymbol{i'\Delta x_j} = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{l_{ij}} \text{ (21)}$$

Na forma matricial, os multiplicadores de produção podem ser expressos da seguinte forma:

$$\boldsymbol{m(p) = i'L} \text{ (22)}$$

Para os demais multiplicadores, basta alterar os elementos na matriz de multiplicadores para que eles representem alguma função de $\boldsymbol{\Delta x_j}$, como ocupações, valor agregado ou emissões de GEE. O procedimento é igual para todos eles, mas os coeficientes de valor agregado estão expressos em termos monetários e os coeficientes de ocupações e emissões de GEE estão expressos em termos físicos. Sendo $\boldsymbol{h' = \left[z_{n+1,1}, \ldots, z_{n+1,n}\right]}$ o vetor desses dados, $\boldsymbol{h'_c = h'\hat{x}^{-1}}$ é a respectiva linha de coeficientes de insumo e $\boldsymbol{a_{n+1,j} = z_{n+1,j}/x_{,j}}$. Assim:

$$m(h)_j = \sum_{i=1}^{n} \boldsymbol{a_{n+1,i} l_{ij}} \text{ (23)}$$

Na forma matricial, os demais multiplicadores podem ser expressos da seguinte forma:

$$\boldsymbol{m(h) = h'_c L} \text{ (24)}$$

(Miller & Blair, 2009).

3.1.4. Extensão da MIP para Análises Ambientais

Desde o final da década de 1960, a estrutura básica da MIP tem sido ampliada por muitos pesquisadores para considerar a geração ou a mitigação de poluição ambiental associada à produção intersetorial, inclusive o próprio Leontief, que elaborou uma das principais extensões metodológicas, amplamente aplicada em análises ambientais, desde então (Miller & Blair, 2009). A Análise Generalizada de Insumo-Produto (AGIP), do inglês: *Generalized Input–Output Analysis (GIOA)* expande a estrutura tradicional de insumo-produto da economia para incluir interações não convencionais, como fluxos de energia, fatores ambientais ou outras externalidades, além das transações econômicas tradicionais. Essa metodologia integra dimensões adicionais para oferecer uma visão mais ampla da produção, consumo e uso de recursos em uma economia ou sistema. Os Modelos de Insumo-Produto Generalizados (MIPG), do inglês: *Generalized Input–Output Models (GIOM)* se baseiam na ampliação da matriz de coeficientes técnicos com linhas e/ou colunas adicionais que refletem a geração ou mitigação de poluição (Miller & Blair, 2009). Sendo os dados de emissões de poluentes contabilizados em unidades físicas e os dados de produção contabilizados em unidades monetárias, as matrizes insumo-produto estendidas com vetores de emissões de poluentes podem ser chamadas de matrizes híbridas. Para o caso em estudo, podemos incluir uma linha na matriz, com um vetor de emissões $\boldsymbol{x}^{\boldsymbol{GEE*}}$, onde cada elemento $\boldsymbol{x_j}^{\boldsymbol{GEE*}}$ representa as emissões correspondentes a cada setor j, em unidades físicas, expressas em tCO_2eq.

Uma abordagem muito simples para contabilizar a poluição associada à atividade intersetorial é, primeiramente, admitir uma matriz de produção de poluição, composta por coeficientes de impacto direto: $\boldsymbol{D^p} = \left[\boldsymbol{d_{kj}^p}\right]$, onde cada elemento representa a quantidade de poluente do tipo k que é emitida por unidade de valor de produção do setor j. Assim, o nível de poluição associado a um dado vetor de produção total pode ser expresso como:

$$\boldsymbol{x^{p*}} = \boldsymbol{D^p x} \quad (25)$$

onde $\boldsymbol{x^{p*}}$ é o vetor de emissões de poluentes. Assim, com base no modelo tradicional de Leontief, $\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{f} = \boldsymbol{L}\boldsymbol{f}$, podemos computar $\boldsymbol{x^{p*}}$ em função da demanda final $(\boldsymbol{f})$:

$$\boldsymbol{x^{p*}} = [\boldsymbol{D^{p}L}]\boldsymbol{f} \quad (26)$$

onde $[\boldsymbol{D^{p}L}]$ é a matriz de coeficientes de emissões totais de poluentes, ou seja, um elemento dessa matriz representa as emissões totais de poluentes geradas por unidade de valor da demanda final apresentada à economia. Ademais, é possível substituir facilmente a matriz de coeficientes de emissões de poluentes por uma matriz correspondente para qualquer outro fator associado à atividade intersetorial que varie linearmente com a produção, como valor adicionado ($\boldsymbol{D^{VA}}$), ocupações ($\boldsymbol{D^{O}}$) ou emissões de GEE ($\boldsymbol{D^{GEE}}$), por exemplo. Por conveniência, podemos concatenar essas matrizes como submatrizes de uma única matriz $\boldsymbol{D}$ de coeficientes de impacto direto:

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D^{VA}} \\ \boldsymbol{D^{O}} \\ \boldsymbol{D^{GEE}} \end{bmatrix}$$

Analogamente, podemos definir um vetor de impactos totais, $\boldsymbol{x^{*}}$, concatenando os vetores $\boldsymbol{x^{VA*}} = \boldsymbol{D^{VA}x}$, $\boldsymbol{x^{O*}} = \boldsymbol{D^{O}x}$ e $\boldsymbol{x^{GEE*}} = \boldsymbol{D^{GEE}x}$, para formar:

$$\boldsymbol{x^{*}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x^{VA*}} \\ \boldsymbol{x^{O*}} \\ \boldsymbol{x^{GEE*}} \end{bmatrix}$$

Assim, $\boldsymbol{x^{*}} = \boldsymbol{Dx}$. Por questão de conveniência de contabilidade, podemos representar $\boldsymbol{x^{*}}$ junto com a demanda final correspondente $(\boldsymbol{f})$, definindo um novo vetor $\tilde{\boldsymbol{x}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x^{*}} \\ \boldsymbol{f} \end{bmatrix}$. Analogamente, podemos concatenar a matriz de coeficientes de impacto direto $\boldsymbol{D}$ com $(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})$, formando a matriz $\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D} \\ (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}) \end{bmatrix}$. Dessa forma:

$$\tilde{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{G}\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D} \\ (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}) \end{bmatrix}\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x^{*}} \\ \boldsymbol{f} \end{bmatrix} \quad (27)$$

(Miller & Blair, 2009).

É possível, portanto, estender uma MIP com vetores de emissões, a fim de considerar a geração ou a mitigação de GEE associada à produção intersetorial da economia e relacionar os aspectos ambientais com a geração de valor agregado e de ocupações.

3.2. MIP HÍBRIDA PARA O ERJ EM 2019

A Secretaria de Estado de Planejamento e Gestão do Rio de Janeiro (SEPLAG) construiu uma MIP oficial para o ERJ (ano-base 2019), com tabelas de recursos e usos de bens e serviços desagregadas em 102 produtos e 56 setores produtivos[2], que são úteis para o caso em estudo nesta dissertação. Essas tabelas podem ser agregadas para a construção de uma MIP do tipo produto x produto capaz de representar os principais setores da economia fluminense. Essa MIP agregada pode receber uma extensão com os dados de emissões de GEE no mesmo ano (2019)[3], para cada um dos setores analisados, gerando assim uma matriz insumo-produto híbrida. Os dados de emissões setoriais de GEE são estimados pelo SEEG, que foi adotado, a partir de 2024, como fonte oficial de informações a respeito de emissões de GEE no ERJ (Rio de Janeiro, 2024). Dessa maneira, é possível simular os efeitos que o aumento ou a redução do nível de produção nos setores-chave da economia tem sobre as emissões totais de GEE e quantificar o impacto das políticas climáticas sobre a economia estadual, utilizando os seguintes indicadores macroeconômicos: PIB e Ocupações.

Para a agregação e hibridização da MIP, o objetivo é destacar os principais emissores de GEE da economia fluminense, considerando a compatibilidade dessa agregação com os dados das estimativas de emissões do SEEG. Assim, os 102 produtos iniciais disponíveis nas contas estaduais podem ser agregados em 11 grupos: agropecuária, florestas e outros usos do solo (AFOLU), óleo e gás (O&G), outras indústrias extrativas, derivados de petróleo e biocombustíveis, minerais não-metálicos (majoritariamente cimento), metalurgia (majoritariamente siderurgia), outras indústrias de transformação, eletricidade e gás (majoritariamente usinas

[2] Os dados oficiais da MIP de 2019 do ERJ podem ser consultados por meio do seguinte link: <https://www.estrategia.planejamento.rj.gov.br/#/>

[3] Os dados oficiais de emissões de GEE pelo ERJ em 2019, estimados pelo SEEG, podem ser consultados por meio do seguinte link: <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/rio-de-janeiro>

termoelétricas a gás), saneamento (majoritariamente resíduos sólidos), transportes e serviços, conforme a tabela 01, abaixo:

Tabela 01 – Tabela de agregação dos produtos

Grupos	Códigos	Produtos
Agricultura, pecuária e exploração florestal (AFOLU)	01011	Arroz, trigo e outros cereais
	01012	Milho em grão
	01021	Cana-de-açúcar
	01031	Outros produtos e serviços da lavoura temporária
	01041	Laranja
	01051	Café em grão
	01061	Outros produtos da lavoura permanente
	02011	Bovinos e outros animais vivos, prods. animal, caça e serv.
	02012	Leite de vaca e de outros animais
	02021	Suínos
	02031	Aves e ovos
	03021	Pesca e aquicultura (peixe, crustáceos e moluscos)
	03011	Produtos da exploração florestal e da silvicultura
Óleo e Gás	04011	Petróleo, gás natural e serviços de apoio
Outras indústrias extrativas	04021	Carvão mineral
	04022	Minério de ferro
	04023	Minerais metálicos não-ferrosos
	04024	Minerais não-metálicos
Derivados de petróleo e biocombustíveis	05071	Combustíveis para aviação
	05072	Gasoálcool
	05073	Naftas para petroquímica
	05074	Óleo combustível
	05075	Diesel - biodiesel
	05076	Outros produtos do refino do petróleo
	05077	Etanol e outros biocombustíveis
Minerais não-metálicos	05111	Produtos minerais não-metálicos
Metalurgia	05121	Semiacabados, laminados planos, longos e tubos de aço
	05122	Outros produtos da metalurgia
	05131	Produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos
Outras indústrias de transformação	05181	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos
	05011	Abate e produtos de carne

	05012	Pescado industrializado
	05013	Conservas/sucos de frutas, legumes e outros vegetais
	05014	Óleos e gorduras vegetais e animais
	05015	Laticínios
	05016	Produtos amiláceos e de alimentos para animais
	05017	Café beneficiado
	05018	Outros produtos alimentares
	05021	Bebidas
	05031	Produtos do fumo
	05041	Produtos têxteis
	05042	Artigos do vestuário e acessórios
	05043	Calçados e artefatos de couro
	05051	Produtos de madeira, exclusive móveis
	05061	Celulose, papel e produtos de papel
	05062	Serviços de impressão e reprodução
	05081	Produtos químicos
	05082	Resina/elastômero/fibras artif. e sintéticas
	05083	Defensivo agro/desinfestante domissanitário
	05084	Produtos de limpeza/polim./perfumaria/hig. pessoal
	05085	Tintas, vernizes, esmaltes e lacas
	05086	Produtos químicos diversos
	05091	Produtos farmoquímicos e farmacêuticos
	05101	Artigos de borracha
	05102	Artigos de plástico
	05141	Máquinas para escritório e equip. de informática
	05142	Material eletrônico e equip. de comunicações
	05143	Outros eletrônicos, óticos e eletromédicos
	05144	Eletrodomésticos
	05145	Máquinas, aparelhos e materiais elétricos
	05151	Máquinas e equipamentos
	05161	Automóveis, camionetas e utilitários
	05162	Caminhões, ônibus, carrocerias e reboques
	05163	Peças e acess. para veículos automotores
	05164	Outros equipamentos de transporte, exceto veículos automotores
	05171	Móveis
	05172	Produtos de indústrias diversas
Eletricidade e gás	06011	Eletricidade e gás
Saneamento	06012	Água e esgoto e gestão de resíduos e recuperação de materiais
Transporte	09021 + 09031	Transporte terrestre e aquaviário carga
	09022	Transporte terrestre passageiro

	09041	Transporte aéreo de carga e passageiro
	09051	Armazenamento e serviços auxiliares aos transportes
	09061	Correio e outras atividades de entrega
Serviços	07011	Edificações
	07012	Obras de infra-estrutura
	07013	Serviços especializados para construção
	08011 + 08021	Comércio por atacado e varejo
	10011	Serviços de alojamento em hotéis e similares
	10021	Serviços de alimentação
	11011	Telecomunicações, TV por assinatura e outros serv. relacionados
	11021	Livros, jornais e revistas
	11022	Serviços cinematográficos, de música, rádio e televisão
	11023	Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação
	12011	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar
	13011	Aluguel imputado
	13012	Aluguel efetivo e serviços imobiliários
	14011	Serviços jurídicos, contabilidade e consultoria
	14012	Pesquisa e desenvolvimento
	14013	Condomínios e serviços para edifícios
	14014	Aluguéis não-imobiliários e gestão de ativos de propriedade intelectual
	14015	Serviços de outras atividades profissionais, científicas, técnicas, administrativas e serviços complementares
	15011	Educação pública
	15012	Saúde pública
	15013	Administração, pesquisa e desenvolvimento públicos, defesa, seguridade social
	16011	Educação privada
	16012	Saúde privada
	17011	Serviços de artes, cultura, esporte e recreação
	17012	Organizações patronais, sindicais e outros serviços associativos
	17013	Serviços pessoais
	17021	Manutenção de computadores, telefones e objetos domésticos
	18011	Serviços domésticos

Tomando como base a formulação da MIP híbrida apresentada na seção 3.1.4 (fórmula 27):

$$\tilde{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{G}\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D} \\ (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}) \end{bmatrix} \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^* \\ \boldsymbol{f} \end{bmatrix}$$

As matrizes e vetores correspondentes na MIP híbrida construída para o ERJ são:

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} 0,16 & 0,42 & 0,01 & 0,07 & 0,10 & 0,06 & 0,07 & 0,32 & 0,39 & 0,49 & 0,60 \\ 1,86 & 0,34 & 1,07 & 0,40 & 2,89 & 1,35 & 1,07 & 1,95 & 2,36 & 7,44 & 9,06 \\ 324,42 & 85,23 & 4,98 & 24,19 & 177,97 & 75,15 & 3,01 & 162,83 & 987,41 & 166,51 & 0,33 \end{bmatrix}$$

$$(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}) =$$

$$\begin{bmatrix} 0,988 & 0,000 & 0,000 & -0,001 & 0,000 & -0,001 & -0,008 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,003 \\ 0,000 & 0,974 & 0,000 & -0,200 & -0,002 & -0,002 & 0,000 & -0,072 & -0,088 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & -0,002 & 1,000 & 0,000 & -0,015 & -0,116 & 0,000 & -0,003 & -0,004 & 0,000 & -0,001 \\ -0,010 & -0,028 & -0,005 & 0,699 & -0,046 & -0,022 & -0,004 & -0,014 & -0,017 & -0,147 & -0,007 \\ -0,001 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,967 & -0,002 & -0,002 & -0,004 & -0,004 & 0,000 & -0,008 \\ 0,000 & -0,046 & 0,000 & -0,001 & -0,005 & 0,897 & -0,013 & -0,006 & -0,008 & 0,000 & -0,006 \\ -0,036 & -0,097 & -0,014 & -0,019 & -0,068 & -0,079 & 0,881 & -0,031 & -0,038 & -0,077 & -0,073 \\ -0,010 & -0,002 & -0,002 & 0,000 & -0,025 & -0,018 & -0,004 & 0,763 & -0,287 & -0,009 & -0,013 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,001 & -0,004 & -0,021 & -0,001 & -0,002 & 0,098 & -0,003 & -0,006 \\ -0,002 & -0,104 & -0,001 & -0,007 & -0,013 & -0,030 & -0,009 & -0,006 & -0,007 & 0,949 & -0,016 \\ -0,005 & -0,193 & -0,004 & -0,025 & -0,056 & -0,049 & -0,040 & -0,080 & -0,097 & -0,176 & 0,792 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} 18.316,36 \\ 194.279,43 \\ 11.719,18 \\ 94.133,85 \\ 10.931,49 \\ 74.418,15 \\ 518.531,75 \\ 45.724,22 \\ 11.692,32 \\ 73.336,30 \\ 781.245,59 \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{x}^* = \begin{bmatrix} 661.054,11 \\ 8.579.478,00 \\ 67.143.019,50 \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} 11.907,12 \\ 166.651,55 \\ 1.666,53 \\ 37.058,11 \\ 3.179,81 \\ 45.954,80 \\ 364.645,87 \\ 16.409,03 \\ 4.371,81 \\ 28.314,23 \\ 536.601,53 \end{bmatrix}$$

Para ponderar os impactos macroeconômicos da restrição de emissões nos diferentes setores econômicos analisados, é possível observar os multiplicadores da MIP híbrida construída para o ano de 2019. Tomando como base a formulação dos multiplicadores apresentada na seção 3.1.3, $\boldsymbol{m}(\boldsymbol{p}) = \boldsymbol{i}'\boldsymbol{L}$ (fórmula 22) é o multiplicador de produção. Para os demais multiplicadores, $\boldsymbol{m}(\boldsymbol{h}) = \boldsymbol{h'}_{\boldsymbol{c}}\boldsymbol{L}$ (fórmula 24), sendo $\boldsymbol{h'}_{\boldsymbol{c}} = \boldsymbol{h}'\hat{\boldsymbol{x}}^{-1}$ e chamamos de $\boldsymbol{m}(\boldsymbol{v})$ os multiplicadores de valor agregado (valor adicionado

bruto), $\boldsymbol{m(o)}$ os multiplicadores de ocupações (número de empregos) e $\boldsymbol{m(e)}$ os multiplicadores de emissões. Assim, os multiplicadores da MIP híbrida construída para o ERJ em 2019 são:

$\mathbf{m(p)} = [1{,}11\ 1{,}79\ 1{,}04\ 2{,}03\ 1{,}41\ 1{,}64\ 1{,}28\ 1{,}77\ 1{,}93\ 1{,}78\ 1{,}51]$

$\mathbf{m(v)} = [0{,}19\ 0{,}71\ 0{,}02\ 0{,}34\ 0{,}21\ 0{,}19\ 0{,}13\ 0{,}59\ 0{,}72\ 0{,}74\ 0{,}81]$

$\mathbf{m(o)} = [\ 2{,}12\ 4{,}31\ 1{,}18\ 2{,}32\ 4{,}26\ 3{,}14\ 1{,}98\ 4{,}49\ 5{,}44\ 10{,}67\ 12{,}05]$

$\mathbf{m(e)} = [332{,}74\ 123{,}98\ 6{,}48\ 73{,}00\ 203{,}70\ 126{,}41\ 14{,}35\ 235{,}27\ 1.075{,}21\ 198{,}51\ 22{,}72]$

3.3. MODELO ESTÁTICO DE OTIMIZAÇÃO

Para avaliar os impactos macroeconômicos das políticas públicas de descarbonização sobre a economia do estado do Rio, é possível aplicar um modelo estático de otimização da MIP híbrida construída para o ano de 2019. Um modelo de Programação Linear (PL) pode ser aplicado à MIP híbrida desenvolvida com as emissões setoriais de GEE da economia do ERJ, para equilibrar a MIP, pelo Método Simplex[4], maximizando o PIB, a partir das restrições de emissões de GEE aplicadas aos diferentes setores econômicos. Assim, é possível avaliar os respectivos impactos dessas restrições setoriais de emissões de GEE sobre o Produto Interno Bruto (PIB) e as Ocupações (O), a partir da variação da Produção Total (PT) de cada setor da economia do ERJ, nesse mesmo ano.

[4] Método Simplex é uma técnica matemática de otimização usada na programação linear para encontrar a solução ótima de problemas com múltiplas restrições e variáveis. Criado por George Dantzig, em 1947, o método é amplamente utilizado na economia e em outras áreas que envolvem a maximização ou minimização de funções lineares, sujeitas a restrições lineares. Para uma descrição detalhada da teoria e das extensões da programação linear e do Método Simplex, consulte Dantzig, G.B. & Thapa, M.N. (2003).

Tomando novamente como base a formulação da MIP híbrida apresentada na seção 3.1.4 (fórmula 27):

$$\tilde{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{G}\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D} \\ (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A}) \end{bmatrix} \boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^{*} \\ \boldsymbol{f} \end{bmatrix}$$

Sendo $\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D^{VA}} \\ \boldsymbol{D^{O}} \\ \boldsymbol{D^{GEE}} \end{bmatrix}$ a matriz de coeficientes de impacto direto, $\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x_1} \\ \boldsymbol{x_2} \\ \boldsymbol{x_3} \\ \boldsymbol{x_4} \\ \boldsymbol{x_5} \\ \boldsymbol{x_6} \\ \boldsymbol{x_7} \\ \boldsymbol{x_8} \\ \boldsymbol{x_9} \\ \boldsymbol{x_{10}} \\ \boldsymbol{x_{11}} \end{bmatrix}$ o vetor de produção total e $\boldsymbol{x}^{*} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x^{VA*}} \\ \boldsymbol{x^{O*}} \\ \boldsymbol{x^{GEE*}} \end{bmatrix}$ o vetor de impactos totais, é possível estabelecer a seguinte função objetivo:

$$\boldsymbol{M\acute{a}x\ VA} = \sum \boldsymbol{d_j^{VA} x_i}, \text{ (28)}$$

variando x_i, sujeito às seguintes restrições:

$$x_i \geq 0; \text{ (29)}$$

$$d_j^{GEE} x_i \leq {x_j}^{GEE*}; \text{ (30)}$$

$$d_j^{O} x_i \leq {x_j}^{O*}; \text{ (31)}$$

$$(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})\boldsymbol{x} \leq \boldsymbol{f}; \text{ (32)}$$

$$f_i \geq 0. \text{ (33)}$$

Assim, podemos estabelecer metas específicas de mitigação de emissões de GEE a cada setor de interesse, impondo limites a x_j^{GEE*} nas restrições do modelo, que irá

atribuir novos valores a x_i, para atender às restrições impostas, maximizando $\sum x_j^{VA*}$, que representa o somatório do Valor Adicionado Bruto de cada setor, ou seja, o PIB. O novo vetor de produção total $\boldsymbol{x}$ altera o vetor de impactos totais $\boldsymbol{x}^*$, conforme a matriz $\boldsymbol{D}$ de coeficientes de impacto direto, e a demanda final $\boldsymbol{f}$, conforme a matriz $(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em 2019, a emissão total de GEE da economia do ERJ foi de 67,1 $MtCO_2eq$. Desse montante, 24,66% provêm da indústria de O&G, que é, folgadamente, o maior setor emissor de GEE da economia fluminense. Em seguida, destacam-se: transportes (18,19%), saneamento[5] (17,19%) e eletricidade e gás[6] (11,09%). Juntos, esses quatro setores contribuem com mais de 70% de todas as emissões de GEE no ERJ. Dos 30% restantes, mais de 15 pontos percentuais são compostos apenas pelas emissões de AFOLU (8,85%) e da metalurgia[7] (8,33%), que têm contribuições quase equivalentes. Com contribuições individuais inferiores a 5%, estão: derivados de petróleo (3,39%), minerais não-metálicos[8] (2,90%), outras indústrias de transformação (2,33%) e a demanda final residencial (2,50%). Por fim, com menos de 1%, estão as emissões dos setores de serviços (0,39%), outras indústrias extrativas (0,09%) e a demanda final do setor público (0,09%). A tabela 02, abaixo, mostra as emissões de GEE por setor em ordem decrescente de participação em termos absolutos:

Tabela 02 – Emissões absolutas de GEE por setor

Setores	Emissões Absolutas de GEE (tCO_2eq)	Participação nas Emissões Totais de GEE (%)
Óleo e gás (O&G)	16.558.652,00	24,66
Transportes	12.216.510,70	18,19
Saneamento	11.545.132,60	17,19
Eletricidade e gás	7.445.168,40	11,09
AFOLU	5.941.810,00	8,85
Metalurgia	5.592.665,00	8,33
Derivados de petróleo e biocombustíveis	2.277.052,00	3,39
Minerais não-metálicos	1.945.511,00	2,90
Demanda final residencial	1.682.133,00	2,50
Outras indústrias de transformação	1.561.398,00	2,33
Serviços	260.495,80	0,39
Outras indústrias extrativas	58.405,00	0,09
Demanda final do setor público	58.086,00	0,09
Total	**67.143.019,50**	**100**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SEEG (2024).

[5] No setor de saneamento do ERJ, 82,79% das emissões de GEE provêm da disposição de resíduos sólidos e apenas 17,21% resultam do tratamento e despejo de efluentes domésticos.
[6] Nesta pesquisa, os dados de emissão de GEE pelo setor de eletricidade e gás estão relacionados ao serviço público de geração de eletricidade; portanto, 100% das emissões de GEE atribuídas ao setor de eletricidade e gás do ERJ nesta dissertação se referem à geração de eletricidade em termoelétricas a gás.
[7] O setor de Metalurgia do ERJ é composto basicamente pela siderurgia (produção de ferro gusa e aço) e mais de 99% das emissões de GEE desse setor derivam da indústria siderúrgica.
[8] O setor de Minerais não-metálicos do ERJ é composto basicamente pela indústria de cimento e 99,62% da emissões totais de GEE desse setor derivam da produção de cimento.

Primeiramente, a partir dos respectivos multiplicadores da MIP híbrida elaborada para o ERJ, é possível observar o impacto total que o aumento da demanda final pelos produtos de cada setor econômico tem sobre a produção total, as ocupações, o PIB e as emissões de GEE da economia do Rio de Janeiro como um todo. A magnitude do multiplicador é diretamente proporcional à importância que a variação da demanda pelos produtos do respectivo setor tem sobre a economia fluminense. Apresentamos abaixo as tabelas dos diferentes multiplicadores, classificadas do maior para o menor, para ilustrar a importância de cada setor para cada tipo de impacto. Começamos pelas emissões, que são o objeto da análise, seguindo com o valor adicionado bruto, que compõe a função objetivo, as ocupações, que também compõem um indicador importante na análise de políticas públicas e, por último, a produção, que indica o impacto sobre a produção total, o que não significa muito como indicador de impacto macroeconômico.

Tabela 03 – Multiplicadores de Emissões (gCO_2e/R)

Saneamento	1.075,21
AFOLU	332,74
Eletricidade e gás	235,27
Minerais não-metálicos	203,70
Transportes	198,51
Metalurgia	126,41
Óleo e gás (O&G)	123,98
Derivados de petróleo e biocombustíveis	73,00
Serviços	22,72
Outras indústrias de transformação	14,35
Outras indústrias extrativas	6,48

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SEEG (2024).

Tabela 04 – Multiplicadores de Valor Adicionado Bruto

Serviços	0,81
Transportes	0,74
Saneamento	0,72
Óleo e gás (O&G)	0,71
Eletricidade e gás	0,59
Derivados de petróleo e biocombustíveis	0,34
Minerais não-metálicos	0,21
Metalurgia	0,19
AFOLU	0,19
Outras indústrias de transformação	0,13
Outras indústrias extrativas	0,02

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SEEG (2024).

Tabela 05 – Multiplicadores de Ocupações (pessoas/milhões de R$)

Serviços	12,05
Transportes	10,67
Saneamento	5,44
Eletricidade e gás	4,49
Óleo e gás (O&G)	4,31
Minerais não-metálicos	4,26
Metalurgia	3,14
Derivados de petróleo e biocombustíveis	2,32
AFOLU	2,12
Outras indústrias de transformação	1,98
Outras indústrias extrativas	1,18

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SEEG (2024).

Tabela 06 – Multiplicadores de Produção

Derivados de petróleo e biocombustíveis	2,03
Saneamento	1,93
Óleo e gás (O&G)	1,79
Transportes	1,78
Eletricidade e gás	1,77
Metalurgia	1,64
Serviços	1,51
Minerais não-metálicos	1,41
Outras indústrias de transformação	1,28
AFOLU	1,11
Outras indústrias extrativas	1,04

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SEEG (2024).

É possível observar que o setor de saneamento é o que mais se destaca dentre os multiplicadores de emissões, seguido pelos setores de AFOLU, eletricidade e gás, minerais não-metálicos e transportes, que completam a lista dos cinco mais importantes, nessa ordem. Metalurgia e O&G aparecem em sexto e sétimo lugar, respectivamente. Desses sete setores identificados dentre os mais relevantes quanto às emissões, quatro sempre ficam entre os cinco principais nos demais quesitos: eletricidade & gás, O&G, transportes e saneamento e três sempre aparecem dentre os outros seis setores: AFOLU, metalurgia e minerais não-metálicos. A priori, pode-se deduzir que esses três últimos setores emitem muito em relação ao quanto contribuem para o PIB e o emprego. Por outro lado, para os quatro primeiros setores, essa conclusão não é evidente. Juntamente com o setor de serviços, que é o principal, esses quatro setores estão entre os mais importantes para a formação do PIB e a geração de empregos na economia do ERJ. No entanto, os setores de O&G, transportes, saneamento e eletricidade & gás são, nessa ordem, os quatro maiores emissores de GEE da economia fluminense. Portanto, é preciso entender como essas

emissões se relacionam com a formação do PIB e a geração de empregos, a partir das emissões relativas.

4.1. SETORES-CHAVE PARA A DESCARBONIZAÇÃO NO ERJ

Os dados das emissões setoriais absolutas são relevantes para a determinação dos setores-chave para a descarbonização da economia fluminense, mas é ainda mais importante entender como essas emissões se relacionam com o Valor Adicionado Bruto de cada um dos setores, o que resulta em uma unidade de medida de intensidade de emissões de GEE nos diversos setores econômicos. A MIP híbrida construída para esta dissertação permite calcular as intensidades de carbono por setor, conforme a tabela 07, abaixo:

Tabela 07 – Intensidade de carbono por setor

Setores	Emissões Setoriais (tCO_2eq)	Valor Adicionado Bruto (milhões de R$)	Intensidade de Carbono ($gCO_2e/R\$$)
Saneamento	11.545.132,60	4.507,25	2.561,46
AFOLU	5.941.810,00	2.980,32	1.993,68
Minerais não-metálicos	1.945.511,00	1.088,99	1.786,53
Metalurgia	5.592.665,00	4.326,32	1.292,71
Eletricidade e gás	7.445.168,40	14.542,84	511,95
Outras indústrias extrativas	58.405,00	142,94	408,59
Transportes	12.216.510,70	36.079,15	338,60
Derivados de petróleo e biocombustíveis	2.277.052,00	7.069,04	320,76
Óleo e gás (O&G)	16.558.652,00	81.939,41	202,08
Outras indústrias de transformação	1.561.398,00	36.604,02	42,66
Serviços	260.495,80	471.743,98	0,55
Demanda final residencial	1.682.133,00	-	-
Demanda final do setor público	58.086,00	-	-
Total	**67.143.019,50**	**661.054,11**	**101,57**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SEEG (2024).

É possível observar que o setor de saneamento fica novamente bem à frente como o mais intensivo em emissões, com 2.561,46 $gCO_2e/R\$$. Em seguida, conforme antecipado por meio da análise dos multiplicadores, estão AFOLU, com 1.993,68 $gCO_2e/R\$$, minerais não-metálicos, com 1.786,53 gCO2e/R$, e metalurgia, com 1.292,71 $gCO_2e/R\$$. Isso significa que esses setores efetivamente emitem muitos GEE, em relação ao quanto contribuem para o PIB do ERJ. Menos intensivos, temos os setores de eletricidade e gás (511,95 $gCO_2e/R\$$), outras indústrias extrativas

(408,59 gCO_2e/R$), transportes (338,60 gCO_2e/R$) e derivados de petróleo e biocombustíveis (320,76 gCO_2e/R$). O setor de O&G, que é o maior emissor absoluto, é o terceiro menor em intensidade de emissões, com 202,08 gCO_2e/R$, porém ainda muito mais intensivo do que outras indústrias de transformação, com 42,66 gCO_2e/R$, e do que o setor de serviços, que é de longe o menos intensivo em emissões, com apenas 0,55 gCO_2e/R$.

A partir da análise dos principais setores emissores de GEE da economia fluminense em termos de emissões absolutas e intensidade de emissões de carbono por unidade de valor agregado, é possível inferir também quais seriam alguns dos setores-chave da economia do ERJ para fins de mitigação das emissões de GEE. Setores que estejam tanto entre os maiores emissores absolutos quanto entre os mais intensivos tendem a ser prioritários, como o setor de saneamento, por exemplo, que é o primeiro mais carbono-intensivo e o terceiro maior emissor absoluto, ou AFOLU, que é o segundo mais carbono-intensivo e o quinto maior emissor absoluto. Minerais não-metálicos, embora seja o terceiro setor mais carbono-intensivo, não se encontra entre os maiores emissores absolutos e O&G e transportes, embora sejam o primeiro e o segundo maiores emissores absolutos, respectivamente, não estão entre os setores mais carbono-intensivos. A metalurgia, por sua vez, tem emissões absolutas equivalentes ao setor de AFOLU e é bastante intensiva, ficando em quarto lugar no ranking dos setores mais carbono-intensivos, com 1.292,71 gCO_2e/R$, muito à frente de eletricidade e gás, que fica em quinto, com 511,95 gCO_2e/R$ (menos da metade da intensidade do setor de metalurgia), embora seja o quarto maior emissor absoluto.

Em teoria, considerando variações de produção, setores que contribuem pouco para as emissões totais e têm baixa intensidade de carbono ou renderiam resultados fracos em termos de redução das emissões totais de GEE ou impactariam fortemente o PIB para contribuírem com reduções significativas, de maneira que os esforços de mitigação não seriam eficientes. Também é importante apontar que os impactos econômicos das políticas de descarbonização não se limitam ao PIB e incluem o emprego (ocupações), que também é um indicador-chave de impacto macroeconômico. As ocupações variam em proporção diferente do PIB, conforme a capacidade de geração de emprego pela produção de cada setor, e é importante que esse indicador também seja considerado na determinação dos setores-chave.

A tabela 08, abaixo, relaciona as emissões de GEE com a geração de emprego de cada setor. Os setores que estão no topo da lista são os que mais emitem GEE

relativamente ao número de empregos que são capazes de gerar na economia fluminense. É possível observar que o setor de saneamento se destaca mais uma vez, em primeiro lugar, seguido por O&G e AFOLU. Esses três setores juntos empregam menos de 1,5% das pessoas ocupadas no ERJ, enquanto são responsáveis por mais de 50% do total de GEE emitidos no estado. O setor de transportes fica fora do ranking dos 07 setores mais intensivos em emissões por ocupações geradas:

Tabela 08 – Emissões de GEE por pessoa empregada por setor

Setores	Emissões Setoriais (tCO_2eq)	Ocupações (pessoas)	Emissões setoriais /ocupações (tCO_2eq/pessoa)
Saneamento	11.545.132,60	27.633,92	417,79
Óleo e gás (O&G)	16.558.652,00	65.551,65	252,60
AFOLU	5.941.810,00	34.104,19	174,23
Eletricidade e gás	7.445.168,40	89.162,03	83,50
Minerais não-metálicos	1.945.511,00	31.547,60	61,67
Derivados de petróleo e biocombustíveis	2.277.052,00	37.970,67	59,97
Metalurgia	5.592.665,00	100.107,09	55,87
Transportes	12.216.510,70	546.125,22	22,37
Outras indústrias extrativas	58.405,00	12.597,53	4,64
Outras indústrias de transformação	1.561.398,00	554.208,26	2,82
Serviços	260.495,80	7.080.469,84	0,04
Demanda final residencial	1.682.133,00	-	-
Demanda final do setor público	58.086,00	-	-
Total	**67.143.019,50**	**8.579.478,00**	**7,83**

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SEEG (2024).

Com base nos resultados obtidos, considerando os efeitos multiplicadores e os critérios de emissões absolutas, intensidade de carbono e relação entre emissões e geração de emprego, é possível observar que os setores de saneamento e AFOLU se destacam, figurando entre os maiores emissores absolutos, os mais carbono-intensivos, os que menos empregam, relativamente às emissões geradas e os que têm maiores efeitos multiplicadores sobre as emissões. Outros setores importantes são: metalurgia, minerais não-metálicos, eletricidade e gás e O&G. Por fim, o setor de transportes se destaca como um dos maiores emissores absolutos. No entanto, com a gradual penetração dos veículos elétricos no mercado brasileiro, a perspectiva a longo prazo é de queda nas emissões de GEE do setor de transportes. É importante pontuar que, de forma geral, fontes estacionárias e pontuais como as da indústria são mais fáceis de controlar do que fontes móveis, como as do setor de transportes, por exemplo. Ademais, setores cujas atividades estão concentradas em poucas unidades

produtivas, sujeitas ao licenciamento ambiental, podem ser mais facilmente submetidos a políticas de comando e controle ou instrumentos econômicos como taxação, *cap-and-trade* e mercados de carbono. Assim, identificamos os seguintes setores-chave para a descarbonização no ERJ: saneamento, AFOLU, metalurgia, minerais não-metálicos, eletricidade e gás e O&G.

4.2. EMISSÕES, MITIGAÇÃO E CUSTOS MARGINAIS DE ABATIMENTO NOS SETORES-CHAVE

É possível estimar o custo macroeconômico que decorreria do abatimento das emissões de GEE pela redução da produção de cada um dos setores-chave identificados, utilizando o modelo estático de otimização da MIP híbrida construída para o ERJ. Para tanto, é preciso limitar as emissões de cada um desses setores separadamente, mantendo irrestritas as emissões dos demais setores e verificar a variação total das emissões, relacionando-a com a variação total do PIB. A razão entre a redução total de emissões de GEE e a redução total do PIB é o custo total de abatimento das emissões no setor avaliado. Considerando uma cotação média do dólar em torno de R$3,95 em 2019 (IPEA, 2024), uma redução de 5% nas emissões de GEE do setor de saneamento resulta em custo total de abatimento de aproximadamente 172,70 US$/$tCO_2$eq. A mesma redução de 5% nas emissões do setor de AFOLU custa 224,32 US$/$tCO_2$eq. Para a metalurgia, o custo é de 355,98 US$/$tCO_2$eq, para minerais não-metálicos, 366,60 US$/$tCO_2$eq, eletricidade & gás, 567,21 US$/$tCO_2$eq e O&G, 1.413,94 US$/tCO_2eq.

Esses resultados evidenciam que os custos de abatimento por redução de produção nos setores de saneamento e AFOLU são consideravelmente menores do que nos demais setores e que as políticas direcionadas a esses setores teriam, potencialmente, menor impacto negativo sobre a economia do que políticas direcionadas aos demais setores. No entanto, as tecnologias disponíveis no mercado não são imutáveis, especialmente no longo prazo, e existem outras maneiras de se abater emissões, sem reduzir a produção, por meio da adoção de tecnologias superiores, menos poluentes, que podem manter ou até aumentar os níveis de produção em cada setor ao mesmo tempo em que reduzem os níveis de emissão de GEE. Portanto, é preciso estudar as fontes de emissão de GEE, as tecnologias de abatimento disponíveis e seus respectivos custos, para poder entender aonde é que

se pode conseguir o máximo de abatimento de emissões de GEE ao menor custo possível. Os chamados custos marginais de abatimento indicam justamente aonde é mais barato cortar emissões pela adoção de novas tecnologias. Portanto, a priorização dos setores-chave identificados na seção anterior depende também dos custos marginais de abatimento em cada setor. Adiante, são apresentas as principais fontes de emissão de GEE em cada um dos setores-chave identificados e as principais tecnologias de abatimento disponíveis, além dos respectivos custos marginais de abatimento.

4.2.1. Saneamento

No setor de saneamento, apenas 17,21% das emissões de GEE resultam do tratamento e despejo de efluentes domésticos, enquanto 82,79% provêm da destinação final de resíduos sólidos. Das emissões relacionadas aos resíduos sólidos, 11,30% advêm da disposição inadequada em aterros controlados ou lixões e 88,58% correspondem a emissões de aterros sanitários (SEEG, 2024). A Política Estadual de Resíduos Sólidos, de 2003, tem como um de seus objetivos a erradicação dos lixões no ERJ e como um de seus princípios a promoção de um modelo de gestão de resíduos sólidos que incentive a cooperação intermunicipal (Rio de Janeiro, 2003). Nesse sentido, sua regulamentação criou o Programa Rio Sem Lixão, em 2007, para a erradicação dos lixões e dos vazadouros clandestinos no território fluminense, com a possibilidade de formação de consórcios públicos intermunicipais para a gestão conjunta dos resíduos sólidos (Rio de Janeiro, 2007) e, em 2008, foi criado o Plano Diretor de Gestão de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro, com previsão de aporte de recursos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) e do Fundo Estadual de Conservação Ambiental (FECAM) para a implementação de aterros sanitários intermunicipais na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2008). Ademais, em 2011, foi instituído o Programa Pacto Pelo Saneamento (Rio de Janeiro, 2011), composto por dois subprogramas: o Rio+Limpo, voltado para o esgotamento sanitário, e o Lixão Zero, que tinha como meta a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, a fim de encerrar todos os lixões até 2014 e remediar as áreas remanescentes até 2016 (Rio de Janeiro, 2013). Finalmente, em 2013, foi lançado o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (PERS/RJ), aprovado pelo

Decreto Nº 45.957, de 22 de março de 2017 (Rio de Janeiro, 2017), com o objetivo geral de promover e aprimorar a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos no Estado do Rio de Janeiro, com base nos marcos regulatórios do setor (Rio de Janeiro 2013). Todos esses esforços têm levado a uma grande redução da disposição de resíduos sólidos em aterro controlado ou lixão e expressivo aumento da disposição final em aterros sanitários (Rio de Janeiro 2013). No entanto, a disposição final em aterros sanitários favorece a formação de biogás (metano), em comparação com as demais formas de destinação (incineração, queima de resíduos a céu aberto e disposição em aterro controlado ou lixão), por conta da decomposição anaeróbia da matéria orgânica, que ocorre em ambientes pobres em oxigênio, como é o caso dos aterros sanitários (Rio de Janeiro, 2012).

É possível reduzir muito as emissões de GEE do setor de saneamento, particularmente metano, com a combustão do biogás que emana dos aterros sanitários, o que pode ser feito com aproveitamento energético ou simplesmente por meio de sua queima em *flares* (Rio de Janeiro, 2013). A combustão do metano (CH_4) em gás carbônico (CO_2) e vapor d'água (H_2O) reduz o potencial de aquecimento global, do inglês *Global Warming Potential (GWP)*, já que o CH_4 tem um GWP 28 vezes maior (horizonte de 100 anos) do que o CO_2 (IPCC, 2014). O biogás, em quantidade suficiente, pode ser depurado para gerar um produto de poder calorífico mais elevado, que pode ser inserido em redes de gás natural ou ser utilizado como combustível no setor automotivo. O biogás de poder calorífico menor pode ser aproveitado diretamente como combustível em caldeiras, para a geração de energia térmica em processos industriais. Também é possível utilizar o biogás para a geração de energia elétrica em termoelétricas associadas aos aterros sanitários, em turbinas a gás, a vapor ou ainda em ciclo combinado, inclusive com cogeração de energia térmica para aquecimento, refrigeração ou suprimento em processos industriais (Rio de Janeiro, 2012).

Também é possível fazer o aproveitamento energético direto dos resíduos sólidos, por meio da incineração, em um sistema de transformação de resíduos em energia, do inglês*: waste-to-energy (WTE)*. Usinas de incineração de resíduos sólidos utilizam calor para produzir vapor, que abastece um gerador de energia elétrica ou é usado diretamente para aquecimento ou em processos industriais. O processo de geração de energia elétrica é semelhante ao de usinas térmicas convencionais e a capacidade de geração depende diretamente do poder calorífico do material

incinerado. Essa é outra forma de aproveitamento de energia a partir do lixo, que apresenta a mesma vantagem do aproveitamento do biogás em termos de aquecimento global: substituição de emissões de metano por emissões de gás carbônico, reduzindo o GWP (MCTIC, 2017 d).

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC, 2017 d) apresenta uma série de medidas de mitigação para o setor de saneamento no período de 2020 a 2050, bem como seus custos marginais de abatimento. Para resíduos sólidos urbanos, podemos destacar: compostagem da fração orgânica de RSU (-4,29 a 1,05 US$/t$CO_2$eq), aproveitamento de biogás em aterro para geração elétrica (-1,75 a -0,53 US$/t$CO_2$eq), aproveitamento de biogás em aterro para produção de biometano (- 1,13 a -0,35 US$/t$CO_2$eq), degradação de biogás de aterro com *flare* (0,01 a 0,17 US$/t$CO_2$eq), difusão da biodigestão de RSU para produção de biometano (-0,98 a 0,45 US$/t$CO_2$eq), difusão da biodigestão de RSU para produção de eletricidade (0,01 a 1,83 US$/t$CO_2$eq), incineração de RSU com aproveitamento energético (8,27 a 23,61 US$/t$CO_2$eq). Os custos de abatimento variam conforme a taxa de desconto adotada (8% ou 14%) e as curvas de aprendizado presumidas, que reduzem os custos e aumentam os potenciais de abatimento (MCTIC, 2017 d).

É possível reparar que os custos marginais de abatimento das diferentes tecnologias de mitigação de emissões do setor de saneamento são muito próximos a zero, levemente negativos ou positivos, com exceção da incineração de RSU com aproveitamento energético, que chega a 23,61 US$/t$CO_2$eq. Mesmo assim, esse valor é menos de 14% dos 172,70 US$/t$CO_2$eq estimados para o custo macroeconômico de abatimento das emissões de GEE por redução da produção do setor de saneamento. A falta de implementação das medidas de mitigação geralmente se deve a barreiras técnicas, econômicas, mercadológicas, institucionais e culturais (MCTIC, 2017 d).

4.2.2. AFOLU

No setor de AFOLU, as ações de descarbonização se relacionam com um uso mais inteligente do solo, adoção de tecnologias mais sustentáveis na criação de animais e no cultivo da terra e recuperação de áreas degradadas. O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (Plano ABC) é um dos planos

setoriais vinculados à Política Nacional sobre Mudança do Clima, com vigência de 2010 a 2020, e está estruturado em sete programas: Recuperação de Pastagens Degradadas; Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF) e de Sistemas Agroflorestais (SAFs); Sistema Plantio Direto (SPD); Fixação Biológica do Nitrogênio (FBN); Florestas Plantadas; Tratamento de Dejetos Animais e Adaptação às Mudanças Climáticas (Rio de Janeiro, 2018).

O estado do Rio de Janeiro elaborou o Plano ABC – RJ em 2018, com vigência até 2030, contando com a contribuição dos seguintes planos e programas: Programa Rio Rural, Plano Estadual sobre Mudança do Clima, Plano de Ação Estadual sobre Adaptação à Mudança do Clima e Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio de Janeiro. Ademais, outras ações importantes vêm sendo desenvolvidas para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas, tais como: RegionsAdapt, Projeto Olho no Verde, Projeto Pacto pelas Águas, Florestando, Cadastro Ambiental Rural, Projeto para Controle de Inundações e Recuperação Ambiental, Plano de Monitoramento e Radar a Riscos e Desastres, Pagamento por Serviços Ambientais, entre outras. O Projeto de Recuperação dos Serviços de Clima e Biodiversidade na Mata Atlântica Brasileira (Projeto Conexão Mata Atlântica), com duração de 5 anos (2017-2021) se baseia na integração de recursos de compensações ambientais, incentivos do Programa Rio Rural e do Fundo Global para o Meio Ambiente ou *Global Environmental Fund (GEF)*, em inglês, para a implantação de um sistema de Pagamento de Serviços Ambientais (PSA). Esse sistema recompensa os proprietários ou possuidores de imóveis rurais pela adoção de práticas produtivas e de conservação em três categorias de serviços ambientais: conservação de florestas, restauração ecológica e conversão produtiva, em que áreas de baixa produtividade são convertidas para sistemas de maior funcionalidade ecológica e econômica. (Rio de Janeiro, 2018).

O Programa Rio Rural incentiva a adoção de práticas produtivas sustentáveis e a transição para sistemas agroecológicos, com técnicas mais eficientes e ambientalmente adequadas, integrando aumento de produtividade, produção de alimentos saudáveis e serviços ambientais, por meio de aporte de recursos para assistência técnica, capacitação, pesquisa adaptativa e incentivos financeiros não reembolsáveis aos agricultores. O programa desenvolve um conjunto de práticas de manejo agrícola e de conservação dos recursos naturais que promovem o aumento dos estoques de carbono na biomassa aérea e nos solos, como adensamento de

cafezal, plantio direto, cultivo mínimo e adubação verde, que aumentam a cobertura do solo com material vegetal, uso de biofertilizantes, pastejo rotacionado, formação e recuperação de pastagens degradadas e aumento das florestas nas paisagens rurais, por meio da proteção de nascentes, conservação de fragmentos florestais, restauração de matas ciliares e de áreas de recarga hídrica, seja por regeneração natural ou por plantio de espécies nativas, além da implantação de sistemas agroflorestais e silvo-pastoris. Os resultados pretendidos são a intensificação de ações de adaptação e redução de vulnerabilidade climática, redução das emissões de GEE das principais cadeias produtivas rurais, agregação de valor aos produtos dos pequenos agricultores e da agricultura familiar, redução de custos de produção, redução de impactos ambientais e incentivo o associativismo (Rio de Janeiro, 2018).

Com pelo menos 1,15 milhões de hectares disponíveis, o ERJ pode contribuir para o Plano ABC do governo federal, particularmente nos seguintes programas: Recuperação de Pastagens Degradadas, Integração Lavoura-Pecuária-Florestas, e Florestas Plantadas (Rio de Janeiro, 2018). As metas de mitigação do setor de AFOLU do ERJ até 2030 são: recuperação de 180.000 ha de pastagens degradadas, com potencial de mitigação de 1,0 a 1,2 $MtCO_2eq$, integração Lavoura-Pecuária-Florestas em 46.000 ha de território, com potencial de mitigação de 0,21 a 0,25 $MtCO_2eq$, e aumento da área de florestas plantadas para pelo menos 100.000 ha, com mitigação de 0,27 a 0,35 $MtCO_2eq$, o que corresponderia a uma redução de até 1,80 $MtCO_2eq$ até 2030 (Rio de Janeiro, 2018). No entanto, os 2,25 milhões de hectares de áreas passíveis de restauração florestal no ERJ representam um potencial líquido de absorção de 800 $MtCO_2eq$ (Rio de Janeiro, 2021), o que torna o setor de AFOLU um sumidouro de carbono em potencial.

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC, 2017 a) apresenta uma série de medidas de mitigação para o setor de AFOLU no período de 2020 a 2050, bem como seus custos marginais de abatimento: sistemas integrados (-1.978 US$/$tCO_2eq$), agricultura de baixo carbono (-311,7 US$/$tCO_2eq$), florestas plantadas (-0,38 US$/$tCO_2eq$), redução do desmatamento (1,24 US$/$tCO_2eq$), intensificação da pecuária (1,99 US$/$tCO_2eq$) e restauração florestal (9,22 US$/$tCO_2eq$).

É possível reparar que os custos marginais de abatimento associados à implementação de sistemas integrados e agricultura de baixo carbono são fortemente negativos e o custo pela intensificação da pecuária é muito baixo. Da mesma forma,

florestas plantadas e redução do desmatamento têm custos de mitigação muito próximos a zero, levemente negativos ou positivos. A restauração florestal desponta como a opção de maior custo, próximo a 10 US$/t$CO_2$eq, mas esse custo é apenas uma fração (menos de 5 %) dos 224,32 US$/t$CO_2$eq estimados para o custo macroeconômico de abatimento das emissões de GEE por redução da produção do setor de AFOLU. A falta de implementação das medidas de mitigação geralmente se deve a barreiras econômicas, socioculturais, político-institucionais e científico-tecnológicas (MCTIC, 2017 a).

4.2.3. Setor Industrial

Para o setor industrial, segundo Hebeda (2024), as medidas de mitigação podem ser agrupadas em três frentes:

a) eficiência energética;
b) substituição de combustíveis;
c) outras melhorias de processo.

A primeira delas, eficiência energética se refere à adoção de tecnologias que podem ser implementadas na estrutura industrial existente e que têm como resultado a redução do consumo específico, como a otimização da combustão, com a implementação de queimadores mais eficientes e regulagem da proporção entre o ar e o combustível, ou a integração de processos, com aproveitamento do calor residual de fluídos de alta temperatura ou a recuperação de vapor e de gases de exaustão de fornos. Entretanto, existe um limite técnico para a eficiência energética, o que leva à necessidade de uma segunda frente de medidas de mitigação, para se alcançar um resultado maior: a substituição de combustíveis fósseis. Contudo, a substituição do tipo de combustível utilizado na geração de energia de um determinado segmento industrial normalmente não pode ser feita sem adaptação ou substituição do equipamento que consome o combustível fóssil, o que requer investimento adicional. Por fim, outras melhorias de processo agrupam todas as demais tecnologias que não se enquadram nem em aumento de eficiência nem em substituição de combustíveis, como é o caso da captura e armazenamento de carbono (CAC), do inglês: *carbon capture and storage (CCS)* uma tecnologia baseada na captura do CO_2 da combustão, dos processos industriais ou mesmo do ar ambiente para armazenamento de volta na geosfera, em depósitos geológicos. Existe também a possibilidade de captura e uso

de carbono (CUC), do inglês: *carbon capture and use (CCU)*, onde o CO_2 emitido de um processo é utilizado em outro (Hebeda, 2024).

Na metalurgia, o foco das políticas estaduais de mitigação dever estar na substituição do carvão mineral, que é utilizado na siderurgia tanto para a geração de energia quanto para a redução do minério de ferro. No entanto, apenas 9,20% das emissões da siderurgia fluminense em 2019 resultaram do consumo de energia, enquanto a maior parte, 90,80%, decorreu dos processos industriais (*IPPU*) (SEEG, 2024). As tecnologias de mitigação de GEE neste setor se concentram em medidas de eficiência energética e de substituição de combustíveis, para a redução do consumo de combustíveis fósseis na geração de energia, e na utilização de rotas tecnológicas de baixo carbono para a produção de aço, para reduzir as emissões de *IPPU*, além do *CCS* (Hebeda, 2024). É possível substituir o carvão mineral pelo carvão vegetal, tanto para a geração de energia quanto para a redução do minério de ferro, por meio da rota integrada a carvão vegetal. No uso de energia, também existe a possibilidade de substituição de combustíveis pela eletrificação, por meio da tecnologia do Forno Elétrico a Arco (FEA), que pode ser associada ao processo de redução direta, sem fusão do minério de ferro, utilizando um gás redutor no lugar do carvão mineral (Hebeda, 2024).

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC, 2017 c) apresenta uma série de medidas de mitigação para o setor siderúrgico no período de 2020 a 2050, bem como seus custos marginais de abatimento: sistema de controle avançado (-330,35 US$/t$CO_2$eq), preaquecimento da sucata (-281,49 US$/t$CO_2$eq), UTE avançadas para produção de eletricidade em usinas integradas (-247,92 US$/t$CO_2$eq), drivers de velocidade variável nos *basic oxygen furnace (BOF)* (-231,35 US$/t$CO_2$eq), queimadores *oxy-fuel* (-132,39 US$/t$CO_2$eq), recuperação de calor sensível do BOF (-110,74 US$/t$CO_2$eq), recuperação de calor das fornalhas de ar quente (-31,38 US$/t$CO_2$eq), injeção de carvão pulverizado (-20,32 US$/t$CO_2$eq), *coke dry quenching* (-14,19 US$/t$CO_2$eq), recuperação de calor residual (24,74 US$/t$CO_2$eq), fornos Scope 21 (50,14 US$/t$CO_2$eq), *top pressure recovery turbine* (TRT) (50,22 US$/t$CO_2$eq) e controle da umidade do carvão (150,07 US$/t$CO_2$eq).

No setor de minerais não-metálicos, particularmente na indústria de cimento do ERJ, em 2019, 36,18% das emissões de GEE aconteceu no uso da energia, pela queima de combustíveis fósseis, e 63,82% ocorreram na produção de clínquer, pelas reações químicas da etapa de calcinação, que transformam o calcário ($CaCO_3$) em

cal virgem (CaO) e gás carbônico (CO_2). Dessa forma, as ações de mitigação se dividem entre medidas de eficiência energética, para a redução do consumo específico de energia, substituição de combustíveis, para redução do uso de combustíveis fósseis, e outras melhorias de processo, para reduzir a formação de gás carbônico (Hebeda, 2024). Dada a elevada concentração de CO_2 nos gases de combustão das plantas de cimento, também se considera o CCS nesse setor, para captura de “pós-combustão”, por absorção química (MCTIC, 2017 b). Quanto ao consumo de combustíveis fósseis, esse setor se destaca pelo potencial de substituição por combustíveis alternativos, por meio do coprocessamento de resíduos. Os fornos de cimento possuem características favoráveis à queima de resíduos, como longo tempo de exposição a altas temperaturas (acima de 1.450°C) e atmosfera oxidante, além de apresentarem vantagens como destruição total de componentes orgânicos, como dioxinas e furanos, e nenhuma geração de cinzas. É possível aproveitar resíduos industriais, resíduos agrícolas e resíduos sólidos urbanos, principalmente pneus velhos (SNIC, 2019). Os fornos da indústria de cimento são capazes de utilizar até 100% de combustíveis alternativos, mas existem barreiras técnicas como o baixo poder calorífico e a concentração de cloro e outras substâncias prejudiciais ao processo (Hebeda, 2024). O coprocessamento de resíduos apresenta duas vantagens: o componente energético dos resíduos substitui a queima de combustíveis fósseis, apresentando emissões de CO_2 inferiores às dos combustíveis tradicionais, e os componentes inorgânicos, como as cinzas, podem ser incorporadas ao clínquer (IEA, 2009). Finalmente, existe a possibilidade de redução da razão clínquer-cimento, por meio do uso de aditivos que substituem parte do clínquer no cimento, como escória de alto-forno, cinzas volantes, cinzas de resíduos agrícolas, como casca de arroz, calcário e materiais pozolânicos naturais, como argilas calcinadas (IEA, 2018). A redução da produção de clínquer promove, além da redução das emissões de processos, a redução do consumo de energia para sua produção (Hebeda, 2024).

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC, 2017 b) apresenta uma série de medidas de mitigação para o setor de cimento no período de 2020 a 2050, bem como seus custos marginais de abatimento: adição de carboneto de escória (-161,4 a -69,3 US$/$tCO_2$eq), inserção de refratário no forno de clinquerização (-155,5 a -63,6 US$/$tCO_2$eq), controle e otimização de processo (-154,8 a -63,0 US$/$tCO_2$eq), melhorias no sistema de combustão (-143,1 a -47,3

US$/tCO$_2$eq), adoção de refrigeradores de grelha de alta eficiência (-69,9 a 44,3 US$/tCO$_2$eq) e processo de via seca com múltiplos estágios de ciclone (-7,0 a 80,0 US$/tCO$_2$eq). Os custos de abatimento variam conforme a taxa de desconto adotada (8% ou 15%).

Devido à proximidade entre as indústrias siderúrgica e de cimento no estado do Rio de Janeiro, existe uma oportunidade interessante de sinergia entre os setores de metalurgia e minerais não-metálicos na oferta de aditivos alternativos ao clínquer, como cinzas volantes e escória de alto-forno, que estão ligadas à produção de aço. Quanto ao CCS, Hebeda (2024) aponta o alto custo de investimento e a necessidade de infraestrutura específica para o transporte e o armazenamento de CO_2 como empecilho comuns para o avanço dessa tecnologia, que se vê restrita a sítios industriais próximos aos locais de armazenamento. No Rio de Janeiro, portanto, o CCS pode ser muito promissor, tendo em vista a vocação do estado para a exploração de óleo e gás, o que torna disponível a infraestrutura de transporte e armazenamento necessárias. O MCTIC (2017 b) afirma que a rota de pós-combustão com absorção química é, atualmente, a única rota de CCS comercialmente disponível para as plantas cimenteiras brasileiras, com custos de aproximadamente 70 a 150 US$/tCO$_2$. Já para a siderurgia, o custo considerado foi de 56 US$/tCO$_2$, para a tecnologia *top gas recycling blast furnace (TGRBF)*, que poderia ser aplicada em plantas existentes, como *retrofitting* (MCTIC, 2017 c).

Nota-se que os custos marginais de abatimento da maioria das tecnologias consideradas pelo MCTIC para os setores industriais de siderurgia e cimento são consideravelmente negativos, com algumas poucas exceções (inclusive o CCS) que chegam a, no máximo, 150 US$/tCO$_2$eq, valor muito inferior (quase 60% menor) do que os cerca de 360 US$/tCO$_2$eq estimados para o custo macroeconômico de abatimento das emissões de GEE por redução da produção dos setores de metalurgia e minerais não-metálicos. Novamente, pesam as barreiras econômicas, socioculturais, político-institucionais e científico-tecnológicas para a implementação dessas soluções (MCTIC, 2017 c).

4.2.4. Geração de Energia Elétrica

A maioria das usinas termoelétricas (UTE) existentes no mundo opera com o ciclo Rankine e sua maturidade tecnológica faz com que poucas novidades sejam

introduzidas nesse ciclo térmico. Também conhecido como ciclo a vapor, o ciclo Rankine envolve inicialmente a geração de vapor em uma caldeira, por meio do aproveitamento de uma fonte térmica de alta temperatura. Nas UTE, essa fonte é o gás de exaustão de um combustível (gás natural, no caso de UTE a gás). O vapor gerado na caldeira segue para a ilha de potência, onde uma turbina a vapor converte o calor em energia mecânica. O vapor esgotado a baixa pressão é resfriado em um condensador, que é responsável pela rejeição de calor de menor qualidade. Finalmente, a água, já sob forma líquida, é bombeada novamente para a caldeira, completando o ciclo térmico. Os pontos críticos para o ciclo Rankine são: a temperatura máxima da caldeira, que determina a qualidade do vapor gerado, e a temperatura de rejeição térmica, no condensador. Os esforços de desenvolvimento dessa tecnologia se concentram no primeiro ponto, visando a melhorar o aproveitamento da fonte de energia, enquanto o segundo ponto é relevante para o aproveitamento do calor residual, como nas usinas de cogeração. A eficiência de geração pode ser aumentada consideravelmente ao se projetar os equipamentos do ciclo a vapor para a operação com pressões e temperaturas maiores, que levam a condições supercríticas no ciclo a vapor, aumentando a variação de entalpia na turbina e a geração de trabalho. Em plantas supercríticas, as eficiências de geração variam de 37% a 40%, mas elas foram desenvolvidas especialmente para térmicas a carvão mineral de alta qualidade. As usinas a gás de ciclo Rankine operam exclusivamente em sistemas subcríticos e apresentam eficiências inferiores, na faixa de 25% a 30% (MCTIC, 2017 f).

O ciclo Brayton, também chamado de ciclo aberto, se baseia na conversão de energia térmica em turbinas a gás, que também são máquinas de combustão interna, cujo desenvolvimento tecnológico permitiu maior competitividade do gás natural na geração elétrica. O ciclo aberto se baseia na queima de combustível com ar comprimido em uma câmara de combustão e os produtos dessa combustão são encaminhados para a turbina a gás a pressões e temperaturas muito altas, onde sua energia térmica é convertida em energia mecânica. Posteriormente, o exausto é descartado para a atmosfera, que atua como reservatório térmico. Para as UTE de ciclo aberto, as turbinas aeroderivadas são a escolha mais comum, pois alcançam eficiências mais altas, de até 40% (MCTIC, 2017 f).

Finalmente, as UTE de ciclo combinado utilizam os dois ciclos (Brayton e Rankine) de forma sequencial. O ciclo Rankine opera a jusante, aproveitando a

qualidade térmica do exausto da turbina a gás do ciclo Brayton, a montante, o que permite um aproveitamento térmico melhor e uma eficiência térmica mais alta do que a do ciclo aberto, podendo chegar até 60%. Para as UTE de ciclo combinado, as turbinas industriais são mais adaptadas, pois o exausto da turbina ainda se encontra a uma temperatura elevada e existe força motriz suficiente para a troca de calor no gerador de vapor do recuperador de calor, do inglês: *heat recuperator steam generator (HRSG)*, que substitui a caldeira do ciclo Rankine isolado (MCTIC, 2017 f).

O setor de geração de energia elétrica fluminense, baseado em UTE a gás, de tecnologia madura, é um setor de difícil abatimento e as medidas de mitigação estão relacionadas basicamente ao aumento de eficiência das turbinas e à substituição do gás natural por gás de síntese das atividades de E&P, que permite atingir temperaturas mais altas, além do uso de combustíveis alternativos, como o biogás de aterros sanitários ou mesmo o etanol (MCTIC, 2017 f).

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC, 2017 f) apresenta duas medidas de mitigação para a geração de energia elétrica por UTE a gás natural no período de 2020 a 2050, bem como seus custos marginais de abatimento: uso de etanol em turbinas a gás (456 a 482 US$/t$CO_2$eq) e ciclo combinado em UTE a gás ou, em inglês*: natural gas combined cycle (NGCC)* flexível (-169 a -79 US$/t$CO_2$eq).

Quanto ao CCS, sua aplicação só é considerada em UTE de ciclo combinado, que tendem a operar na geração de base e não de pico e apresentam eficiência mais alta. A rota tecnológica envolvida nesse caso é a captura em pós-combustão de um exausto com concentração molar de CO_2 em torno de 4% a 6% (valor inferior ao de uma térmica a carvão), devido a uma maior razão ar-combustível na turbina a gás, o que eleva o custo de captura relativamente às UTE a carvão. As térmicas de ciclo aberto costumam operar para a geração de pico, o que requer capacidade de entrar e sair de operação rapidamente, para seguir a demanda a tempo. A introdução do CCS em UTE de ciclo aberto retardaria a capacidade de partida rápida e sua penalidade energética reduziria ainda mais a eficiência das usinas, aumentando o custo da geração. Portanto, considerando as tecnologias de captura de carbono disponíveis no mercado, não existe expectativa de se capturar o dióxido de carbono na geração de pico, em UTE de ciclo Brayton (MCTIC, 2017 f).

O custo de abatimento por CCS em termelétricas a gás no Brasil depende do fator de capacidade de operação das plantas, da taxa de desconto empregada e do

preço do gás. O MCTIC (2017 f) indica que esses custos devem girar em torno de 50 a 60 US$/tCO2 para um fator de capacidade médio, de 50% a 60%. No entanto, a integração do CCS nas UTE impacta consideravelmente o custo nivelado da geração elétrica, gerando um aumento de cerca de 30% a 50%, para uma mesma faixa de fator de capacidade. O reciclo do exausto pode reduzir em parte esses custos, pois aumenta a concentração de CO_2 para a captura, mas demanda modificações no sistema de queima da turbina e aumenta a complexidade da usina, o que podem inviabilizar sua utilização em plantas que já foram instaladas sem essa tecnologia de captura (MCTIC, 2017 f).

O setor de eletricidade e gás fluminense pode ser considerado, portanto, de difícil descarbonização ou *hard-to-abate*, em inglês, pois já opera com tecnologia relativamente madura e grande parte de suas emissões são inerentes aos próprios processos produtivos, de forma que a redução de emissões de GEE é especialmente complexa, devido às limitações tecnológicas e operacionais que se apresentam. A implementação do ciclo combinado em UTE a gás é a única alternativa que apresenta custo marginal de abatimento negativo. A implementação do CCS enfrenta barreiras tecnológicas importantes, particularmente em usinas que já estão em operação, e o uso de etanol em turbinas a gás apresenta custo marginal de abatimento muito alto, próximo a 482 US$/$tCO_2$eq. Ainda assim, os custos marginais de abatimento não chegam a 85% dos 567,21 US$/$tCO_2$eq estimados para o custo macroeconômico de abatimento das emissões de GEE por redução da produção do setor de eletricidade e gás (MCTIC, 2017 f).

4.2.5. Exploração e Produção de Óleo e Gás (E&P)

No setor de O&G, as emissões de GEE do petróleo estão associadas às atividades de exploração, produção, transporte e refino de petróleo cru, tanto em operações terrestres quanto marítimas (EPA, 2024). Entretanto, o refino de petróleo faz parte do setor de derivados de petróleo e biocombustíveis da MIP e trataremos aqui apenas dos aspectos relacionados às atividades de exploração e produção (E&P), incluindo o transporte e armazenamento de petróleo cru. As emissões de metano (CH_4) são provenientes de vazamentos, liberação direta (do inglês: *venting*) e queima em chaminés (do inglês: *flaring*) nas atividades de exploração, produção, transporte e refino, enquanto as emissões de dióxido de carbono (CO_2) estão

associadas principalmente às atividades de produção e refino de óleo cru. A maior parte das emissões são oriundas da etapa de produção, que foi responsável por 97% das emissões totais de CH_4, 86% das emissões totais de CO_2 e 84% das emissões totais de N_2O do setor de petróleo dos Estados Unidos em 2022, enquanto a exploração representou menos de 0,5% das emissões totais de CH_4 e N_2O e 1% das emissões totais de CO_2 e o transporte, 0,6% das emissões totais de CH_4, 0,01% das emissões totais de CO_2 e nenhuma emissão de N_2O (incluindo vazamentos, *venting* e *flaring*) (EPA, 2024).

Para o gás natural, as emissões de GEE são provenientes de vazamentos, *venting* e *flaring* nas atividades de exploração, produção, processamento, transmissão & armazenamento, distribuição e consumo final (“pós-medidor”). O setor de O&G da MIP construída para esta dissertação abrange as quatro primeiras categorias. As emissões de metano e gás carbônico dos sistemas de gás natural podem ser resultantes da operação normal, da manutenção de rotina ou de falhas no sistema. As emissões da operação normal incluem gases não queimados de motores e turbinas a gás natural, *flaring* e vazamentos a partir dos componentes do sistema. As atividades de reparo e manutenção, por sua vez, provocam emissões a partir de tubulações, equipamentos e poços. Sistemas de alívio de pressão e acidentes também podem resultar em emissões, devido a falhas do sistema. A maior parte das emissões são oriundas da etapa de produção (incluindo coleta e compressão), que foi responsável por 46% das emissões totais de GEE no setor de gás dos Estados Unidos, em 2022, enquanto as etapas de processamento e transmissão & armazenamento responderam, cada uma, por outros 20% do total de emissões. As emissões da etapa de exploração, por sua vez, foram desprezíveis. As emissões de CH_4 estão mais associadas a vazamentos e *venting*, enquanto as emissões de CO_2 e N_2O são provenientes principalmente de *flaring*, (EPA, 2024).

Nos Estados Unidos, em 2022, as sete principais fontes emissoras de CH_4 nos campos de produção de petróleo foram: controladores pneumáticos, plataformas de petróleo offshore, vazamentos de equipamentos, água produzida, motores a gás, bombas de injeção química e queima de gás associado, que representaram juntas 93% das emissões de metano da etapa de produção. As principais fontes de emissões de CO_2, por outro lado, foram apenas três: *flaring* de gás associado, *flaring* de outros gases e *flaring* de vapores de tanques de armazenamento de óleo, que representaram 96% das emissões totais de gás carbônico da etapa de produção. Para o N_2O, por

sua vez, as principais fontes foram o *flaring* de vapores de tanques de armazenamento de óleo e o *flaring* de gás associado, que representaram 90% das emissões de óxido nitroso da etapa de produção (EPA, 2024).

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações (MCTIC, 2017 e) apresenta uma série de medidas de mitigação para o setor de O&G no período de 2020 a 2050, bem como seus custos marginais de abatimento: instalação de Unidades de Recuperação de Vapor (URV) em tanques de armazenamento (-26,1 US$/t$CO_2$eq), substituição da selagem a óleo pela selagem a gás em compressores centrífugos (44,1 US$/t$CO_2$eq), aumento da frequência de substituição do invólucro em compressores recíprocos (21,80 US$/t$CO_2$eq), implementação de programas de inspeção e manutenção de equipamentos (19,8 US$/t$CO_2$eq), implementação do piloto de *flare* (-59,7 US$/t$CO_2$eq) e aplicação da rota *gas-to-liquids* (GTL) nas plataformas (-382,8 US$/t$CO_2$eq). Ademais, considera-se o CCS para captura de CO_2 diretamente do gás associado extraído nos campos de óleo e gás, ou seja, captura "pré-combustão", por meio da tecnologia de separação por membranas em plataformas *offshore* de produção de óleo e gás natural a um custo de 3,9 a 20,9 US$/t$CO_2$eq, dependendo do teor de CO_2 no gás bruto e do custo da membrana (MCTIC, 2017 e).

Algumas das tecnologias consideradas pelo MCTIC para o setor de O&G apresentam custos marginais de abatimento consideravelmente negativos, particularmente a aplicação da rota *gas-to-liquids* (GTL) nas plataformas de E&P. Outras tecnologias apresentam custos marginais de abatimento positivos (inclusive o CCS), que chegam a, no máximo, 44,1 US$/t$CO_2$eq, valor que é apenas uma fração (cerca de 3 %) dos 1.413,94 US$/t$CO_2$eq estimados para o custo macroeconômico de abatimento das emissões de GEE por redução da produção do setor de O&G. Pesam, como sempre, as barreiras técnicas, econômicas, mercadológicas, institucionais e culturais para a implementação dessas soluções (MCTIC, 2017 e).

4.3. IMPLICAÇÕES MACROECONÔMICAS DE CENÁRIOS FUTUROS DE DESCARBONIZAÇÃO

Para a descarbonização da economia do ERJ, o principal setor econômico que deve ser alvo de políticas públicas de mitigação de emissões de GEE é o setor de saneamento, pois as emissões desse setor se caracterizam por emissões de metano,

de alto GWP, que basicamente escapam de aterros sanitários, o que não contribui para a geração de emprego e renda na economia. É importante, portanto, incentivar o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU), seja pelo aproveitamento do biogás gerado nos aterros sanitários, seja pelo aproveitamento energético direto dos RSU por incineração, no sistema WTE. Em último caso, não havendo viabilidade econômica para o aproveitamento energético, é fundamental pelo menos queimar o biogás residual dos aterros sanitários por meio de *flares*.

Outro setor que se mostra essencial para a descarbonização da economia fluminense é o setor de AFOLU, que desperdiça emissões pelo mau uso do solo e tem potencial de redução principalmente pela recuperação de pastagens degradadas. Ademais, esse é o único setor com potencial para se tornar um sumidouro de carbono, com base na restauração florestal. As ações em andamento para a descarbonização desse setor da economia fluminense têm resultado esperado de mitigação de uma média de 150.000 tCO_2eq por ano até 2030, mas o potencial de absorção de carbono da restauração florestal fluminense é grande e o setor de AFOLU pode se tornar um sumidouro líquido de carbono, se forem intensificadas as atividades de reflorestamento.

Por outro lado, os setores industriais, de E&P e de geração de energia elétrica do ERJ já operam com tecnologia relativamente madura e grande parte de suas emissões são inerentes aos próprios processos produtivos. Assim, são considerados setores de difícil descarbonização, onde a redução de emissões de GEE é especialmente complexa. Esses setores dependem, portanto, de políticas públicas que viabilizem e estimulem os investimentos em tecnologias de abatimento. No entanto, esses setores não têm sido alvo das políticas estaduais de descarbonização e ainda não possuem metas de mitigação estipuladas.

Já existem metas para a descarbonização do setor de resíduos sólidos no ERJ e diversas ações em andamento para a mitigação das emissões de GEE do setor de AFOLU. Assim, o cenário de referência para a descarbonização parte do cumprimento das metas setoriais já determinadas para a economia fluminense e concretização dos resultados estimados para as ações de mitigação do setor de AFOLU, até 2030: redução de 65% nas emissões per capita do setor de saneamento, em relação ao ano-base de 2005, 30% nas emissões do setor de transportes, em relação ao ano-base de 2010, 30% de redução das emissões da demanda final do setor público, em relação ao ano-base de 2005, intensidade de carbono (emissões/PIB) em 2030 menor do que

em 2005 e redução de 150.000 tCO_2eq por ano no setor de AFOLU, entre 2018 e 2030.

De acordo com o Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Estado do Rio de Janeiro de 2005, para uma população de 15,38 milhões de habitantes (IBGE, 2024), as emissões de GEE resultantes da disposição de resíduos sólidos foram de 3,71 $MtCO_2eq$ (Centro Clima, 2007), fornecendo o nível-base de 241 $kgCO_2eq/hab$ em 2005. As emissões de GEE provenientes do tratamento e despejo de efluentes domésticos em 2005 foram de 0,96 $MtCO_2eq$ (Centro Clima, 2007), fornecendo o nível-base de 62 $kgCO_2eq/hab$ em 2005.

Segundo as informações do SEEG (2024), em 2019, as emissões totais do setor de saneamento do ERJ somaram 11,55 $MtCO_2eq$, sendo 9,56 $MtCO_2eq$ resultantes da disposição de resíduos sólidos e 1,99 $MtCO_2eq$ provenientes do tratamento e despejo de efluentes domésticos. Nesse mesmo ano, a população do estado era de 17,26 milhões de habitantes (IBGE, 2024). Portanto, as emissões per capita do setor de saneamento em 2019 eram de 554 $kgCO_2eq/hab/ano$ para a disposição de resíduos sólidos e 115 $kgCO_2eq/hab/ano$ para o tratamento e despejo de efluentes domésticos. Assim, para cumprir a meta de 65% de redução nas emissões per capita do setor de saneamento, em relação ao ano-base de 2005, as emissões per capita desse setor devem ser reduzidas de 554 $kgCO_2eq/hab/ano$ em 2019 para 84 $kgCO_2eq/hab/ano$ em 2030, para a disposição de resíduos sólidos, e de 115 $kgCO_2eq/hab/ano$ em 2019 para 22 $kgCO_2eq/hab/ano$[9] em 2030, para o tratamento e despejo de efluentes domésticos, o que resulta em uma taxa média anual de redução de 6,0% ao ano nas emissões do setor de saneamento, por onze anos consecutivos, na hipótese da mesma redução percentual nas duas parcelas das emissões do saneamento.

Para o setor de transportes, a meta é a redução de 12.79 $MtCO_2eq$ em 2010 (SEEG, 2024) para 8.95 $MtCO_2eq$ em 2030, sendo que, em 2019, as emissões somaram 12.22 $MtCO_2eq$, ou seja, já houve uma ligeira redução de 4,5 % nas emissões entre 2010 e 2019, sendo necessária uma ulterior mitigação de 27% entre 2019 e 2030, ou 2,2 % ao ano. Por outro lado, até 2019, a demanda final do setor

[9] O Decreto nº 43.216, de 30/09/2011, explicita que as emissões per capita de GEE de esgoto sanitário deverão sair do patamar de 31 kg CO_2e/hab./ano em 2005 e alcançar 11 kg CO_2e/hab./ano em 2030. No entanto, segundo os dados do Centro Clima (2007), as emissões de GEE provenientes do tratamento e despejo de efluentes domésticos em 2005 foram de 0,96 $MtCO_2eq$, fornecendo o nível-base de 62 $kgCO_2eq/hab$ em 2005, o que resultaria em uma meta de 22 $kgCO_2e$/hab/ano em 2030.

público teve suas emissões reduzidas em quase 62% em relação ao nível de 2005, caindo de 152 mil tCO_2eq para 58 mil tCO_2eq. Isso mostra que a meta de 30% de redução das emissões do setor público já foi superada. O mesmo ocorre com a intensidade de emissões da economia fluminense que, em 2019, já era 49% menor do que em 2005, o que significa que a meta inicial de 30% já foi superada.

As estimativas, até 2030, para as ações de mitigação que estão em andamento no setor de AFOLU do ERJ são: recuperação de 180.000 ha de pastagens degradadas, integração Lavoura-Pecuária-Florestas em 46.000 ha de território e aumento da área de florestas plantadas para pelo menos 100.000 ha, o que corresponderia a uma redução de até 1,80 $MtCO_2eq$ em relação aos níveis de 2018 (Rio de Janeiro, 2018). Segundo as informações do SEEG (2024), em 2018, as emissões totais do setor de AFOLU do ERJ somaram 5,61 $MtCO_2eq$. Em 2019, por sua vez, as emissões alcançaram 5,94 $MtCO_2eq$ (aumento 5,88% em relação a 2018). Portanto, para se alcançar a meta, é preciso fechar o ano de 2030 com emissão de 3,81 $MtCO_2eq$, o que representa uma mitigação média de cerca de 4% ao ano nas emissões do setor de AFOLU entre 2019 e 2030.

Para fins de exercício paramétrico, mantida a MIP de 2019, é possível simular o efeito macroeconômico de restrições de emissões compatíveis com as metas de mitigação do cenário de referência sobre a economia do ERJ, estabelecendo um choque na produção dos respectivos setores e observando os resultados do modelo estático de otimização fundamentado no Método Simplex de programação linear. O reequilíbrio da MIP mostra uma queda de 2,01% nas emissões totais de GEE em um ano, a um custo de 0,28% do PIB e 0,26% das ocupações, para um corte de 6,0% a.a. nas emissões do setor de saneamento, 2,5% a.a. no setor de transportes e 4,0% a.a. no setor de AFOLU. Essa queda anual, se repetida ano a ano, seria o suficiente para se atingir, em 2030, as metas já estabelecidas e as estimativas do Plano ABC – RJ. Esse resultado se traduziria em um custo macroeconômico de 347,69 UStCO_2eq, para o cenário de referência, na hipótese de redução das emissões de GEE pelo sacrifício da produção.

Para um cenário mais restritivo, é preciso impor limites de emissões de GEE também aos setores industriais, de E&P e de geração de energia elétrica. É possível repetir a simulação feita para o cenário de referência, acrescentando restrições de emissões para os demais setores-chave na MIP de 2019. Atribuindo-se um corte de 5% para os setores de metalurgia, minerais-não-metálicos, óleo e gás e eletricidade e

gás, o modelo resultaria em queda de 4,32% nas emissões totais de GEE do ERJ em um ano, com um sacrifício de 1,33% no PIB e 0,76% no emprego. Esse resultado se traduziria em um custo macroeconômico de 769,66 US$/tCO$_2$eq, para o cenário mais restritivo, na hipótese de redução das emissões de GEE pelo sacrifício da produção. O aumento do custo macroeconômico no cenário restritivo, em relação ao cenário de referência, se deve ao maior peso dos setores industriais, de O&G e de geração de energia elétrica. Entretanto, esse último cenário permite aumentar a mitigação de emissões totais de GEE na economia fluminense, de 2,01% para 4,32%.

Segundo o relatório do Banco Mundial que faz o acompanhamento anual do estado dos mercados regulados de carbono em cada jurisdição: *State and Trends of Carbon Pricing* (2024), para se alcançar as metas do Acordo de Paris, em 2030, os níveis de preço necessários para se limitar o aquecimento global a 1,5°C giram em torno de 226 e 385 US$/tCO$_2$e e para manter o aumento da temperatura bem abaixo de 2°C, a faixa de preço é de 63 a 127 US$/tCO$_2$e. Ademais, em 2024, apenas sete instrumentos de precificação de carbono, abrangendo menos de 1% das emissões globais de GEE, atingiram níveis de preços iguais ou superiores ao nível mínimo de US$63/tCO$_2$eq. Os custos macroeconômicos encontrados neste estudo são, portanto, extremamente elevados em relação aos níveis de preço praticados mundo afora. O principal motivo para esse custo tão alto é que foi feita uma análise estática, em que a redução das emissões de GEE ocorre por redução do nível de atividade de cada setor. Entretanto, na prática, a economia não se ajusta por mera mudança no nível de atividade de cada setor, para obedecer a restrições de emissões de GEE impostas pelo governo, fugindo de setores mais intensivos para setores menos intensivos. As empresas sempre buscarão aprimorar seus processos produtivos e implementar tecnologias de abatimento para poderem manter seus níveis de produção. O ajuste, portanto, se faz muito mais por inovação tecnológica do que por redução de produção.

A abordagem macroeconômica proposta neste estudo ajuda a hierarquizar os diferentes setores, mostrando as diferenças entre eles em termos de emissões absolutas e relativas e a contribuição de cada um para a formação do PIB e a geração de empregos, de forma a contribuir para a definição de prioridades na elaboração de políticas públicas de mitigação de emissões de GEE. No entanto, é imprescindível considerar também os aspectos microeconômicos, que se referem aos custos de abatimento das diferentes tecnologias disponíveis para cada um dos setores-chave. O custo marginal de abatimento de cada tecnologia indica a viabilidade econômica de

se mitigar emissões de GEE em cada indústria, de cada setor, e o estabelecimento de sistemas de comércio de emissões, a exemplo do SBCE, ajudam a nivelar os custos de abatimento entre as diferentes indústrias e os diferentes setores participantes, resultando em um custo total de abatimento menor do que as perdas macroeconômicas estimadas pela redução da produção. A partir de 2030, portanto, as indústrias siderúrgica e cimenteira, as UTE a gás e o setor de O&G fluminenses estarão sujeitos ao SBCE, o que provocará impactos macroeconômicos decorrentes das obrigações de redução de emissões de GEE. As ações de descarbonização gerarão novos custos para os atores regulados e novas receitas para o governo, além de novos esforços de mitigação de emissões para a geração de créditos de carbono que possam ser comercializados. Tudo isso gera impactos macroeconômicos que precisarão ser apreciados pelo governo do ERJ para fins de planejamento.

Outro ponto a se considerar na ponderação dos impactos econômicos das políticas de descarbonização no ERJ é que, além de contribuírem para o cumprimento das CND brasileiras, elas também apresentam muitos cobenefícios. No saneamento, uma gestão eficaz dos resíduos sólidos, com coleta e tratamento adequados, não apenas reduziria as emissões de GEE ligadas ao metano que se forma nos aterros sanitários, como também contribuiria para a despoluição do solo e dos recursos hídricos, que hoje se veem repletos de lixo, e para a economia de energia e de materiais, por meio do reuso e da reciclagem (MCTIC, 2017 d). No setor de AFOLU, o desenvolvimento de sistemas agroflorestais e silvo-pastoris pode contribuir para a produtividade de pequenas propriedades rurais e ajudar no desenvolvimento de novos mercados, como o de produtos orgânicos, agregando valor à produção agropecuária. Além disso, o setor de AFOLU permite a criação de sumidouros, conforme previsto na PEMCDS, e a restauração florestal do território fluminense pode contribuir muito para a absorção de CO_2, o principal gás de efeito-estufa, além da preservação dos ecossistemas, da biodiversidade e dos mananciais de recursos hídricos (Rio de Janeiro, 2018). Por fim, o aumento da eficiência energética e a substituição de combustíveis nos setores industriais e de geração de energia elétrica também contribuiria muito para a redução da poluição atmosférica causada pela queima de combustíveis fósseis. Se esses cobenefícios forem adequadamente valorados, os investimentos em tecnologias de abatimento podem se mostrar compensadores (COPPE, 2017).

5 CONCLUSÕES, LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

Esse trabalho explorou o potencial do uso de uma matriz insumo produto híbrida, com agregação de um vetor de dados de emissões de GEE, como ferramenta de modelagem para análise de implicações macroeconômicas de políticas de restrição de emissões em nível subnacional (estadual), tomando o estado do Rio de Janeiro como caso de estudo, a partir de tabelas de recursos e usos de bens e serviços construídas para o ano de 2019 e disponibilizadas pela Secretaria de Planejamento e Gestão (SEPLAG), do Governo do Estado do Rio de Janeiro.

A análise dos multiplicadores da matriz e dos dados de emissões de GEE estimados pelo SEEG permite concluir, a partir dos efeitos multiplicadores, da intensidade de carbono e das emissões de GEE por ocupação gerada de cada setor, que os setores de saneamento e AFOLU são setores-chave para a descarbonização da economia do ERJ, pois apresentam elevado potencial de mitigação de emissões, com baixo impacto macroeconômico negativo. Ademais, é possível concluir que as emissões de GEE da economia fluminense estão muito concentradas em poucos setores e que, com exceção dos setores de transportes e de AFOLU, as atividades emissoras estão condensadas em poucas unidades produtivas, com emissões a partir de fontes estacionárias e pontuais, sujeitas ao licenciamento ambiental, o que facilita o controle e a regulação. Assim, os setores de metalurgia, minerais não-metálicos, O&G e eletricidade & gás também se destacam como setores-chave para a descarbonização da economia fluminense, pois são os mais relevantes segundo os critérios adotados, além de estarem ao alcance da formulação de políticas públicas de mitigação de emissões, particularmente aquelas fundamentadas em instrumentos econômicos, como taxação, *cap-and-trade* e mercado de carbono.

O modelo de programação linear elaborado a partir da matriz insumo produto híbrida construída para o ERJ em 2019 foi utilizado para simular os efeitos macroeconômicos de choques na produção dos setores-chave identificados. A avaliação foi feita para dois cenários: um cenário de referência, considerando restrições compatíveis com as metas de redução de emissões de GEE que já estão em vigor para os setores de saneamento (6% a.a.) e transportes (2,5% a.a.) e com as diversas ações em andamento para a mitigação das emissões de GEE do setor de

AFOLU (4,0% a.a.), e um cenário restritivo, considerando tanto as metas já existentes como limites adicionais de 5% para os setores de metalurgia, minerais não-metálicos, eletricidade & gás e O&G. Os resultados mostram que a perda macroeconômica no cenário de referência é de 347,69 UStCO_2$eq e, no cenário restritivo, essa perda é de 769,66 US$/tCO$_2$eq, refletindo o peso dos setores industriais, de geração de energia e de O&G na economia fluminense. Por outro lado, no cenário de referência, a redução anual alcançada nas emissões totais é de apenas 2,01%, enquanto no cenário restritivo é possível conseguir uma redução anual bem maior, de 4,32%, com um sacrifício pequeno do PIB e do emprego no mesmo ano.

No entanto, na prática, as empresas não precisam necessariamente reduzir sua produção para mitigar as emissões e podem investir em tecnologias de abatimento (equipamentos ou processos inovadores, mais eficientes) para mitigar as emissões ao mesmo tempo em que mantêm seus níveis de atividade, o que resulta em mitigação de emissões a um custo muito inferior do que as perdas macroeconômicas que resultariam da redução de seu nível de atividade. Esta é a principal razão de se estabelecerem os mercados de cotas comercializáveis de redução de emissões, como o SBCE: empresas com custos de abatimento menores podem vender seus certificados de redução de emissões para empresas que teriam maior custo de abatimento, o que leva a um custo total de abatimento menor na economia como um todo.

Os setores industriais, de E&P e de geração de energia elétrica do ERJ são setores *hard-to-abate*, que já operam com tecnologia relativamente madura e grande parte de suas emissões são inerentes aos próprios processos produtivos. Dessa forma, a redução de emissões de GEE é especialmente complexa, devido às limitações tecnológicas e operacionais que se apresentam, o que acaba tornando o custo de abatimento mais alto. Assim, a mitigação de emissões de GEE nesses setores se beneficiaria de instrumentos econômicos de regulação. O SBCE, lançado recentemente, é um esforço pioneiro nesse sentido, em nível nacional, e prevê a distribuição não onerosa de certificados de emissões a partir do primeiro Plano Nacional de Alocação (PNA) e implementação de um mercado de ativos (certificados de redução ou remoção verificada de emissões), em 2029. A implementação plena do SBCE, ao fim da vigência do primeiro PNA, deve começar em 2030 e impactará as indústrias siderúrgica, cimenteira, termoelétrica e de O&G fluminenses, que estarão sujeitas à regulação, baseada no esquema de *cap-and-trade*. Para avaliar esses

impactos, será preciso desenvolver um modelo de EGC complexo e específico para a economia do ERJ, a exemplo do modelo nacional, o IMACLIM-BR.

Por fim, além de contribuir para o cumprimento das metas nacionais de mitigação estabelecidas pelo Brasil por meio de suas CND para o Acordo de Paris, a restrição das emissões de GEE no ERJ apresenta importantes cobenefícios a curto prazo, em escala local e regional, que podem justificar, per se, os investimentos iniciais em tecnologias de abatimento, se forem adequadamente monetizados.

5.2. LIMITAÇÕES

A delimitação do escopo deste trabalho permitiu elaborar uma MIP híbrida para o ERJ em 2019, com nível de agregação suficiente para uma boa representação dos principais setores econômicos da economia fluminense, com especial atenção para o nível de emissões de GEE. Para esta primeira etapa de abordagem macroeconômica da questão do efeito-estufa em nível estadual, seria muito abrangente construir um modelo de equilíbrio geral computável capaz de avaliar os impactos econômicos de políticas públicas de mitigação de emissões. Embora esta MIP híbrida não permita ainda avaliar os impactos macroeconômicos sobre a economia fluminense da implementação de um mercado de carbono, ela permite estimar o impacto que a variação da demanda pelos produtos de cada um dos 11 setores agregados tem sobre as emissões totais de GEE no ERJ, o PIB e as ocupações, mostrando a relação entre PIB, emprego e emissões de GEE. Ademais, essa abordagem permite identificar os setores que mais emitem e os setores que são mais intensivos em emissões, tanto em relação ao PIB quanto em relação aos empregos gerados, ajudando a definir setores-chave para a descarbonização.

A priorização dos setores econômicos para fins de políticas públicas de mitigação de emissões de GEE não depende apenas da intensidade de emissões por valor de produção, ou seja, do valor da perda macroeconômica que uma redução de seu nível de atividade traria, em caso de restrição da quantidade permitida de emissões de GEE. Ela depende também da disponibilidade, em cada setor, de tecnologias de baixo custo de abatimento. A seção 4.2 mostrou as diversas tecnologias de abatimento existentes, aplicáveis a cada setor, e seus respectivos custos marginais de abatimento. No setor de saneamento, com exceção da incineração de RSU com aproveitamento energético, que chega a 23,61 US$/t$CO_2$eq,

os custos marginais de abatimento são negativos ou muito baixos. Esses custos são ainda menores no setor de AFOLU, em que a opção mais cara é a restauração florestal, a menos de 10 US$/$tCO_2$eq. Esses custos sugerem a escolha dos setores de saneamento e AFOLU como setores prioritários. No entanto, dentre demais setores-chave, a priorização depende fortemente dos custos marginais de abatimento das tecnologias disponíveis para cada um deles. No setor de E&P, por exemplo, existem opções atraentes, como: Unidades de Recuperação de Vapor (URV) em tanques de armazenamento (-26,1 US$/$tCO_2$eq), implementação do piloto de *flare* (-59,7 US$/$tCO_2$eq) e aplicação da rota *gas-to-liquids* (GTL) nas plataformas (-382,8 US$/$tCO_2$eq). No setor industrial, a maioria das opções de mitigação tem custos negativos, mas ainda existem soluções caras: recuperação de calor residual (24,74 US$/$tCO_2$eq), fornos Scope 21 (50,14 US$/$tCO_2$eq), *top pressure recovery turbine* (TRT) (50,22 US$/$tCO_2$eq) e controle da umidade do carvão (150,07 US$/$tCO_2$eq). Na geração de eletricidade, por sua vez, o abatimento é particularmente difícil e se resume, basicamente, à adoção do *NGCC* flexível, com custo marginal negativo (-169 a -79 US$/$tCO_2$eq), pois a opção de uso de etanol em turbinas a gás ainda se mostra extremamente cara (456 a 482 US$/$tCO_2$eq). Portanto, o critério macroeconômico utilizado na priorização dos setores foi limitado. Um modelo de EGC permitiria realizar uma simulação a partir da implementação de novas tecnologias, a determinado custo, para se averiguar os impactos macroeconômicos e sociais dos custos de abatimento das tecnologias disponíveis em cada setor.

As análises apresentadas, relativas aos impactos macroeconômicos das políticas de descarbonização em nível estadual, são preliminares e mostram o impacto sobre os indicadores macroeconômicos (PIB e emprego) a partir de restrições na produção dos setores-chave, que se refletem, naturalmente, na redução das respectivas emissões de GEE, a um determinado custo em termos de queda do PIB e do número de ocupações na economia. Esses resultados podem mudar com uso de modelos mais complexos, de equilíbrio geral, computáveis, baseados em matrizes de contabilidade social, mais completas. Na prática, a estrutura da economia muda com o passar dos anos, pois alguns setores crescem mais do que outros, assim como mudam os padrões de consumo, conforme a cultura e o desenvolvimento de novos produtos, a capacidade de geração de emprego de cada atividade etc. Ademais, a redução de emissões não ocorre somente com redução de produção e existem tecnologias de abatimento que podem ser implementadas, conforme o seu custo

marginal e o ambiente regulatório. Inclusive, muitas vezes, o custo marginal de abatimento de emissões das medidas de mitigação é negativo, o que significa geração de receita com redução de emissões, o que pode mudar completamente a relação entre a mitigação de emissões de GEE e a formação do PIB. Da mesma forma, algumas ações de descarbonização podem criar novas atividades econômicas, com geração de emprego e renda.

O modelo de insumo-produto construído para esta dissertação ainda é, portanto, um primeiro passo para se alcançar um modelo de EGC capaz de simular os complexos efeitos macroeconômicos, em nível subnacional, de políticas públicas e instrumentos econômicos de regulação que venham a ser idealizados ou implementados, a exemplo do SBCE. No entanto, essa matriz pode ser ampliada para formar uma matriz de contabilidade social, que serve como base para a elaboração de um modelo mais complexo, de equilíbrio geral computável, que será útil para a avaliação de políticas públicas de mitigação de emissões a longo prazo, especialmente aquelas baseadas em instrumentos econômicos, conforme os modelos que têm sido construídos em nível nacional.

5.3. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Para o avanço da linha de pesquisa sobre os aspectos macroeconômicos da mitigação do efeito estufa em nível subnacional, particularmente do ERJ, é importante realizar estudos futuros focados no desenvolvimento de modelos de EGC, com base em uma matriz de contabilidade social. É possível adaptar o modelo nacional IMACLIM-S BR para o ERJ, construindo-se uma MCS a partir da MIP híbrida elaborada para esta dissertação, com dados complementares de contabilidade das Contas Econômicas Integradas (CEI), publicadas pelo IBGE. O IMACLIM se baseia na modelagem *bottom-up* das tecnologias disponíveis e custos associados à oferta de energia e na descrição de curvas de custo marginal de abatimento, a partir de projeções *bottom-up* realizadas por especialistas de cada setor. Um sistema de contabilidade casada permite acoplar o modelo de equilíbrio geral (abordagem *top-down*) e os modelos e informações bottom-up, mantendo uma projeção não apenas das transações monetárias entre os diferentes setores da economia, mas também das transações físicas de fluxos energéticos, produção da indústria, demanda por transportes etc. Dessa forma, o sistema de contabilidade mantém duas matrizes, uma

de fluxos monetários e outra de fluxos físicos, sempre interligadas, por meio de uma terceira matriz (de preços), que é variável e endógena ao modelo (Wills, 2013). O modelo de EGC poderá fornecer resultados mais completos e realistas acerca dos impactos macroeconômicos de políticas de descarbonização baseadas em instrumentos econômicos. Assim, os modelos poderão ajudar na definição do valor de taxas, subsídios, cotas de emissão e multas ou informar a administração pública a respeito das consequências que a implementação desse tipo de instrumento pode ter sobre a competitividade das indústrias, o poder de compra das famílias ou a distribuição de renda, por exemplo.

Outro tipo de estudo importante é a valoração dos cobenefícios das ações de mitigação de emissões, que pode ajudar a justificar os investimentos em tecnologias de mitigação ou a obrigatoriedade de sua implementação.

REFERÊNCIAS

ALERJ, FUJB, UFRJ. Matriz Insumo Produto para o Estado do Rio de Janeiro: Tabelas de Recursos e Usos e Tabelas de Passagem. Relatório Metodológico. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR ISO 14064:1: Gases de efeito estufa: Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa*. Rio de Janeiro, ABNT, 2007.

BANCO MUNDIAL. *State and Trends of Carbon Pricing 2024*. Washington, DC, World Bank, 2024. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10986/41544>. Acessado em janeiro de 2025.

BHATTACHARYYA, Subhes C. “Applied general equilibrium models for energy studies: a survey”. **Energy Economics**, 3ª ed., volume 18, pp. 145-164, 1996. ISSN 0140-9883. <https://doi.org/10.1016/0140-9883(96)00013-8>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0140988396000138>. Acessado em outubro de 2024.

BODANSKY, D. “The History of the Global Climate Change Regime”. **International Relations and Global Climate Change**. 2001. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237769103_The_History_of_the_Global_Climate_Change_Regime>. Acessado em abril de 2023.

BOREO, G., CLERKE, R. & WINTERS, L.A. “The Macroeconomic Consequences of Controlling Greenhouse Gases: A Survey”. **Departamento de Economia, Universidade de Birmingham**. Londres, 1991.

BRASIL (REPÚBLICA FEDERATIVA). Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 – Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, 2009. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm?trk=article-ssr-frontend-pulse_little-text-block>. Acessado em junho de 2024.

BRASIL (REPÚBLICA FEDERATIVA). *Paris Agreement Nationally Determined Contribution (NDC)*. Brasília, 2022. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Updated%20-%20First%20NDC%20-%20%20FINAL%20-%20PDF.pdf>. Acessado em: abril de 2023.

BRASIL (REPÚBLICA FEDERATIVA). *A NDC do Brasil: Determinação Nacional em Contribuir e Transformar*. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/ndc-versao-em-portugues.pdf/view>. Acessado em: janeiro de 2025.

BRASIL (REPÚBLICA FEDERATIVA). Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024: Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE); e altera as Leis nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, 12.651, de 25 de maio de 2012 (Código Florestal), 6.385, de 7 de dezembro de 1976 (Lei da Comissão de Valores Mobiliários), e 6.015, de 31 de dezembro de 1973 (Lei de Registros Públicos). Brasília, 2024. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html>. Acessado em dezembro de 2024.

CENTRO CLIMA. *Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do Estado do Rio de Janeiro. Síntese*. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/3-inventario-gee-RJ.pdf>. Acessado em janeiro de 2025.

CENTRO CLIMA. *Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do Estado do Rio de Janeiro: 2015. Resumo Técnico*. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.centroclima.coppe.ufrj.br/index.php/br/estudos-e-projetos/encerrados/36-2017/152-inventario-de-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-gee-do-estado-do-rio-de-janeiro>. Acessado em junho de 2024.

COPPE. *Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Setores-Chave do Brasil – Análise de Co-Benefícios Ambientais de Estratégias de Baixo Carbono*. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/opcoes-de-mitigacao-de-emissoes-de-gee-em-setores-chave/analise-de-co-beneficios-ambientais-de-estrategias-de-baixo-carbono-qualidade-do-ar.pdf/view>. Acessado em novembro de 2024.

DANTZIG, G.B. & THAPA, M.N. *Linear Programming 2: Theory and Extensions*. Springer Series in Operations Research. New York, Springer-Verlag, 2003. ISBN 0-387-98613-8.

EPA. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2022*. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 430-R-24-004. Washington, DC, 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-andsinks-1990-2022>. Acessado em dezembro de 2024.

ERBACH, Gregor. “At a glance: Doha Amendment to the Kyoto Protocol”. **European Parliamentary Research Service – EPRS**. 04 de junho de 2015. Disponível em: <www.europarl.europa.eu/EPRS/EPRS-AaG-559475-Doha-Agreement-Kyoto-Protocol-FINAL.pdf>. Acessado em: abril de 2023.

FALKNER, R. “The Paris Agreement and the new logic of international climate politics”. **International Affairs**, volume 92, n. 5, pp.1107-1125, 2016. Disponível em: <https://www.lse.ac.uk/granthaminstitute/wp-content/uploads/2016/10/Falkner_2016_TheParisAgreement.pdf>. Acessado em: abril de 2023.

FERNANDES, José Augusto C. et al. “Capítulo 4: Economia”. In: *Rio 2022: Diagnóstico e Propostas para o Estado*, pp. 143-173. Rio de Janeiro, julho 2022.

Disponível em: <https://iepecdg.com.br/wp-content/uploads/2022/07/Rio-2022_Diagno%CC%81stico-e-Propostas-para-o-Estado_FINAL.pdf>. Acessado em abril de 2023.

GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas. *The Entropy Law and the Economic Process*. Cambridge, Massachusetts, Editora Harvard University Press, 1971.

HUDSON, E. A. & JORGENSON, D. W. "U. S. Energy Policy and Economic Growth, 1975-2000". **The Bell Journal of Economics and Management Science**, volume 5, n. 2, pp. 461–514, 1974. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/3003118>. Acessado em novembro de 2024.

IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Relatório Síntese, AR5, 151 p. Genebra, Suíça, 2014. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf >. Acessado em novembro de 2024.

IEA; WBCSD. *Cement Technology Roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050*. Geneva, International Energy Agency – IEA and World Business Council for Sustainable Development – WBCSD, 2009.

IEA and WBCSD. *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Paris, International Energy Agency – IEA and World Business Council for Sustainable Development – WBCSD, 2018.

IVIG. *Estudo do Potencial de Remoção de CO2 e Produção de Bioenergia pela Implantação/Expansão das Florestas Energéticas nos Distritos Florestais do Estado do Rio de Janeiro: Resumo Executivo*. Organização: Professor Dr. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas. Rio de Janeiro, Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (IVIG), COPPE, UFRJ, 2023.

IPEA. *Taxa média de câmbio comercial (venda) R$/US$: Frequência Anual, de 1889 até 2024*. Rio de Janeiro, dezembro de 2024. Disponível em: <http://www.ipeadata.gov.br/ExibeSerie.aspx?serid=31924>. Acessado em dezembro de 2024.

JOHANSEN, L. *A Multi-Sectoral Study of Economic Growth*. Second enlarged edition. The Netherlands, North-Holland Publishing Company, 1974.

LAGO, Antônio e PÁDUA, José Augusto. *O Que é Ecologia*. São Paulo, Editora Brasiliense, 1984.

LEONTIEF, W. "Environmental Repercussions and the Economic Structure: an Input-Output Approach". **The Review of Economics and Statistics**, volume 52, n. 3, pp. 262-271, 1970.

MANNE, A.S., & RICHELS, R.G. *ETA-MACRO: A model of energy-economy interaction, In J. Hitch, (ed.), Modeling Energy-Economy Interactions: Five Approaches, Research Paper nº 5, Resources for the Future*. Washington, DC, 1977.

MCTI. *Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Editado e traduzido pelo Ministério da Ciência e Tecnologia, com o apoio do Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil. Tradução de: KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 1998. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/Protocolo_Quioto.pdf>. Acessado em abril de 2023.

MCTIC. *Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil: Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para Agricultura, Florestas e Outros Usos do Solo (AFOLU)*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações e ONU Meio Ambiente, 2017 (a). Disponível em:<https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto_opcoes_mitigacao/publicacoes/Setor-AFOLU.pdf>. Acessado em dezembro de 2024.

MCTIC. *Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil: Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Cimento*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações e ONU Meio Ambiente, 2017 (b). Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto_opcoes_mitigacao/publicacoes/Setor-Industrial_Cimento.pdf>. Acessado em dezembro de 2024.

MCTIC. *Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil: Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Ferro-Gusa e Aço*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações e ONU Meio Ambiente, 2017 (c). Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto_opcoes_mitigacao/publicacoes/Setor-Industrial_Ferro-Gusa-e-Aco.pdf>. Acessado em dezembro de 2024.

MCTIC. *Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil: Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Gestão de Resíduos*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações e ONU Meio Ambiente, 2017 (d). Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto_opcoes_mitigacao/publicacoes/Setor-Gestao-de-Residuos.pdf>. Acessado em novembro de 2024.

MCTIC. *Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil: Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Óleo e Gás Natural*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações e ONU Meio Ambiente, 2017 (e). Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arqui

vos/projeto_opcoes_mitigacao/publicacoes/Setor-Energetico_Oleo-e-Gas-Natural.pdf>. Acessado em novembro de 2024.

MCTIC. *Opções de Mitigação de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Setores-Chave do Brasil: Modelagem Setorial de Opções de Baixo Carbono para o Setor de Termelétricas e Termonucleares*. Brasília, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, ONU Meio Ambiente, 2017 (f). Disponível em: <https://antigo.mctic.gov.br/mctic/export/sites/institucional/ciencia/SEPED/clima/arquivos/projeto_opcoes_mitigacao/publicacoes/Setor-Energetico_Termoeletricas.pdf>. Acessado em novembro de 2024.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. *Input-output analysis: foundations and extensions*. Segunda Edição. Cambridge, Cambridge University Press, 2009.

MMA, SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. *Inventario Florestal Nacional: Rio de Janeiro: principais resultados*. Série Relatórios Técnicos – IFN, 111 p. Brasília, 2018. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/publicacoes/977-publicacoes-ifn-sfb>. Acessado em julho de 2024.

ONU. *Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Paris, dezembro de 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf>. Acessado em abril de 2023.

ONU. *Rio + 20: Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável*. Rio de Janeiro, junho de 2012. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio2012>. Acessado em abril de 2023.

ONU. *United Nations Conference on the Human Environment*. Estocolmo, junho de 1972. Disponível em: <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>. Acessado em abril de 2023.

PASSET, René. *L'économique et le vivant*. Paris, Editora Payot, 1979.

PELIZ, Ana Carolina. "Saída do Canadá do Protocolo de Kyoto não surpreende especialista". **Rádio França Internacional – RFI**. 15 de dezembro de 2011. Disponível em: <https://www.rfi.fr/br/geral/20111215-saida-do-canada-do-protocolo-de-kyoto-nao-surpreende-especialista>. Acessado em: abril de 2023.

PEREIRA JUNIOR, Amaro Olímpio; MAIA, Rodrigo Gomes Távora; MENDONÇA, Mário Jorge; CASACA, Paulo Roberto Santos. *Análise do efeito distributivo da precificação de carbono no Brasil*. Texto para Discussão, n. 3008, 32 p. Rio de Janeiro, Ipea, junho de 2024. DOI: http://dx.doi.org/10.38116/td3008-port

RAMOS, Marilene et al. "Capítulo 3: Rota Verde do Rio". In: *Rio 2022: Diagnóstico e Propostas para o Estado*, pp. 121-142. Rio de Janeiro, julho 2022. Disponível em: <https://iepecdg.com.br/wp-content/uploads/2022/07/Rio-

2022_Diagno%CC%81stico-e-Propostas-para-o-Estado_FINAL.pdf>. Acessado em abril de 2023.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Lei nº 1060, de 10 de novembro de 1986 – Institui o Fundo Especial de Controle Ambiental – FECAM e dá outras providências. Rio de Janeiro, 1986. Disponível em: <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/c8aa0900025feef6032564ec0060dfff/10190914b8d64c0b0325654b00801bd0?OpenDocument>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Lei nº 4.191, de 30 de setembro de 2003 – Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=374214>. Acessado em novembro de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Decreto 40.780, de 23 de maio de 2007 - Institui O Fórum Rio de Mudanças Climáticas Globais que fornecerá suporte à implementação da Política Estadual de Mudanças Climáticas e dá outras providências. Rio de Janeiro, 2007, a. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/decreto-n-40780-2007-rio-de-janeiro-institui-o-forum-rio-de-mudancas-climaticas-globais-que-fornecera-suporte-a-implementacao-da-politica-estadual-de-mudancas-climaticas-e-da-outras-providencias>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Decreto nº 41.084, de 20 de dezembro de 2007 – Regulamenta a Lei Nº 4.191, de 30 de setembro de 2003, que dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2007 b. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/decreto-n-41084-2007-rio-de-janeiro-regulamenta-a-lei-n%C2%BA-4191-de-30-de-setembro-de-2003-que-dispoe-sobre-a-politica-estadual-de-residuos-solidos?origin=instituicao>. Acessado em novembro de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Lei nº 5.067, de 09 de julho de 2007 – Dispõe sobre o Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Rio de Janeiro e define critérios para a implantação da atividade de silvicultura econômica no estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007 c. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/legislacao/87911/lei-5067-07>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Decreto nº 41.122, de 09 de janeiro de 2008. Institui o Plano Diretor de Gestão de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/decreto-n-41122-2008-rio-de-janeiro-este-ato-ainda-nao-esta-disponivel-no-sistema>. Acessado em novembro de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Lei nº 5.690, de 14 de abril de 2010 – Institui a Política Estadual sobre Mudança Global do Clima e Desenvolvimento Sustentável e dá outras providências. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/lei-ordinaria-n-5690-2010-rio-de-janeiro-institui-a-politica-estadual-sobre-mudanca-global-do-clima-e-desenvolvimento-sustentavel-e-da-outras-providencias>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Decreto nº 42.930, de 18 de abril de 2011 – Institui o Programa Pacto Pelo Saneamento. Rio de Janeiro, 2011.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Decreto nº 43.216, de 30 de setembro de 2011 – Regulamenta a Lei nº 5.690, de 14 de abril de 2010, que dispõe sobre a Política Estadual sobre Mudança Global do Clima e Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=159527#:~:text=Regulamenta%20a%20Lei%20n%C2%BA%205.690,do%20Clima%20e%20Desenvolvimento%20Sustent%C3%A1vel>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Plano Estadual Sobre Mudança do Clima. Governo do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012 a. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br/portal/apps/sites/#/portal-de-mudancas-climaticas-do-estado-do-rio-de-janeiro/pages/acervo>. Acessado em novembro de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Resolução INEA/PRES Nº 64, de 12 de dezembro de 2012 – Dispõe sobre a apresentação de inventário de emissões de gases de efeito estufa para fins de licenciamento ambiental no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012 b. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=248481#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20a%20apresenta%C3%A7%C3%A3o%20de,Estado%20do%20Rio%20de%20Janeiro>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro: Relatório Síntese. Governo do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://observatoriopnrs.wordpress.com/wp-content/uploads/2014/11/rio-de-janeiro-plano-estadual-de-resc3adduos-sc3b3lidos.pdf>. Acessado em novembro de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Decreto Nº 45.957, de 22 de março de 2017 – Aprova o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Rio de Janeiro, e dá outras Providências. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/rj/decreto-n-45957-2017-rio-de-janeiro-aprova-o-plano-estadual-de-residuos-solidos-do-estado-do-rio-de-janeiro-e-da-outras-providencias>. Acessado em novembro de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Plano ABC - RJ: Plano Estadual de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas – Para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura do Estado do Rio de Janeiro. Governo do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br/portal/apps/sites/#/portal-de-mudancas-climaticas-do-estado-do-rio-de-janeiro/pages/acervo>. Acessado em novembro de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Lei nº 9072, de 27 de outubro de 2020 – Altera a Lei Estadual N.º 5.690, de 14 de abril de 2010, que dispõe sobre a Política Estadual Sobre Mudança Global do Clima e Desenvolvimento Sustentável, determina a elaboração de um Plano Estadual sobre Mudanças Climáticas e a atualização das metas de mitigação e adaptação previstas em regulamento, e dá outras providências. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em:

<https://leisestaduais.com.br/rj/lei-ordinaria-n-9072-2020-rio-de-janeiro-altera-a-lei-estadual-n-5690-de-14-de-abril-de-2010-que-dispoe-sobre-a-politica-estadual-sobre-mudanca-global-do-clima-e-desenvolvimento-sustentavel-determina-a-elaboracao-de-um-plano-estadual-sobre-mudancas-climaticas-e-a-atualizacao-das-metas-de-mitigacao-e-adaptacao-previstas-em-regulamento-e-da-outras-providencias>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (Estado). Potencial de Absorção de CO_2 pela Restauração Florestal no Estado do Rio de Janeiro: Resumo Executivo. Organização: Telmo Borges Silveira Filho, Renzo Solari. Instituto Estadual do Ambiente (INEA), Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS), 35p. Rio de Janeiro, 2021.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). NOP INEA 52, de 10 de novembro de 2022 – Estabelece Procedimentos, Requisitos Gerais e Critérios para Atendimento ao Programa de Relato de Emissões de Gases de Efeito Estufa para Fins de Licenciamento Ambiental e Composição do Cadastro Estadual de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br/portal/apps/sites/#/mc-portal/pages/base_legal_storymap>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Decreto nº 48508, de 10 de maio de 2023 – Institui o Programa Estadual de Gestão de Resíduos Integrada e Desenvolvimento Sustentável - Progride e dá outras providências. Rio de Janeiro, 2023 a. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=445336#:~:text=%2D%20Decreto%20n%C2%B0%2042.930%2C%20de,Art.>. Acessado em novembro de 2023.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Lei nº 10.164 de 31 de outubro de 2023 – Altera a Lei nº 1060, de 10 de novembro de 1986, que institui o Fundo Especial de Controle Ambiental – FECAM e dá outras providências. Rio de Janeiro, 2023 b. Disponível em: <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/c8aa0900025feef6032564ec0060dfff/947331026affae6b03258a5a0071957a?OpenDocument>. Acessado em junho de 2024.

RIO DE JANEIRO (ESTADO). Portal de Mudanças Climáticas do Rio de Janeiro. Governo do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://geoportal.inea.rj.gov.br/portal/apps/sites/#/mc-portal/>. Acessado em junho de 2024.

SEEG. *Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa*. Piracicaba, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/rio-de-janeiro>. Acessado em: novembro de 2024.

SNIC. *Cement Technology Roadmap: Carbon Emissions Reduction Potential in the Brazilian Cement Industry by 2050*. Coordenação de Gonzalo Visedo e Marcelo Pecchio, 64 p. Rio de Janeiro, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2019.

SHOVEN, J. & WHALLEY, J. “Applied general equilibrium models of taxation and international trade: an introduction and survey”. **Journal of Economic Literature**,

volume 22, pp. 1007-1051. Nashville, TN, 1984. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/4726165_Applied_General-Equilibrium_Models_of_Taxation_and_International_Trade_An_Introduction_and_Survey>. Acessado em novembro de 2024.

SCHUBERT, Katheline. "Les Modèles d'équilibre Général Calculable : Une Revue de La Littérature / Computable General Equilibrium Models: A Survey". **Revue d'Économie Politique**, volume 103, n. 6, pp. 775–825. Paris, 1993. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/24700547>. Acessado em novembro de 2024.

SOUZA, Maria Cristina Oliveira; CORAZZA, Rosana Icassatti. "Do Protocolo Kyoto ao Acordo de Paris: uma análise das mudanças no regime climático global a partir do estudo da evolução de perfis de emissões de gases de efeito estufa". **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, volume 42, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/322217637_Do_Protocolo_Kyoto_ao_Acordo_de_Paris_uma_analise_das_mudancas_no_regime_climatico_global_a_partir_do_estudo_da_evolucao_de_perfis_de_emissoes_de_gases_de_efeito_estufa>. Acessado em abril de 2023.

SUWA, Akiko. "Les modèles d'équilibre général calculable". **Économie & Prévision**, n. 97, 1991-1. **L'économie du développement**, pp. 69-76. Paris, 1991. Doi: https://doi.org/10.3406/ecop.1991.5211. Disponível em: <https://www.persee.fr/doc/ecop_0249-4744_1991_num_97_1_5211> Acessado em dezembro de 2024.

VIOLA, E. "O Regime Internacional de Mudança Climática e o Brasil". **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, volume 17, n. 50, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcsoc/a/jf4CkyjgTkKh3CV6hF7hXTS/?format=pdf&lang=pt>. Acessado em abril de 2023.

WILLS, William. *Modelagem dos Efeitos de Longo Prazo de Políticas de Mitigação de Emissão de Gases de Efeito Estufa na Economia do Brasil*. Tese de Doutorado, Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.

ANEXO I – MIP HÍBRIDA PARA O ERJ EM 2019

Milhões de R$	AFOLU	Óleo e gás	Outras indústrias extrativas	Derivados de petróleo e biocombustíveis	Minerais não-metálicos	Metalurgia	Outras indústrias de transformação	Eletricidade e gás	Saneamento	Transporte	Serviços	Demanda Final	Demanda Total
AFOLU	222,82	0,00	0,37	60,30	4,00	92,58	4.056,30	3,54	1,10	0,00	1.968,23	11.907,12	18.316,36
Óleo e gás	0,00	5.070,17	0,01	17.655,19	19,79	137,68	132,63	3.302,67	1.023,59	0,00	286,14	166.651,55	194.279,43
Outras indústrias extrativas	2,01	399,27	4,35	10,59	164,24	8.636,71	24,53	158,07	48,99	0,57	603,34	1.666,53	11.719,18
Derivados de petróleo e biocombustíveis	179,81	6.077,98	55,35	28.800,34	498,60	1.635,90	2.095,02	632,67	196,08	10.801,16	6.102,83	37.058,11	94.133,85
Minerais não-metálicos	10,73	33,90	1,02	0,07	361,49	117,96	953,71	163,50	50,67	1,98	6.056,66	3.179,81	10.931,49
Metalurgia	6,42	8.994,41	2,68	70,51	49,37	7.690,96	6.761,58	287,25	89,03	24,59	4.486,56	45.954,80	74.418,15
Outras indústrias de transformação	654,34	18.832,77	162,85	1.665,32	748,35	5.908,81	61.645,08	1.422,79	440,96	5.679,00	56.725,61	364.645,87	518.531,75
Eletricidade e gás	182,73	336,76	25,65	16,34	276,29	1.318,07	1.974,13	10.831,79	3.357,09	673,17	10.323,18	16.409,03	45.724,22
Saneamento	0,03	88,91	0,75	66,52	38,58	1.553,24	489,68	77,12	23,90	254,00	4.727,77	4.371,81	11.692,32
Transporte	37,55	20.197,89	13,24	633,31	145,36	2.250,27	4.873,56	252,16	78,15	3.773,82	12.796,77	28.314,23	73.366,30
Serviços	100,64	37.573,45	44,83	2.182,01	615,71	3.673,62	20.555,92	3.651,94	1.131,84	12.917,48	162.196,62	536.601,53	781.245,59
Importações	6.532,37	12.916,24	9.388,07	15.017,15	4.413,47	28.869,18	259.123,92	63,91	5,22	5.157,58	95.345,37	1.216.760,38	1.834.358,65
Margens de comércio, transporte e impostos líquidos	7.405,49	1.818,27	1.877,09	20.857,31	2.507,25	8.206,84	119.241,67	10.333,98	738,44	-1.996,20	-52.117,46	Total	
Vetor de Valor Adicionado Bruto	2.980,32	81.939,41	142,94	7.098,89	1.088,99	4.326,32	36.604,02	14.542,84	4.507,25	36.079,15	471.743,98	661.054,11	
Produção Total	18.315,25	194.279,43	11.719,18	94.133,85	10.931,49	74.418,15	518.531,75	45.724,22	11.692,32	73.366,30	781.245,59	1.834.357,54	1,11
Vetor de Ocupações (pessoas)	34.104,19	65.551,65	12.597,53	37.970,67	31.547,60	100.107,09	554.208,26	89.162,03	27.633,92	546.125,22	7.080.469,84	8.579.478,00	7,83
Vetor de Emissões de GEE (tCO_2e)	5.941.810,00	16.558.652,00	58.405,00	2.277.052,00	1.945.511,00	5.592.665,00	1.561.398,00	7.445.168,40	11.545.132,60	12.216.510,70	260.495,80	1.740.219,00	67.143.019,50
% Emissões	8,85%	24,66%	0,09%	3,39%	2,90%	8,33%	2,33%	11,09%	17,19%	18,19%	0,39%	2,59%	1,00
Intensidade de emissões (gCO_2e/R)	1.993,68	202,08	408,59	320,76	1.786,53	1.292,71	42,66	511,95	2.561,46	338,60	0,55		
Intensidade de emissões (tCO2e/pessoa)	174,23	252,60	4,64	59,97	61,67	55,87	2,82	83,50	417,79	22,37	0,04		

Fonte: Elaboração própria, com base em dados do SEEG (2024).