

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEEL

Maise Natalia Soares da Silva

**AVALIAÇÃO DAS PERSPECTIVAS E IMPACTOS DA EXTENSÃO DO
PROGRAMA RENOVABIO NO MERCADO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO
BRASIL**

Itajubá

2025

Maise Natalia Soares da Silva

**AVALIAÇÃO DAS PERSPECTIVAS E IMPACTOS DA EXTENSÃO DO
PROGRAMA RENOVABIO NO MERCADO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO
BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Eduardo Crestana Guardia

Coorientador: Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira

ITAJUBÁ

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEEL

**AVALIAÇÃO DAS PERSPECTIVAS E IMPACTOS DA EXTENSÃO DO
PROGRAMA RENOVABIO NO MERCADO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO
BRASIL**

Maise Natalia Soares da Silva

Tese aprovada por banca examinadora em
25 de agosto de 2025, conferindo ao autor
o título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:
Prof. Dr. Roberto Silva Capaz
Prof. Dr. Roberto Akira Yamachita
Prof. Dr. Jamil Haddad
Prof. Dr. Paulo Magalhães Filho
Dr. Marcio Andrey Roselli

Itajubá
2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço às agências de fomento pelo apoio financeiro que tornou o desenvolvimento deste trabalho possível. Este trabalho foi realizado com o apoio da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no âmbito do Programa de Recursos Humanos para o setor de petróleo e gás natural (PRH-ANP-MCTI).

Aos pesquisadores, colegas e toda equipe do PRH 46.1 pelo apoio durante o doutorado.

Aos meus orientadores Dr. Eduardo Crestana Guardia e Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira pelos ensinamentos e apoio durante a elaboração deste trabalho.

Agradecer à minha mãe Maria do Carmo Soares da Silva, meu pai Antonio Nascimento da Silva, aos meus irmãos Maria de Paula e Antonio Henrique pela paciência, pelo cuidado, por entender a necessidade das ausências e pelo apoio incondicional as minhas decisões.

Por fim, agradecer aos meus sobrinhos e amores Alan, Ana Cler, Marina e Mariah pelo carinho e afeto que me motivam a seguir em frente.

RESUMO

A eficiência energética é estratégica para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a transição energética sustentável. Este trabalho avalia a criação de um mercado de créditos de carbono voltado às políticas de eficiência energética no Brasil, tomando o programa RenovaBio como referência. A pesquisa estima as emissões evitadas pelos programas PROCEL e PEE-ANEEL, analisa potenciais ganhos financeiros em diferentes cenários e propõe uma estrutura de mercado específica para o setor elétrico. Estimou-se que entre 2016 e 2022 o PROCEL, nos setores residencial, comercial e industrial evitaram emissões acumuladas de 8,37 milhões, 454 mil e 2,7 milhões de toneladas de CO₂e, respectivamente. No cenário de preço baixo, a venda estimada de créditos do PROCEL resultaria em ganhos variando de US\$ 5,5 a US\$ 15,5 milhões, alcançando US\$ 130 milhões em cenários de preço médio/alto no período. Com a amostra de 765 projetos do PEE-ANEEL, desenvolvidos entre 2014 e 2022, estimou-se uma redução acumulada de aproximadamente 380 mil toneladas de CO₂e, com destaque para o uso final iluminação, responsável por 57% da estimativa. A estrutura de mercado proposta inclui a certificação de projetos por meio da emissão do Certificado de Redução de Carbono em Eficiência Energética (CRECE) e a negociação dos Créditos de Carbono em Eficiência Energética (CefEn). Também foram definidos o escopo, mecanismos de gestão e governança, critérios para definição de metas de redução, ambiente de negociação na B3, mecanismos de flexibilidade e estabilidade, além de regras de monitoramento e conformidade. A organização institucional do mercado foi representada em fluxograma, evidenciando as interações entre os agentes.

Palavras-chave: RenovaBio; Eficiência Energética; emissões evitadas; mercado de crédito de carbono.

ABSTRACT

Energy efficiency is strategic for reducing greenhouse gas emissions and advancing a sustainable energy transition. This study evaluates the creation of a carbon credit market focused on energy efficiency policies in Brazil, using the RenovaBio program as a reference. The research estimates the emissions avoided by the PROCEL and PEE-ANEEL programs, analyzes potential financial gains under different scenarios, and proposes a market structure tailored to the electricity sector. It is estimated that between 2016 and 2022, PROCEL, in the residential, commercial, and industrial sectors, avoided cumulative emissions of 8.37 million, 454 thousand, and 2.7 million tons of CO₂e, respectively. In a low-price scenario, the estimated sale of PROCEL credits would result in gains ranging from US\$ 5.5 to US\$ 15.5 million, reaching US\$ 130 million in medium/high-price scenarios during the period. Based on a sample of 765 PEE-ANEEL projects developed between 2014 and 2022, a cumulative reduction of approximately 380 thousand tons of CO₂e was estimated, with the end use of lighting standing out, accounting for 57% of the total estimate. The proposed market structure includes the certification of projects through the issuance of the Certificate of Carbon Reduction in Energy Efficiency (CRECE) and the trading of Carbon Credits in Energy Efficiency (CefEn). The scope, management and governance mechanisms, criteria for setting reduction targets, trading environment at B3, mechanisms for flexibility and stability, as well as monitoring and compliance rules, were also defined. The institutional organization of the market was represented in a flowchart, highlighting the interactions among the agents.

Keywords: Energy Efficiency; RenovaBio; avoided emissions; carbon trade systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Preços das licenças EU-ETS na União Europeia 2005-2024	19
Figura 2.2 Preços de Permissão de Emissões no Mercado Chinês	21
Figura 2.3 Demanda por eletricidade em 2020 durante restrição sanitária de COVID-19	25
Figura 2.4 Selo PROCEL de economia de energia	29
Figura 2.5 Resumo da Estrutura Física de Mercado do RenovaBio	36
Figura 2.6. Fluxograma de ações dos agentes envolvidos no RenovaBio.....	39
Figura 2.7 Processos Certificados por Tipo de Biocombustível.....	43
Figura 2.8 Produtores de Biocombustíveis Autorizados e Certificados	44
Figura 2.9 Emissão de CBIOs por Período	45
Figura 2.10 Quantidade Negociada e Preço Médio Diário de CBIO	45
Figura 4.1 Distribuição das emissões por setor econômico – PROCEL	61
Figura 4.2 Distribuição das emissões evitadas no setor residencial – PROCEL	62
Figura 4.3 Distribuição das emissões evitadas no setor comercial – PROCEL	63
Figura 4.4 Distribuição das emissões evitadas no setor industrial – PROCEL	63
Figura 4.5 Distribuição das emissões evitadas por setor PEE ANEEL	64
Figura 4.6 Distribuição das emissões evitadas no setor residencial – PEE ANEEL	65
Figura 4.7 Distribuição das emissões evitadas no setor comercial – PEE ANEEL	65
Figura 4.8 Distribuição das emissões evitadas no setor industrial – PEE ANEEL	66
Figura 4.9 Distribuição de Emissões Evitadas por Região - PROCEL	69
Figura 4.10 Distribuição regional das emissões evitadas – Refrigeração.....	70
Figura 4.11 Decomposição regional das emissões evitadas – Iluminação.....	70
Figura 4.12 Decomposição regional das emissões evitadas - Força Motriz	71
Figura 4.13 Decomposição regional das emissões evitadas - Condicionamento Ambiental.	72
Figura 4.14 Decomposição regional das emissões evitadas – Ventilação.....	72
Figura 4.15 Decomposição regional das emissões evitadas - Aquecimento de Água	73
Figura 4.16 Distribuição de Emissões Evitadas por Região – PEE ANEEL.....	74
Figura 4.17 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Refrigeração	75
Figura 4.18 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Iluminação	75
Figura 4.19 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Força Motriz.....	76
Figura 4.20 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Condicionamento Ambiental.....	77
Figura 4.21 Figura 4.21 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Aquecimento de água	78
Figura 4.22 Ganhos Potenciais Cenário de Preço Baixo - PROCEL	79
Figura 4.23 Ganhos Potenciais Cenário de Preço Médio/Alto - PROCEL	80
Figura 4.24 Ganhos Potenciais Cenário de Preço Baixo – PEE ANEEL	80
Figura 4.25 Ganhos Cenário de Preço Médio/Alto – PEE ANEEL.....	81
Figura 4.26 Fluxograma institucional do mercado de carbono em eficiência energética	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Cenário de preços no mercado regulado	14
Tabela 3.1 Período de análise dos programas de eficiência energética.....	48
Tabela 3.2 Taxa de distribuição setorial dos usos finais- PROCEL.....	50
Tabela 3.3 Participação setorial da amostra - PEE ANEEL.....	51
Tabela 3.4 Cálculo do FTE em função da característica do subsistema do SIN.....	53
Tabela 3.5 Taxa de distribuição dos usos finais por região - PROCEL	55
Tabela 3.6 Fator de emissão médio anual do SIN	57
Tabela 3.7 Definição de Cenários de Preço.....	59
Tabela 4.1 Carga de energia por subsistema (GWh)	67
Tabela 4.2 Intercâmbio líquido entre subsistemas do SIN (GWh).....	67
Tabela 4.3 Saldo do intercâmbio de energia entre subsistemas (GWh).....	68
Tabela 4.4 Fator de Transferência de Energia dos Subsistemas do SIN	68
Tabela 4.5 Atribuições dos representantes do CGEE	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ACEEE	<i>American Council for an Energy-Efficient Economy</i>
ABilumi	Associação Brasileira de Fabricantes e Importadores de Produtos de Iluminação
ABRASOL	Associação Brasileira de Energia Solar Térmica
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CBIO	Crédito de Descarbonização
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CefEn	Crédito de Carbono em Eficiência Energética
CER	<i>Certified Emission Reductions</i>
CGEEE	Comitê de Governança em Eficiência Energética
CMMC	Comissão Mista Permanente sobre Mudanças Climáticas
CMSE	Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CONSERVE	Programa de Conservação de Energia do Setor Industrial
COP	Conferência das Partes
CPEB	Certificado de Produção Eficiente de Biocombustíveis
CRECE	Certificado de Redução de Carbono em Eficiência Energética
ETS	<i>Emissions Trading Scheme</i>
EU ETS	<i>European Union Trading Scheme</i>
FTE	Fator de Transferência de Fluxo de Energia
GEE	Gases do Efeito Estufa
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MBRE	Mercado Brasileiro de Redução de Emissões
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MRV	Mensuração/Monitoramento, Relato e Verificação
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i>
NEEA	Nota de Eficiência Energético-Ambiental
OPEE	Observatório do Programa de Eficiência Energética
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PEE	Programa de Eficiência Energética
PIA	Pesquisa Industrial Anual
PNADC	Pesquisa Nacional de Amostras por Domicílio Contínua
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel
PPH	Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial
PROALCOOL	Programa Nacional do Alcool
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RISE	<i>Regulatory Indicators for Sustainable Energy</i>

ROL	Receita Operacional Líquida
SBCE	Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases do Efeito Estufa
SCS	Selo Combustível Social
SERPRO	Serviço Federal de Processamento de Dados
SIN	Sistema Interligado Nacional
TSEE	Tarifa Social de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação, Justificativa e Relevância	2
1.2	Objetivos e Hipóteses.....	7
2.	REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1	Mercado de Carbono e Eficiência Energética.....	9
2.1.1	Introdução ao Mercado de Carbono	9
2.1.2	Precificação do Carbono no Mercado Regulado.....	12
2.1.3	Desafios da Eficiência Energética na Atualidade.....	24
2.1.4	Programas e Políticas de Eficiência Energética no Brasil	28
2.2	Política de Referência	32
2.2.1	Contexto da Criação da RenovaBio.....	32
2.2.2	Estrutura e Descrição do Funcionamento.....	36
2.2.3	Importância para o Setor de Transportes.....	40
2.2.4	Desafios do RenovaBio	41
2.2.5	Resultados Ambientais e Econômicos do RenovaBio.....	42
3.	METODOLOGIA.....	47
3.1	Estimativa de Serviço Ambiental	47
3.1.1	Aquisição de dados de economia de energia	47
3.1.2	Tratamento de dados das economias de energia	48
3.1.3	Emissões Evitadas por Programas de E.E.	56
3.2	Projeção de Ganhos Econômicos.....	58
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1	Resultados Ambientais e Econômicos.....	60
4.1.1	Emissões Evitadas por Setor.....	60
4.1.2	Emissões Evitadas por Região	66
4.1.3	Ganhos potenciais da negociação de créditos de carbono EE	78
4.1.4	Principais achados e proposições	82
4.2	Estrutura do Sistemas de Comércio de Emissões	83
4.2.1	Escopo e Objetivo Geral.....	84
4.2.2	Governança e Coordenação.....	84
4.2.3	Definição das Metas de Redução de Emissões	86
4.2.4	Certificação dos Projetos de Eficiência Energética	87
4.2.5	Emissão e Registro de Créditos	88
4.2.6	Mercado de Negociações dos CefEn.....	89
4.2.7	Mecanismos de Flexibilidade e Estabilidade.....	90

4.2.8	Monitoramento, Conformidade e Penalidades	92
4.2.9	Integração com outros Mercados	93
4.2.10	Desenho do Mercado de Carbono em Eficiência Energética	94
4.2.11	Considerações Adicionais.....	97
5.	CONCLUSÕES.....	98
	REFERÊNCIAS	103
	ANEXOS.....	115

1. INTRODUÇÃO

Há um consenso mundial sobre a necessidade de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) no planeta. Os GEE, sobretudo dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), tem função importante de reter calor do sol na atmosfera. Entretanto, o aumento descontrolado da concentração destes gases pode levar a efeitos prejudiciais como o aumento da temperatura média global, mudança na distribuição de chuvas e do regime hidrológico, derretimento de massas de gelo nas regiões polares e aumento do nível dos oceanos, por exemplo. Desta forma os países, num esforço conjunto se comprometeram, com a assinatura do Acordo de Paris, a reduzir suas emissões, através da *Nationally Determined Contribution* (NDC).

Em geral, todas as atividades humanas modernas contribuem com o aumento de emissões de GEE. A queima de combustíveis fósseis para produção de eletricidade e calor foi responsável por cerca de 40% das emissões globais de dióxido de carbono em 2021 (IEA, 2022c). Sendo o setor elétrico um dos que mais contribuem para a emissão de GEE no mundo, duas estratégias são apontadas para se resolver o problema: transição para fontes de energia renovável e eficiência energética.

No Brasil a matriz elétrica tem caráter predominantemente renovável, principalmente oriunda de fonte hidroelétrica. Na transição energética observada no país, o uso de biomassa, energia solar fotovoltaica e energia eólica na geração de eletricidade destacam-se, apresentando crescimento sobretudo nas últimas duas décadas. Apesar disto, observa-se também um aumento gradativo das emissões relacionadas às termelétricas.

De acordo com o 2º Inventário de emissões em termelétricas (IEMA, 2022) houve um aumento de 75% das emissões de GEE no parque termelétrico do Sistema Interligado Nacional (SIN) em 2021 com relação a 2020. Este aumento poderia ser atribuído a baixa capacidade dos reservatórios das hidroelétricas e a retomada das atividades econômicas pós pandemia de COVID-19. Entretanto, a geração termelétrica no país cresceu cerca de 200%, passando de 30,6 TWh para 92 TWh, entre 2000 e 2020, resultando num aumento de 113% nas emissões do setor.

A eficiência energética possibilita a redução do consumo de energia ao

passo que reduz a produção de resíduos provenientes de sua geração. Desde a crise de petróleo, na década de 70, políticas e programas em eficiência energética vêm sendo criados, influenciando o mercado de energia, seja pela destinação de recursos, ou pela mudança de comportamento do consumidor final (JANNUZZI, G. M., 2017). No Brasil o marco regulatório da eficiência energética é basicamente uma resposta aos momentos de crise do setor, e fortemente direcionado ao consumo residencial, enquanto a indústria, por exemplo, maior consumidor de eletricidade do país, tem grande potencial não explorado.

A tendência de crescimento das emissões e a necessidade de cumprimento das metas ambientais, demonstram a relevância de avaliar instrumentos que estimulem a redução de GEE no setor elétrico. Portanto, a presente tese propõe avaliar se e como a negociação de créditos de carbono pode influenciar na adoção de novas ações de eficiência energética no setor elétrico brasileiro.

1.1 Motivação, Justificativa e Relevância

A crise de petróleo na década de 70, fez com que os preços da energia tivessem um aumento significativo. O déficit de oferta de petróleo e os altos preços afetaram setores industriais que dependiam de maneira significativa de petróleo para gerar energia. Como resposta à crise mundial causada pela escassez destes derivados, houve aumento de investimentos em fontes alternativas e o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes para poupar energia, reduzir custos e aumentar a competitividade. Sendo assim, a crise funcionou como um importante catalizador para o desenvolvimento de sistemas energéticos cada vez mais diversificados e de tecnologias mais eficientes.

A primeira discussão sobre questões ambientais relacionadas a emissões de GEE, resultado de atividades antrópicas modernas, deu-se na Conferência de Estocolmo em 1972, que discutiu o impacto das atividades humanas no meio ambiente. Dentre os acordos internacionais estabelecidos com referência ao meio ambiente, o Protocolo de Quioto (UNFCCC, 1998), referendado em 1997, propôs pela primeira vez um esforço conjunto para estabilizar as emissão de GEE, com objetivo de impedir interferências perigosas destes gases no sistema climático. Para que as emissões fossem estabilizadas,

os países desenvolvidos se comprometeram a reduzir em pelo menos 5% suas emissões, com relação ao ano de 1990, durante os anos de 2008 e 2012.

No protocolo de Quioto, foram estabelecidos três mecanismos flexíveis para ajudar os países a atingir suas metas: os países desenvolvidos podiam negociar unidades de emissão de GEE (Comercio de Emissões), denominadas de créditos de carbono, de forma a atingir suas metas, podendo implementar projetos conjuntamente com outros países desenvolvidos (Implementação Conjunta) ou adquirir créditos oriundos de projetos desenvolvidos nos países em desenvolvimento (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)) (UNEP, 2006). No MDL, nos países em desenvolvimento como o Brasil, foram contemplados projetos ligados ao setor elétrico de geração de energias renováveis, melhoria de eficiência energética no consumo final e melhoria da eficiência energética no lado da oferta.

A consolidação das estratégias globais de incentivo à mitigação das mudanças climáticas ocorreu na Conferência das Partes (COP) realizada em 2015. No acordo de Paris, assinado nesta Conferência, as partes interessadas firmaram um acordo que tem como principal objetivo manter o aumento de temperatura média mundial abaixo de 2°C, tendo como referência a temperatura do período pré-industrial, mas esforçando-se para que esta elevação seja de 1,5°C, sendo a assinatura do acordo voluntária, no qual os países apresentaram suas NDCs, compromissos relacionados a redução de emissões. Nas NDCs cada país se compromete de forma autônoma com a redução da emissão de GEE em função das suas capacidades e prioridades (ONU, 2015).

Foram realizados estudos dos potenciais de energias renováveis e de eficiência energética para implementação dos NDCs, para que os países coordenassem seus respectivos potenciais energéticos, com os compromissos firmados no acordo, levando em consideração a necessidade de investimentos para alcançá-los. Após a assinatura do acordo de Paris notou-se um reforço na adoção de energias renováveis para geração de eletricidade e em ações de eficiência energética, dada a necessidade de se garantir a diversificação das matrizes e segurança energética (IRENA, 2017).

No Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), no ano em que o acordo foi firmado, 64% de toda eletricidade gerada no país foi proveniente de fonte renovável hidroelétrica, o equivalente a três vezes a média

mundial de geração naquele ano (EPE, 2016). A predominância de apenas um tipo de fonte de energia, aliada a falta de planejamento do setor deixou o país susceptível a crises energéticas ao longo dos anos.

A chamada “crise do apagão”, reflexo de fatores político-econômicos e climáticos, ocorreu no início dos anos 2000. Em função da redução dos níveis dos reservatórios da região sudeste, havia a probabilidade de haver falta de energia a partir de 1997. Houve, portanto, uma tentativa de reorganização do sistema elétrico, mas em função da política de austeridade do governo e de crises econômicas simultâneas, novos investimentos em geradoras federais não aconteceram. Com a baixa do armazenamento, entre junho de 2001 e março de 2002 houve redução do fornecimento de energia elétrica para os consumidores, com cortes programados em determinados horários e dias da semana (GOLDENBERG; PRADO, 2003)

Em 2014, a estiagem, a falta de planejamento na expansão do sistema de transmissão, tarifas reduzidas, alta aquisição de eletrodomésticos e, portanto, aumento do consumo, foram fatores para outra crise no setor. Com o crescimento da demanda e a baixa capacidade de produção, as térmicas entraram em funcionamento, assim as distribuidoras compraram energia a preços altos. Como no mercado regulado, as distribuidoras são autorizadas a aumentar a tarifa anualmente, o custo não foi repassado imediatamente aos consumidores finais, sendo necessário recorrer a empréstimos a fim de honrar os compromissos da distribuição. A crise hídrica levou a uma crise econômica das distribuidoras, que foram autorizadas a repassar um débito de quase R\$ 18 bilhões aos consumidores a partir de 2015 (GALVÃO; BERMANN, 2015).

Um novo alerta foi emitido pelo governo federal em função da estiagem que se agravou no segundo semestre de 2020. Com o cenário hidrológico dos subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste abaixo da média histórica, o Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) recomendou a flexibilização das restrições operativas, a fim de preservar o volume dos reservatórios. Como forma de garantir a continuidade no fornecimento de energia elétrica, as termelétricas ficaram responsáveis por um volume maior de geração e foi solicitada importação de energia da Argentina e Uruguai a partir de outubro de 2020. O sinal econômico para os consumidores, por meio das bandeiras tarifárias, passou a indicar a conjuntura do setor elétrico e incentivar a eficiência

energética, ao mesmo tempo em que contribui para equilibrar o fluxo de caixa das distribuidoras, evitando o descasamento entre custos e tarifas. (MME, 2021b).

A necessidade de redução da geração renovável (*curtailment*), que começou a ganhar intensidade em 2024 e se agravou em 2025, evidenciou um desafio estrutural do setor elétrico brasileiro. Embora represente um sinal da expansão acelerada das fontes limpas, a limitação de sua plena utilização compromete a atratividade dos investimentos e gera incertezas quanto à viabilidade econômica de novos empreendimentos. O médio e longo prazo, esse cenário pode impactar negativamente compromissos ambientais assumidos pelo país, em especial metas de descarbonização e transição energética, já que a frustração de projetos renováveis restringe a substituição de fontes fósseis e atrasa o cumprimento, por exemplo, das NDCs (LUCCHESI; AZEVEDO; MILLARD, 2025).

Ao passo que enfrenta esses desafios no setor elétrico, o Brasil segue assumindo compromissos ambientais relacionados a redução de emissões em função de sua influência nas mudanças climáticas. Desta forma, em 2008 foi criada a Comissão Mista Permanente sobre Mudanças Climáticas (CMMC) com a finalidade de acompanhar, monitorar e fiscalizar as ações relacionadas as mudanças climáticas no Brasil. A Lei 12.187/2009, por sua vez, instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima com compromisso voluntário de promover ações de mitigação das emissões de GEE e a finalidade de reduzir entre 36,1% e 38,9% as emissões projetadas até 2020 (BRASIL, 2008) (BRASIL, 2009).

No Acordo de Paris, marco global para ações climáticas, inicialmente o Brasil se comprometeu em reduzir suas emissões de GEE 37% abaixo dos níveis de 2005 até o ano de 2025. A NDC passou por atualizações ao longo dos anos e em 2023 o compromisso de redução de emissões passou a ser de 48,4% até 2025 e de 53,1% 2030, correspondendo respectivamente a 1,24 GtCO_{2e} e 1,36 GtCO_{2e} em comparação com os níveis de 2005. No setor elétrico, a NDC evidencia a participação de energias renováveis na matriz, com destaque para a energia solar, eólica e biomassa. Entretanto, nenhum dos compromissos assumidos até então trata a eficiência energética no setor elétrico como uma via para a redução das emissões do país (BRASIL, 2020) (BRASIL, 2023).

O programa RenovaBio é uma política pública brasileira criada para

incentivar a produção e o uso de biocombustíveis no país. Foi implementado com o objetivo de promover a redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes, estimular a indústria de biocombustíveis e contribuir para o cumprimento das metas de sustentabilidade do Brasil no âmbito do Acordo de Paris. O programa foi instituído pela Lei nº 13.576/2017 e regulamentado pelo Decreto nº 9.308/2018. Ele estabelece metas de descarbonização para distribuidoras de combustíveis fósseis no mercado brasileiro. Para alcançar as metas do RenovaBio, as distribuidoras devem adquirir Créditos de Descarbonização (CBIO) de produtores de biocombustíveis, como etanol, biodiesel e biogás. Dessa forma, o programa criou o primeiro mercado nacional de créditos de carbono do país (BRASIL, 2017a) .

No setor de combustíveis líquidos a redução de emissões de carbono é facilmente rastreável e mensurável. No caso da eficiência energética no setor elétrico, a redução de emissões é tratada de maneira distinta, através de programas específicos e metas estabelecidas por órgãos reguladores. Para incorporar a eficiência energética no setor elétrico, através de uma estrutura semelhante ao CBIO, é necessário desenvolver métricas e padrões que permitam quantificar e rastrear a redução de emissões de CO₂ de maneira confiável. Além disso, é preciso definir como os "Créditos de Eficiência Energética" seriam certificados, validados e comercializados, a fim de garantir que a estrutura do mercado seja justa, transparente e alinhada aos objetivos ambientais do país.

Não foram encontrados estudos que avaliam os possíveis efeitos de um mercado de carbono na adoção de ações de eficiência energética. Logo, a proposta de criação de um mercado de carbono pode fornecer, por exemplo, incentivo econômico para as empresas adotarem práticas e tecnologias mais eficientes. Sendo assim, é fundamental analisar como ocorre a interação entre os programas/políticas públicas de eficiência energética e um possível sistema de comércio de emissões. Portanto, este estudo se justifica pela necessidade de preencher a lacuna existente na literatura e de fornecer informações relevantes para a tomada de decisões políticas no setor elétrico brasileiro.

Além disso, os resultados deste estudo podem ser utilizados para embasar decisões estratégicas e aperfeiçoar as políticas existentes, promovendo a transição para um setor elétrico mais sustentável e resiliente às

mudanças climáticas. A relevância desse estudo, portanto, estende-se para além do contexto acadêmico, impactando diretamente a sociedade e o meio ambiente.

1.2 Objetivos e Hipóteses

Considerando o contexto apresentado, com o objetivo de impulsionar a redução efetiva das emissões de gases do efeito estufa no Brasil, tendo em vista que:

- i. os impactos climáticos, causados pela emissão de GEE, são uma questão de interesse global;
- ii. o Brasil vem assumindo compromissos em acordos ambientais e precisa cumprir suas metas;
- iii. apesar da grande participação de renováveis, observa-se um aumento nas emissões associadas à termoeletricas;
- iv. o Brasil apresenta programas e legislações de eficiência energética, em constante revisão e modernização, que contribuem para redução de emissões de GEE no país;
- v. O Programa RenovaBio criou o primeiro sistema nacional de comércio de emissões no país.

O objetivo geral desta tese é investigar como a criação de um mercado de carbono eficiente, nos moldes do programa RenovaBio, pode incentivar a eficiência energética no setor elétrico, buscando compreender os potenciais benefícios, desafios e oportunidades decorrentes da criação deste mecanismo de mercado.

Assim, para que se alcance o objetivo geral, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- i. analisar a estrutura do mercado de créditos de carbono do programa RenovaBio e de mercados internacionais;
- ii. estimar a redução de emissões associadas a programas e políticas de eficiência energética no Brasil;
- iii. estimar o impacto econômico da negociação de créditos de carbono provenientes dos programas e políticas de eficiência energética no Brasil;
- iv. propor uma estrutura de mercado para negociação do Crédito de Carbono em Eficiência Energética.

Mais especificamente, esta tese busca responder à pergunta: "A criação de um mercado de carbono é capaz de incentivar a eficiência energética no setor elétrico brasileiro?"

A hipótese a ser investigada é de que a criação de um sistema nacional de comércio de emissões de créditos de carbono tem potencial para incentivar a eficiência energética no setor elétrico, resultando em reduções efetivas de emissões e adoção de práticas e tecnologias mais eficientes em termos de energia.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda informações relevantes sobre os mecanismos de precificação de carbono como forma de internalizar as externalidades negativas relativas as emissões de gases do efeito estufa. São apresentados exemplos de sistemas de comércio de emissões do tipo *cap-and-trade* no mercado regulado, destacando os mercados da União Europeia, China e Brasil. Apresenta também, o papel e os desafios relacionados à eficiência energética frente a eventos extremos da atualidade e os programas e políticas de eficiência energética do Brasil. Por fim, são apresentados detalhes do programa Renovabio, mecanismo nacional para negociação de créditos de carbono usado como referência neste estudo.

2.1 Mercado de Carbono e Eficiência Energética

2.1.1 Introdução ao Mercado de Carbono

Toda atividade econômica apresenta impactos positivos e/ou negativos para outras partes ou para a sociedade em geral, sem que esses impactos sejam refletidos nos preços de produtos e serviços no mercado. Quando os impactos, também chamados externalidades, são negativos, como poluição ambiental ou degradação de recursos naturais, são consideradas falhas de mercado. São falhas pois os custos ambientais associados não são considerados pelas empresas ou indivíduos envolvidos na atividade econômica. A internalização das externalidades negativas busca corrigir esta falha, incentivando os agentes econômicos a assumirem os custos dos impactos causados.

A internalização dos impactos de emissões de GEE pode ser feita através de diversos mecanismos políticos e de mercado, seja pela imposição de regulamentações ambientais mais rigorosas, pela aplicação de impostos sobre as emissões ou pela criação de sistemas de comércio de emissões. A aplicação desses instrumentos depende de características específicas de cada país, o que exige uma compreensão de cada um deles e das possíveis interações entre eles.

De acordo com o relatório sobre mudanças climáticas do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), a taxação de carbono e os sistemas de comércio de emissões são os mecanismos abrangentes e difundidos globalmente. A escolha entre impostos sobre carbono e sistemas de

comércio de emissões depende das circunstâncias e políticas de cada país ou região. Alguns lugares podem optar por uma combinação de ambos ou implementar outros mecanismos de precificação do carbono, como fundos de compensação de carbono ou ainda padrões de desempenho ambiental. (IPCC, 2014).

Na taxação do carbono, um imposto é aplicado diretamente às emissões de carbono, geralmente com base na quantidade de toneladas de dióxido de carbono equivalente (tCO₂e) emitido. As empresas ou indivíduos que emitem carbono pagam um valor por unidade de emissão. O imposto sobre carbono visa internalizar o custo socioambiental das emissões de carbono, incentivando a redução das emissões, já que as empresas têm um incentivo econômico para diminuir suas emissões para evitar pagar um valor mais alto em impostos. Os recursos arrecadados com os impostos sobre carbono podem ser direcionados para investimentos em projetos de energia limpa, pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono, entre outros.

Nos sistemas de comércio de emissões, do inglês *emission trading system* (ETS), do tipo *cap-and-trade*, um limite máximo de emissões de tCO₂e é estabelecido para determinado setor econômico. As empresas recebem créditos de emissão, equivalentes a uma quantidade específica de emissões permitidas. As empresas que emitem abaixo do limite podem vender suas reservas de permissões para aquelas que excedem o limite. O comércio dessas permissões cria um mercado de carbono, onde o preço dos créditos é determinado pela oferta e demanda. À medida que o limite de emissões é reduzido, a quantidade total de emissões permitidas diminui, incentivando as empresas a encontrarem formas ainda mais eficientes de produção.

A abordagem do imposto é simples, não exigindo um monitoramento complexo, relatórios detalhados e um sistema de mensuração/monitoramento, relato e verificação (MRV). Além disso, pode ser implementado utilizando-se instrumentos já existentes no sistema fiscal, como impostos especiais de consumo e taxas. Todavia, o ETS é amplamente reconhecido como um mecanismo de mercado que oferece uma forma mais econômica de reduzir as emissões em comparação com um imposto. Isso ocorre pois o ETS estabelece um mercado que permite que as empresas acessem opções de redução de menor custo e pode ser comercializado entre diferentes locais. O ETS

proporciona uma vantagem significativa na prática, pois empresas e outros agentes econômicos têm uma ampla gama de oportunidades para reduzir seus custos associados à diminuição das emissões. Sob um ETS, uma empresa pode optar por negociar com outra e adquirir créditos de emissão em vez de reduzir suas próprias emissões, caso essa alternativa seja economicamente mais viável, tendo a opção de negociar no mercado voluntário ou no mercado regulado. (UN, 2021).

O mercado voluntário de carbono é um sistema onde empresas, organizações e indivíduos podem compensar voluntariamente suas emissões de carbono, adquirindo créditos de carbono provenientes de projetos de redução ou remoção de gases de efeito estufa. Esses créditos são gerados através de atividades como reflorestamento, energia renovável e eficiência energética. Ao participar desse mercado, os compradores contribuem para a mitigação das mudanças climáticas e promovem a sustentabilidade. Embora seja um mercado não regulamentado, o mercado voluntário de carbono desempenha um papel importante no combate às emissões de gases de efeito estufa e na transição para uma economia de baixo carbono. Os créditos deste mercado são utilizados principalmente para alcançar a neutralidade de carbono voluntária, financiar projetos adicionais de redução de emissões e atrair investimentos (STRECK, 2021).

O mercado voluntário de carbono é um ecossistema que envolve programas de compensação de carbono, desenvolvedores de projetos, compradores e intermediários financeiros. Instituições financeiras e corretoras facilitam a negociação e transação dos créditos, tanto no mercado à vista quanto nos mercados futuros. Entretanto, a falta de padronização pode tornar o mercado pouco confiável e imprevisível. A expectativa para o futuro deste mercado, aponta que a comercialização de créditos de carbono, por meio de contratos padronizados, se realizada de forma adequada, pode contribuir para o aumento da disponibilidade futura, do volume e da transparência de preços, em benefício de quem desenvolve, compra e negocia este tipo de crédito (SPILKER; NUGENT, 2022).

O mercado regulado é um sistema estabelecido por governos e autoridades competentes para limitar e controlar as emissões de gases de efeito estufa. Nesse mercado, são estabelecidas metas e regulamentações para

redução de emissões, com a definição de um limite máximo de emissões para cada setor ou empresa. As entidades são obrigadas a adquirir permissões de emissão ou créditos de carbono que correspondam às suas emissões, e esses ativos financeiros podem ser comprados, vendidos ou leiloados entre as partes envolvidas. O objetivo desse mercado regulado é incentivar a redução das emissões, premiando práticas mais eficientes e criando um incentivo financeiro para a adoção de práticas mais sustentáveis.

O Protocolo de Quioto criou um mercado regulado global ao estabelecer metas de redução de emissões para países industrializados e introduzir os “mecanismos de flexibilidade”, como o MDL e o Comércio de Emissões. O MDL permitiu que países desenvolvidos investissem em projetos de redução em países em desenvolvimento em troca de créditos de carbono, enquanto o Comércio de Emissões possibilitou a negociação de permissões entre países para o cumprimento de metas. Esses instrumentos pioneiros serviram de base para sistemas regulados de mercado de carbono em todo o mundo, como o *European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS)*, o *Beijing Pilot ETS* e o *California Cap-and-Trade Program*, impulsionando a expansão global desses mercados (OLIVEIRA, 2022).

Assim, enquanto o mercado regulado é gerido por regras e regulamentos obrigatórios, o mercado voluntário é baseado em ações voluntárias e pode ter critérios de elegibilidade menos rigorosos. Ambos os mercados desempenham um papel importante na mitigação das emissões, incentivando a redução de emissões de GEE e promovendo a transição para uma economia de baixo carbono. Entretanto, apenas no mercado regulado a redução de emissão dos países é considerada para cumprimento de acordos ambientais.

2.1.2 Precificação do Carbono no Mercado Regulado

Em 1990, a Finlândia se tornou o primeiro país a introduzir um imposto sobre carbono, estabelecendo uma taxa de EUR 1,12 por tonelada de CO₂e com base no teor de carbono dos combustíveis fósseis. Essa medida pioneira foi implementada como um instrumento para mitigar as mudanças climáticas. Ao longo do tempo, por meio de reformas sucessivas a Finlândia aumentou as taxas e unificou o imposto sobre carbono com o imposto sobre energia (NACHMANY *et al.*, 2015)

Já o pioneirismo do ETS no mercado regulado ocorre no comércio de emissões do protocolo de Quioto, primeira estratégia global de comercialização de créditos de carbono. O crédito de carbono, conhecido como *Certified Emission Reduction* (CER), no âmbito do MDL representa 1tCO_{2e}. Após 2020, com o término do período de compromisso do Protocolo de Quioto, os CER's perderam a validade para cumprir metas de redução de emissões sob o acordo internacional (HULTMAN; LOU; HUTTON, 2020). Existe a expectativa da criação de um novo mercado mundial nos moldes do MDL, proposto no Artigo 6 do acordo de Paris, com objetivo de incentivar a participação dos mais diversos setores econômicos das partes.

O Artigo 6 estabelece mecanismos de cooperação internacional para reduzir emissões de gases de efeito estufa. Um desses mecanismos é o Mecanismo de Desenvolvimento Sustentável, descrito no Artigo 6.4, que permite a geração de créditos de carbono a partir de projetos que comprovadamente reduzem ou evitam emissões. Esses créditos podem ser comercializados entre países, empresas ou outros atores, ajudando a cumprir metas nacionais de redução de emissões (UN, 2016).

De acordo com World Bank, (2022b) em 2022 havia 68 mecanismos de precificação de carbono regulados ativos e 3 já desenvolvidos aguardando implementação, sendo 37 mecanismos de taxaço de carbono e 34 de ETS's. Mercados de carbono do tipo ETS, na União Europeia, Estados Unidos, Canadá, Brasil etc, permitem a emissão e negociação de créditos de carbono provenientes de geração de energias renováveis, eficiência energética, biocombustíveis, reflorestamento, captura de carbono dentre outros (LADE; LIN LAWELL, 2015) (KOUGIAS *et al.*, 2021).

Os estudos de CHISHTI *et al.* (2021), HEIMVIK& AMUNDSEN (2021) GRUBB *et al.* (2020) e HU *et al.* (2023) focaram em avaliar a implementação de mercados de emissões do tipo ETS. É consenso entre eles que a implementação de modelos de precificação de emissões, como estratégia política, causa uma pressão positiva em empresas e governos e estimulam investimentos em práticas mais sustentáveis e em inovação tecnológica. Alguns destes mercados destacam-se seja pelo pioneirismo, pelo tamanho ou por suas potencialidades.

O preço médio nos mercados internacionais depende da combinação de políticas e estratégias de mercado. O preço do crédito reage positivamente a

combinação de mecanismos regulatórios fortes e NDCs ambiciosas, como demonstrado na Tabela 2.1. A alta demanda por créditos em locais com regulação forte e baixa oferta de créditos, configura-se como o cenário ideal para o intercâmbio desses ativos, daí a importância de um mercado de carbono internacional.

Tabela 2.1 Cenário de preços no mercado regulado

		Baixa Oferta	Alta Oferta
		Exemplo: -NDC ambiciosa; -Regras estritas para gerar créditos.	Exemplo: -NDC menos ambiciosa; -Regras de emissão de créditos equilibradas.
Baixa Demanda	Exemplo: -Ausência de parte obrigada; -Aceita projetos não certificados; -Baixa demanda no mercado voluntário	Cenário de preço médio: US\$ 10 – 30/tCO ₂ e	Cenário de preço baixo: < US\$ 10/tCO ₂ e
Alta demanda	Exemplo: -Imposto por emissão; - Restrição por tipo de projeto; -Alta demanda no mercado voluntário	Cenário de preço alto: > US\$ 30/tCO ₂ e	Cenário de preço médio: US\$ 10 - 30/tCO ₂ e

Fonte: Adaptado de (SCHWIEGER; BRODMANN; MICHAELOWA, 2019)

O sistema ETS de Pequim, em operação desde 2014, inicialmente negociava créditos de carbono com valores em torno de US\$ 8,52/tCO₂e, atingindo o pico de US\$ 12,2/tCO₂e em 2020 (WORLD BANK, 2025). Em 2021, o preço foi reduzido para US\$ 4,32/tCO₂e, refletindo o impacto da introdução do sistema ETS nacional chinês, que aumentou a oferta de créditos no mercado, e da retomada da produção industrial após a pandemia de COVID-19.

Por sua vez, o EU ETS, estabelecido em 2005, representa o maior mercado de carbono de tipo *cap-and-trade* globalmente e tem passado por diversas reformas que elevaram gradualmente o preço das permissões de emissão. A redução das permissões gratuitas ao longo do tempo, bem como o combate à fuga de carbono por meio de regulações mais rigorosas, foram fatores

cruciais para estabilizar o mercado e permitir a aplicação de preços mais elevados. Em 2021, o EU ETS alcançou um preço de US\$ 49,78/tCO₂e e, em 2022, atingiu a marca histórica de US\$ 86,53/tCO₂e. A modernização constante das regras, incluindo a interconexão com o ETS da Suíça em 2014, possibilitou uma elevação sustentada nos preços praticados (WORLD BANK, 2025).

No contexto da precificação de créditos de carbono, a distinção entre diferentes tipos de projetos geradores de créditos, como eficiência energética e soluções baseadas na natureza, também contribui para a variação de preços. Em mercados voluntários, é comum que créditos derivados de soluções naturais, como reflorestamento e preservação de ecossistemas, sejam negociados a preços superiores aos de projetos de eficiência energética. Esta diferença ocorre, principalmente, devido aos cobenefícios socioambientais associados às soluções naturais, que vão além da captura de carbono e incluem preservação de biodiversidade, melhoria da qualidade do solo e benefícios para comunidades locais.

A adicionalidade e a presença de cobenefícios, portanto, exercem influência direta na valoração dos créditos. Enquanto projetos de eficiência energética são economicamente viáveis e geram créditos com custos relativamente baixos, soluções baseadas na natureza dependem da venda de créditos para cobrir seus custos e garantir a sustentabilidade dos projetos. No mercado voluntário, por exemplo, créditos de reflorestamento ou conservação florestal podem alcançar valores entre US\$ 20/ tCO₂e e US\$ 30/tCO₂e, enquanto créditos oriundos de eficiência energética apresentam valores inferiores, dependendo da metodologia aplicada e da região de execução do projeto (ASSUNÇÃO; SCHEINKMAN, 2023).

Dessa forma, a diferença de preço entre os créditos oriundos de diferentes tipos de projetos se fundamenta nas características específicas e no impacto ambiental de cada iniciativa. No caso dos programas de eficiência energética brasileiros, a aplicação dos créditos no mercado de carbono dependerá de uma avaliação criteriosa que considere as reformas regulatórias, a comprovação de adicionalidade — ou seja, a garantia de que as reduções de emissões só ocorrem em função dos projetos implementados e não seriam realizadas na ausência destes — e os cobenefícios associados, como a redução de custos energéticos, o aumento da competitividade industrial, a melhoria da

segurança energética e os impactos sociais positivos para consumidores de baixa renda.

2.1.2.1 *European Union Emissions Trading Scheme (EU ETS)*

A União Europeia tem sido líder na implementação de um sistema de comércio de emissões, o *European Union Emissions Trading Scheme* (EU ETS). O sistema, estabelecido em 2005, inclui os 31 países membros da União Europeia mais três Estados não membros (Islândia, Liechtenstein e Noruega), e abrange os setores de energia, indústria e aviação.

O EU ETS opera sob o princípio de *cap and trade*, estabelecendo um limite máximo para as emissões e permitindo que as empresas negociem permissões de emissões. Esse modelo tem se mostrado eficaz, contribuindo para a redução das emissões nos setores cobertos. Além disso, o sistema é fiscalizado e constantemente atualizado para garantir sua eficiência e adaptabilidade às mudanças às condições econômicas e ambientais.

A região tem sido responsável por parcela significativa das emissões globais de GEE ao longo dos anos, representando a terceira maior emissão de GEE do mundo. Em 2019, cerca de 77% das emissões globais da região foram provenientes do setor de energia (EURICID MNE, 2020). Sabendo que a quantidade e a natureza destas emissões variam ao longo do tempo entre os Estados membros da região, foi estabelecido que as regras do EU ETS seriam atualizadas periodicamente com a finalidade de avaliar o progresso, identificar lacunas e implementar ajustes necessários (EUROPEAN COMMISSION, 2023a, b).

Desta forma, as etapas do sistema de comércio de emissões dividem-se em quatro fases com diferentes objetivos e características:

- Na Fase 1 (2005-2007), também chamado de fase piloto foi um período do sistema para realização de testes e para avaliar a eficácia do sistema. Logo, não havia metas de redução de emissões definida e as termelétricas, refinarias de petróleo, produção de ferro e aço, indústria de cimento, produção e transformação de metais, e indústrias de papel e celulose receberam uma alocação inicial de permissões de emissões;
- Na Fase 2 (2008 – 2012) foram realizados ajustes com base nas

lições aprendidas na fase piloto. O refinamento do sistema entre outras medidas reduziu a alocação gratuita de permissões, com o objetivo de estabilizar os preços nos países membros. Foi nessa fase que setores adicionais foram incluídos, inclusive o setor de aviação. Durante este período foi estabelecida a meta de reduzir 6,5% em relação aos níveis de 2005 até o final do período de abrangência;

- A Fase 3 (2013-2020) foi marcada por uma ambição mais audaciosa que as fases anteriores, com objetivo de reduzir 21% com relação aos níveis de 2005. Foram estabelecidas metas anuais de redução de emissões e o número total de permissões gratuitas foi gradualmente reduzido e criados mecanismos de estabilização dos preços;
- Na etapa atual, Fase 4 (2021-2030), a meta de redução de emissões para o período passou a ser de 43% até o final de 2030, ainda com referência a 2005. A previsão de redução gradual das permissões gratuitas continua e, portanto, as empresas precisarão buscar novas opções para cumprirem suas metas individuais. Foi introduzido também um mecanismo de ajuste de “vazamentos de carbono”, aprovado em 2023 e com previsão de funcionamento gradual a partir de 2026.

Investir em eficiência energética e participar de mercados de emissões tem sido vantajoso para as empresas europeias, pois resulta em maior lucratividade. Um estudo aplicado a empresas de 19 estados membros do EU ETS analisou características econômicas, ambientais e energéticas dos países para avaliar a influência do mecanismo no lucro das empresas. Os resultados mostraram que uma maior alocação de permissões de emissões está associada a uma menor lucratividade. Além disso, o nível de poluição e a relação entre as emissões verificadas e a venda de créditos de redução de emissões também afetam negativamente a lucratividade. Por outro lado, empresas que controlam seus níveis de poluição e operam em países com políticas energéticas mais robustas tendem a ter maior lucratividade (MAKRIDOU; DOUMPOS; GALARIOTIS, 2019).

Mesmo com a pressão dos órgãos reguladores para atingir metas

ambientais, a participação no mercado regulado não garante necessariamente a redução de emissões, já que empresas que optam pelo mercado voluntário obtiveram resultados semelhantes, ou podem ainda transferir sua produção para países fora da União Europeia (NARANJO TUESTA; CRESPO SOLER; RIPOLL FELIU, 2021) (PAPIEŽ; ŠMIECH; FRODYMA, 2022).

Em 2020, durante o enfrentamento da pandemia de COVID-19, houve um declínio de 11,4% nas emissões da União Europeia e o número de permissões de emissões superou as emissões, o que não ocorria desde 2013. A preocupação é que a retomada das atividades econômicas mude o histórico de declínio de emissões observadas desde 2005. As projeções indicam uma redução de até 43% das emissões em 2030, mas espera-se que as atualizações previstas na fase 4 sejam realizadas e a redução chegue a pelo menos 55% com relação as emissões de 1990 (EEA, 2023).

A robustez e o pioneirismo do EU ETS fez com o sistema fosse o modelo que deu origem a outros sistemas de comércio de emissões, como os da China e da Coreia do Sul.

Um projeto de três anos entre União Europeia e China deu suporte a implementação do sistema de comércio de emissões chinês. O primeiro acordo foi firmado em 2015 e renovado em um novo projeto entre 2017 e 2020 (EUROPEAN COMMISSION, 2014). Já o sistema Sul Coreano recebeu assistência técnica para implementar seu sistema de comércio de emissões em 2015 (KIM, 2016). A estratégia bilateral ou multilateral permitidas pelo sistema de emissões europeu beneficia sobretudo empresas energo-intensivas, que conseguem negociar créditos de carbono a preços mais competitivos. Uma das ações que garante esta competitividade foi limitar o comércio de emissões com o mercado chinês a 40%, visto que aparentemente não há benefícios financeiros para a União Europeia em permissões superiores (LI; PERDANA; VIELLE, 2021).

A competitividade dos preços das permissões de emissões na União Europeia é fortemente influenciada pela reestruturação das regras deste mercado. Ao longo dos anos, o preço do crédito de carbono no EU ETS tem variado significativamente. No início do sistema, em 2005, o preço era relativamente baixo. No entanto, ao longo do tempo, o preço aumentou em resposta a várias mudanças nas políticas e regulamentações climáticas e do

próprio EU ETS, bem como a fatores econômicos e crises socioeconômicas. Nos últimos anos, o preço do crédito de carbono no EU ETS tem mostrado uma tendência de alta como observado na Figura 2.1.

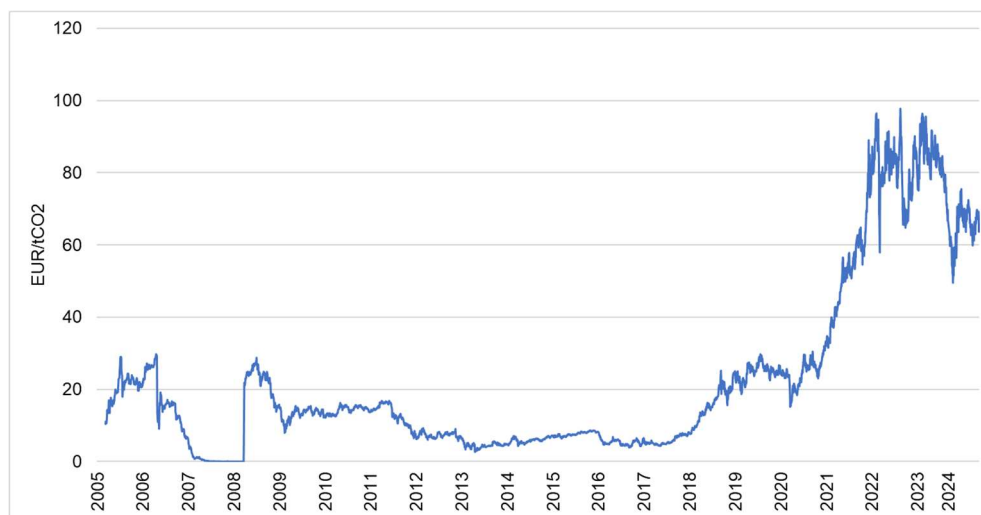


Figura 2.1 Preços das licenças EU-ETS na União Europeia 2005-2024

Fonte: ICAP, 2023 (ICAP, 2025)

Esta tendência ascendente do preço do crédito de carbono reflete os esforços para fortalecer o sistema e aumentar a ambição climática da União Europeia. Entretanto, a volatilidade e a especulação nos preços das permissões de emissão podem levar a flutuações significativas no mercado e dificultar o planejamento de longo prazo para as empresas.

Alguns estudos apresentam metodologias para estimar o preço do crédito de carbono no EU ETS e quais fatores podem o influenciar. Tais estudos indicam que a formação de preços no EU ETS resulta da interação entre fundamentos de mercado (oferta/demanda de permissões e preços de combustíveis fósseis, por exemplo), variáveis macroeconômicas, decisões regulatórias e outros fatores como clima e expectativas de investidores. Essa multiplicidade de influências faz com que o preço do carbono na Europa seja altamente sensível a choques externos e à evolução das políticas climáticas, funcionando ao mesmo tempo como sinal econômico e como reflexo das condições estruturais do setor energético (WANG et al., 2019), (HARTVIG; PAP; PÁLOS, 2023) e (BAI; OKULLO, 2021) (IPCC, 2011).

É importante ressaltar que o preço no EU ETS pode ter impactos

significativos nas empresas e em suas estratégias de redução de emissões. Um preço mais alto pode incentivar as empresas a investirem em tecnologias mais limpas e a reduzirem suas emissões, ou simplesmente estimulá-las a migrar para países onde a regulação climática é mais branda.

2.1.2.2 *China National ETS*

Em 2022 a China foi responsável por aproximadamente 27% das emissões de dióxido de carbono e de um terço das emissões dos demais GEE em 2021, se consolidando como o maior emissor de gases poluentes do mundo, posto que ocupa desde 2005, quando ultrapassou os Estados Unidos (CRIPPA *et al.*, 2022).

Devido ao tamanho da sua população e sua economia em rápido crescimento, o país tem uma demanda significativa por energia, o que resulta em altas emissões de carbono. O país enfrenta desafios ambientais significativos relacionados à poluição do ar, da água e do solo. Grande parte dessa poluição é causada pela queima de carvão e pela utilização intensiva de energia em setores como a indústria e o transporte. Ao reduzir suas emissões, o país pode impulsionar ainda mais o desenvolvimento e a adoção dessas tecnologias, o que pode levar a avanços significativos na transição para uma economia de baixo carbono em escala global (WORLD BANK, 2022a).

O sistema opera por meio de uma abordagem de alocação de permissões baseada na intensidade de emissões. As usinas termelétricas a carvão e a gás recebem permissões de emissão com base na geração real de eletricidade e calor, multiplicada pelas metas de intensidade de emissões específicas para cada tipo de usina. As permissões são alocadas gratuitamente aos operadores de usinas, e as usinas devem devolver as permissões correspondentes às suas emissões verificadas, calculadas com base no consumo de combustível e fator de emissões (IEA, 2022b).

Um estudo analisou os efeitos do sistema de comércio de emissões em 478 termelétricas chinesas, considerando dois cenários: a ausência de um sistema de comércio de emissões; e a existência de um Sistema Nacional de Comércio de Emissões. As simulações estimam que com o comércio de emissões as usinas teriam em média uma economia de 12,96% em seus custos de geração, podendo chegar a 41,5%, especialmente em usinas termelétricas

de baixa emissões de carbono. Essa redução de custos é mais significativa em usinas com maior eficiência, independentemente da localização. No entanto, num cenário de concorrência imperfeita, mais de 70% das usinas não obtiveram os mesmos benefícios de economia que em um mercado de concorrência perfeita. Esses resultados destacam a importância de considerar a estrutura de mercado ao implementar o ETS e a necessidade de ajustes para maximizar os benefícios econômicos e ambientais (ZENG *et al.*, 2020).

O Esquema nacional de comércio de emissões da China foi criado em dezembro de 2017, agregando os sistemas da fase piloto que já existiam em sete regiões, incluindo Pequim, Shanghai e Guangdong. Após a fase piloto do programa nacional, em fevereiro de 2021, o ETS foi expandido para cobrir todo o país, tornando-se o maior sistema de comércio de emissões do mundo (NIIZAWA; HAYASHI; LIU, 2020).

Na fase piloto do ETS chinês, os preços das permissões de emissão foram relativamente baixos, como observado na Figura 2.2, devido à alocação inicial generosa de permissões gratuitas para as empresas. No entanto, à medida que o sistema avança e as metas de redução de emissões se tornam mais rigorosas, espera-se que o preço das permissões aumente gradualmente.

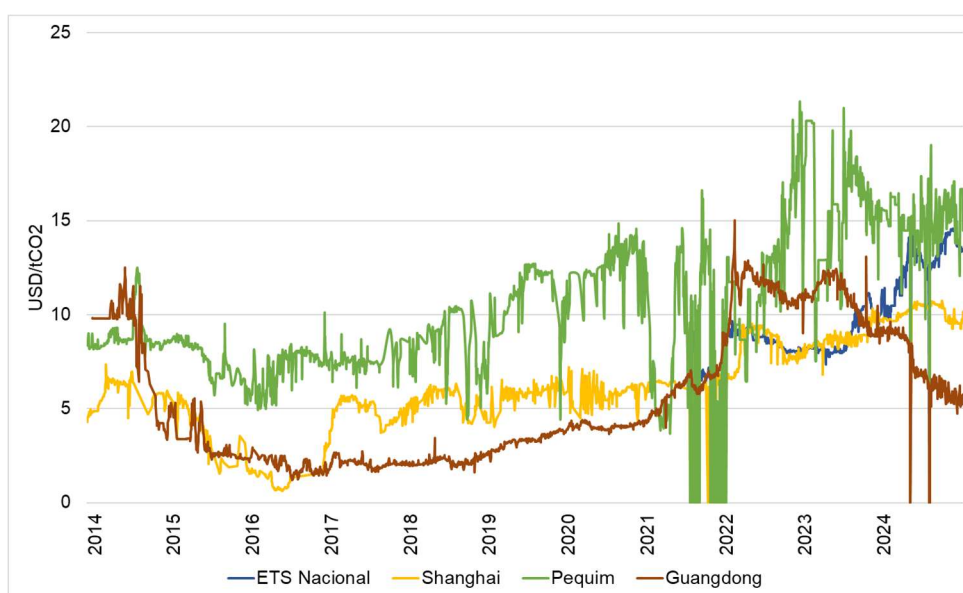


Figura 2.2 Preços de Permissão de Emissões no Mercado Chinês

Fonte: ICAP, 2023

O impacto da adoção do ETS, por exemplo, no setor industrial é heterogêneo, desta forma há uma necessidade de atualizações periódicas na

política de comércio, nos setores participantes e nos limites de emissões. Políticas complementares que forneçam subsídios e incentivos podem ser necessárias para que setores intensivos em energia adentrem no mercado e sejam responsabilizados de forma apropriada (SUN *et al.*, 2022) (FENG *et al.*, 2022).

Por outro lado, é importante que o mercado tenha autonomia e segurança para que as empresas se sintam estimuladas a participar do mercado de emissões (CHEN; LIN, 2021). Por incluir muitas empresas de setores distintos, a implantação de sistemas de comércio de emissões no país resulta em reduções significativas de emissões em escala global. O sucesso do ETS na China, pode incentivar a adoção de tecnologias limpas e o desenvolvimento econômico de baixo carbono, podendo criar ainda um ambiente comercial e econômico de valorização destas práticas.

Analisar a fase piloto do mercado de emissões do país fornece informações importantes sobre o que esperar de resultados futuros e de como melhorar possíveis falhas.

Um estudo observou o impacto do ETS nas cidades piloto a nível nacional, regional e local, utilizando dados de 283 cidades. O estudo observou que a adoção do ETS causou melhoras na eficiência da economia de baixo carbono nas cidades analisadas. Nas cidades onde o sistema piloto foi implantado, a eficiência da economia de baixo carbono cresceu cerca de 4,3%. O estudo observou que há influência do ETS nas cidades vizinhas de forma concentrada num raio de 600 km. Este efeito vai se atenuando e desaparece em um raio de 1800 km (TAO *et al.*, 2022).

Na metodologia aplicada por Huang *et al.* (2022) estima-se que nas cidades piloto houve redução de emissões de pouco mais de 7% e nas demais cidades chinesas a redução foi de aproximadamente 4,2% na fase inicial do sistema. Os resultados são compatíveis com os estudos de (ZHANG; DUAN; DENG, 2019), (STOERK; DUDEK; YANG, 2019) e (ZHENG *et al.*, 2021) que enfatizam a importância da fase piloto na eficácia do sistema, apontando falhas e potencialidades que podem levar a ajustes na regulação.

2.1.2.3 Política Nacional de Biocombustíveis - RenovaBio

A Política Nacional de Biocombustíveis, conhecida como RenovaBio, foi

instituída no Brasil pela Lei nº 13.576/2017, com o objetivo de promover a expansão da produção e uso de biocombustíveis de forma sustentável, alinhando-se aos compromissos do país no Acordo de Paris.

O programa RenovaBio visa à redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de combustíveis, estabelecendo metas anuais de descarbonização para a matriz de combustíveis. A política se destaca pela introdução do CBIO, emitido por produtores e importadores de biocombustíveis de acordo com a eficiência energética e ambiental de seus produtos.

Esses créditos podem ser comercializados no mercado financeiro, incentivando a produção de biocombustíveis com menor impacto ambiental. A certificação dos biocombustíveis é feita por firmas inspetoras acreditadas, que verificam a redução de emissões em comparação com combustíveis fósseis. Além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, o RenovaBio também busca fortalecer a indústria nacional de biocombustíveis, promover a segurança energética, e garantir previsibilidade e estabilidade ao mercado, estimulando investimentos em tecnologias mais limpas e eficientes (BRASIL, 2017a).

O RenovaBio ao certificar produtores e importadores de biocombustíveis, demonstra como cada agente contribui para a redução de emissões dos gases de efeito estufa, tornando o biocombustível um produto ainda mais atrativo, ao permitir a negociação do crédito ambiental. Esta política pública é um exemplo de mecanismo capaz de promover ou acelerar a transição energética, levando em consideração a importância do etanol e do biodiesel na experiência brasileira, sendo capaz de reduzir a volatilidade de preços, tanto no mercado interno, quanto no mercado internacional, principalmente se aliada a incentivos à competitividade (DENNY, 2020) (CARVALHO *et al.*, 2020a).

Existe a expectativa de criação de um mercado nacional de emissões que contemple, por exemplo, o setor elétrico. O projeto de Lei 528/2021 prevê a regulamentação do mercado brasileiro de redução de emissões (MBRE). O MBRE foi determinado pela Política Nacional de Mudança do Clima – Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que prevê o estímulo ao desenvolvimento MBRE. Em 2022 a Comissão de Assuntos Econômicos – CAE do senado, aprovou o PL 412/2022 que tem o objetivo de regulamentar o MBRE (RODRIGUES, 2022).

2.1.3 Desafios da Eficiência Energética na Atualidade

A eficiência energética tem papel importante para questões ambientais, ao promover a utilização de energia de forma mais inteligente, reduzindo o consumo desnecessário e maximizando a produtividade do setor energético nas mais distintas áreas. As estratégias que dão suporte às ações de eficiência energética ocorrem por meio de campanhas informativas, treinamentos, criação de leis, regulação e normas técnicas, taxas, incentivos, leilões e certificados de eficiência. Tais estratégias, entretanto são impactadas por eventos extremos, como a recente pandemia de COVID-19 e a guerra entre Rússia e Ucrânia, por exemplo.

De acordo com relatório da IEA sobre os impactos da pandemia de COVID-19 no setor elétrico mundial, entre março e abril de 2020, período marcado pelo bloqueio total das atividades econômicas - ilustrado na Figura 2.3 pelas linhas tracejadas, observou-se uma queda acentuada na demanda global de eletricidade. Esse recuo foi causado principalmente pela desaceleração dos setores comercial e industrial, embora tenha sido parcialmente compensado pelo aumento do consumo residencial. Apesar de apresentar recuperação a partir de maio de 2020, nos meses que se seguiram, a demanda por eletricidade ficou entre 5% e 10% abaixo dos valores observados em 2019 na maioria dos países. Entretanto, países apresentaram uma recuperação acelerada e acentuada do setor, como a Índia que teve um crescimento de demanda de 3,4% e 10% nos meses de setembro e outubro com relação aos mesmo período em 2019 (IEA, 2021).

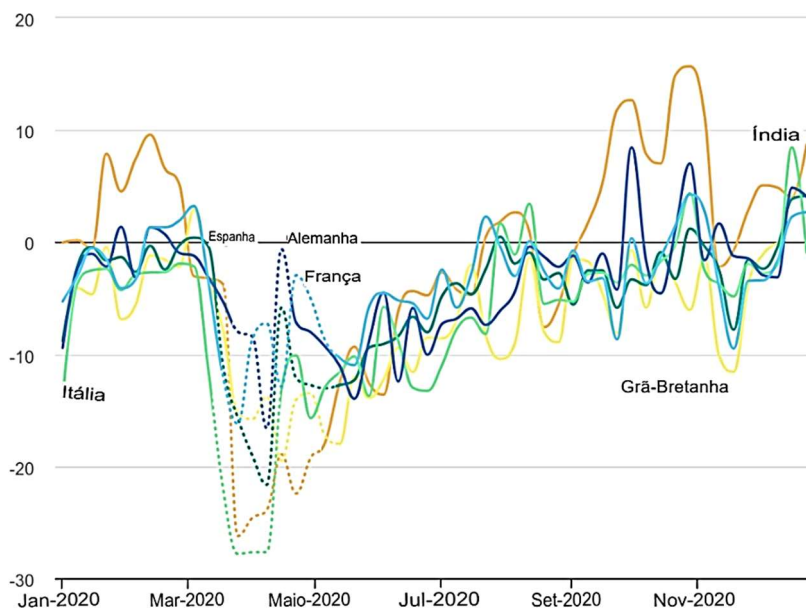


Figura 2.3 Demanda por eletricidade em 2020 durante restrição sanitária de COVID-19

Fonte: (IEA, 2021)

No Brasil, a pandemia de COVID-19 impactou a operação do sistema, os preços da energia, os investimentos no setor e ainda os segmentos de geração, comercialização, transmissão e distribuição de energia. A redução do consumo aliada a boa situação dos reservatórios acarretou numa redução de 5GW médio nas projeções de consumo entre 2020 e 2024. Como a velocidade da retomada das atividades comerciais e industriais era incerta, os investimentos em geração e transmissão de energia foram postergados. Ainda em decorrência da retração do consumo, as reservas de energia das distribuidoras aumentaram, o que deu margem para renegociação de contratos em busca de adequar o volume de energia contratado com a real necessidade, principalmente entre consumidores do mercado livre, resultando em crise nas distribuidoras (GONÇALVES *et al.*, 2022).

O conflito entre Rússia e Ucrânia acendeu um alerta, sobretudo nos países europeus, em função da elevada dependência da importação de gás natural para geração de calor e eletricidade no continente. Esse cenário expôs a vulnerabilidade energética como um componente das chamadas guerras híbridas, em que instrumentos não convencionais, como o suprimento de energia, podem ser utilizados de forma estratégica em disputas geopolíticas. A instrumentalização da energia como arma de guerra acelerou a busca por

autossuficiência energética e tende a influenciar a velocidade de adoção das fontes renováveis. Além disso, o conflito impactou diretamente o mercado global de energia, tanto em termos de preço quanto de acesso, com reflexos significativos sobre a economia mundial. (IEA, 2022d) (NERLINGER; UTZ, 2022).

Ainda de acordo com a Agência Internacional de Energia, (IEA, 2022a) as políticas públicas e agências destinadas ao desenvolvimento de ações e programas de eficiência energética, podem ser um diferencial para uma ação rápida à eventos extremos, como os citados. A eficiência energética tem potencial de reduzir a dependência na importação de energia, regular a volatilidade dos preços da energia e contribuir no alcance de metas ambientais em todos os mercados.

O desempenho dos países quanto à adoção da eficiência energética é disponibilizado por órgãos e ferramentas de monitoramento como, por exemplo, o *International Energy Efficiency Scorecard*, desenvolvida pelo *American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE)* e o; *Regulatory Indicators for Sustainable Energy (RISE)*, elaborado pelo *World Bank Group*.

O *International Energy Efficiency Scorecard* apresenta a classificação de 25 países que mais consomem energia no mundo, considerando 36 métricas eficientes e as melhores práticas desenvolvidas pelos países analisados. O ranking concede uma nota máxima de 25 pontos para quatro setores (esforços nacionais, edificações, indústria e transportes), totalizando 100 pontos. No relatório de 2022, a França aparece em primeiro lugar no ranking, totalizando 74,5 pontos, seguido de Reino Unido, Holanda, Alemanha e Itália. Já o Brasil aparece na 19ª posição com um total de 34 pontos (SUBRAMANIAN *et al.*, 2022).

O *RISE* é um indicador mais amplo que cobre trinta indicadores de 140 países que representam 98% da população mundial. O indicador eficiência energética tem onze subindicadores que avaliam, dentre outros, as entidades responsáveis pelas ações de eficiência, os incentivos destinados aos setores industrial e comercial, mecanismos financeiros, sistemas de etiquetagem, sistemas de monitoramento de emissões e precificação de carbono. Uma pontuação de 0 a 100 é atribuída para a eficácia de cada um dos subindicadores. Entre 2010 e 2021 a porcentagem de países com pouca ou nenhuma política de eficiência energética (nota ≤ 33) caiu de 79% para 35%. No ranking dos países

mais bem avaliados a Coreia do Sul lidera a lista. Já o Brasil aparece na 27ª posição, apesar de apresentar crescimento em todos os subindicadores com relação ao ano de 2010 (ESMAP, 2022).

Países desenvolvidos podem estar em melhor posição nos indicadores pelo fato de as ações de eficiência serem desenvolvidas com o envolvimento de diferentes *stakeholders* (órgãos da administração pública, entidades da sociedade civil, conselhos comunitários e empresas privadas). Outro fator relevante refere-se ao acesso à tecnologia de ponta. Países desenvolvidos estão no limiar tecnológico, ou seja, um maior acesso à renda possibilita que o consumidor final tenha acesso a tecnologias mais eficientes. Outro ponto refere-se ao nível de detalhes das políticas e procedimentos e à descentralização dos modelos políticos de eficiência. A disseminação dos indicadores facilita a adoção de programas e políticas de outros países.

De acordo com Menkes (2004) os mecanismos de eficiência energética em vigor no Brasil foram desenvolvidos a partir de experiências de programas desenvolvidos no Reino Unido, França, Canadá e Estados Unidos da América, países com melhores indicadores de eficiência que o Brasil. Entretanto, a posição do país nos indicadores, demonstra que ainda é necessário algum esforço para que os programas de eficiência energética tenham melhores resultados.

Com o objetivo de melhorar os níveis de eficiência e aprimorar suas ações, alguns países optam também pela criação de agências de eficiência energética, ligadas a ministérios e órgão de meio ambiente. As agências de eficiência energética podem: i) promover assessoria técnica específica para governos e população; ii) realizar lobby para que empresas privadas de energia mantenham suas margens de lucro; iii) evitar ações em duplicidade, coordenando a atividade de órgãos vinculados à eficiência energética; iv) mediar e coordenar acordos entre *stakeholders* envolvidos; v) ser a parte nacional quando acordos internacionais são firmados e; vi) desenvolver e coordenar a aplicação de normas e legislação de eficiência energética. Assim, tanto a criação de políticas públicas quanto a criação de agências específicas estão ligados à importância que cada governo dá às medidas de eficiência energética.

Existe um potencial latente de redução de demanda através da boa execução de políticas públicas de eficiência energética, cabe a cada governo

identificar e aplicar medidas condizentes com suas respectivas realidades e avaliar se de fato o mecanismo adotado estimula o consumo eficiente.

2.1.4 Programas e Políticas de Eficiência Energética no Brasil

A primeiro programa de eficiência energética no Brasil data do início da década de 80, como resposta aos choques do petróleo de 1973 e 1979. O Programa de Conservação de Energia do Setor Industrial (CONSERVE), sob administração do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), foi uma estratégia de governo para reduzir os impactos da segunda crise do petróleo e das altas taxas de juros praticadas no país na época, através de subsídios e incentivos fiscais. O programa foi pautado na redução do consumo de energia no setor industrial, na substituição de energéticos importados por fontes alternativas nacionais e no desenvolvimento de processos e produtos mais eficientes. A criação de projetos de conservação de energia foram responsáveis por 21% das economias do programa e a substituição de derivados de petróleo correspondeu a 79% das economias previstas (BEHRENS, 1985) (PICCININI, 1994).

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), ainda em vigor, foi criado em 1984 com o objetivo de incentivar a fabricação e a aquisição de produtos mais eficientes. O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) tem a função de estabelecer critérios e coordenar as normas de classificação e etiquetagem obrigatória de eletrodomésticos, motores, aquecedores, condicionadores de ar e coletores solares etc. Ao longo dos anos novas modalidades foram inseridas, como veículos e edificações que também puderam ser, voluntariamente, submetidos a classificação e etiquetagem. O Inmetro estabelece ainda normativos de eficiência e procedimentos de medição que são periodicamente revisados, de acordo com os avanços tecnológicos e com os objetivos do programa. A etiquetagem do equipamento indica ao consumidor o nível de eficiência do produto, propiciando uma maior procura por aqueles mais eficientes, desta forma a indústria é estimulada a produzir equipamentos cada vez mais eficientes (JANNUZZI, G; DANELLA; SILVA, 2004).

Em cinco anos de aplicação do CONSERVE o objetivo de conservação de energia elétrica representou uma parcela pequena de projetos, tendo um impacto inexpressivo no sistema elétrico brasileiro. O Programa Nacional de

Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), foi então lançado por meio de uma portaria interministerial, em dezembro de 1985, com a expectativa de expandir iniciativas anteriores, aplicadas por concessionárias e centros de pesquisa, estimuladas também pelo PBE.

O programa PROCEL, executado pela Eletrobrás, foi criado com objetivo de reduzir custos e desperdícios através da racionalização do uso da energia, proporcionando o mesmo produto ou serviço com menor consumo possível (PROCEL, 2006). A ação mais conhecida do programa é o selo PROCEL de economia de energia, ilustrado na Figura 2.4, para os equipamentos mais eficientes do mercado, sendo concedido ao equipamento mais eficiente de cada tipo. Ao longo dos anos, os investimentos no programa têm sido ampliados, bem como sua abrangência. Em 2022 o programa foi responsável por uma economia de energia de pouco mais de 22 bilhões de kWh, acumulando desde sua criação uma economia de mais de 240 bilhões de kWh (PROCEL, 2023).



Figura 2.4 Selo PROCEL de economia de energia

Fonte: PROCEL Info

No ano de 1999, na iminência do que mais tarde seria chamado de “crise do apagão”, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) autorizou que as concessionárias investissem parte de seus recursos na melhoria de seus fatores de carga, com obrigatoriedade de destinar parte desse recurso para programas de eficiência energética.

A partir desta experiência, a Lei Nº 9.991 de 24 de julho de 2000 foi sancionada com o objetivo de regulamentar a destinação de recursos das concessionárias e permissionárias para realização de pesquisa e

desenvolvimento (P&D) e eficiência energética no uso final de energia. Inicialmente esse repasse de recursos de sua Receita Operacional Líquida (ROL), seria de no mínimo 0,65% em P&D do setor elétrico e 0,25% em programas de eficiência energética (BRASIL, 2000).

Um outro tipo de abordagem foi estabelecido, por exemplo, com a Lei 10.295 de Outubro de 2001, chamada Lei da Eficiência Energética, assinada num momento de crise no setor elétrico com o objetivo de reduzir o consumo de equipamentos através da eficiência energética. O foco da Lei da Eficiência Energética é o desempenho técnico e a redução do consumo de energia por meio de normas e padrões que assegurem que produtos e processos sejam energeticamente eficientes. A abordagem é voltada à regulamentação do mercado para promover a inovação tecnológica e garantir que novos produtos atendam a critérios mínimos de eficiência (BRASIL, 2001) (HADDAD, 2005).

A Lei nº 12.212/2010 representa um aprimoramento de políticas públicas de eficiência energética anteriores, ao estabelecer que concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica destinem, no mínimo, 60% dos recursos de seus programas de eficiência energética às unidades consumidoras cadastradas na Tarifa Social de Energia Elétrica (TSEE). Essa medida visa promover o acesso a programas de eficiência energética às populações vulneráveis, que, em geral, apresentam menor capacidade financeira para investir em medidas de redução do consumo de energia elétrica (BRASIL, 2010).

A combinação destas iniciativas demonstra a complexidade e importância de haver uma combinação entre o aumento de disponibilidade de energia e atuações no gerenciamento de cargas, bem como parceria entre diferentes setores em programas de eficiência, através da articulação institucional com atores responsáveis pela concepção e aplicação de políticas públicas.

2.1.4.1 Resultados dos programas de eficiência energética no Brasil

Os resultados dos programas e leis de eficiência energética, demonstram os impactos dos programas de eficiência energética no âmbito econômico e ambiental. Cada ação de eficiência tem seus índices divulgados de forma distinta.

No portal PROCEL Info, por exemplo, estão disponíveis relatórios anuais dos resultados da política de 1996 e de 2003 a 2022. O Programa de Eficiência Energética (PEE) da ANEEL faz a divulgação de seus resultados através do Observatório do Programa de Eficiência Energética – OPEE, fornecendo ao usuário índices que compõem o programa, oriundos de uma amostra de 1514¹ projetos. Além de relatórios oficiais, alguns estudos propõem metodologias que auxiliam na avaliação dos impactos das ações de eficiência, tanto no setor elétrico quanto no âmbito ambiental.

Em estudo conduzido para avaliar os impactos da Lei da Eficiência Energética, considerou-se o modelo de vendas de equipamentos elétricos mais eficientes em função das portarias interministeriais que definem os índices mínimos de eficiência. O modelo de vendas foi aplicado para refrigeradores, condicionadores de ar, motores elétricos e lâmpadas eficientes para definir a redução de consumo e demanda de energia elétrica. A estimativa aponta para uma redução acumulada de 182,8 GWh e uma redução de demanda na ponta de 70MW no ano de 2010 (NOGUEIRA *et al.*, 2015).

Uma outra pesquisa apresenta uma estimativa da redução de emissões associadas aos programas de eficiência energética de três iniciativas: - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), Lei da Eficiência Energética e Programa de Eficiência Energética (PEE) da ANEEL entre os anos de 2008 e 2015. A proposta metodológica do estudo realizou a desagregação da economia de energia para avaliar os resultados por região geográfica, setor econômico e sazonalidade. Em função dos dados disponíveis para cada uma das iniciativas, foram estimadas emissões evitadas de 26,2 Milhões tCO₂ no PROCEL; 1,42 Milhões tCO₂ no PEE ANEEL; e 3,8 Milhões tCO₂ na Lei de Eficiência Energética. Ainda de acordo com o estudo, a razão entre a redução de emissões e a energia economizada pelo método proposto pelo MCTI foi de 0,075 tCO₂evitado/MWh_{economizado}. Utilizando a análise de despacho, a razão encontrada foi de 0,329 e 0,332 tCO₂evitado/MWh_{economizado} para o PEE ANEEL e PROCEL, respectivamente (VIEIRA; NOGUEIRA; HADDAD, 2018).

Tais estudos se debruçaram na investigação da eficiência energética com a finalidade de estimar as emissões evitadas pelas políticas públicas e

¹ Informação do tamanho da amostra foi obtida em 20/09/2023.

programas desenvolvidos no Brasil. Entretanto, é escasso na literatura trabalhos que discutam a possibilidade de gerar e negociar créditos de carbono provenientes do serviço ambiental prestado pelas ações de eficiência energética no setor elétrico.

2.2 Política de Referência

O RenovaBio é um exemplo relevante de mercado regulado nacional e pode fornecer informações para o desenvolvimento de um futuro sistema de comércio de emissões. A política aborda especificamente as emissões de gases de efeito estufa no setor de biocombustíveis, estabelecendo metas de descarbonização e criando um mecanismo de comercialização de créditos de descarbonização. Essa abordagem pode servir como referência para a implementação de um sistema de comércio de emissões mais amplo, abrangendo outros setores da economia.

O estudo do RenovaBio possibilita a identificação dos desafios e benefícios da criação de um mercado regulado para redução de emissões no Brasil. Aspectos como definição de metas, monitoramento e verificação das emissões, estabelecimento de padrões de certificação e integração com políticas públicas existentes podem ser analisados para aprimorar a concepção de um sistema de comércio de emissões no futuro. Ou seja, o estudo da política pode contribuir para identificar os atores envolvidos, as interações entre os setores público e privado, os mecanismos de incentivo e as melhores práticas na implementação de um mercado regulado de carbono.

2.2.1 Contexto da Criação da RenovaBio

O histórico das políticas de incentivo ao etanol inicia-se no ano de 1931 com o Decreto nº 19.717, que obrigava a adição de 5% de etanol na gasolina importada. Já a criação do Programa Nacional do Alcool (PROALCOOL) foi resposta à crise do petróleo da década de 1970 (BRASIL, 1976).

O incentivo ao biodiesel teve como política principal a criação do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), lançado em 2004 que deveria promover a diversificação de culturas utilizadas na produção de biodiesel. Porém em 2016 cerca de 75% do biodiesel produzido era proveniente de soja. O programa previa ainda que cerca de 200 mil pequenos produtores

rurais participariam do programa, fornecendo grãos através da emissão do Selo Combustível Social (SCS), entretanto em 2015 esse número era de pouco mais de 72 mil produtores (MORENO-PÉREZ; MARCOSSI; ORTIZ-MIRANDA, 2017). O RenovaBio seria, portanto, uma oportunidade de expandir o consumo de biocombustíveis sustentáveis, incluindo os de segunda geração, observando equívocos anteriores e preenchendo lacunas no mercado produtor e importador de biocombustíveis.

O RenovaBio surge como uma política fundamental no setor de biocombustíveis, meio a outras estratégias adotadas pelo Brasil, como estratégia para cumprir a NDC nacional (DOĞAN *et al.*, 2022). A política foi instituída pela Lei N° 13.576, de 26 de dezembro de 2017 tendo como principais instrumentos as metas de descarbonização, a certificação da produção eficiente de biocombustíveis e o crédito de descarbonização, apresentando no Artigo 1° seus objetivos, com a finalidade de:

I - Contribuir para o atendimento aos compromissos do País no âmbito do Acordo de Paris sob a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima;

II - Contribuir com a adequada relação de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, na comercialização e no uso de biocombustíveis, inclusive com mecanismos de avaliação de ciclo de vida;

III - Promover a adequada expansão da produção e do uso de biocombustíveis na matriz energética nacional, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e

IV - Contribuir com previsibilidade para a participação competitiva dos diversos biocombustíveis no mercado nacional de combustíveis.

O RenovaBio foi pensado como estratégia de combate as mudanças climáticas, pois enquanto em outros países o desafio da redução de emissões está relacionado ao setor elétrico, as emissões brasileiras estão concentradas principalmente no setor de transportes.

Como apontado, o PROALCOOL surgiu como resposta à crise do petróleo na década de 1970; já o PNPB surge a partir de discussões sobre desenvolvimento sustentável do início dos anos 2000. Entretanto, ao longo dos anos houve uma convergência de motivações para o incentivo destes biocombustíveis, quando as políticas públicas passaram a ser instrumentos regulatórios que garantissem inclusão social e atenção às questões climáticas e ambientais. Assim, a indústria de biocombustíveis no Brasil passou a aproveitar os recursos naturais e as condições ambientais favoráveis para promover

crescimento socioeconômico sustentável (RUTHERFORD, 2016) (GALLINA; DE OLIVEIRA CRUZ; MATIAS, 2017).

Há na criação do RenovaBio, além do incentivo à expansão da produção e do consumo de biocombustíveis, a expectativa de que a política pública seja uma resposta a falhas de instrumentos anteriores.

A valorização da eficiência no programa RenovaBio ocorre por meio do mecanismo de certificação que atribui a cada produtor de biocombustível uma Nota de Eficiência Energético-Ambiental (NEEA), baseada na redução de emissões de gases de efeito estufa em comparação com combustíveis fósseis. Quanto maior a eficiência energética e ambiental do processo produtivo (considerando fatores como matérias-primas utilizadas, tecnologias empregadas e práticas agrícolas sustentáveis), maior será a Nota de Eficiência atribuída. Essa nota determina a quantidade de créditos que a produtora pode emitir para cada unidade de biocombustível comercializada. Assim, usinas com maior eficiência ambiental conseguem emitir mais CBIOS por volume de biocombustível produzido, gerando um incentivo econômico direto para investimentos em processos produtivos mais sustentáveis.

Este mecanismo recompensa produtores que se destacam na redução de emissões, refletindo o valor do serviço ambiental prestado e estimulando a adoção de tecnologias de ponta e práticas que maximizem a sustentabilidade do biocombustível. No entanto, existem incertezas quanto à atratividade de aderir ao programa RenovaBio, principalmente relacionadas à volatilidade do preço do C BIO. O mercado de CBIOS em operação apresentou crescente liquidez, entretanto, a volatilidade de preços e sua estabilidade a longo prazo despertou incertezas no seu lançamento. Apesar desta desconfiança inicial, o ativo tem mostrado potencial para gerar receitas significativas aos produtores de biocombustíveis, e apesar da variação no valor de negociação o ritmo de adesão ao programa e o nível de investimentos em eficiência energética no setor segue em expansão. (GRASSI; PEREIRA, 2019) (HUGHES *et al.*, 2020).

Nos mercados internacionais, muitos países criaram barreiras comerciais aos biocombustíveis brasileiros, com a finalidade de forçar o desenvolvimento de seus respectivos mercados internos, mesmo reconhecendo a importância do Brasil como país estratégico na mitigação de mudanças climáticas. Enquanto o pioneirismo brasileiro no setor de biocombustíveis

consolidou-se ao longo dos anos, nos países da União Europeia, por exemplo, os biocombustíveis continuaram sendo um complemento marginal dos combustíveis fósseis.

Críticos dos incentivos públicos ao programa alertaram para a possibilidade de que o crescimento da produção de biocombustíveis fosse acompanhado pelo aumento do desmatamento e por conflitos no campo. Por outro lado, entusiastas defenderam que as tecnologias agrícolas modernas poderiam elevar a produção sem a necessidade de expandir a área cultivada. Persistiram, contudo, preocupações de que, diante de uma gestão inadequada, a expansão da produção de biocombustíveis no Brasil incentivasse monoculturas de cana-de-açúcar e soja. Essas monoculturas, ao desconsiderarem a dinâmica do uso do solo, poderiam gerar impactos ambientais adversos, como a contaminação do solo e da água, além de ameaças à biodiversidade. Tais cenários, entretanto, dependem de variáveis como a implementação de regulamentações ambientais rigorosas e de práticas adequadas de manejo de defensivos, que também compõem a estratégia para obtenção de notas de eficiência mais elevadas (SILVEIRA; JOHNSON, 2016).

As tecnologias associadas ao etanol de primeira geração já se encontram consolidadas; contudo, para manter sua competitividade e liderança em inovação, o Brasil precisa avançar no desenvolvimento e na incorporação de novos bioprodutos não convencionais, desde que apresentem viabilidade econômica e contribuam para a redução dos impactos ambientais. A adoção de ações e/ou benefícios aos produtores de biocombustíveis não convencionais pode estimular sua produção principalmente quando considerado o retorno financeiro associado às negociações de CBIOs (KLEIN *et al.*, 2019) (CARVALHO *et al.*, 2020b).

Diante de um cenário de transição e de inserção de novos insumos no setor de transportes, houve o envolvimento de diferentes agentes no mercado de biocombustíveis, no qual políticas públicas de incentivo à produção com cunho ambiental explícito tiveram início no Brasil apenas em 2005. A influência de agentes comerciais externos pode ter provocado a mudança de discurso e perspectivas relacionadas aos biocombustíveis, especificamente etanol e biodiesel.

O Brasil, em comparação com outros países iniciou a valorização de

biocombustíveis estando na vanguarda da redução de emissões de gases do efeito estufa, mesmo quando a questão de mudanças climáticas não estava explícita. Portanto, deve-se considerar quais os interesses do país ao fomentar a expansão do consumo de biocombustíveis, em equilíbrio com a promoção da segurança energética, crescimento econômico e redução de emissões.

2.2.2 Estrutura e Descrição do Funcionamento

O RenovaBio adicionou ao mercado físico de combustíveis do Brasil uma forma de remunerar a externalidade positiva dos biocombustíveis, ou seja, uma forma de atribuir valor ao serviço ambiental pela retirada de GEE da atmosfera. Assim, o mercado físico constituído por produtores, distribuidores, postos de venda e consumidores finais permaneceu inalterado. Na nova configuração da estrutura do mercado de biocombustíveis, ilustrada de forma resumida na Figura 2.5, e detalhada no Anexo I, são adicionados agentes e etapas comerciais que intermediam e influenciam o mercado físico.

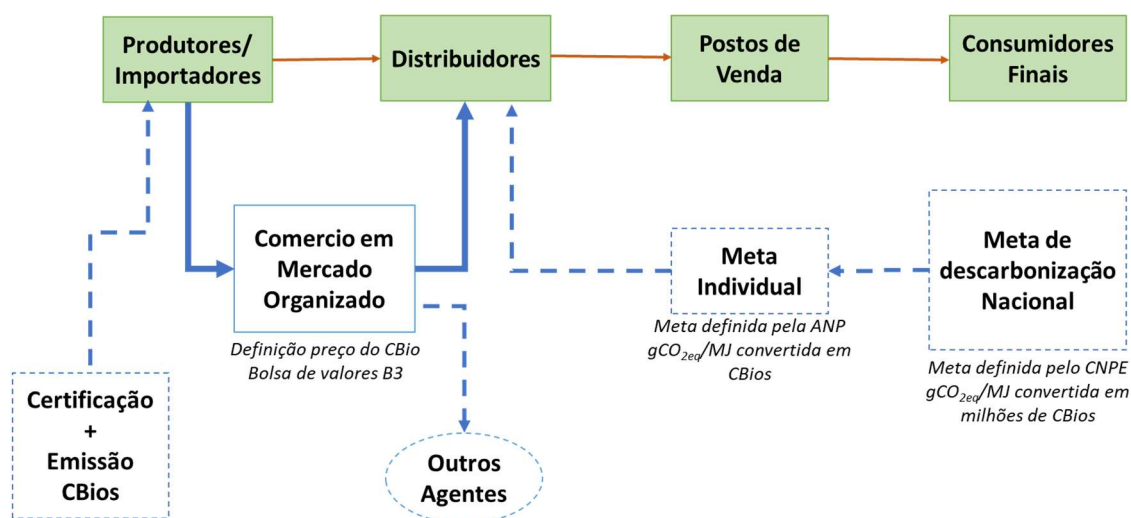


Figura 2.5 Resumo da Estrutura Física de Mercado do RenovaBio

Fonte: Adaptado de (MENDES, 2021)

Na nova configuração do mercado de biocombustíveis, os agentes têm papéis bem definidos, como mostrado na Figura 2.6.

O produtor/importador, também chamado de emissor primário, voluntariamente se certifica, para que seja autorizado a emitir CBIOs proporcionais a eficiência de seu processo produtivo. Os distribuidores

representam a parte obrigada ou mercado cativo, devendo adquirir créditos de descarbonização de acordo com a comercialização de combustíveis fósseis do ano anterior. A meta de descarbonização global é definida pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE), já a meta individualizada dos distribuidores de combustíveis fósseis é determinada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) em função do volume de combustíveis vendidos (EPE, 2018).

O Certificado de Produção Eficiente de Biocombustíveis (CPEB) e a Nota de Eficiência Energético-Ambiental são instrumentos centrais do RenovaBio, refletindo a capacidade dos produtores e importadores de biocombustíveis de reduzir as emissões de GEE. A NEEA é calculada por meio da ferramenta RenovaCalc, que realiza uma análise completa do ciclo de vida do biocombustível, desde o cultivo da matéria-prima até o seu uso final. Essa abordagem considera as emissões em todas as etapas produtivas, incluindo o plantio, processamento, transporte e distribuição, permitindo uma avaliação comparativa com os combustíveis fósseis. Quanto maior a eficiência ambiental ao longo desse ciclo, menor será a emissão e, portanto, maior será a nota atribuída ao biocombustível.

A NEEA, uma vez calculada, precisa ser certificada pela ANP. Esse processo de certificação envolve auditorias rigorosas de todo o ciclo de produção para garantir que as práticas adotadas pelos produtores atendam aos critérios estabelecidos pelo RenovaBio. Somente após a certificação e aprovação pela ANP é que a NEEA se torna válida, e o produtor está apto a emitir CBIOs. Esse mecanismo de auditoria garante que os biocombustíveis certificados realmente contribuam para a redução das emissões, promovendo transparência e confiança no mercado.

Após a comercialização do biocombustível, é emitido um volume de CBIOs proporcional à quantidade vendida e à NEEA certificada. A emissão dos créditos é realizada por um escriturador, geralmente uma instituição financeira, que também é responsável por reportar à ANP o montante de créditos disponibilizados, negociados e aposentados². Esses créditos são comercializados na Bolsa de Valores (B3), e os distribuidores de combustíveis

² O termo aposentado para os créditos significa que os créditos já foram comprometidos em contratos no mercado.

são obrigados a adquiri-los para atender às metas de descarbonização individualizadas estabelecidas pela ANP. Dessa forma, o RenovaBio incentiva a eficiência ambiental ao vincular diretamente o volume de CBIOs à performance energética e ambiental dos biocombustíveis, criando um mercado que valoriza práticas produtivas mais sustentáveis.

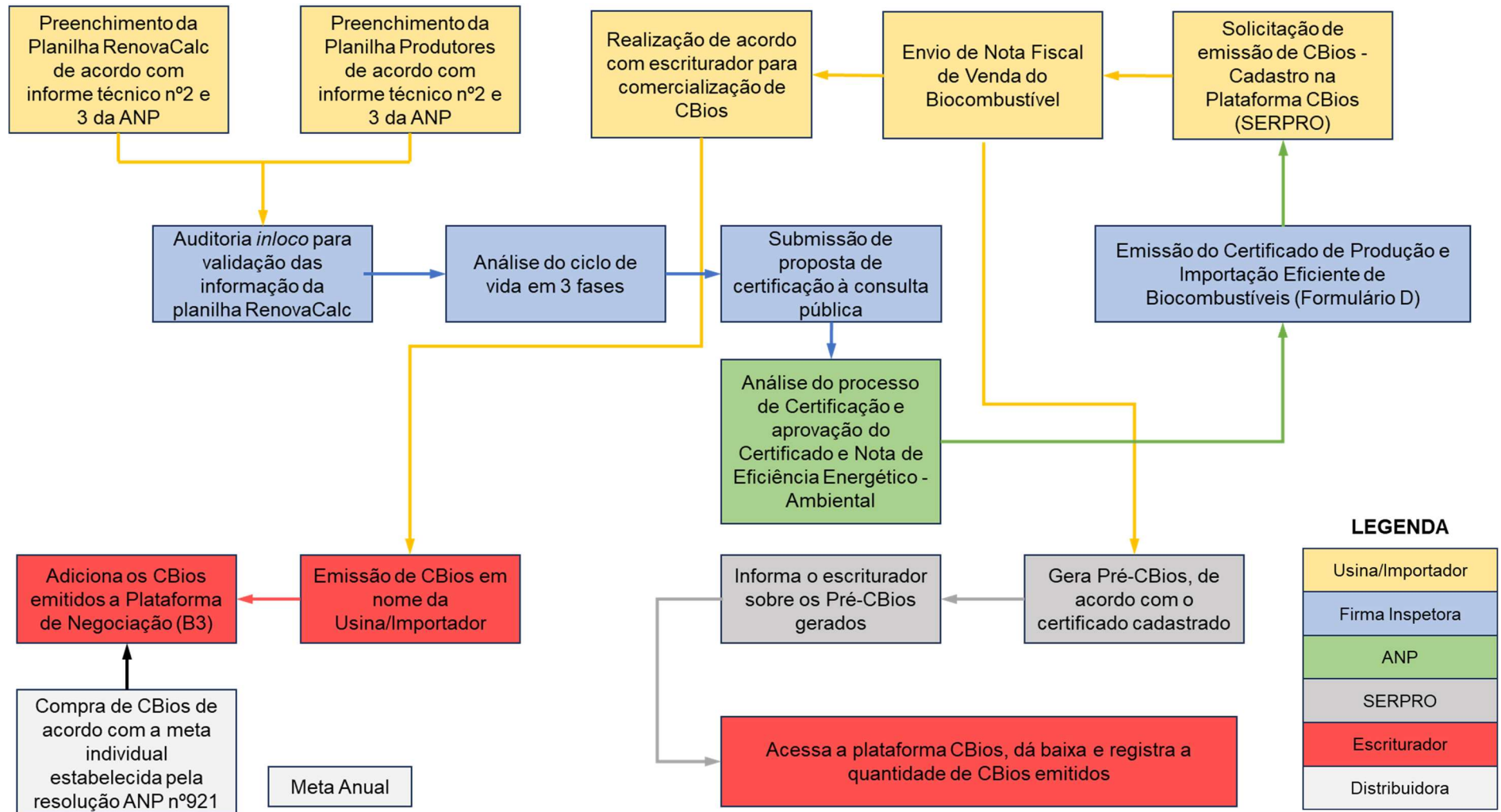


Figura 2.6. Fluxograma de ações dos agentes envolvidos no RenovaBio

Fonte: Adaptado de (EPE, 2018)

2.2.3 Importância para o Setor de Transportes

A importância do setor de transportes na questão climática brasileira dá-se pelo fato deste ser o maior responsável pelas emissões de GEE do país. De acordo com o BEN 2025 as emissões antrópicas associadas à matriz energética no país no ano de 2024 foram de aproximadamente 431 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente, deste total 214,3 MtCO_{2e} (49,69%) foi emitido pelo setor de transportes (EPE, 2025).

O incentivo ao consumo de biocombustíveis no setor de transporte ocorre no Brasil desde a década de 1930. A transição energética relacionada a redução da dependência de combustíveis fósseis no setor de transporte é vista como a principal motivadora das intervenções no mercado e políticas públicas de biocombustíveis.

Através de uma análise histórica da relação entre ações governamentais e transição bioenergética, percebe-se uma simetria entre as políticas públicas do setor e a transformação da indústria de veículos, atraídos por incentivos econômicos. A expansão da produção e do consumo de biocombustíveis ocorre, portanto, quando políticas públicas convergem com os interesses do mercado.

O papel do RenovaBio, principalmente no fortalecimento do mercado de biocombustíveis para transporte veicular, deixa de lado o caráter regulatório de preços na bomba. Do ponto de vista econômico, a combinação entre preço e consumo de combustíveis ao longo da história chama atenção o controle de preços nas políticas já desenvolvidas. O RenovaBio foi implementado num cenário de alta de preços de biocombustíveis, mesmo assim o consumo subiu no período seguinte. Em uma estimativa das opções mais econômicas para redução de emissões em frotas veiculares, os veículos do tipo *flex* apresentam a melhor opção para o incentivo ao uso de biocombustíveis, em segundo lugar aparecem os veículos pesados, que percorrendo longas distâncias também apresentam um bom custo-benefício na utilização do biodiesel (RODRÍGUEZ-MORALES, 2018), (BENVENUTTI; URIONA-MALDONADO; CAMPOS, 2019), (TEIXEIRA *et al.*, 2020) (GOES *et al.*, 2020).

Além da finalidade de reduzir as emissões de dióxido de carbono, a política estimula, por exemplo o aumento da frota de veículos leves do tipo *flex* e o consequente aumento o consumo de etanol. A preocupação é de que esta

prática possa causar pressão no uso da terra para produção de biocombustíveis, em detrimento da produção de gêneros alimentícios. Daí a importância de se promover a efficientização do processo produtivo e a adoção de novas tecnologias produtivas com capacidade para expandir a produção sem necessariamente aumentar o uso e ocupação do solo por culturas bioenergéticas.

2.2.4 Desafios do RenovaBio

A complexidade envolvendo a produção de biocombustíveis reside na relação de dependência com o consumo de energia e água, a produção de gêneros alimentícios e o uso e ocupação da terra, demonstrando haver possíveis dificuldades do RenovaBio em atender interesses distintos.

Embora exista uma preocupação legítima quanto à influência das políticas públicas sobre conflitos fundiários, é importante considerar que críticas a essas políticas muitas vezes são influenciadas pelo protecionismo de mercados internacionais, o que deve ser devidamente observado nas análises. Quando comparada com políticas semelhantes aplicadas a outros membros do BRICS e na Alemanha, o pioneirismo brasileiro na implementação de políticas de incentivo aos biocombustíveis e à eficiência energética é evidente em função da utilização de alternativas menos poluentes que os combustíveis fósseis (SARAVANAN; PUGAZHENDHI; MATHIMANI, 2020).

O Brasil constituiu-se como uma autoridade no setor de biocombustíveis, sendo reconhecido por sua performance ambientalmente positiva, apesar das contradições relacionadas as monoculturas de cana-de-açúcar e soja. Destaca-se por possuir condições climáticas adequadas e grande disponibilidade de terra para o cultivo de matérias-primas para a produção de biocombustíveis da primeira geração. Embora o RenovaBio incorpore critérios de certificação ambiental e restrições quanto ao uso de vegetação nativa, ele ainda não aborda plenamente as interações entre produção de energia, alimentos, uso da água e biodiversidade. Assim, apesar dos avanços recentes, permanecem lacunas regulatórias que limitam a capacidade do programa de tratar de forma integrada esses desafios (MERCURE *et al.*, 2019) (TAKAES SANTOS, 2020).

A correlação entre energia, água e alimentos é de grande valia para o desenvolvimento de políticas públicas no Brasil, em função das características

da produção e consumo de energia. O discurso consolidado é de que existe uma competição entre energia e produção de alimentos, estimulada pelos biocombustíveis. Desta forma, não considerar quesitos como disponibilidade de terras e água, a qualidade do solo e o uso de agroquímicos, pode acarretar o uso ineficiente dos recursos disponíveis para produção de biocombustíveis e, portanto, impactar na emissão de créditos de descarbonização. Ou seja, não discutir a interdependência entre tais setores por si só caracteriza uma fragilidade da política pública (BENITES-LAZARO *et al.*, 2020)

Para além da complexidade, o mecanismo político tem forte influência econômica no setor. Em pesquisas pelos termos “RenovaBio” e “política”, palavras como produção, sustentabilidade, ambiente, energia, gerenciamento, segurança e CBIO, sendo a última de maior ocorrência, são encontradas. Com isso nota-se que além do caráter ambiental associado ao RenovaBio, as discussões que envolvem a política estão também fortemente relacionadas à comercialização do crédito de descarbonização, CBIO (BENITES LAZARO; GIATTI; PUPPIM DE OLIVEIRA, 2021).

2.2.5 Resultados Ambientais e Econômicos do RenovaBio

A ANP disponibiliza Painéis Dinâmicos do RenovaBio que apresentam análises e a visualização interativa de dados consolidados referentes ao programa. No Painel Dinâmico de Certificação do RenovaBio, estão disponíveis informações sobre firmas inspetoras e unidades produtoras de biocombustíveis certificados, além de informações consolidadas referentes à NEEA, rota de produção de biocombustíveis certificados etc.

O Painel Dinâmico da Plataforma CBIO - RenovaBio é disponibilizado pelo Serviço Federal de Processamento de Dados (SERPRO), envolvido no processo de comercialização dos créditos, e contém informações referentes ao cumprimento de metas ambientais compulsórias de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa. As informações disponibilizadas apontam para a consolidação do Renovabio como política pública de estímulo à eficiência energética desde a sua criação em 2018.

2.2.5.1 Painel Dinâmico de Certificação de Biocombustíveis Renovabio

Os organismos credenciados para realizar a certificação de

biocombustíveis e emitir o CPEB e a NEEA, entre 2018 e junho de 2025 emitiram 325 certificações a produtores e importadores de biocombustíveis. Usinas produtoras e importadoras autorizadas são aquelas que podem comercializar biocombustível, enquanto as certificadas além da atividade comercial autorizada pela ANP, estão habilitadas a solicitar a emissão de CBIO. Dentre as certificações emitidas destaca-se o etanol anidro e hidratado ou apenas etanol hidratado que correspondem respectivamente a 61% e 26% das certificações. O Biodiesel corresponde a 12% dos certificados emitidos, enquanto biometano corresponde a 1%, conforme Figura 2.7.

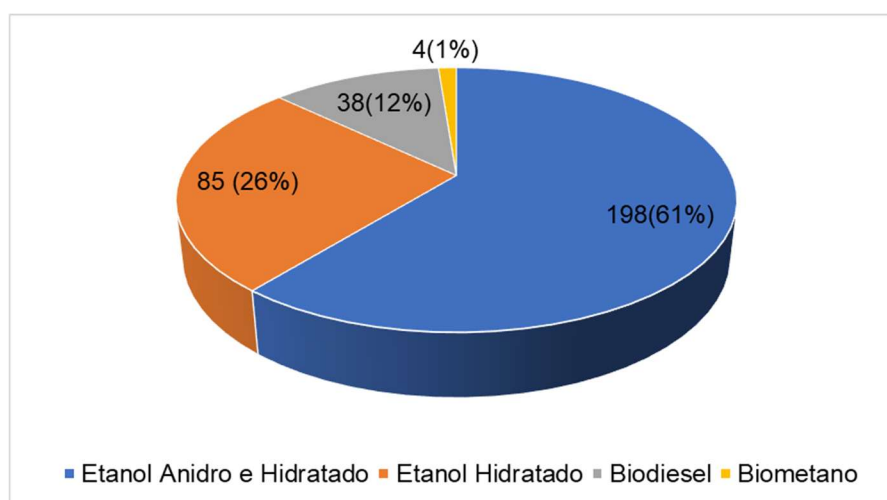


Figura 2.7 Processos Certificados por Tipo de Biocombustível

Fonte: (ANP, 2025b)

Em 2025, 440 produtores e importadores de biocombustíveis estavam autorizados pela ANP a produzir biocombustíveis. A Figura 2.8 apresenta a proporção das usinas autorizadas que possuem CPEB e consequentemente habilitadas a solicitar a emissão de CBIO. Observa-se, portanto, que 286 (79%) produtores de etanol, 38 (56%) produtores de biodiesel e 5 (42%) produtores de biometano são certificados pela ANP.

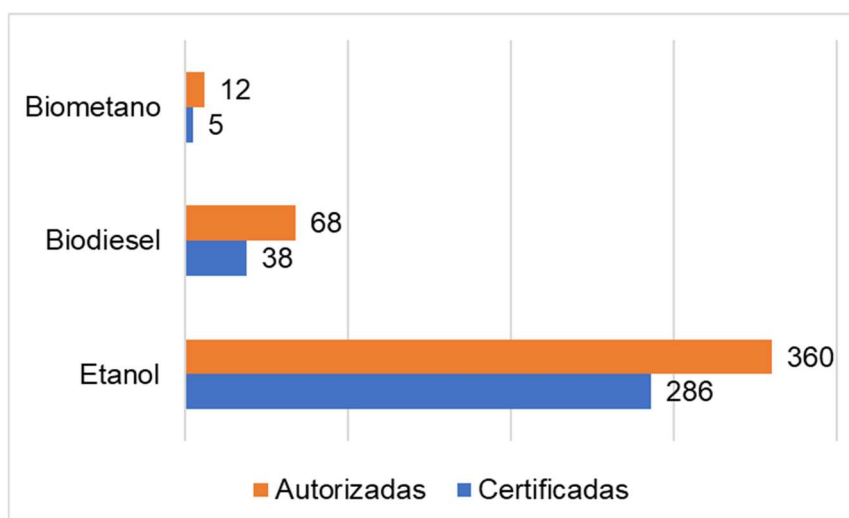


Figura 2.8 Produtores de Biocombustíveis Autorizados e Certificados

Fonte: (ANP, 2025b)

2.2.5.2 Painel Dinâmico da plataforma CBIO RenovaBio

O Painel Dinâmico da Plataforma CBIO RenovaBio apresenta dados relativos à escrituração, aposentadoria e negociação de CBIOs. A plataforma foi desenvolvida e é abastecida por dados do SERPRO, cujo serviço é contratado por produtores e importadores de biocombustíveis certificados, mediante pagamento de taxa por nota fiscal emitida, com CPEB aprovado pela ANP. As distribuidoras também devem contratar o serviço do SERPRO, para acompanhamento e controle de suas respectivas metas compulsórias de redução de emissões.

A meta global compulsória anual de descarbonização do RenovaBio é definida anualmente pelo CNPE e sua base de cálculo é definida considerando: o tamanho do mercado de combustíveis; a participação de mercado das unidades certificadas; as NEEAs geradas; o volume elegível da produção certificadas; além da emissão do setor e da meta anual fixada no ano anterior (MME, 2021a).

Na Figura 2.9 observa-se as metas estabelecidas pelo CNPE e o volume de créditos de descarbonização acumulados ao longo dos anos. Em seu primeiro ano de negociações, 2020, a meta global foi alcançada no mês de novembro, no ano seguinte entre os meses de agosto e setembro a meta de quase 25 milhões de CBIOs foi ultrapassada, ocorrendo situação semelhante nos anos seguintes.

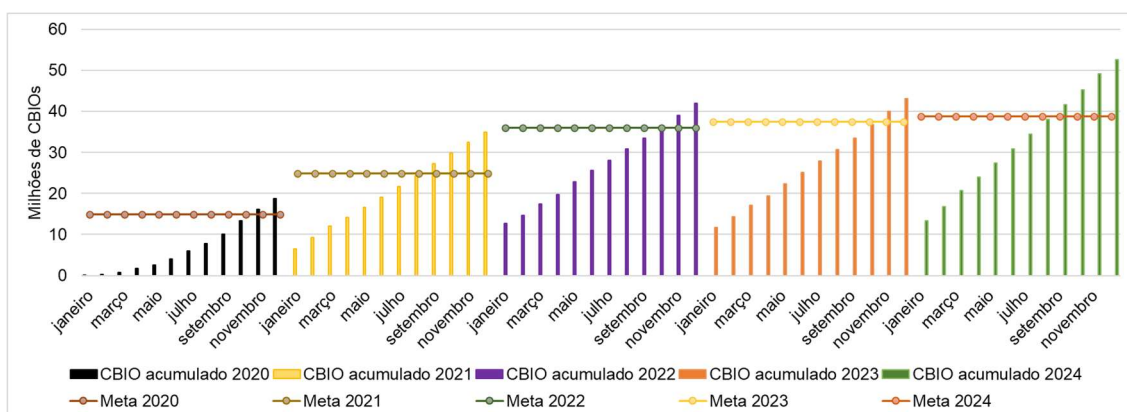


Figura 2.9 Emissão de CBIOs por Período

Fonte: (ANP, 2025a)

Os dados das negociações definitivas de CBIOs na Bolsa B3, são importados e disponibilizados graficamente no painel dinâmico. Dados diários de preço mínimo, médio e máximo, o número de negociações e a quantidade de CBIOs negociados, estão disponíveis na plataforma. Na Figura 2.10 é possível observar que o CBIO atingiu seu maior preço médio no dia 30 de junho de 2022, custando R\$ 202,65. Os maiores volumes negociados foram observados nos anos 2020 e 2021, cerca de 2 milhões de créditos, no dia 22 de outubro de 2020, quando o preço médio foi de R\$ 54,8 e dia 20 de setembro de 2021, com preço médio de R\$ 44,85.

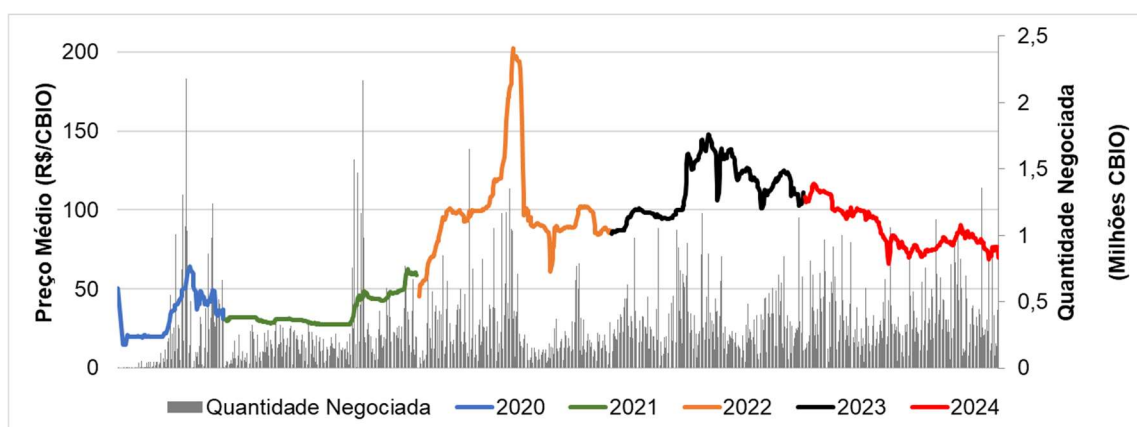


Figura 2.10 Quantidade Negociada e Preço Médio Diário de CBIO

Fonte: (B3, 2025)

O RenovaBio apresenta resultados ambientais positivos desde sua implementação, superando, as metas anuais de créditos de descarbonização. O programa tem contribuído para o aumento da participação de biocombustíveis

na matriz energética brasileira, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes. Através das metas de descarbonização estabelecidas, o RenovaBio tem incentivado a produção e o consumo de biocombustíveis de baixo carbono, impulsionando a indústria nacional. Além disso, o mecanismo de créditos tem gerado um mercado dinâmico, proporcionando oportunidades econômicas para os produtores e importadores de biocombustíveis e promovendo investimentos em tecnologias mais limpas. Os resultados alcançados até o momento demonstram que o RenovaBio está desempenhando um papel importante na redução das emissões do país.

3. METODOLOGIA

O serviço ambiental no contexto das políticas públicas de eficiência energética está diretamente ligado à capacidade dessas políticas de promover a redução de emissões. O comércio de créditos de carbono atua como um mecanismo que valoriza financeiramente esse serviço ambiental, ao quantificar e negociar as reduções de emissões obtidas. Dessa forma, as políticas de eficiência energética, ao incentivar o uso mais racional e eficiente de energia, geram uma diminuição na demanda por fontes energéticas mais poluentes e, conseqüentemente, na emissão de GEE. Essa redução é convertida em créditos de carbono que podem ser negociados no mercado, criando uma intersecção entre benefícios ambientais e econômicos. Assim, o comércio de créditos de carbono não apenas reforça o valor do serviço ambiental prestado pelas políticas públicas, como também cria incentivos econômicos para a adoção de tecnologias e práticas mais eficientes no setor energético.

Este capítulo apresenta uma estimativa do serviço ambiental, em termos de emissões evitadas, prestado pelos programas PROCEL e PEE ANEEL, com a finalidade de analisar o comportamento de políticas públicas de eficiência energética no setor elétrico no Brasil.

3.1 Estimativa de Serviço Ambiental

3.1.1 Aquisição de dados de economia de energia

O PROCEL elabora e divulga seus resultados anuais, na forma de relatórios disponibilizados no portal PROCEL Info³. Entre os anos de 2003 e 2013 além dos resultados globais, foram disponibilizados também resultados por uso final e participação das regiões geográficas. Ao longo dos anos houve mudanças na forma de divulgação dos resultados, estando disponíveis a partir de 2017 apenas resultados globais.

O OPEE ANEEL disponibiliza informações dos projetos em seu portal de dados abertos⁴ e no portal Gestão do Programa de Eficiência Energética⁵ do MME, ferramenta virtual que disponibiliza um relatório das economias médias

³ Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética: <http://www.PROCELInfo.com.br/>

⁴ <https://dadosabertos.ANEEL.gov.br/dataset/projetos-de-eficiencia-energetica>

⁵ Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética: <https://www.gov.br/ANEEL/pt-br/centrais-de-conteudos/relatorios-e-indicadores/ped-e-ee>

anuais por estado, por tipologia e por empresa. Porém, em função do grande volume de dados os índices do programa são disponibilizados com relação a amostras.

Vale salientar que a consistência dos dados e sua divulgação adequada são essenciais para estudos sobre economia de energia. A variabilidade na forma como os dados são apresentados ao longo do tempo, com mudanças na granularidade e no nível de detalhamento, cria desafios para análises precisas. Dados inconsistentes ou divulgados de maneira fragmentada podem dificultar a comparação entre diferentes períodos e regiões, além de comprometer a precisão das estimativas de economia de energia.

Neste contexto, a utilização de fontes secundárias torna-se crucial para preencher lacunas e fornecer uma análise mais completa e robusta. Assim, garantir a disponibilidade de dados detalhados e consistentes ao longo do tempo é fundamental para estudos que buscam avaliar o impacto de políticas e programas de eficiência energética.

Desta forma, os resultados dos programas são apresentados de maneira distinta em função da disponibilidade e da forma como os dados são divulgados. A padronização na apresentação dos dados é fundamental, pois o tratamento consistente das informações facilita análises comparativas e contribui para a confiabilidade dos estudos atuais e futuros. Sendo assim, analisam-se os resultados dos programas PROCEL e PEE ANEEL durante os períodos descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Período de análise dos programas de eficiência energética

Iniciativa de Eficiência Energética	Início	Período analisado
PROCEL	1995	2016 - 2022
PEE ANEEL	2000	2014 - 2022

3.1.2 Tratamento de dados das economias de energia

A estimativa da economia de energia foi realizada considerando a participação dos usos finais nos respectivos setores econômicos e localização. Para tanto, os dados foram tratados e normalizados, garantindo assim uma maior

integridade dos resultados apresentados, mesmo na avaliação de políticas distintas.

3.1.2.1 Desagregação Setorial

A estimativa da economia de energia por uso final nos respectivos setores econômicos é baseada na metodologia de desagregação de dados desenvolvida por Vieira (2016). A desagregação setorial das economias de energia para os usos finais permite que o estudo vá além de uma análise agregada e capture algumas particularidades que cada uso final tem em diferentes contextos setoriais. Essa abordagem é especialmente interessante porque a demanda e o impacto de tecnologias de eficiência energética variam consideravelmente entre os setores industrial, comercial e residencial.

Esta análise tem por finalidade identificar lacunas das políticas de eficiência energética e definir dentre os setores econômicos os participantes do mercado de carbono a ser proposto.

- **PROCEL**

O PROCEL apresentou resultados sobre a participação setorial na economia de energia em 2009 e, parcialmente, em 2013 (condicionadores de ar e lâmpadas). Os dados indicam que a participação setorial experimentou variações ao longo do tempo. A inclusão de novos equipamentos contemplados por programas de eficiência, assim como a variabilidade climática e fatores ambientais, são elementos que podem explicar as mudanças na participação de equipamentos na economia de energia nos setores ao longo dos anos.

A distribuição setorial de sistemas de aquecimento de água disponibilizada pela ABRASOL, por exemplo, no período entre 2017 e 2022, abrange as categorias residencial, comercial, industrial, projetos sociais e serviços. Entretanto, na presente análise, são apreciadas as categorias residencial, comercial e industrial.

A decomposição setorial da economia de energia foi considerada conforme detalhado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 Taxa de distribuição setorial dos usos finais- PROCEL

Uso Final	Setor Econômico	Taxa de Participação	Fonte
Condicionamento ambiental	Residencial	57%	Eletrobrás/PROCEL (2013) ⁶
	Comercial	30%	
	Industrial	13%	
Aquecimento de água	Residencial	74%	ABRASOL (2023) ⁷
	Comercial	19%	
	Industrial	6%	
Iluminação	Residencial	80%	Eletrobrás/PROCEL (2013)
	Comercial	11%	
	Industrial	9%	
Força Motriz	Industrial	100%	Valor Considerado
Refrigeração	Residencial	100%	Valor Considerado
Ventilação	Residencial	100%	Valor Considerado

A desagregação setorial, demonstrada na Equação 3.1, possibilita uma avaliação mais detalhada e precisa das economias de energia e consequentemente das emissões evitadas. Esta análise, portanto, destaca onde as políticas de eficiência energética têm maior impacto e identifica oportunidades para otimizar o uso de recursos e maximizar a eficácia dos programas e políticas de eficiência energética nos respectivos setores econômicos.

$$EE_{ist} = EE_{it} \times V_{ist} \quad (3.1)$$

Na qual:

- EE_{ist} - Economia de energia para o uso final i no setor s no ano t (MWh);
- EE_{it} - Economia de energia global associado ao uso final i no ano t (MWh)
- V_{ist} - Taxa de distribuição de vendas do uso final i no setor s no ano t (%);

• PEE ANEEL

Os resultados referentes à economia de energia do PEE ANEEL em termos setoriais são apresentados com base em um recorte do programa, em

⁶ A participação dos setores comércio e indústria são apresentados em conjunto, representando 43% da economia de energia em 2013. Logo considerou-se que os setores comercial e industrial foram responsáveis por 30% e 13% respectivamente.

⁷ Foi adicionado ao setor residencial 1% de participação, referente a projetos sociais. O setor comercial na análise abrange os setores de comércio e serviços.

virtude do caráter sigiloso de algumas informações e do elevado volume de dados disponíveis.

Foi selecionada uma amostra inicial contendo informações sobre projetos de eficiência por empresa proponente, a partir de um conjunto de 7.244 projetos desenvolvidos. A planilha selecionada inclui informações sobre a distribuidora responsável pelo projeto, tipologia do projeto, demanda retirada da ponta, valor anual de energia economizada, dentre outros.

Os dados brutos foram tratados de forma a considerar projetos que abrangessem um único tipo de uso final. Diversas iniciativas incluem ações de eficiência combinadas, como substituição de lâmpadas, refrigeradores e instalação de sistemas de aquecimento de água em um mesmo projeto. No entanto, devido à indisponibilidade de informações detalhadas sobre cada ação específica, projetos com essas características foram excluídos da análise. Após o tratamento dos dados, obteve-se uma amostra final de 765 entradas.

Considerando que as concessionárias de distribuição podem investir a maior parte do recurso⁸ dos programas de eficiência energética em unidades consumidoras beneficiadas pela Tarifa Social de Energia Elétrica (TSEE), ou seja, no setor residencial, observa-se uma predominância de dados relativos a este setor. Assim, a participação dos setores econômicos na amostra selecionada está descrita na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 Participação setorial da amostra - PEE ANEEL

Setor Econômico	Número de projetos avaliados	Participação na amostra
Residencial	455	59%
Comercial	243	32%
Industrial	67	9%

A Equação 3.2 calcula uma estimativa da economia de energia dos projetos no âmbito do PEE ANEEL considerando o momento em que as ações de eficiência energética são encerradas, o que oferece uma estimativa conservadora adequada, ao alinhar as economias de energia com o período em que os benefícios de eficiência realmente começam a ser percebidos.

⁸ De acordo com a Lei 9.991/2000 as concessionárias podem aplicar até 80% dos recursos dos programas de eficiência energética em unidades consumidoras beneficiadas pela Tarifa Social de Energia Elétrica, em comunidades de baixa renda e em comunidades rurais.

$$EE_{fim} = \frac{EE_{ano}}{365} \cdot n \quad (3.2)$$

Na qual:

- EE_{fim} – Energia economizada no ano final do projeto (MWh);
- EE_{ano} – Média de economia de energia por ano (MWh/ano)
- 365 – Número de dias no ano;
- n – Duração do projeto (dias)

Este tipo de abordagem com o fator de ajuste temporal n , é fundamental para distribuir a economia de energia ao longo do período em que o projeto está ativo, garantindo que o cálculo reflita o tempo de implementação das ações de eficiência energética. Isto aplica-se sobretudo para equipamentos cuja vida útil pode ser inferior a duração do projeto, como no caso de projetos de iluminação, pois deve-se considerar a redução de eficiência pela degradação do equipamento.

3.1.2.2 *Desagregação Regional*

A normalização dos dados de economia de energia foi realizada de maneiras distinta em função da forma de divulgação dos resultados da política. Além disso a proposta deste estudo é estabelecer uma metodologia que garanta a justa distribuição dos créditos de carbono entre os diferentes subsistemas do SIN. A economia de energia em uma região nem sempre significa redução direta das emissões locais, já que a eletricidade pode estar sendo gerada em outro subsistema.

Desta forma, propõe-se a adoção de uma Fator de Transferência de Energia (FTE), como um indicador de autossuficiência de energia e, portanto, um fator de ponderação na distribuição de créditos de carbono associados ao consumo de energia elétrica.

O FTE, quando aplicado ao cálculo dos créditos de carbono emitidos garante que a quantidade seja proporcional às emissões evitadas em função de

dados da carga de energia dos subsistemas⁹ e do Intercâmbio líquido entre subsistemas¹⁰, fornecidos pelo ONS¹¹. Esta abordagem atribui maior responsabilidade ao subsistema gerador e ajusta os benefícios ambientais observados no subsistema consumidor. Logo, o cálculo do FTE deve refletir esta dinâmica, conforme apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 Cálculo do FTE em função da característica do subsistema do SIN.

Característica do Subsistema	Saldo do Intercâmbio de Energia (Si_{st})	FTE_{st}
Autossuficiente	$Si_{st} = 0$	$FTE_{st} = 1$
Importador líquido	$Si_{st} < 0$	$FTE_{st} = 1 + \frac{ Si_{st} }{Ce_{st}} > 1$ (3.3)
Exportador líquido	$Si_{st} > 0$	$FTE_{st} = \frac{Ce_{st}}{Ce_{st} + Si_{st}} < 1$ (3.4)

Nas quais:

- FTE_{st} – Fator de transferência de energia no subsistema s no ano t;
- Si_{st} - Saldo do intercâmbio de energia do subsistema s no ano t (GWh);
- Ce_{st} – Carga de energia no subsistema s no ano t (GWh).

Subsistemas que exportam energia para outras regiões, ao terem uma redução de demanda em seus consumidores externos, são beneficiados indiretamente pelo serviço ambiental prestado pelo subsistema importador. Já regiões que importam energia, e que de fato implementam ações de eficiência energética, reduzem sua dependência externa e por prestar um serviço ambiental deve ser recompensada por isto.

• PROCEL

Na ausência de dados desagregados foram utilizados dados globais divulgados nos relatórios anuais do PROCEL. Para realizar a desagregação por

⁹ O ONS fornece dados de carga de energia, que se referem à quantidade total de energia consumida nos subsistemas do SIN, em base horária, semanal, mensal e anual dado em MWmed ou GWh.

¹⁰ ONS fornece dados de intercâmbio entre subsistemas em base horária, semanal, mensal e anual em MWmed ou GWh, representando o saldo líquido dos fluxos de potência ativa nas linhas de transmissão de fronteira entre subsistemas.

¹¹ Portal de Dados Abertos do ONS <https://dados.ons.org.br/>

setor econômico adotou-se o pressuposto de que as economias são proporcionais à participação regional nas vendas de equipamentos.

Entre 2008 e 2016, o PROCEL divulgou os resultados de economia de energia por região geográfica. Porém, a partir de 2017 apenas dados globais passaram a ser divulgados. Assim, a distribuição regional das economias de energia foi elaborada em função do parque de equipamentos de cada uso final considerando as informações, conforme segue:

- A distribuição regional de condicionadores de ar foi estimada através de dados da Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (PPH) 2019 e dados da Associação Brasileira de Refrigeração Ar-Condicionado, Ventilação e Aquecimento nos demais setores.
- Os dados de Aquecedores solares foram obtidos nos relatórios de Produção e Vendas de Aquecimento Solar da Associação Brasileira de Energia Solar Térmica (ABRASOL) entre 2017 e 2022.
- A distribuição regional de lâmpadas além do PPH 2019, teve como base os dados de distribuição regional disponibilizados pelo PROCEL entre os anos de 2009 e 2013.
- Com relação aos motores elétricos, considerou-se a Pesquisa Industrial Anual – (PIA), realizada pelo IBGE, que apresenta anualmente dados da distribuição regional de vendas de motores elétricos.
- Para os refrigeradores foram considerados os dados de posse média de refrigeradores por domicílio disponíveis do PPH 2019 e da Pesquisa Nacional de Amostras por Domicílio Contínua (PNADC) nos anos 2016, 2017, 2018 e 2022.

Diante das mudanças na divulgação dos resultados do PROCEL, fez-se aproximações da taxa de contribuição de diferentes dispositivos e equipamentos no processo de economia de energia, por meio da utilização de dados disponíveis em documentos oficiais diversos, como apresentados na Tabela 3.5 .

Tabela 3.5 Taxa de distribuição dos usos finais por região - PROCEL

Uso final	Região geográfica						Fonte de dados
	Ano	N	NE	CO	SE	S	
Condicionamento ambiental	2014	10%	16%	6%	51%	17%	ABRAVA (2014-2015) apud Vieira (2016).
	2015	7%	15%	28%	34%	16%	
	2019	5%	14%	39%	26%	14%	PPH (2019)
Aquecimento de água	2017	4%	8%	12%	63%	13%	ABRASOL (2017 - 2020)
	2018	4%	7%	9%	71%	9%	
	2019	5%	8%	13%	55%	19%	
	2020	5%	8%	13%	55%	19%	
	2021	3%	8%	9%	54%	26%	
	2022	3%	7%	14%	53%	23%	
Iluminação	2009	8%	32%	8%	33%	19%	PROCEL 2010
	2011	9%	33%	7%	32%	19%	PROCEL 2012
	2012	7%	26%	8%	47%	12%	PROCEL 2013
	2013	7%	26%	8%	45%	14%	PROCEL 2014
	2019	10%	26%	8%	52%	10%	PPH 2019
Força Motriz	2017	3%	13%	7%	48%	29%	PIA/IBGE (2017 - 2021)
	2018	3%	13%	7%	49%	29%	
	2019	2%	12%	7%	49%	30%	
	2020	3%	12%	7%	48%	30%	
	2021	3%	13%	7%	48%	30%	
Refrigeração	2016	7%	25%	8%	42%	15%	PNADC/IBGE 2016
	2017	7%	26%	8%	42%	15%	PNADC/IBGE 2017
	2018	7%	26%	8%	41%	15%	PNADC/IBGE 2020
	2022	8%	28%	8%	39%	14%	PNADC/IBGE 2022
Ventilação	-	13%	32%	10%	33%	12%	Valor Considerado

A decomposição dos dados globais, realizada em função da taxa de vendas de cada equipamento, pode ajudar a melhor refletir características específicas de cada região, sendo calculada como apresentado na Equação 3.5.

$$EE_{irt} = EE_{it} \times V_{irt} \quad (3.5)$$

Na qual:

- EE_{irt} - Economia de energia para o uso final i, na região r, no ano t (MWh);
- EE_{it} - Economia de energia global associado ao uso final i no ano t (MWh);
- V_{irt} - Taxa de distribuição das vendas do uso final i na região r no ano t (%).

- **PEE ANEEL**

As informações a respeito da localização geográfica dos projetos foram identificadas na planilha de dados abertos do PEE ANEEL através do nome da distribuidora proponente - o nome da pessoa jurídica registrado na junta comercial – identificada na planilha com o nome do campo “*NomAgente*”. Em alguns projetos o nome da mesma empresa foi registrado por extenso ou por sigla, neste caso utilizou-se o código identificador da empresa proponente designado como “*IdeEmpresaProponenteProjeto*”. Por fim, cada projeto foi alocado na planilha do subsistema correspondente à área de concessão da respectiva distribuidora.

3.1.3 Emissões Evitadas por Programas de E.E.

Durante períodos de seca, quando a capacidade dos reservatórios das hidrelétricas é limitada, a necessidade de geração térmica, particularmente por usinas a combustíveis fósseis, aumenta. Isso eleva o fator de emissão médio do Sistema Interligado Nacional (SIN), uma vez que as termoeletricas apresentam maior intensidade de emissões de CO₂ em comparação com as hidrelétricas. Em contrapartida, em períodos de alta pluviosidade, quando os níveis dos reservatórios estão elevados, a geração hidroelétrica assume um papel mais dominante, reduzindo a necessidade de acionamento das usinas térmicas e, conseqüentemente, diminuindo o fator de emissão médio do SIN.

O fator de emissão médio, calculado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), é desenvolvido segundo a metodologia do IPCC e utiliza o método da análise de despacho. Esse fator representa a quantidade de tCO₂e emitida por unidade de energia elétrica gerada e é essencial para estimativas de emissões evitadas em projetos de eficiência energética. Os fatores de emissão resultantes da metodologia são calculados com base na composição da matriz elétrica e leva em consideração usinas que estão na margem de construção e na margem de operação, como explica BUENDIA, E. *et al* (2019), conforme segue:

- **Margem de Operação:** Este fator reflete as emissões das usinas que estão operando para suprir a demanda elétrica em tempo real. Em contextos nos quais a energia economizada resulta na redução do uso de usinas de alta emissão – uso de termoeletricas

–, o fator de emissão da margem de operação é adequado, pois captura diretamente o impacto da eficiência energética na redução das emissões imediatas.

- **Margem de Construção:** Este fator considera as emissões associadas às usinas construídas recentemente para atender ao crescimento da demanda energética. Utilizar o fator de emissão da margem de construção para políticas de eficiência energética é mais apropriado quando se avalia o impacto dessas políticas na necessidade de expansão da capacidade de geração, ou seja, se a redução de demanda energética evita a construção de novas usinas com alta emissão.

O fator de emissão médio nacional, disponível na Tabela 3.6, integra as contribuições de ambas as margens, oferecendo uma média das emissões associadas ao mix de geração do sistema como um todo.

Tabela 3.6 Fator de emissão médio anual do SIN

Ano	Fator de Emissão Médio (tCO ₂ e/MWh)
2014	0,1355
2015	0,1244
2016	0,0817
2017	0,0927
2018	0,0740
2019	0,0750
2020	0,0617
2021	0,1264
2022	0,0426
2023	0,0385

Fonte: (MCTI, 2023)

A estimativa das emissões evitadas nos setores econômicos e regiões, resultante das ações de eficiência energética, foi realizada pelo simples produto entre a economia de energia e o fator de emissão médio anual correspondente, conforme a Equação 3.7.

$$Eev = EE_t \times fe_t \quad (3.7)$$

Na qual:

- Eev – Emissões evitadas por uma política/projeto de eficiência (tCO₂e);
- EE_t – Economia de Energia pela ação de eficiência no ano t (MWh);
- fe_t – Fator de emissão médio no ano t (tCO₂e/MWh);

Entretanto, na análise regional, é necessário ponderar os valores das emissões evitadas utilizando o FTE. A ponderação das emissões evitadas com o fator deve confirmar que toda energia exportada por um subsistema está sendo consumida por um outro e que os dados de intercâmbio líquido estão consistentes, ou seja, a soma dos saldos de intercâmbio deve ser igual a zero. A ponderação foi então realizada através do equacionamento seguinte:

$$P_{ist} = Eev_{ist} \times FTE_{st} \quad (3.8)$$

$$Eev_{ist}^p = \left(\frac{P_{ist}}{\sum P_t} \right) \times Eev_{SIN,t} \quad (3.9)$$

Onde:

- P_{ist} – Peso ponderado do uso final i, no subsistema s, no ano t (tCO₂e);
- Eev_{ist} – Emissão evitada pelo uso final i, no subsistema s, no ano t (tCO₂e);
- FTE_{st} – Fator de transferência de energia no subsistema s no ano t;
- Eev_{ist}^p – Emissão evitada ponderada pelo uso final i, no subsistema s, no ano t (tCO₂e);
- $\sum P_t$ – Soma dos pesos ponderados no ano t (tCO₂e);
- $Eev_{SIN,t}$ – Emissões totais evitadas no SIN no ano t (tCO₂e);

3.2 Projeção de Ganhos Econômicos

A análise da variação nos preços médios por tonelada de CO₂ evitado ao longo dos anos oferece uma perspectiva sobre a precificação potencial do mercado de carbono, permitindo entender as diferenças de valor conforme o tipo de projeto e suas respectivas externalidades.

Para este estudo, foram selecionados dois sistemas de comércio de emissões com comportamentos distintos - o EU ETS e o sistema ETS de Pequim - representando, cenários de preço médio/alto e de preço baixo, conforme

demonstrado na Tabela 3.7. A escolha desses sistemas tem o objetivo de ilustrar ganhos potenciais pela negociação de créditos de carbono oriundos de programas brasileiros de eficiência energética PROCEL e PEE ANEEL.

Tabela 3.7 Definição de Cenários de Preço

Cenário Ano	Preço médio/alto (US\$)	Preço baixo (US\$)
2014	6,76	8,52
2015	7,69	8,21
2016	4,88	8,03
2017	6,24	7,59
2018	16,37	9,44
2019	24,51	10,4
2020	18,54	12,2
2021	49,78	4,32
2022	86,53	6,53

Fonte: (WORLD BANK, 2025)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Procel, financiado por recursos da União, parcerias institucionais e cooperação internacional, tem como objetivo reduzir desperdícios, estimular tecnologias eficientes e apoiar políticas públicas voltadas ao uso racional da eletricidade, sem gerar custos diretos aos consumidores. Já o PEE-ANEEL é custeado pelas distribuidoras de energia, que aplicam anualmente pelo menos 0,5% de sua receita operacional líquida em projetos de eficiência, com os recursos incorporados às tarifas de forma diluída. Apesar dessa origem tarifária, os benefícios retornam à sociedade por meio da redução do consumo de energia e da consequente diminuição das despesas associadas, além de ganhos ambientais e tecnológicos.

Sendo assim, neste capítulo são apresentadas as estimativas do serviço ambiental e econômico prestado pelas políticas públicas PROCEL e PEE ANEEL em termos setoriais e regionais. A estimativa de preços considera dois cenários distintos, a partir de preços reais praticados em mercados internacionais, com a finalidade de estimar ganhos potenciais de um mercado de carbono aplicado as políticas públicas de eficiência energética no Brasil.

A partir das estimativas de emissões evitadas pelas ações de eficiência energética, considera-se que há um potencial de redução de emissões significativas o suficiente para se propor um modelo de comercialização de créditos de carbono aplicado especificamente às políticas e ações de eficiência energética do setor elétrico brasileiro. Este modelo deve integrar tanto aspectos de simplificação e certificação, como no RenovaBio, quanto aos mecanismos de regulação e flexibilidade para garantir a estabilidade e a transição gradual para este mercado.

4.1 Resultados Ambientais e Econômicos

4.1.1 Emissões Evitadas por Setor

A análise setorial é essencial para compreender como os diferentes usos finais contribuem para a redução de emissões dos segmentos econômicos avaliados.

- **PROCEL**

O setor residencial, como observa-se na Figura 4.1, tem a maior contribuição de serviço ambiental do PROCEL, sendo responsável pela retirada de mais de 8 milhões de tCO₂e do ambiente no período analisado. Há, portanto, margem para ajustes na política, para que os setores comercial e industrial tenham maior participação em resultados futuros do programa.

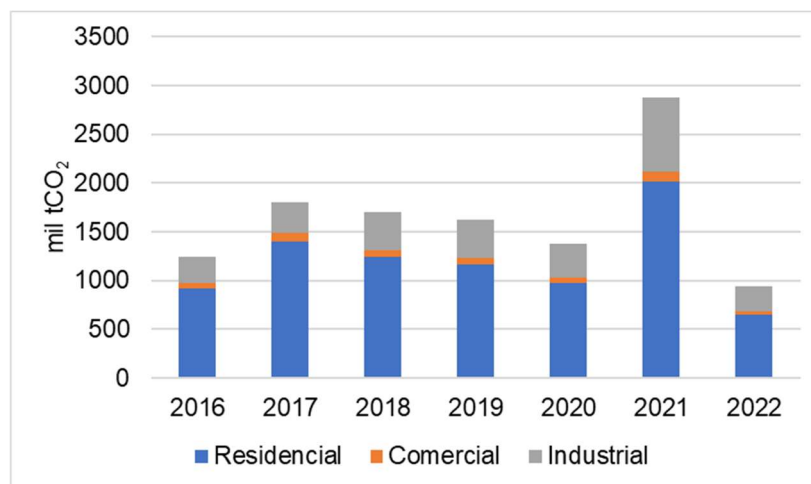


Figura 4.1 Distribuição das emissões por setor econômico – PROCEL

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

São apresentados na Figura 4.2 os resultados das emissões evitadas no setor residencial, fortemente influenciado pela taxa de participação de refrigeradores e sistemas de iluminação. O setor residencial concentra grande parte da demanda por serviços básicos de energia, influenciado pelo crescimento populacional, expansão urbana e aumento do acesso a eletrodomésticos e sistemas de conforto térmico. Além disso, políticas públicas voltadas ao consumidor residencial, como campanhas de conscientização, subsídios para equipamentos eficientes e programas de substituição de lâmpadas, tornam mais acessíveis as tecnologias de eficiência energética.

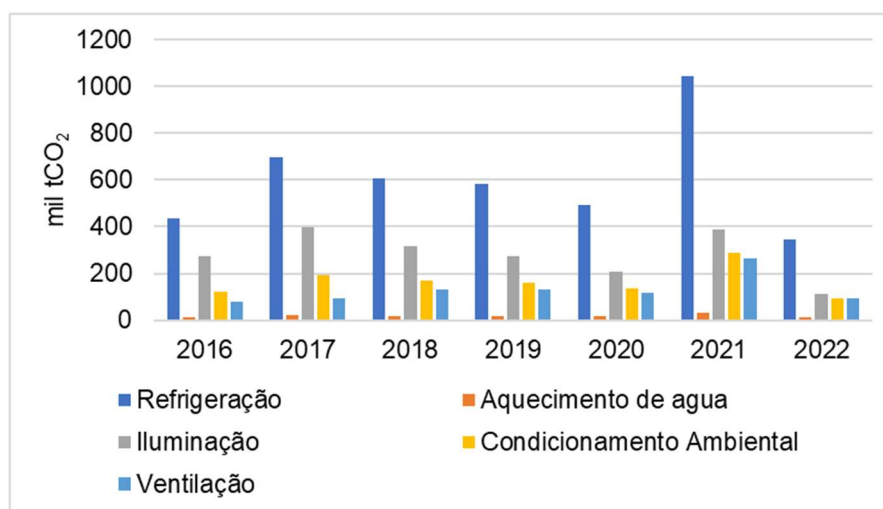


Figura 4.2 Distribuição das emissões evitadas no setor residencial – PROCEL

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

A participação dos sistemas de aquecimento é tímida no setor, mostrando que há potencial para aumento de sua participação. Um exemplo de iniciativa com esta finalidade, é a Portaria nº402, publicado em outubro de 2021, aprovando o regulamento técnico da qualidade e requisitos de avaliação da conformidade para equipamentos de aquecimento solar, atribuindo índices mínimos de qualidades e a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE (BRASIL, 2021).

A estimativa do setor comercial, apresentada na Figura 4.3, mostra concentração de suas emissões evitadas principalmente no condicionamento ambiental, resultado das atualizações periódicas dos índices mínimos de eficiência para condicionadores de ar e do aumento da disponibilidade de equipamentos eficientes no mercado. A participação do uso final iluminação apresentou uma queda, passando de 355 mil tCO₂ evitadas em 2017 para 155 mil tCO₂ em 2022. Esse comportamento é explicado pela consolidação de tecnologias LED de alto desempenho, que reduzem gradualmente a necessidade de substituição em função de sua maior durabilidade e eficiência.

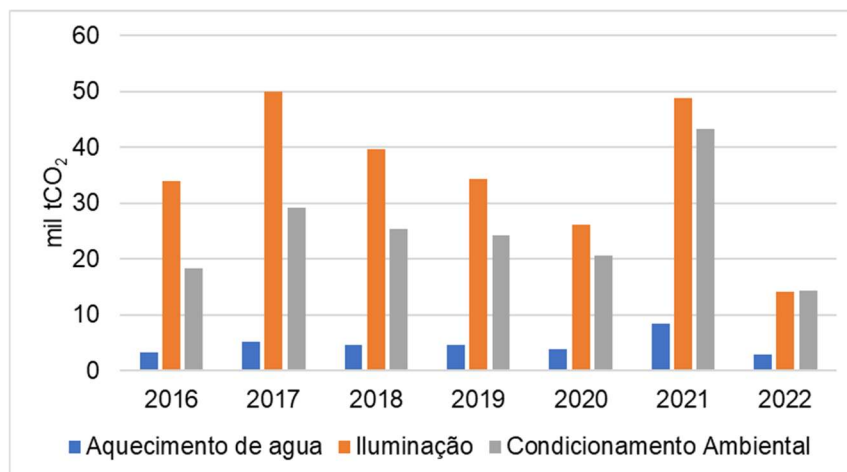


Figura 4.3 Distribuição das emissões evitadas no setor comercial – PROCEL

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

Nos resultados do setor industrial, Figura 4.4, a força motriz se destaca como o principal uso final responsável pelas emissões evitadas. Este segmento apresenta uma tendência crescente, possivelmente influenciada pela modernização do parque de motores elétricos, impulsionada pela adoção do índice de eficiência IR3, regulamentado pela portaria interministerial de 2017 (BRASIL, 2017b). Entretanto, em 2020, a pandemia de COVID-19 causou uma queda nas emissões evitadas devido à desaceleração econômica, com um forte "efeito rebote" em 2021, quando as restrições sanitárias começaram a ser flexibilizadas.

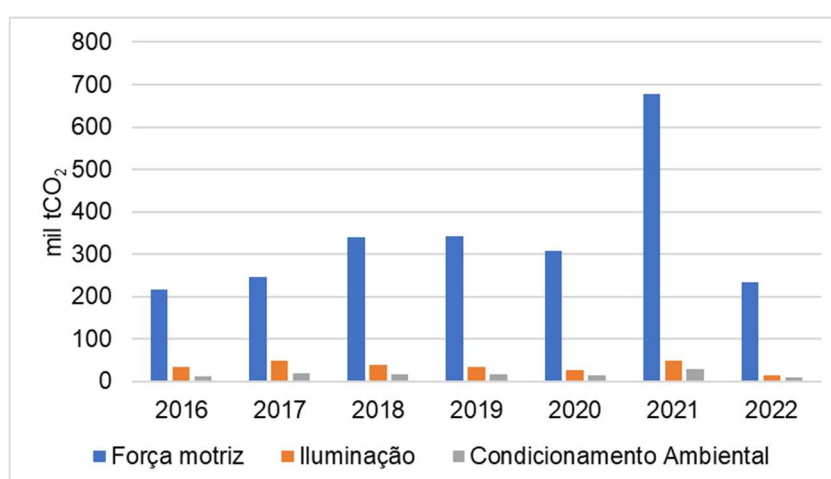


Figura 4.4 Distribuição das emissões evitadas no setor industrial – PROCEL

Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

- **PEE ANEEL**

A análise apresentada estima que as emissões evitadas, dos 765 projetos que compõem a amostra, somam aproximadamente 380 mil tCO₂ ao longo do período avaliado. Conforme ilustrado na Figura 4.5, o setor residencial é responsável pela quase totalidade dos projetos da amostra selecionada, representando 99% dos projetos enquanto os setores comercial e industrial representam 0,8% e 0,2%, respectivamente.



Figura 4.5 Distribuição das emissões evitadas por setor PEE ANEEL

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

O setor residencial tem predominância dos usos finais de iluminação e refrigeração na redução das emissões de CO₂. Como mostrado na Figura 4.6, os anos de 2015 e 2016 registraram os maiores volumes de emissões evitadas da amostra, com destaque para iluminação com valor estimado de 50 tCO₂ evitados e refrigeração, cuja estimativa foi de 47 mil tCO₂ evitados em 2015. O aquecimento de água e condicionamento ambiental apresentaram contribuições modestas, nos quais as estimativas máximas foram de 8,3 mil tCO₂ e 0,03 mil tCO₂ ao longo do período analisado.

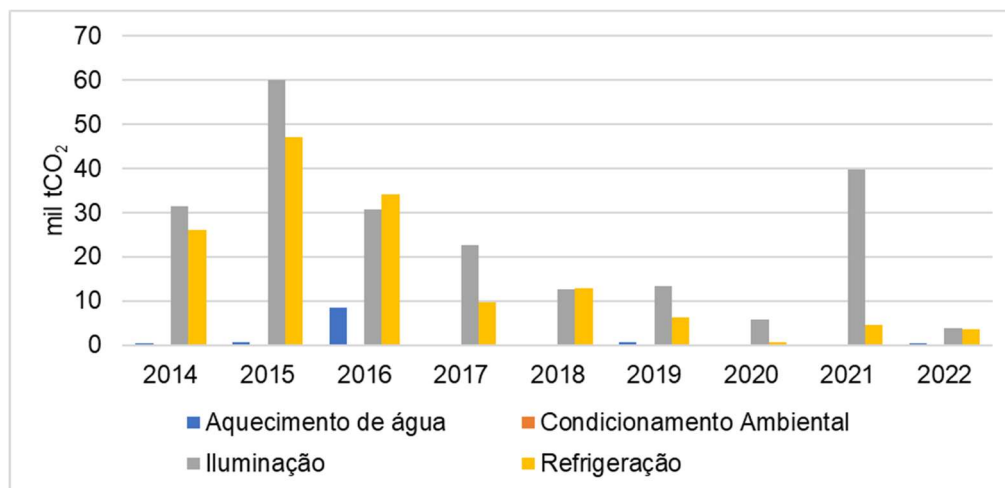


Figura 4.6 Distribuição das emissões evitadas no setor residencial – PEE ANEEL

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

As estimativas do setor comercial, mostrado na Figura 4.7, evidenciam a influência da iluminação e do condicionamento ambiental no setor. No período avaliado, as emissões evitadas pela iluminação tiveram o melhor resultado do setor, apesar de inexpressivo quando comparado ao setor residencial, com valores próximos a 0,35 mil tCO₂ entre 2018 e 2020. Já o uso final condicionamento ambiental apresentou variações mais significativas, com um pico em 2022 com 0,25 mil tCO₂ evitados. O aquecimento de água, por sua vez, contribuiu de forma modesta em todo o período, com emissões evitadas inferiores a 0,05 mil tCO₂.

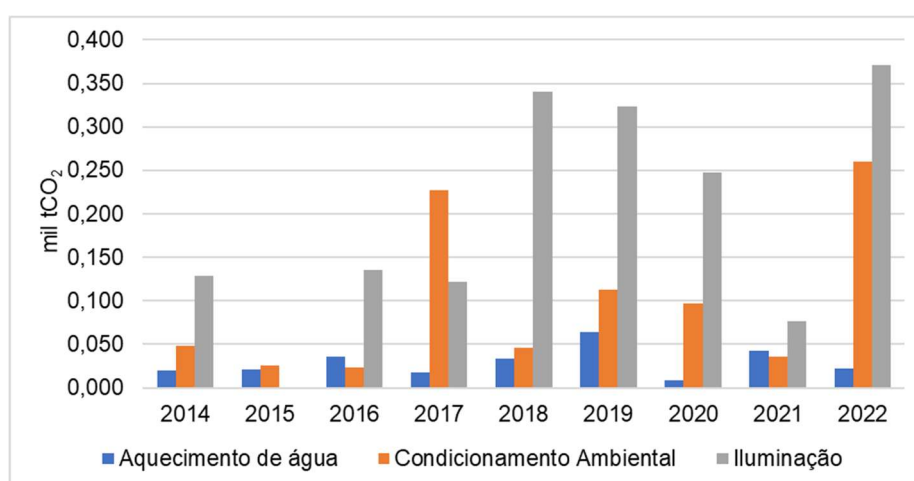


Figura 4.7 Distribuição das emissões evitadas no setor comercial – PEE ANEEL

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

Na amostra analisada, há no setor industrial pequena participação de projetos na amostra, com particular destaque ao uso final força motriz, conforme mostrado na Figura 4.8. Estima-se que esse uso foi responsável pelas maiores reduções do setor, com emissões evitadas próximas a 0,14 mil tCO₂ em 2014 e 2022. A iluminação apresenta estimativas mais modestas, com emissões evitadas variando entre 0,02 mil tCO₂ e 0,05 mil tCO₂, refletindo iniciativas contínuas, porém menos representativas no contexto industrial em comparação à força motriz.

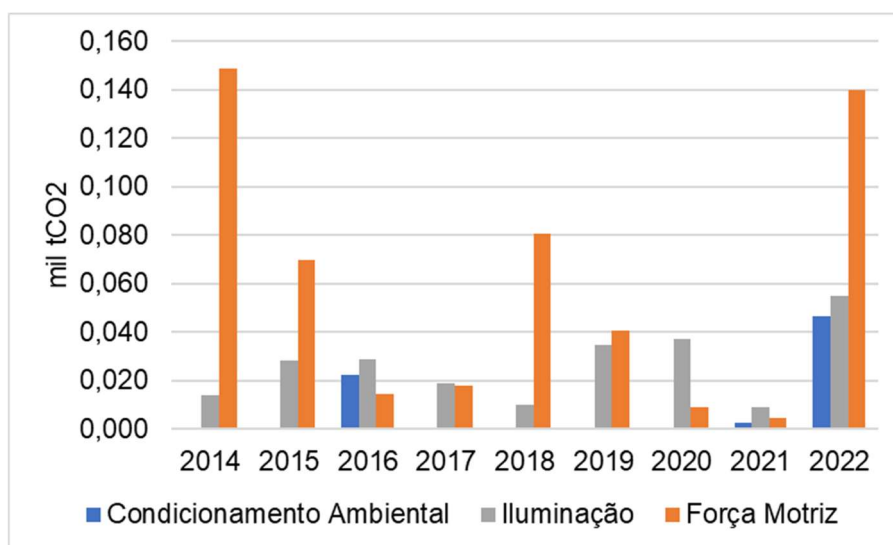


Figura 4.8 Distribuição das emissões evitadas no setor industrial – PEE ANEEL

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

Os resultados da amostra indicam que a maior parte das emissões evitadas se concentra no setor residencial, enquanto os setores comercial e industrial apresentam participação reduzida. Essa evidência permite identificar tanto os usos finais já consolidados com potencial de economia relevante, quanto os setores cujo potencial de eficiência energética ainda permanece pouco explorado.

4.1.2 Emissões Evitadas por Região

A análise regional permite redistribuir as emissões evitadas de acordo com o local onde as ações de eficiência energética foram implementadas, refletindo com maior precisão o serviço ambiental efetivamente prestado em cada região. Essa abordagem permite evidenciar as diferenças entre os

contextos regionais do país, considerando, por exemplo, fatores como perfil de consumo, disponibilidade tecnológica e condições climáticas, que influenciam diretamente o potencial de mitigação.

4.1.2.1 Fator de Transferência de Energia FTE

Para fins de simplificação adotou-se a premissa que as regiões geográficas do Brasil são equivalentes aos subsistemas considerados pelo SIN.

Para o cálculo do FTE_{st} foram utilizados os dados de carga de energia por subsistema, presentes na Tabela 4.1 e dados do intercâmbio líquido de energia entre os subsistemas.

Tabela 4.1 Carga de energia por subsistema (GWh)

Subsistema	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
N	45002	46979	47965	48778	47102	48823	49218	52704	54457
NE	83948	89887	91533	92592	94638	96743	95318	100371	99107
SE/CO	317732	333440	331603	334365	340702	346406	340120	349870	351510
S	92871	95811	96456	98791	100614	102266	102456	106130	106188

Fonte: (ONS, 2025a)

O intercâmbio líquido, apresentado na Tabela 4.2, representa os fluxos de energia entre os subsistemas nos quais os valores positivos indicam que o subsistema emissor exportou energia, enquanto os valores negativos indicam que o subsistema emissor na verdade recebeu energia do subsistema receptor.

Tabela 4.2 Intercâmbio líquido entre subsistemas do SIN (GWh)

Subsistema Emissor	Subsistema Receptor	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
N	NE	8998	7283	5594	10540	12558	10623	7147	5478	1313
N	SE/CO	12218	8579	-784	-6799	-17563	24043	29452	40932	38842
NE	SE/CO	-3141	-5878	-11541	-3643	-1680	5707	16421	29682	33971
SE/CO ¹²	S	-10188	-15630	-10580	9386	12797	15175	38920	25121	15892

Fonte:(ONS, 2025b)

O saldo de intercâmbio de cada subsistema é determinado pela soma

¹² De acordo com os critérios do ONS o subsistema Sul está conectada apenas com o subsistema Sudeste/Centro-Oeste, neste caso o intercâmbio físico entre estes subsistemas é igual ao intercâmbio líquido entre eles.

algébrica dos fluxos de energia elétrica trocados com os demais subsistemas do SIN. Por convenção, os fluxos exportados assumem valores positivos, enquanto os fluxos importados são representados por valores negativos. Assim, um saldo positivo caracteriza o subsistema como exportador líquido, ao passo que um saldo negativo indica sua condição de importador líquido, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Saldo do intercâmbio de energia entre subsistemas (GWh)

Subsistema	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
N	21216	15862	4810	3741	-5005	34666	36599	46410	40155
NE	-12139	-13161	-17135	-14183	-14238	-4916	9274	24204	32658
SE/CO	-19265	-18331	1745	19828	32040	-14575	-6953	-45493	-56921
S	10188	15630	10580	-9386	-12797	-15175	-38920	-25121	-15892
Soma Zero	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A verificação do fechamento energético do sistema e da consistência dos dados foi verificada através da soma dos saldos de intercâmbio anuais iguais a zero. Desta forma, após determinar se o subsistema naquele ano foi um importador líquido ou exportador líquido, utilizou-se respectivamente as equações 3.3 e 3.4 para determinar FTE_{st} conforme apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Fator de Transferência de Energia dos Subsistemas do SIN

Subsistema	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
N	0,68	0,75	0,91	0,93	1,11	0,58	0,57	0,53	0,58
NE	1,14	1,15	1,19	1,15	1,15	1,05	0,91	0,81	0,75
SE/CE	1,06	1,05	0,99	0,94	0,91	1,04	1,02	1,13	1,16
S	0,89	0,84	0,89	1,10	1,13	1,15	1,38	1,24	1,15

Por fim, calculou-se as emissões evitadas Eev_{ist}^p , Equação 3.9, considerando a ponderação do fator de transferência de energia.

- **PROCEL**

O resultado geral da distribuição regional de emissões evitadas, apresentado na Figura 4.9, evidencia a região Sudeste como grande centro consumidor e como protagonista na adoção de medidas de eficiência energética, através do PROCEL. A estimativa indica que a região foi responsável por um serviço ambiental equivalente a retirada de 5,13 milhões tCO₂e (42%) em todo

período analisado, seguida das regiões Nordeste, Sul, Centro-Oeste e Norte que representaram, respectivamente, 2,75 milhões tCO₂e (23%), 2,18 milhões tCO₂e (18%), 1,33 milhões tCO₂e (11%) e 672 mil tCO₂e (6%).

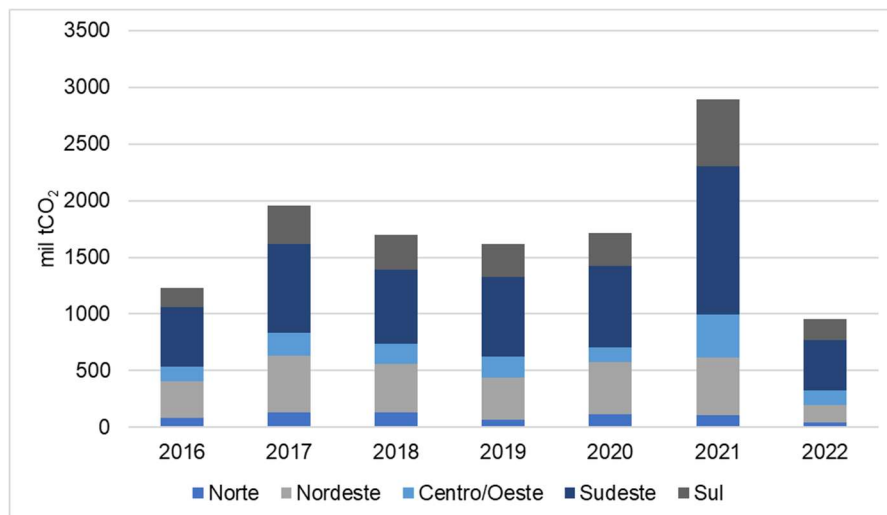


Figura 4.9 Distribuição de Emissões Evitadas por Região - PROCEL

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

Observa-se que o uso final refrigeração é o responsável pela maior redução de emissões no período analisado, seguido da iluminação, força motriz, condicionamento ambiental e aquecimento de água, respectivamente. Nos resultados do setor residencial apresentados na Figura 4.10, observa-se que os refrigeradores representaram a maior participação nas emissões evitadas dentre os usos finais chegando a mais de 1 milhão tCO₂e em 2021. As regiões Sudeste e Nordeste concentram os maiores resultados de emissões evitadas deste tipo de equipamento no período. De acordo com o Censo 2022, 43% dos domicílios permanentemente ocupados no Brasil estão na região sudeste e 26% na região Nordeste.

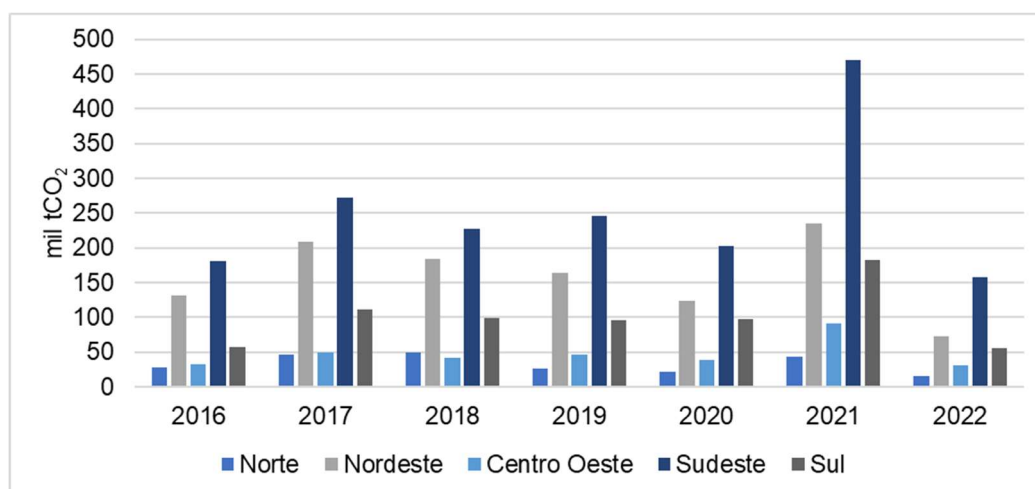


Figura 4.10 Distribuição regional das emissões evitadas – Refrigeração

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

O elevado número de residências nas regiões SE e NE também explica o destaque no resultado do uso final iluminação, conforme apresentado na Figura 4.11. A certificação das lâmpadas LED em 2016 injetou no mercado de luminárias tecnologias cada vez mais eficientes. Programas subsidiados e a maior exposição a iniciativas governamentais impulsionam essa transição, mesmo em populações de renda mais baixa. A Associação Brasileira de Fabricantes e Importadores de Produtos de Iluminação (ABilumi), destaca que a expansão de tecnologias LED se deu a partir de 2017, em função das diversas possibilidades de aplicação da tecnologia e de sua alta eficiência (ABILUMI, 2018).

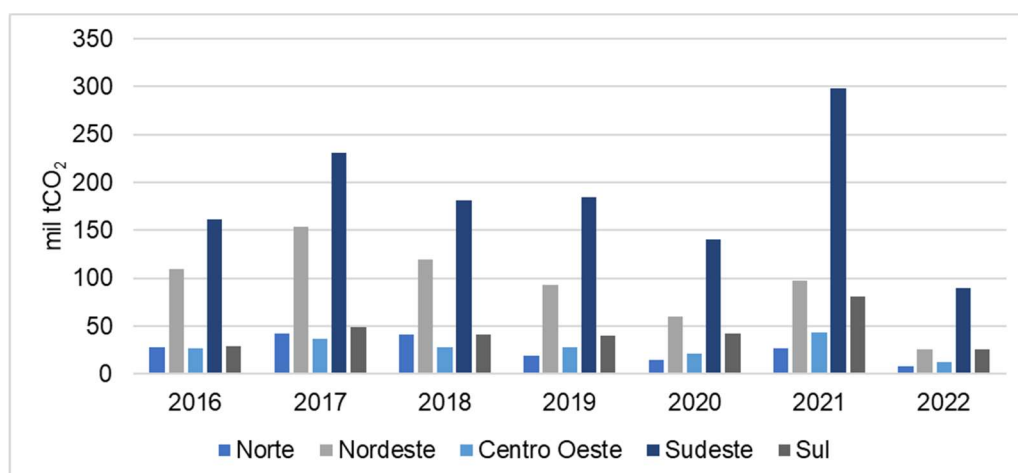


Figura 4.11 Decomposição regional das emissões evitadas – Iluminação

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

Os resultados relativos ao uso final força motriz, Figura 4.12, reflete o comportamento do parque industrial brasileiro. As regiões sudeste e sul concentram os maiores parques industriais do país e foram responsáveis, respectivamente, por 61,1% e 18,1% do Valor de Transformação Industrial – VTI do Brasil em 2022 (IBGE, 2024) . Em 2021 os motores eficientes representaram para o sudeste mais de 3331 mil tCO₂ evitadas em 2021, em função da recuperação da indústria pós pandemia de COVID-19, aliado ao aumento do fator de emissão naquele ano.

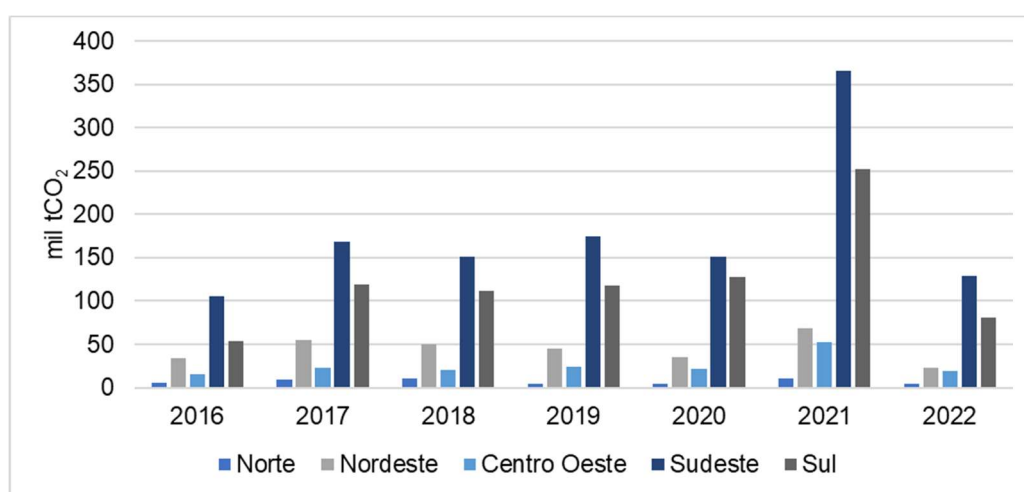


Figura 4.12 Decomposição regional das emissões evitadas - Força Motriz

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

A região Centro-Oeste se destacou no uso final condicionamento ambiental, como observado na Figura 4.13, atingindo uma estimativa de 164 mil tCO₂ evitadas em 2021. O uso de sistemas de condicionamento ambiental justifica-se pelas altas temperaturas registradas na região (INMET, 2021). Apesar das altas temperaturas médias, a região Nordeste apresenta emissões evitadas por condicionamento ambiental semelhantes às da região Sul, que possui um clima mais ameno. Um dos fatores que podem explicar essa menor demanda por climatização é a restrição de acesso à renda. De acordo com o IBGE, o rendimento nominal mensal domiciliar per capita no Brasil foi de R\$ 1.625, enquanto na região Nordeste foi de R\$ 1.023, sendo o menor rendimento nominal mensal do país. O acesso a renda pode limitar as famílias tanto na aquisição de equipamentos de ar-condicionado mais eficientes quanto o aumento do custo de energia elétrica associado ao seu uso (IBGE, 2023).

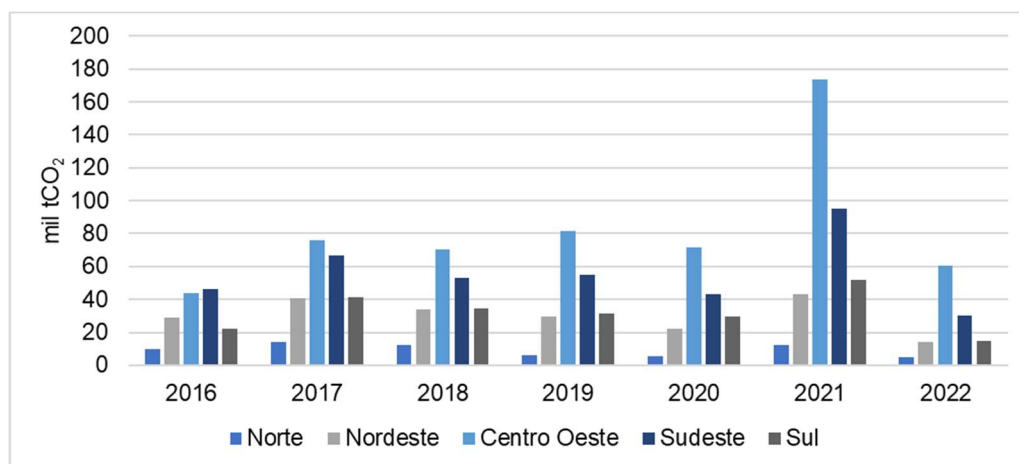


Figura 4.13 Decomposição regional das emissões evitadas - Condicionamento Ambiental

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

Os sistemas de ventilação têm papel relevante nas emissões evitadas, sobretudo das regiões Sudeste e Nordeste, como observado na Figura 4.14, resultando respectivamente numa estimativa de emissões evitadas de cerca de 102 mil tCO₂ e 71 mil tCO₂ em 2021. Com a consideração de que este uso final se encontra apenas no setor residencial, a densidade populacional anteriormente citada destas regiões, reforça a assertividade deste resultado.

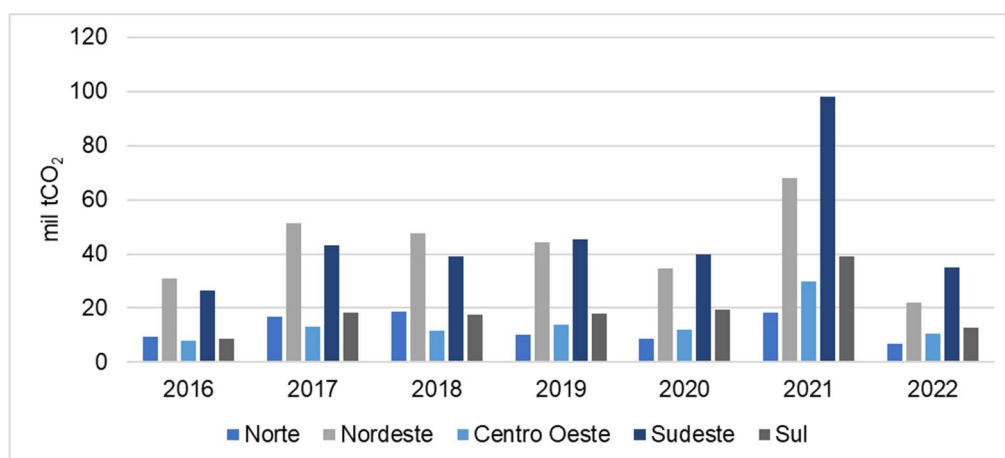


Figura 4.14 Decomposição regional das emissões evitadas – Ventilação

Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

Como pode-se observar na Figura 4.15, o aquecimento de água é o uso final que apresenta a menor contribuição de emissões evitadas da análise

energética. O aquecimento tem resultados mais expressivos nas regiões Sudeste e Sul, nas quais estima-se uma redução de emissões de 22,8 mil tCO₂ e 12,0 mil tCO₂ em 2021. Um clima predominantemente tropical e subtropical, com temperaturas elevadas, e a preferência dos consumidores por chuveiros elétricos, que fornecem aquecimento instantâneo, podem ser fatores que justifiquem o resultado menos expressivo para este uso final.

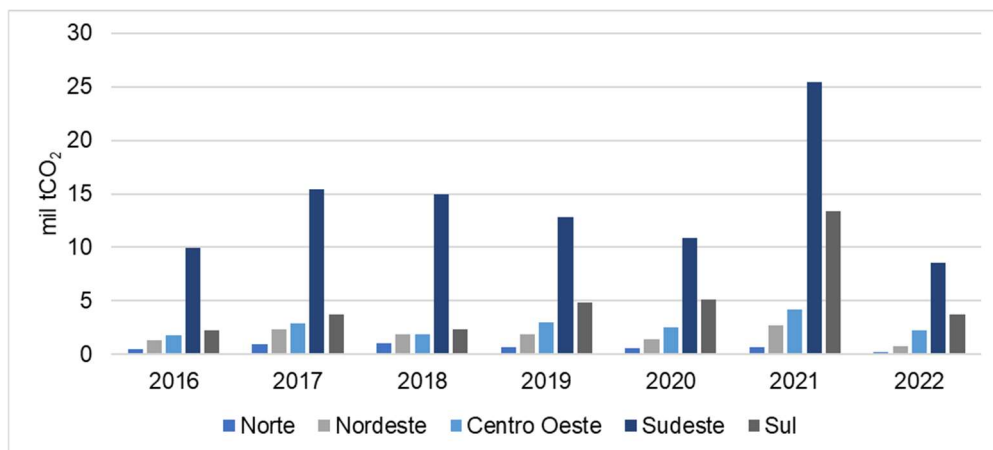


Figura 4.15 Decomposição regional das emissões evitadas - Aquecimento de Água
Fonte: Adaptado de (ELETROBRÁS, 2025)

- **PEE ANEEL**

A análise regional das emissões evitadas do PEE ANEEL, é um recorte que demonstra o tipo de investimento realizado pelas distribuidoras a partir do percentual da ROL investido nos projetos de eficiência energética. No caso do PEE ANEEL, a amostra selecionada representa uma tendência de emissões evitadas por uso final nas regiões geográficas. A Figura 4.16 apresenta os resultados gerais da participação de cada região na distribuição das emissões evitadas na amostra do programa (10,54% dos dados globais). Observa-se, seguindo os resultados anteriores, o destaque da região Sudeste que apresentou emissões evitadas de aproximadamente 130 mil tCO₂e apenas em 2014, representando quase 65% da economia da amostra naquele ano.

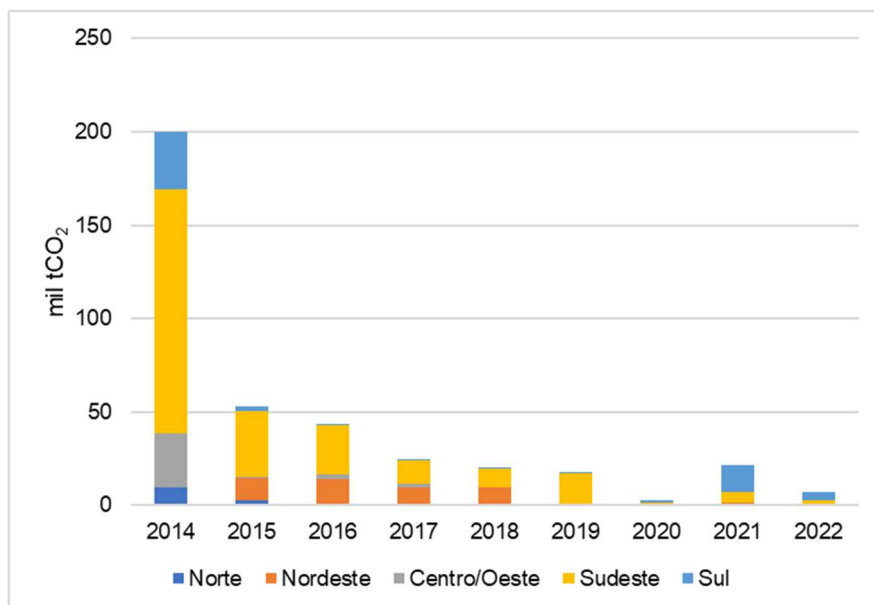


Figura 4.16 Distribuição de Emissões Evitadas por Região – PEE ANEEL

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

O uso final refrigeração é o responsável pela segunda maior redução de emissões no período analisado ficando atrás apenas do uso final iluminação. Nos resultados apresentados na Figura 4.17 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, observa-se que os refrigeradores tiveram participação expressiva nas emissões evitadas, sobretudo em 2014 quando os projetos deste tipo evitaram a emissão de 58 mil tCO_{2e}, com destaque para a região Centro-Oeste responsável pela retirada de 28,6 mil tCO_{2e}. As emissões evitadas acumuladas no período foram de 127,5 mil tCO_{2e}.

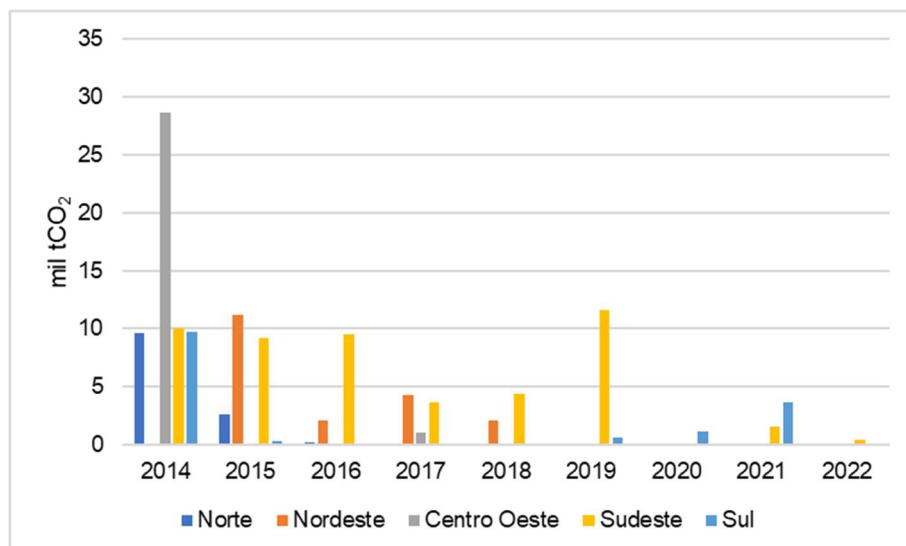


Figura 4.17 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Refrigeração

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

O resultado da amostra para o uso final iluminação, apresentado na Figura 4.18, tem seu auge em 2014 quando os projetos da amostra resultaram na retirada de 131 mil tCO₂e, com destaque para região Sudeste representando 89% do total ou 116,9 mil tCO₂e. Nos anos seguintes os projetos de iluminação da amostra dividiram-se predominantemente entre as regiões Sudeste e Nordeste, corroborando com os resultados do PROCEL que mostram o destaque destas duas regiões nas emissões evitadas oriundas de projetos de iluminação.

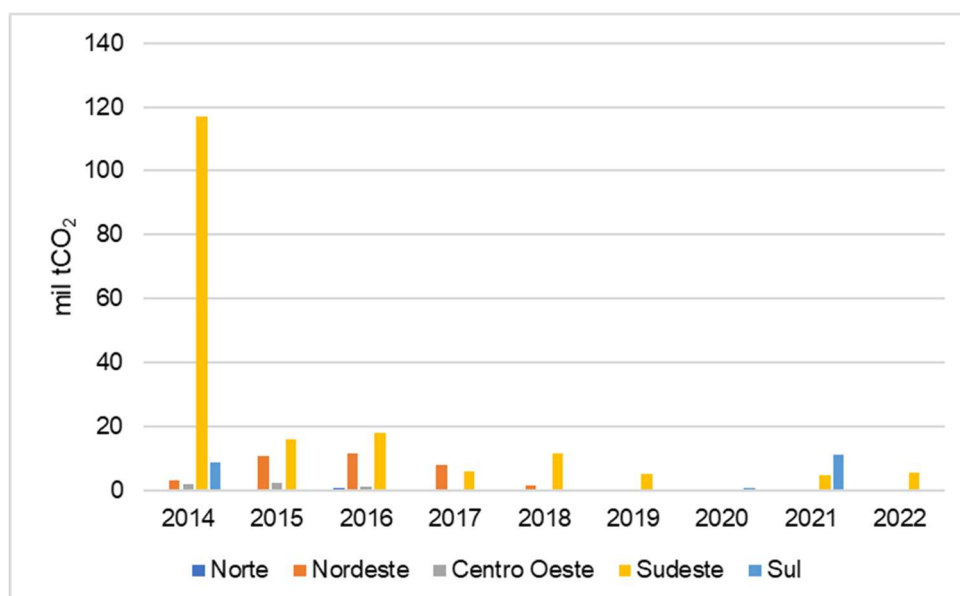


Figura 4.18 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Iluminação

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

Os resultados relativos ao uso final força motriz, Figura 4.19, reflete mais uma vez o comportamento do parque industrial brasileiro, com destaque para as regiões Sudeste e Sul. Estima-se que as emissões evitadas acumuladas do uso final Força Motriz chegaram a pouco mais de 0,5 mil tCO₂e. O maior valor de emissões evitadas foi registrado na região Sul em 2022 sendo igual a 0,14 mil tCO₂e.

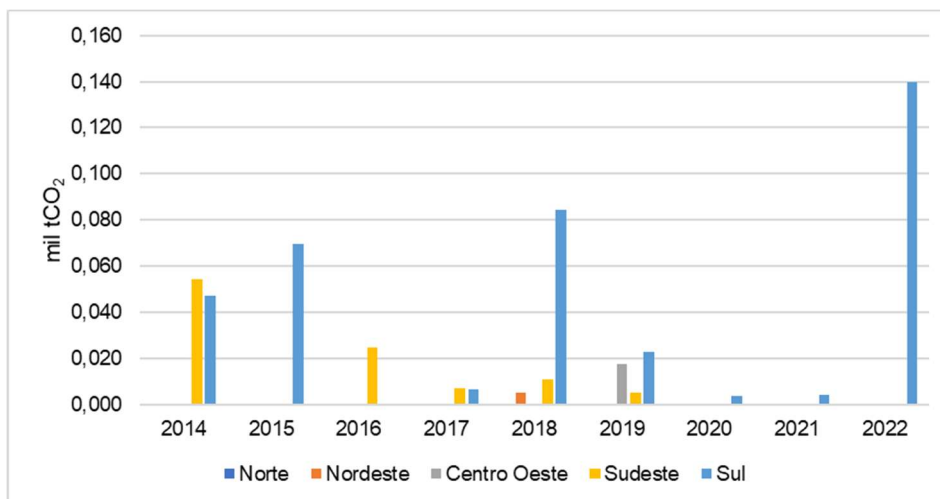


Figura 4.19 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Força Motriz

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

Os projetos de condicionamento ambiental representaram uma estimativa de emissões evitadas acumuladas de 1,15 mil tCO₂e. Os projetos de condicionamento ambiental têm representação em todas as regiões, como observado na Figura 4.20, com destaque para as regiões Centro-oeste, Sul e Sudeste com emissões evitadas de aproximadamente 0,2 mil tCO₂e cada.

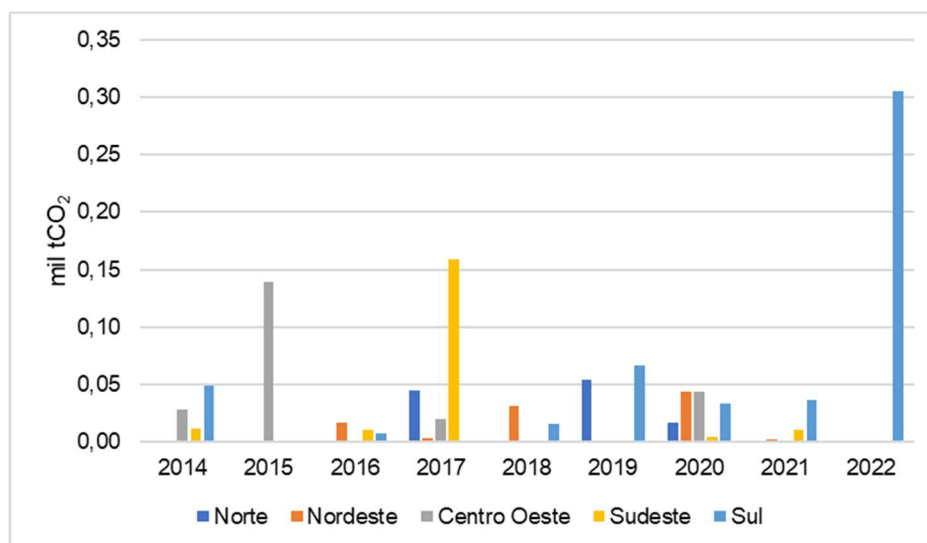


Figura 4.20 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Condicionamento Ambiental

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

A estimativa do uso final aquecimento de água, Figura 4.21, é o uso final que apresenta a segunda menor contribuição da amostra, tendo um acumulado de 1,15 mil tCO_{2e}. O aquecimento tem resultados mais expressivos nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste respectivamente. Na amostra selecionada não há representação de projetos desenvolvidos nas regiões Norte e Nordeste. A amostra apresenta destaque para o ano de 2014 quando as regiões representaram 8 mil tCO_{2e}, 2,4 mil tCO_{2e} e 0,4 mil tCO_{2e} evitadas.

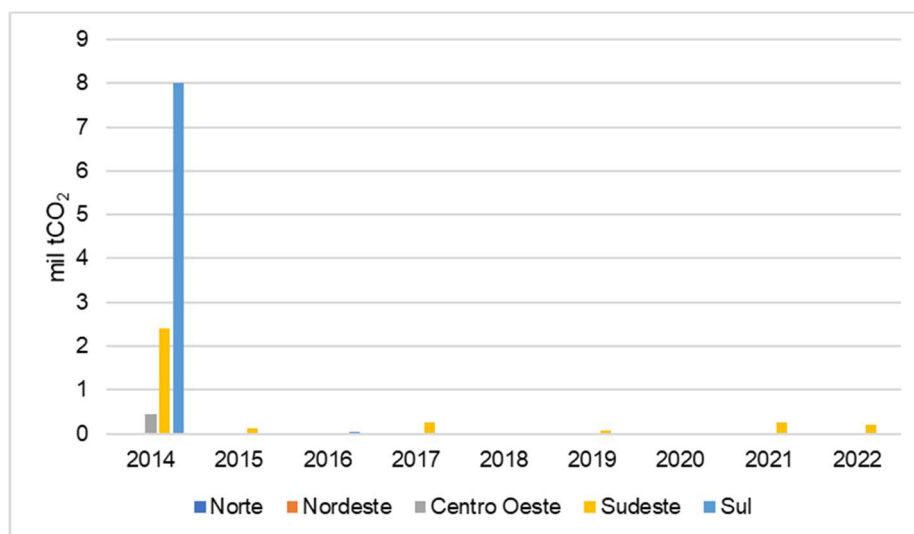


Figura 4.21 Distribuição regional das emissões evitadas PEE ANEEL – Aquecimento de água

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2025)

4.1.3 Ganhos potenciais da negociação de créditos de carbono EE

A análise de ganhos potenciais pela negociação de créditos de carbono provenientes do PROCEL e do PEE ANEEL tem como objetivo explorar as possibilidades econômicas associadas às emissões evitadas por esses programas. Para isso, foi adotada uma abordagem simplificada, considerando os preços médios anuais de créditos de carbono praticados em dois mercados reais.

Multiplicando-se o volume de emissões evitadas pelo valor do crédito em cada ano, é possível estimar o potencial financeiro dos programas no contexto de um mercado de carbono consolidado. Essa metodologia permite uma avaliação preliminar do impacto econômico das políticas de eficiência energética, fornecendo subsídios para a discussão sobre a viabilidade e a importância de mecanismos financeiros voltados à sustentabilidade energética no Brasil.

Numa comparação entre os custos administrativos do Procel e o potencial de retorno financeiro pela negociação de créditos de carbono evidencia a relevância econômica da eficiência energética como instrumento de política pública. Os investimentos anuais realizados no programa — que variaram de R\$ 14,99 milhões em 2016 para R\$ 107,88 milhões em 2022 — destinam-se a

contratos, convênios, recursos humanos, instalações e insumos necessários à sua operacionalização.

Quando confrontados com os valores estimados de arrecadação pela comercialização dos créditos de carbono, mesmo em cenários de preço baixo (< US\$ 10,00), apresentado na Figura 4.22, observa-se um potencial de retorno anual entre US\$ 5,5 e US\$ 15,5 milhões, o que representa valores comparáveis, e em alguns casos superiores, ao montante efetivamente aplicado no programa

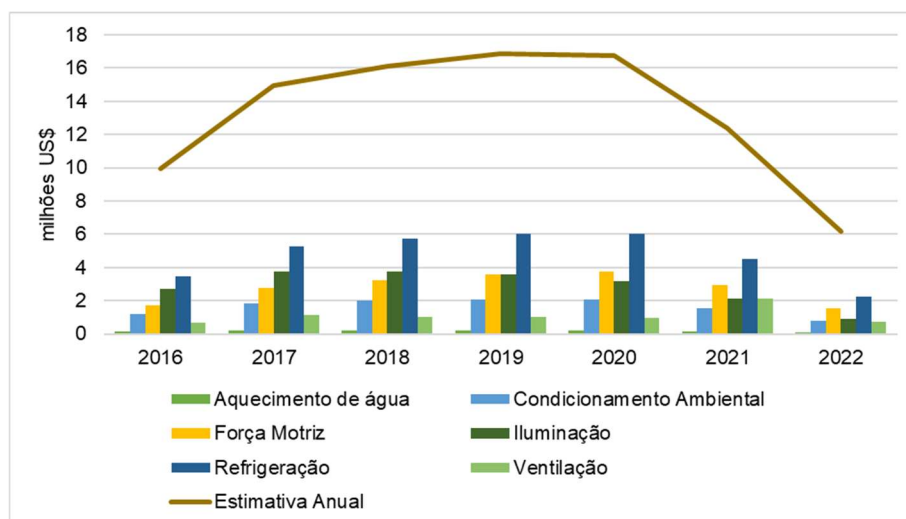


Figura 4.22 Ganhos Potenciais Cenário de Preço Baixo - PROCEL

Fonte: Elaboração própria

A Figura 4.23 mostra que o potencial para um cenário de preço médio/alto chega a representar uma arrecadação de US\$ 130 milhões no PROCEL em 2021. Neste cenário, no qual o crédito de carbono chegaria a ser negociado por um preço médio de US\$ 86,53, os ganhos poderiam ser ainda maiores dependendo do volume de créditos negociados. Essa análise sugere que, além dos benefícios ambientais e sociais já reconhecidos, a eficiência energética possui capacidade de gerar receitas que não apenas compensariam seus custos administrativos, mas também reforçariam a sustentabilidade financeira do próprio programa.

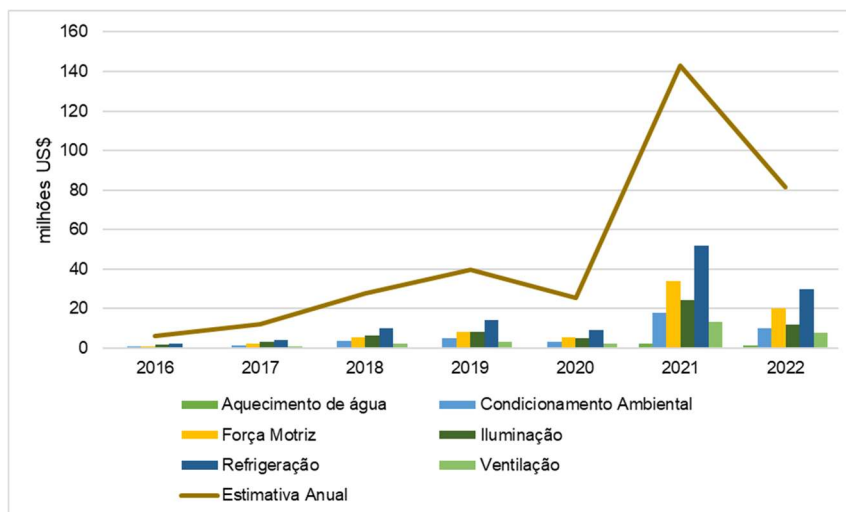


Figura 4.23 Ganhos Potenciais Cenário de Preço Médio/Alto - PROCEL

Fonte: Elaboração própria

A amostra do PEE ANEEL apresentou uma estimativa de arrecadação no cenário de preço baixo, que varia de pouco mais de US\$57 mil a US\$ 884 mil, como apresentado na Figura 4.24. Os projetos de iluminação teriam potencial de arrecadar um acumulado de aproximadamente US\$ 1,72 milhão (57%) de um total de US\$3,02 milhões no período. Os projetos de refrigeração, por sua vez, seriam capazes de arrecadar um acumulado de cerca de US\$ 1,19 milhão ou 39% do total.

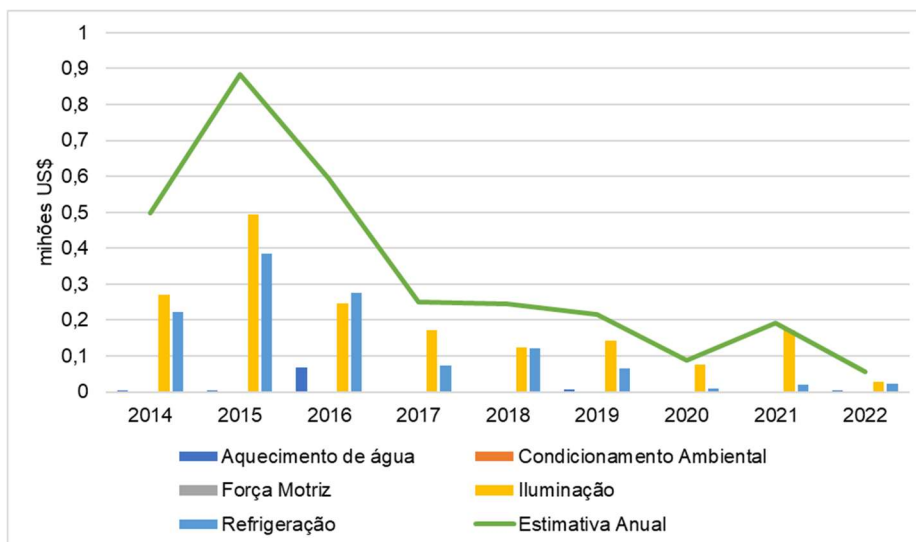


Figura 4.24 Ganhos Potenciais Cenário de Preço Baixo – PEE ANEEL

Fonte: Elaboração própria

No cenário de preço médio/alto, apresentado na Figura 4.25, a amostra

do PEE ANEEL teria o potencial de arrecadar um acumulado de pouco mais de US\$ 5,83 milhões. Apenas em 2021, ano que o preço médio da tCO₂ foi negociada em média a US\$ 86,53, os projetos de iluminação seriam capazes de arrecadar US\$ 1,98 milhões. Num mercado com regulação robusta, como o EU ETS, os usos finais com resultados menos expressivos – aquecimento de água, condicionamento ambiental e força motriz, arrecadariam juntos um acumulado de US\$171 mil no período.

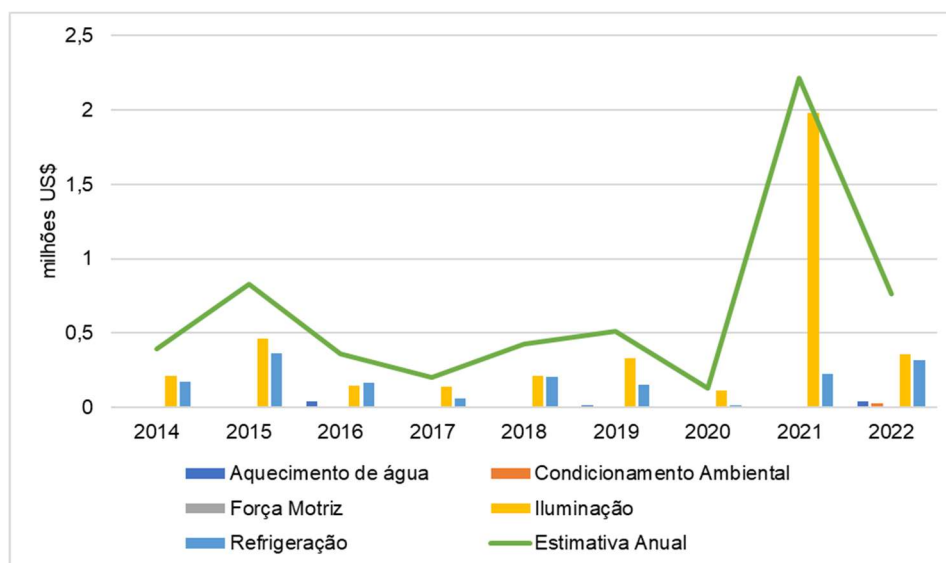


Figura 4.25 Ganhos Cenário de Preço Médio/Alto – PEE ANEEL

Fonte: Elaboração própria

Fica evidente que há potencialidade de arrecadação de receitas advindas do serviço ambiental prestado pelos programas de eficiência energética. Receitas estas, capazes, por exemplo de substituir subsídios do setor, ou ainda financiar a introdução de novos equipamentos nas políticas consideradas. O comportamento dos gráficos indica quais usos finais são responsáveis pela estimativa de um maior retorno e aqueles que, mesmo não tendo retorno significativo podem receber aporte financeiro para se desenvolverem, por exemplo na forma de subsídios ou de reforço na legislação para aumentar sua participação no montante potencialmente arrecadado. É interessante perceber que o CBIO nos anos 2020, 2021 e 2022 teve preços médios anuais¹³ de US\$ 6,63, US\$ 6,6 e US\$ 19,54. Logo, no mercado nacional

¹³ Considerando as cotações médias anuais do dólar. Os preços médios anuais do CBIO em reais foram iguais a R\$ 34,47, R\$ 35,81 e R\$ 100 em 2020, 2021 e 2022, respectivamente.

seria possível ter resultados ainda mais atrativos que os estimados no cenário de preço baixo.

4.1.4 Principais achados e proposições

A decomposição setorial das emissões evitadas pelas políticas públicas de eficiência energética analisadas, revela que o setor residencial é o principal beneficiário das ações implementadas. Apenas no PROCEL, estimou-se que o setor foi responsável por mais de 8 milhões de tCO₂e evitadas no período analisado. Este resultado decorre da ampla penetração de programas voltados à, por exemplo, substituição de lâmpadas, incentivo à aquisição de refrigeradores eficientes e campanhas educativas, que se mostraram eficazes ao longo dos anos.

Apesar de sua representatividade no consumo energético nacional — especialmente no caso do setor industrial, que consome cerca de 40% da eletricidade do país — a participação nas emissões evitadas no setor industrial no PEE ANEEL é inferior a 1% da amostra analisada. Isso evidencia um descompasso entre o potencial de mitigação de emissões e o investimento em eficiência energética direcionado ao setor industrial, que apresenta significativo espaço para expansão de políticas públicas específicas.

A força motriz surge como principal uso final no setor industrial, demonstrando o impacto de políticas voltadas à modernização de motores e processos. Já no setor comercial, observa-se uma concentração nas ações relacionadas ao condicionamento ambiental e iluminação, com oscilações que refletem variações na disponibilidade de tecnologias e nos padrões de consumo.

Na análise regional, os maiores volumes de emissões evitadas estão concentrados nas regiões Sudeste e Nordeste, refletindo tanto o tamanho da população quanto a distribuição do parque de equipamentos. Destaca-se a forte contribuição dos usos finais refrigeração e iluminação, que lideram o volume de emissões evitadas. No uso final força motriz, as regiões Sudeste e Sul também lideram, acompanhando a concentração da atividade industrial. Já o condicionamento ambiental se destaca na região Centro-Oeste, em função das altas temperaturas médias, enquanto no Nordeste, embora o clima também favoreça o uso desses equipamentos, o acesso limitado à renda reduz o impacto esperado. O aquecimento de água, por sua vez, apresenta a menor contribuição

entre os usos finais, especialmente devido às condições climáticas do país e à predominância do chuveiro elétrico, sendo mais expressivo apenas no Sul e Sudeste.

A análise regional, serve para que sejam observadas particularidades do SIN, as quais o mercado de carbono deveria considerar. Para abordar essas especificidades, realizou-se a inclusão de um Fator de Transferência de Fluxo de Energia (FTE), que ajusta as emissões evitadas com base na localização da geração e do consumo da eletricidade.

Esses achados apontam para a necessidade de reequilíbrio das políticas de eficiência energética, ampliando o escopo das ações em setores e regiões com potencial de redução de emissões ainda pouco explorado. Além disso, a heterogeneidade regional sugere que a customização das estratégias, sobretudo por região pode aumentar a efetividade das políticas públicas analisadas.

4.2 Estrutura do Sistemas de Comércio de Emissões

O mercado de emissões em eficiência energética aqui proposto, baseia-se na recomendação do Banco Mundial que elenca dez passos no processo de criação de um sistema de mercado de emissões (WORLD BANK, 2016) , sendo estes:

- i. Definição do escopo;
- ii. Definição do teto de emissões;
- iii. Distribuição de permissões;
- iv. Uso de compensações;
- v. Definição de regras de flexibilidade;
- vi. Criação de mecanismos de estabilidade;
- vii. Definição de regras de supervisão e conformidade;
- viii. Envolvimento das partes interessadas;
- ix. Definição de conexão com outros mercados;
- x. Implementação, avaliação e melhoria.

Além de definir, regras, processos e papel das entidades envolvidas no mercado, este capítulo apresenta o fluxograma de funcionamento do mercado proposto.

4.2.1 Escopo e Objetivo Geral

O Mercado de Carbono para Eficiência Energética deve ser estruturado para estimular a redução de emissões de GEE por meio de ações de eficiência energética no setor elétrico, promovendo um mercado onde o Crédito de Carbono em Eficiência Energética (CefEn) seja negociado com o objetivo de reduzir a intensidade de carbono na matriz elétrica, ao passo que apoia políticas públicas e programas de eficiência energética, como os desenvolvidos no PROCEL e no PEE ANEEL.

A base regulatória para explorar o potencial das ações de eficiência energética dá-se com a instituição do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases do Efeito Estufa (SBCE), pela Lei nº 15.042/2024 que prevê intervenções direcionadas à eficiência energética como uma das possíveis fontes de geração de créditos de carbono no novo mercado (BRASIL, 2024).

O setor industrial, sobretudo indústrias de alta intensidade de emissões (cimento, siderurgia e química), dado seu papel de protagonismo como emissor de gases de efeito estufa, dentre os setores econômicos, possui também a maior capacidade econômica de investimento em eficiência energética, deve ser a parte obrigada do mercado proposto. As distribuidoras de energia elétrica, que já são obrigadas por regulamentação a investir um percentual da sua ROL em projetos de eficiência energética, integrarão o mercado gerando créditos de carbono a partir dos projetos que financiam.

Por fim, a metodologia para o cálculo de emissões evitadas seguirá as diretrizes do *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines on National Greenhouse Gas Inventories (2019 Refinement)*, garantindo alinhamento com padrões internacionais.

4.2.2 Governança e Coordenação

A coordenação e gestão do mercado de carbono em eficiência energética, deve ser realizada de forma a assegurar que suas operações estejam alinhadas com os objetivos estratégicos do setor elétrico brasileiro. Desta forma, deverá ser criado um Comitê de Governança em Eficiência Energética (CGEEE), composto por representantes de diversos órgãos, responsável por definir diretrizes e metas específicas para o mercado de

carbono. Cada instituição contribuirá com sua expertise e atribuições específicas, formando uma estrutura funcional, conforme descrito na

Tabela 4.5.

Tabela 4.5 Atribuições dos representantes do CGEE

Representante	Atribuições
Ministério de Minas e Energia - MME	<ul style="list-style-type: none"> • Coordenar a política do novo mercado de carbono; • Definir, através do Conselho Nacional de Política Energética – CNPE, as diretrizes e políticas públicas que farão parte do mercado de carbono; • Assegurar o alinhamento do mercado aos compromissos climáticos e às prioridades do país.
Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL	<ul style="list-style-type: none"> • Estabelecer critérios regulatórios para a aprovação de projetos de eficiência energética; • Garantir o cumprimento de normas vigentes para que tragam benefícios ao sistema elétrico; • Assegurar a transparência e a integridade dos processos, garantindo a confiança dos participantes no mercado.
Operador Nacional do Sistema - ONS	<ul style="list-style-type: none"> • Fornecer informações técnicas e análises sobre o impacto dos projetos de eficiência no SIN; • Avaliar como as ações de eficiência energética contribuem para a segurança e confiabilidade da operação do sistema elétrico; • Garantir, com base em dados operacionais que as emissões evitadas sejam compatíveis com a realidade técnica do setor.
Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE	<ul style="list-style-type: none"> • Contabilizar e gerenciar as transações de CefEn; • Assegurar que as negociações sejam realizadas de forma justa, eficiente e transparente.
Empresa de Pesquisa Energética - EPE	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar estudos técnicos e projeções sobre o impacto dos projetos de eficiência energética no planejamento energético de longo prazo; • Subsidiar a definição de metas e diretrizes com base em análises de oferta, demanda e potencial de economia; • Garantir que o mercado de carbono seja orientado por informações robustas e baseados em estudos científicos.

A integração desses membros permite que o comitê funcione como uma instância de governança eficiente e multidisciplinar. Cada instituição contribui com sua expertise específica, enquanto a coordenação do comitê assegura que as ações sejam direcionadas para maximizar os benefícios ambientais, econômicos e sociais do mercado de carbono em eficiência energética.

4.2.3 Definição das Metas de Redução de Emissões

O CNPE, instância de assessoramento superior do MME para a formulação de diretrizes para o setor, tem como objetivos proteção do meio ambiente, promoção da conservação de energia, mitigação de gases causadores de efeito estufa, dentre outros. Logo, deve ser o responsável por definir anualmente a meta global de redução de emissões da indústria, ao passo que coordena as regras de diferentes políticas e programas de eficiência energética. A centralização dessas decisões no CNPE garante maior coordenação entre diferentes políticas e programas de eficiência e o mercado de carbono.

Para as distribuidoras, o CNPE deve determinar que as emissões evitadas pelos projetos de eficiência gerem créditos de carbono. Para tal, deve ser estabelecido um limite mínimo para geração de créditos, que será proporcional ao percentual da ROL investido em eficiência energética, o que garante a continuidade das obrigações regulatórias. A manutenção ou expansão das regras de utilização da ROL será garantida por meio do mercado, que permitirá às distribuidoras obterem retorno financeiro pela negociação dos créditos na bolsa de valores.

Já nos setores industriais intensivos - como siderurgia, cimento, papel e celulose, e químico – o CNPE deve definir anualmente o teto global de emissões levando em consideração o desempenho do mercado, os Planos Decenais de Expansão de Energia - PDE e às metas climáticas definidas na NDC brasileira.

Neste cenário, a ANEEL seria o agente responsável por definir as metas individuais com base no consumo energético anual, perfil de emissões da atividade e pelo histórico de investimentos em eficiência energética da indústria, devendo a base de cálculo depender de três aspectos principais:

- **Intensidade de emissões históricas por setor** utilizando séries temporais de emissões verificadas em inventários nacionais de GEE, estabelecendo metas proporcionais ao consumo médio registrado por cada instalação industrial em um período de referência, de forma a garantir que a responsabilidade seja compatível com o impacto de cada agente no setor.
- **Projeção de crescimento do setor** extraídas do PDE e de cenários econômicos setoriais avaliando, por exemplo, a expansão prevista da produção de cimento, aço e papel, de modo que as metas de redução estejam calibradas para não comprometer o crescimento econômico, mas incentivem ganhos de eficiência.
- **Potencial tecnológico de mitigação** considerando melhores práticas, inclusive as desenvolvidas internacionalmente, que permitem definir metas progressivas, viáveis e justas.

4.2.4 Certificação dos Projetos de Eficiência Energética

Empresas certificadoras são responsáveis por validar e verificar as reduções de emissões de gases de efeito estufa resultantes, por exemplo, de iniciativas de eficiência energética, assegurando que os créditos de carbono gerados sejam legítimos e reconhecidos no mercado.

No mercado proposto, as certificadoras devem ser credenciadas pela ANEEL, para garantir a credibilidade, transparência e integridade do mercado de carbono em eficiência energética. As empresas serão responsáveis por auditar e certificar os projetos de eficiência energética, validando as reduções de consumo de energia e emissões de GEE. Para isso, devem conceder o Certificado de Redução de Carbono em Eficiência Energética (CRECE), que formaliza os benefícios ambientais e energéticos obtidos.

As empresas certificadoras credenciadas terão, portanto, a responsabilidade de: (i) Avaliar os projetos de eficiência energética submetidos por indústrias e distribuidoras, (ii) Verificar a conformidade dos projetos com os critérios estabelecidos pela ANEEL, (iii) utilizar metodologias padronizadas para calcular as reduções de consumo energético e as emissões evitadas por cada projeto, (iv) verificar se os resultados apresentados pelos agentes estão em

conformidade com os padrões e normas estabelecidas, (v) emitir o CRECE, que formaliza e documenta as economias de energia e as emissões evitadas, (vi) auditar periodicamente para monitorar resultados e (vii) validar, se for o caso, dados adicionais em caso de expansão. Vale ressaltar que os custos associados a essas atividades fazem parte da própria estrutura de mercado de carbono eficiente, sendo internalizados nos processos de certificação e negociação dos CefEn, e não alocados diretamente aos recursos do PEE

Do ponto de vista técnico e econômico, a viabilidade da proposta é sustentada pela capacidade do MME, em parceria com a EPE, de desenvolver ferramentas e metodologias para calcular o potencial de redução de emissões em diferentes regiões ou subsistemas do SIN. A adoção de uma ferramenta, semelhante à *RenovaCalc*, pode garantir uma abordagem regionalizada e precisa, atendendo às especificidades regionais e setoriais do setor elétrico.

4.2.5 Emissão e Registro de Créditos

A emissão dos CefEn é uma etapa central no funcionamento do mercado de carbono em eficiência energética, pois garante que as reduções de emissões associadas aos projetos sejam devidamente quantificadas, certificadas e disponibilizadas para negociação. Esse processo é projetado para ser transparente, rastreável e baseado em critérios técnicos rigorosos, assegurando que cada crédito emitido reflita uma redução real de emissões de GEE.

Como visto anteriormente, cada projeto de eficiência energética deve ser submetido a uma auditoria técnica conduzida por uma empresa certificadora credenciada pela ANEEL. Essa auditoria verifica se o projeto atende aos critérios previamente estabelecidos. Uma vez aprovado, o projeto recebe o CRECE que formaliza os resultados esperados em termos de economia de energia e redução de emissões.

Com o CRECE emitido, deve-se realizar o cálculo da quantidade de créditos a serem emitidos. Recomenda-se que o cálculo básico, cuja Equação 4.1 representa, considere as emissões evitadas pelo projeto e o local onde a economia de energia está acontecendo, sendo, portanto, ponderada em função do Fator de Transferência de Fluxo de Energia.

$$CefEn_i = Eev_{it} \times FTE_{st} \quad (4.1)$$

Na qual:

- $CefEn_i$ – Crédito de carbono atribuído ao projeto i (tCO_{2e});
- Eev_{it} – Emissões evitadas pelo projeto i no ano t (tCO_{2e})
- FTE_{st} – Fator de transferência de fluxo de energia do subsistema s no ano t .

O registro e a escrituração do CefEn devem ser realizados por instituições financeiras autorizadas, seguindo a abordagem utilizada no RenovaBio. Para o registro inicial dos CefEn, as instituições financeiras receberão informações diretamente das empresas certificadoras, responsáveis por auditar os projetos de eficiência energética e emitir o CRECE de cada projeto. Com base nesses dados, os escrituradores devem criar registros digitais únicos para cada CefEn. Esses registros digitais devem conter informações detalhadas do projeto, tais como tipo de intervenção, local do projeto, período de vigência e volume de emissões evitadas.

Uma vez registrados, os CefEn ficam disponíveis para negociação no mercado de carbono, permitindo que distribuidoras cumpram suas metas de eficiência, que indústrias cumpram suas metas de redução de emissões e que investidores voluntários adquiram créditos como parte de estratégias de sustentabilidade.

Após a emissão inicial, o projeto deve ser monitorado de forma contínua por meio de auditorias periódicas realizadas pelas empresas certificadoras. Esse acompanhamento garante que as reduções de emissões declaradas no CRECE sejam mantidas ao longo do tempo e que, caso haja mudanças, sejam ajustadas.

4.2.6 Mercado de Negociações dos CefEn

A sugestão é que a rastreabilidade do CefEn, ocorra através de uma plataforma digital, a qual deve possibilitar o acompanhamento do status do crédito - disponível, negociado ou aposentado. As transferências devem ser documentadas na plataforma digital, garantindo que o histórico de cada crédito esteja sempre acessível e atualizado. A rastreabilidade garante a integridade do mercado e assegura a verificação da emissão que aquele crédito evitou.

Quando um CefEn for utilizado para compensar emissões ou cumprir metas regulatórias, deve ser aposentado pelo escriturador e esta ação registrada

numa plataforma digital. A aposentadoria indica que o crédito não pode mais ser negociado e que sua contribuição para a redução de emissões foi efetivamente contabilizada. Os escrituradores devem, portanto, interagir diretamente com a B3, como ocorre no RenovaBio, integrando os dados dos créditos e facilitando as transações entre os agentes do mercado.

A bolsa de valores B3 é um espaço adequado para as negociações dos CefEn, onde os preços são determinados livremente pela interação entre oferta e demanda, conectando os vendedores - distribuidoras e indústrias - aos compradores - outras indústrias, investidores voluntários, entre outros. Além de promover a liquidez no mercado, a B3 garante a transparência nas transações e a rastreabilidade dos créditos, assegurando que cada negociação seja documentada e acessível para auditorias e análises futuras.

4.2.7 Mecanismos de Flexibilidade e Estabilidade

A flexibilidade temporal, ou *banking*, é um mecanismo que permite aos participantes do mercado acumularem créditos não utilizados em um período para serem usados em períodos futuros. Este mecanismo de flexibilidade permite o cumprimento de metas em períodos futuros e a negociação dos ativos em períodos nos quais a demanda seja maior. O prazo de validade para o uso dos créditos deve ser determinado de forma a evitar tanto o acúmulo excessivo de créditos no mercado, quanto para garantir que o serviço ambiental siga sendo realizado (TIETENBERG, 2012) (JEAN-FRANCOIS; HINESH; DAN, 2020).

No modelo de mercado proposto, o uso do *banking* permitiria que as indústrias que excederem suas metas de redução de emissões e as distribuidoras que investirem mais em eficiência, preservassem seus créditos para o futuro. Este mecanismo reduz a pressão para atingir as metas anuais e incentiva que investimentos continuem sendo feitos, já que há a perspectiva de benefícios financeiros de médio e longo prazo. Isto garante estabilidade financeira para quem gera créditos e redução de riscos associados à volatilidade de preços do mercado para todos os participantes.

Entretanto, com a finalidade de evitar distorções no mercado é necessário instituir um prazo máximo de validade dos CefEn, garantindo que os créditos reflitam reduções recentes. O prazo máximo deve se relacionar com a natureza do projeto, ao ciclo de vida dos equipamentos eficientes e/ou a

degradação da tecnologia. Por exemplo, em tecnologias como motores industriais que tem um ciclo de vida que pode ser superior a 10 anos, a validade do crédito deve ser ajustada para refletir a taxa de degradação do equipamento. Esse vínculo tem a finalidade de motivar as indústrias a manterem tecnologias em bom estado de conservação ou substituir equipamentos ineficientes. Ainda para reduzir os riscos associados ao *banking*, pode-se determinar uma taxa máxima para acúmulo de CefEn gerados no período e aplicar taxas de depreciação de créditos acumulados.

A reserva de estabilidade é um mecanismo utilizado para evitar flutuações profundas de preço em mercados de carbono, garantindo previsibilidade de preços e confiança dos agentes participantes, definindo-se um preço mínimo (piso) e um preço máximo (teto) para o crédito (ACWORTH; SCHAMBIL; BERNSTEIN, 2020) .

No mercado proposto recomenda-se que uma quantidade inicial de CefEn deve ser adquirida pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), criando uma reserva estratégica que poderá ser acumulada através de contribuições dos participantes, no qual um pequeno percentual dos créditos gerados em cada projeto é automaticamente destinado a reserva, ou através da compra pela CCEE, quando os preços estiverem baixos. Esta reserva deve ser utilizada em situações de alta demanda e de baixa demanda. Na alta demanda quando o preço do CefEn subir além do teto, os créditos da reserva devem ser liberados para estabilizar o mercado. Já na baixa demanda a Câmara deve comprar créditos para aumentar a demanda.

A CCEE deve ser a responsável por operar a reserva e por definir os preços que geram a ativação da reserva, com supervisão do Comitê de Governança em Eficiência Energética, sendo capaz de garantir que as negociações sejam transparentes. A definição do piso e do teto deve ocorrer anualmente e depender dos custos médios para geração dos CefEn, definidos pela Equação 4.2, e da projeção da demanda por créditos.

$$C_{CefEn} = C_{cert} + C_{reg} + C_{esc} + C_{sup} \quad (4.2)$$

Na qual:

- C_{CefEn} – Custo médio para geração dos CefEn;
- C_{cert} – Custo de auditoria e verificação técnica dos projetos;
- C_{reg} – Taxa de registro e rastreabilidade na CCEE;
- C_{esc} – Taxas cobradas pelos escrituradores para gerenciar os CefEn;
- C_{sup} – Taxas direcionadas à governança e conformidade.

4.2.8 Monitoramento, Conformidade e Penalidades

No contexto do sistema elétrico brasileiro, os procedimentos de MRV devem ser implementados por agentes do próprio sistema e por empresas certificadoras em função das suas competências técnicas.

Portanto, a ANEEL deve ser a responsável por supervisionar o cumprimento das regras e metas estabelecidas pelos programas de eficiência, por supervisionar a alocação dos recursos da ROL e fiscalizar a confiabilidade dos dados reportados. A CCEE teria a competência de gerenciar e rastrear os CefEn na plataforma de negociação, desde a emissão até a aposentadoria, além de consolidar os dados de consumo ajustados por perdas técnicas e não técnicas, assegurando a integridade da contabilização. Já o ONS forneceria os dados de consumo e geração de energia para verificação da efetiva redução de emissões. As empresas certificadoras ficariam responsáveis pela verificação técnica dos projetos antes da emissão dos créditos, com a tarefa de realizar auditorias periódicas nos projetos em andamento.

A garantia de conformidade deve ser garantida por meio das auditorias das certificadoras e da CCEE. Além disso devem ser produzidos relatórios detalhados, submetidos ao Comitê de Governança, responsável por revisar o desempenho do mercado e sugerir ajustes, caso necessário. Apesar deste processo não receber o termo MRV, os princípios fundamentais desse sistema estão incorporados em seus mecanismos operacionais.

No contexto da RenovaBio, as penalidades foram gradativamente endurecidas com o amadurecimento do mercado. Recentemente a Lei 15.082/2024 estabeleceu multas para a parte obrigada não-conforme, ou seja, pelo não cumprimento das metas, e tipificou como crime ambiental o não cumprimento das metas individuais estabelecidas o que poderá resultar em

sanções, que incluem a revogação da autorização da atividade de distribuição de combustíveis (BRASIL, 2024). Em mercados internacionais as penalidades¹⁴ pela não-conformidade com as regras estabelecidas incluem multa, obrigação de compensação com acréscimo, suspensão de participação no mercado e sanções penais.

A proposta para o mercado de CefEn alinha-se com penalidades praticadas tanto na RenovaBio quanto em mercados internacionais, entretanto sugere-se que as penalidades sejam adotadas gradualmente conforme a consolidação do mercado. Para a etapa de implementação do mecanismo deve-se aplicar multas proporcionais a quantidade de emissões não compensadas, para tal, podendo-se considerar o maior preço médio mensal. Numa compensação em período posterior, as emissões não mitigadas devem ser acrescidas de um percentual adicional.

Os agentes reincidentes ou com descumprimento significativo, determinado por regulamento, devem ter restrições ou suspensão temporária na participação no mercado de CefEn. Num cenário de mercado consolidado, as infrações graves devem ser tipificadas como crime ambiental, conforme legislação vigente, ficando os agentes sujeitos às penalidades correspondentes.

4.2.9 Integração com outros Mercados

A adesão de outros mercados ao sistema de comércio de emissões de CefEn pode ter um impacto significativo nos custos de emissão, tanto pela redução quanto pela diluição de despesas operacionais e regulatórias. Essa integração amplia a base de participantes, aumenta a liquidez e incentiva o compartilhamento de boas práticas, o que pode otimizar a estrutura de custos e melhorar a eficiência do mercado.

Quando outros mercados, nacionais ou internacionais, são incorporados ao sistema, a escala do mercado cresce substancialmente. Isso significa que os custos fixos relacionados à certificação, registro e rastreamento dos CefEn são diluídos entre um número maior de participantes e transações.

Além disso, a integração com outros mercados traz consigo inovações

¹⁴ As penalidades dos mercados internacionais abordados nesta tese são: *China National ETS*: <https://icapcarbonaction.com/en/ets/china-national-ets>
EU ETS: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/monitoring-reporting-and-verification-eu-ets-emissions_en#annual-compliance-cycle

tecnológicas e processuais que podem ser aplicadas para otimizar o sistema de gestão e certificação dos CefEn. Ferramentas de rastreamento digital, auditorias baseadas em inteligência artificial e metodologias de certificação mais ágeis, adotadas em mercados internacionais, poderiam ser incorporadas ao mercado brasileiro, reduzindo o custo operacional e aumentando a eficiência.

Outro aspecto importante é a competitividade entre os escrituradores e certificadores. Quando o mercado se amplia, mais entidades são incentivadas a oferecer serviços de certificação e escrituração. Essa concorrência tende a resultar em preços mais acessíveis para os participantes, sem comprometer a qualidade dos serviços prestados. Ao mesmo tempo, a adesão de novos mercados aumenta a demanda por CefEn, promovendo maior valorização dos créditos e, conseqüentemente, gerando receitas adicionais para os emissores.

Por fim, a adesão de mercados internacionais ao sistema de CefEn permite a conexão com padrões globais de carbono, o que pode trazer benefícios financeiros diretos. Créditos certificados e registrados em mercados integrados tendem a ganhar maior reconhecimento e ser negociados a preços mais altos, devido à confiança gerada pela interconexão entre os sistemas.

4.2.10 Desenho do Mercado de Carbono em Eficiência Energética

O fluxograma da estrutura institucional do mercado de carbono em eficiência energética proposto é organizado em níveis de hierarquia, conforme apresentado na Figura 4.26.

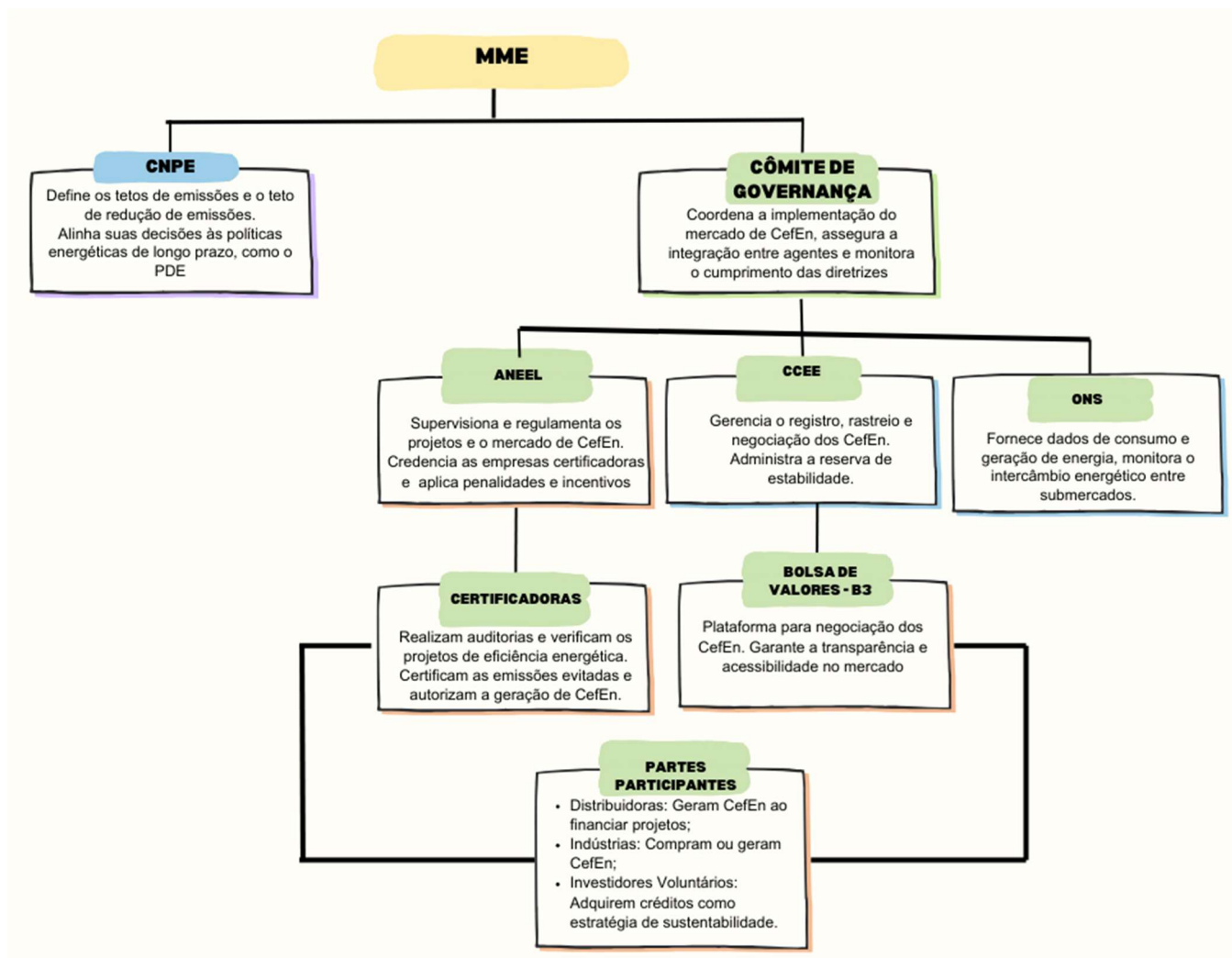


Figura 4.26 Fluxograma institucional do mercado de carbono em eficiência energética

Fonte: Elaboração própria

O fluxograma do mercado de CefEn apresenta uma rede de conexões estruturada entre os agentes, cada um desempenhando um papel específico para garantir a operacionalização eficiente do sistema.

O MME atua como o coordenador geral do sistema, sendo responsável por supervisionar o trabalho do CNPE, que define metas globais de redução de emissões e diretrizes gerais para o mercado. Além disso, o MME supervisiona o Comitê de Governança, que implementa essas diretrizes e monitora a sua execução.

O CNPE, por sua vez, se conecta diretamente com o Comitê de Governança, para garantir que as metas e diretrizes sejam operacionalizadas, e à ANEEL, que regulamenta o mercado e assegura que os objetivos traçados pelo CNPE sejam cumpridos.

O Comitê de Governança se conecta à ANEEL, à CCEE e ao ONS, assegurando que todos os agentes estejam alinhados e que os sistemas de monitoramento e gerenciamento de créditos funcionem de forma integrada.

A ANEEL está conectada às empresas certificadoras, que realizam auditorias nos projetos e emitem os certificados necessários para a geração dos CefEn. Além disso, a ANEEL trabalha com a CCEE, definindo diretrizes operacionais, e mantém comunicação constante com o CGEEE.

O ONS fornece dados técnicos críticos sobre a geração, o consumo e o intercâmbio de energia entre subsistemas, conectando-se tanto ao CGEEE quanto à CCEE. Esses dados são utilizados no cálculo das emissões evitadas e no rastreamento da eficiência dos projetos.

A CCEE atua junto à Bolsa de Valores B3, às empresas certificadoras e ao Comitê. A CCEE garante que os créditos emitidos sejam rastreáveis e negociáveis, além de administrar a reserva de estabilidade para manter o equilíbrio do mercado.

As empresas certificadoras, credenciadas pela ANEEL, interagem com a CCEE para registrar os créditos e com as partes participantes, que incluem distribuidoras, indústrias e investidores voluntários. Elas verificam e validam os projetos de eficiência energética, assegurando a integridade dos CefEn emitidos, que serão negociados na B3, atua como a plataforma de negociação dos CefEn, conectando-se à CCEE para acessar os registros dos créditos e às partes participantes, permitindo a transação entre distribuidoras, indústrias e investidores.

Por fim, as partes participantes interagem diretamente com as empresas certificadoras para validar seus projetos e com a B3 para negociar os créditos de carbono. As indústrias, em especial as de maior intensidade de emissões, tornam-se demandantes obrigatórias de créditos em função das metas compulsórias definidas pelo CNPE e operacionalizadas pela ANEEL, criando a base legal que garante a demanda no mercado.

Empresas que já são altamente eficientes podem não necessitar adquirir créditos adicionais, e inclusive gerar excedentes a partir de reduções adicionais comprovadas, que poderão ser negociados. Já empresas ineficientes somente poderão emitir créditos se realizarem investimentos efetivos em eficiência energética, validados por auditoria técnica e registrados pela CCEE,

garantindo que apenas reduções reais, adicionais e verificáveis sejam convertidas em CefEn.

A estrutura organizacional proposta adapta elementos do modelo RenovaBio e de experiências internacionais, considerando as especificidades do sistema elétrico brasileiro e dos agentes envolvidos.

4.2.11 Considerações Adicionais

Implementar o mercado de CefEn de forma gradual pode mitigar riscos e facilitar a adaptação dos participantes. Seria, portanto, interessante uma fase piloto que abrangesse indústrias de alta intensidade de emissões e as distribuidoras, com foco em realizar ajustes dependendo dos resultados alcançados e do feedback destes participantes iniciais. Em seguida, caminhar para uma expansão na qual outros agentes de mercado possam ser incorporados, sendo a fase ideal para elevar gradualmente metas compulsórias, por exemplo. Numa situação de consolidação de mercado, regras mais rígidas de conformidade, como multas e sanções, podem ser aplicadas.

Há, entretanto, risco de volatilidade de preços, de baixa aderência inicial e riscos operacionais associados ao modelo de mercado proposto. Apesar de ser um mecanismo importante, a reserva de estabilidade deve passar por revisões criteriosas para evitar concentração excessiva de créditos ou escassez prolongada. Na fase piloto é importante que a aderência seja estimulada, por exemplo, através de incentivos fiscais. Os riscos operacionais mais significativos devem ocorrer no rastreamento do crédito, portanto, é crucial garantir que a plataforma desenvolvida com essa finalidade seja robusta o suficiente para garantir a integridade das negociações.

A atração de agentes voluntários traria ainda mais liquidez para o mercado. Em contrapartida a participação de partes não obrigadas, pode-se oferecer benefícios como um certificado de responsabilidade ambiental, ou incluir o nome de investidores voluntários em relatórios oficiais de sustentabilidade, mostrando o impacto positivo destes agentes.

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista a importância do comércio de emissões como ferramenta na mitigação das emissões de gases do efeito estufa e conseqüentemente das mudanças climáticas e considerando: o crescimento da participação das termelétricas na matriz brasileira; os compromissos ambientais firmados no Acordo de Paris; a ambiciosa Contribuição Nacionalmente Determinada; e os resultados positivos das políticas e programas de eficiência energética, este trabalho tinha como questionamento norteador se a criação de um mercado de carbono seria capaz de incentivar a eficiência energética no setor elétrico brasileiro.

O mercado proposto, baseado na emissão de Créditos de Carbono em Eficiência Energética (CefEn), estabelece mecanismos claros para estimular investimentos em eficiência energética. A estrutura abrange incentivos econômicos para indústrias, distribuidoras e outros participantes, permitindo que esses agentes monetizem as reduções de emissões de GEE provenientes de projetos de eficiência energética.

As distribuidoras, já obrigadas a investir em eficiência energética pelo PEE-ANEEL, passam a gerar créditos de carbono com esses projetos. Entretanto, em respeito ao contrato de concessão e ao princípio da modicidade tarifária, os ganhos com a comercialização desses créditos não constituem receita própria, devendo ser revertidos em benefício dos consumidores, seja por meio de redução tarifária ou reinvestimento regulado. Já as indústrias, sobretudo as de alta intensidade de carbono, têm incentivos diretos para adotar tecnologias mais eficientes e cumprir metas regulatórias. Já os investidores voluntários encontram no mercado uma oportunidade de apoiar ações de eficiência energética enquanto contribuem para a sustentabilidade de suas empresas.

Os resultados apresentados destacam que programas como o PROCEL e o PEE ANEEL já demonstraram impacto significativo na redução do consumo energético e, conseqüentemente, nas emissões. A proposta de incorporar esses créditos em um mercado regulado amplifica seus benefícios. A análise de usos finais, como iluminação e condicionamento ambiental, evidencia o potencial de redução de emissões associadas à implementação de tecnologias mais eficientes.

O mercado de CefEn gera um incentivo financeiro para participantes obrigados e voluntários, garantindo que a eficiência energética seja economicamente atrativa. Ademais, a proposta está alinhada às metas climáticas nacionais e internacionais, como o Acordo de Paris. Além de complementar políticas já existentes, como o PROCEL, PEE ANEEL é possível adaptar mecanismos e conceitos bem-sucedidos do RenovaBio, para o setor elétrico.

A proposta prevê mecanismos de estabilidade, através da acumulação de créditos não utilizados para períodos futuros, e uma reserva de estabilidade, que mitiga flutuações extremas de preço, garante que a negociação dos créditos permaneça atrativa e previsível. Esses mecanismos oferecem aos participantes maior segurança para investir em projetos de médio e longo prazo.

Embora tenha-se tentado criar uma proposta de mercado robusta, alguns desafios como (i) a necessidade de integração de agentes do setor elétrico; (ii) a dificuldade em definir claramente as metas setoriais e regionais considerando a complexidade do SIN; e (iii) os custos associados ao monitoramento e à certificação que precisam ser equilibrados para que o mercado seja de fato atrativo para os agentes envolvidos, devem ser considerados. Apesar dos desafios, a criação de um mercado de carbono no formato proposto pode ser uma solução viável economicamente e estratégica para incentivar a eficiência energética no Brasil.

Definiu-se como primeiro objetivo específico a análise da estrutura do mercado de créditos de carbono do programa RenovaBio. Esta análise foi utilizada para entender a estrutura de um mercado de carbono que atendesse as especificidades do país. As lições extraídas da experiência do RenovaBio direcionaram a proposta que, de forma semelhante, deve estabelecer metas compulsórias de redução de emissões, na presença de um mecanismo robusto de certificação e rastreio dos créditos, utilizando certificadoras e escrituradores. e ambiente de negociações confiável.

No objetivo seguinte, esperava-se estimar a redução de emissões associadas a programas de eficiência energética. O PROCEL e o PEE ANEEL foram as políticas selecionadas para esta estimativa. Alguns resultados foram interessantes para a determinação, por exemplo, Fator de Transferência de Energia – FTE. Este fator tem a função de corrigir discrepâncias regionais no

intercambio de energia entre os subsistemas.

A estimativa do impacto econômico da negociação de créditos de carbono provenientes dos programas de eficiência energética, foi abordado em dois cenários: cenário de preço baixo e cenário de preço médio/alto.

No cenário de preço baixo (<US\$ 10/tCO₂e), o PROCEL apresentou um potencial de arrecadação entre US\$ 5,5 milhões e US\$ 15,5 milhões. Já o PEE ANEEL, apresentou um potencial de arrecadação entre US\$ 580 mil a US\$ 4,6 milhões, dependendo do uso final considerado. No cenário de preço médio/alto, com preços chegando a US\$ 86,53/tCO₂e em 2022, estimou-se ganhos de até US\$ 130 milhões no PROCEL e valores entre US\$ 861 mil e US\$ 10,4 milhões na amostra selecionada do PEE ANEEL.

Por fim o último objetivo foi alcançado através da proposição de um sistema de comércio de emissões voltado para a eficiência energética. Foram considerados aspectos de governança, certificação, negociação, flexibilidade e estabilidade, com base no RenovaBio e em mecanismos internacionais. O papel das entidades-chave, como ANEEL, CCEE, CNPE e certificadoras, foi detalhado, demonstrando como suas funções se integrariam para garantir a transparência e o monitoramento eficaz de um novo mercado.

Essa abordagem não apenas estimula a eficiência energética, mas também cria um ambiente onde a mitigação das emissões se torna não apenas uma responsabilidade ambiental, mas uma oportunidade financeira atrativa. Ao alinhar os interesses econômicos com os objetivos de sustentabilidade, a criação de uma estrutura de mercado de carbono emerge como uma ferramenta valiosa para impulsionar investimentos em soluções de baixa emissão de carbono.

Embora os objetivos inicialmente propostos tenham sido alcançados, mesmo que parcialmente, algumas dificuldades e limitações foram encontradas ao longo do desenvolvimento do estudo.

A primeira dificuldade observada refere-se à variação na forma como os dados de economia de energia e emissões evitadas são apresentados por diferentes programas ao longo dos períodos analisados. A falta de uniformidade no nível de detalhamento das informações e nas abordagens metodológicas empregadas compromete a comparação entre resultados e a precisão das avaliações realizadas. Por exemplo, a partir de 2013, verificou-se uma redução na especificidade dos resultados do PROCEL por uso final, dificultando análises

regionais e setoriais mais aprofundadas.

Outra limitação refere-se a falta de um alinhamento entre diferentes políticas públicas e programas de eficiência energética. Embora o RenovaBio tenha servido como referência, não existem mecanismos robustos para conectar políticas como o PROCEL e o PEE ANEEL a um mercado de carbono em eficiência energética.

Apesar de ser uma proposição pioneira o nível de coordenação entre os agentes responsáveis e as regulamentações existentes é um desafio considerável e apesar da apresentação detalhada, não é possível prever como o mercado se comportará numa situação extrema, especialmente diante de cenários, como por exemplo, de redução da ROL, ocorrido durante a pandemia de COVID-19.

O desenvolvimento de um mercado de carbono para eficiência energética é um desafio, especialmente no que diz respeito à criação de métricas confiáveis para calcular e rastrear emissões evitadas. Apesar da adoção de metodologias baseadas em padrões internacionais, como os do IPCC, a necessidade de incluir fatores específicos, como o Fator de Transferência de Energia – FTE ou variáveis regionais e setoriais, adiciona camadas de complexidade ao sistema proposto.

A implementação de mercados regulados frequentemente enfrenta barreiras em sua fase inicial, como baixa adesão dos agentes obrigados e limitada participação de investidores voluntários. Além disso, a volatilidade de preços e a incerteza econômica podem desestimular o investimento inicial em projetos de eficiência energética, o que exige a adoção de mecanismos de incentivo, tais como subsídios ou incentivos fiscais.

Tendo em vista a complexidade do mercado, sugerem-se três possibilidades de estudos futuros:

- (i) Explorar a integração do mercado de CefEn com mercados nacionais e internacionais de carbono. A conexão com mercados maiores pode aumentar a liquidez e atratividade do CefEn, permitindo a participação de agentes internacionais e elevando o valor dos créditos emitidos. A experiência mesmo que em mercados voluntários pode oferecer aprendizados e boas práticas para aprimorar o funcionamento e a governança do

CefEn.

- (ii) Avançar nas metodologias de estimativa de emissões evitadas considerando fatores regionais e setoriais específicos, nas estimativas de economia de energia e créditos de carbono, e inclusão de variáveis de ajuste considerando o ciclo de vida dos equipamentos.
- (iii) Investigar os impactos sociais de um mercado de carbono voltado para eficiência energética, especialmente nos setores residenciais de baixa renda. Setores como o residencial têm menor capacidade de investimento em tecnologias eficientes, mas possuem grande relevância social. Um estudo focado nesse segmento pode identificar oportunidades de inclusão e ter um impacto social positivo. A análise pode considerar por exemplo como os recursos gerados pela negociação de CefEn podem ser realocados em programas sociais ou melhorias de infraestrutura energética.

BRASIL. **Lei 10.295: Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências.** 2001.

BRASIL. **Lei 13.576 Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).** 2017a.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009 Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC.** 2009.

BRASIL. **Lei Nº 12.212: Dispõe sobre a Tarifa Social de Energia Elétrica.** 2010.

BRASIL. **Lei Nº 15.082, de 30 de dezembro de 2024: Altera a Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017, que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), para nela incluir os produtores independentes de matéria-prima destinada à produção de biocom.** 2024.

BRASIL. **Lei no 9.991, de 24 de julho de 2000: Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providê.** 2000.

BRASIL. **Nationally Determined Contribution to the Paris Agreement under the UNFCCC.** 2023. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-11/Brazil First NDC 2023 adjustment.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2023-11/Brazil%20First%20NDC%20adjustment.pdf).

BRASIL. Paris Agreement: Brazil's Nationally Determined Contribution (NDC). 2020. **United Nations.** Disponível em: [https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil First/Brazil First NDC \(Updated submission\).pdf](https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Brazil%20First/Brazil%20First%20NDC%20(Updated%20submission).pdf).

BRASIL. **Portaria Interministerial MME/MCTIC/MDIC nº 1, de 29.08.2017: Aprova o Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo.** 2017b. Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias_interministeriais/Portaria_Interministerial_MME_MCTIC_MDIC_n_1_de_29082017.html#:~:text=Aprova o Programa de Metas,Indução Rotor Gaiola de Esquilo.](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias_interministeriais/Portaria_Interministerial_MME_MCTIC_MDIC_n_1_de_29082017.html#:~:text=Aprova%20o%20Programa%20de%20Metas,Indu%C3%A7%C3%A3o%20Rotor%20Gaiola%20de%20Esquilo.)

BRASIL. **PORTARIA Nº 420, DE 4 DE OUTUBRO DE 2021: Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Equipamentos de Aquecimento Solar de Água – Consolidado.** 2021. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002848.pdf>.

BRASIL. **R E S O L U Ç Ã O Nº 4, DE 2008 Cria, no âmbito do Congresso Nacional, Comissão Mista Permanente sobre Mudanças Climáticas - CMMC.** 2008.

BUENDIA, E., TANABE, K., KRANJC, A., BAASANSUREN, J., FUKUDA, M., NGARIZE, S., OSAKO, A., PYROZHENKO, Y.; SHERMANAU, P. AND FEDERICI, S. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National**

Greenhouse Gas Inventories. Switzerland, 2019. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2019/12/19R_V0_01_Overview.pdf.

CARVALHO, N. B.; BERRÊDO VIANA, D.; MUYLELAERT DE ARAÚJO, M. S.; LAMPREIA, J.; GOMES, M. S. P.; FREITAS, M. A. V. How likely is Brazil to achieve its NDC commitments in the energy sector? A review on Brazilian low-carbon energy perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 133, n. November 2019, 2020a. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110343>.

CARVALHO, N. B.; BERRÊDO VIANA, D.; MUYLELAERT DE ARAÚJO, M. S.; LAMPREIA, J.; GOMES, M. S. P.; FREITAS, M. A. V. How likely is Brazil to achieve its NDC commitments in the energy sector? A review on Brazilian low-carbon energy perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 133, 2020b. DOI 10.1016/j.rser.2020.110343. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85091248182&doi=10.1016%2Fj.rser.2020.110343&partnerID=40&md5=e1d80f15be38e8aca25845b68264e3e4>.

CHEN, X.; LIN, B. Towards carbon neutrality by implementing carbon emissions trading scheme: Policy evaluation in China. **Energy Policy**, v. 157, n. August, p. 112510, 2021. DOI 10.1016/j.enpol.2021.112510. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112510>.

CHISHTI, M. Z.; AHMAD, M.; REHMAN, A.; KHAN, M. K. Mitigations pathways towards sustainable development: Assessing the influence of fiscal and monetary policies on carbon emissions in BRICS economies. **Journal of Cleaner Production**, v. 292, p. 126035, 2021. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.126035. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126035>.

CRIPPA, M.; GUIZZARDI, D.; BANJA, M.; SOLAZZO, E.; MUNTEAN, M.; SCHAAF, E.; PAGANI, F.; MONFORTI-FERRARIO, F. **CO2 emissions of all world countries – JRC/IEA/PBL 2022 Report.** Luxembourg, 2022. <https://doi.org/10.2760/07904>.

DENNY, D. M. T. Competitive renewables as the key to energy transition—RenovaBio: the Brazilian biofuel regulation. *In*: GUIMARÃES, L. N. (org.). **The Regulation and Policy of Latin American Energy Transitions.** Elsevier Science, 2020. p. 223–242. DOI 10.1016/b978-0-12-819521-5.00013-9. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-819521-5.00013-9>.

DOĞAN, B.; FERRAZ, D.; GUPTA, M.; DUC HUYNH, T. L.; SHAHZADI, I. Exploring the effects of import diversification on energy efficiency: Evidence from the OECD economies. **Renewable Energy**, v. 189, p. 639–650, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.018>.

EEA. The EU Emissions Trading System in 2021: trends and projections. 2023. **European Environment Agency.** Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/the-eu-emissions-trading-system-2>. Acesso em: 30 maio 2023.

ELETROBRÁS. Resultados do PROCEL. 2025. **PROCELINFO - Centro**

Brasileiro de Informação de Eficiência Energética. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BEB580A2D-48EF-4BE7-B53F-E5751205CF66%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>.

EPE. **Balço Energético Nacional 2016: Relatório Síntese.** Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

EPE. **BEN: Relatório Síntese (2025).** 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_Síntese_2025_PT.pdf.

EPE. Fluxograma de Funcionamento do RenovaBio. 2018. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/Fluxograma de funcionamento RenovaBio - ARQUIVO 5.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-155/Fluxograma_de_funcionamento_RenovaBio_-_ARQUIVO_5.pdf). Acesso em: 19 ago. 2022.

ESMAP. **Regulatory Indicators for Sustainable Energy (RISE).** Washington, DC, 2022. Disponível em: <https://rise.esmap.org/analytics>.

EURICID MNE. Alterações Climáticas: Rumo a uma União Europeia com impacto neutro no clima. Lisboa, Portugal, 2020. Disponível em: https://eurocid.mne.gov.pt/entity_pdf/node/11860/full.

EUROPEAN COMMISSION. Development of EU ETS (2005-2020). 2023a. Disponível em: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en#:~:text=Set up in 2005%2C the,phase \(2021-2030\)](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en#:~:text=Set up in 2005%2C the,phase (2021-2030).). Acesso em: 20 maio 2023.

EUROPEAN COMMISSION. EU-China ETS: Project Introduction. 2014. Disponível em: <https://www.eu-chinaets.org/en/about-us/project-introduction>. Acesso em: 30 maio 2023.

EUROPEAN COMMISSION. Revision for phase 4 (2021-2030). 2023b. Disponível em: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/revision-phase-4-2021-2030_en. Acesso em: 20 maio 2023.

FENG, R.; LIN, P.; HOU, C.; JIA, S. Study of the Effect of China's Emissions Trading Scheme on Promoting Regional Industrial Carbon Emission Reduction. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, n. July, p. 1–16, 2022. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.947925>.

GALLINA, E. S.; DE OLIVEIRA CRUZ, L.; MATIAS, F. Brazilian public policies and sustainable development that influence the national bioindustry. **World Sustainability Series**, , p. 127–139, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45081-0_8.

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: Conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos Avancados**, v. 29, n. 84, p. 43–68, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142015000200004>.

GOES, G. V.; SCHMITZ GONÇALVES, D. N.; DE ALMEIDA D'AGOSTO, M.; DE MELLO BANDEIRA, R. A.; GROTTERRA, C. Transport-energy-environment modeling and investment requirements from Brazilian commitments. **Renewable Energy**, v. 157, p. 303–311, 1 set. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.032>.

GOLDENBERG, J.; PRADO, L. T. S. Reforma e crise do setor elétrico no período FHC. **Tempo Social**, v. 15, 2003. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0103-20702003000200009>.

GONÇALVES, C. P.; RAMOS, D. S.; ROSA, P. S.; BALAN, M. H.; BEZERRA, B. V.; CAVALIERE, M.; MELLO, R. F. The impact of COVID-19 on the Brazilian Power Sector: Operational, Commercial and Regulatory Aspects. **IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS**, v. 20, n. 4, p. 529–536, 2022. .

GRASSI, M. C. B.; PEREIRA, G. A. G. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial Crops and Products**, v. 129, n. July 2018, p. 201–205, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.006>.

GRUBB, M.; CRAWFORD-BROWN, D.; NEUHOFF, K.; SCHANES, K.; HAWKINS, S.; PONCIA, A. Consumption-oriented policy instruments for fostering greenhouse gas mitigation. **Climate Policy**, v. 20, n. sup1, p. S58–S73, 2020. DOI 10.1080/14693062.2020.1730151. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1730151>.

HEIMVIK, A.; AMUNDSEN, E. S. Prices vs. percentages: Use of tradable green certificates as an instrument of greenhouse gas mitigation. **Energy Economics**, v. 99, p. 105316, 2021. DOI 10.1016/j.eneco.2021.105316. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105316>.

HU, Y.; DING, Y.; JUN, L.; ZHANG, Q.; ZIJIAN, P. Does carbon mitigation depend on green fiscal policy or green investment? **Environmental Research Letters**, v. 18, 2023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acc4df>.

HUANG, W.; WANG, Q.; LI, H.; FAN, H.; QIAN, Y.; KLEMEŠ, J. J. Review of recent progress of emission trading policy in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 349, n. December 2021, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131480>.

HUGHES, N.; MUTRAN, V. M.; TOMEI, J.; DE OLIVEIRA RIBEIRO, C.; OLLER DO NASCIMENTO, C. A. Strength in diversity? Past dynamics and future drivers affecting demand for sugar, ethanol, biogas and bioelectricity from Brazil's sugarcane sector. **Biomass and Bioenergy**, v. 141, n. September, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105676>.

HULTMAN, N.; LOU, J.; HUTTON, S. A review of community co-benefits of the clean development mechanism (CDM). **Environmental Research Letters**, v. 15, 2020. .

IBGE. IBGE divulga o rendimento domiciliar per capita e o Coeficiente de Desequilíbrio Regional de 2022. 2023. **Agência IBGE Notícias**. Disponível em:

[https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/37023-ibge-divulga-o-rendimento-domiciliar-per-capita-e-o-coeficiente-de-desequilibrio-regional-de-2022#:~:text=Em 2022%2C o rendimento nominal,e CDR de 0%2C6](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/37023-ibge-divulga-o-rendimento-domiciliar-per-capita-e-o-coeficiente-de-desequilibrio-regional-de-2022#:~:text=Em%202022%2C%20o%20rendimento%20nominal,e%20CDR%20de%200%2C6). Acesso em: 30 set. 2023.

IBGE. **Pesquisa Industrial Anual - Empresa 2022**. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/2a8462d222b8f6b63581518071ffa2f2.pdf.

ICAP. Allowance Price Explorer. 2025. Disponível em: <https://icapcarbonaction.com/en/ets-prices>. Acesso em: 10 jun. 2023.

IEA. **Accelerating energy efficiency: What governments can do now to deliver energy savings**. Paris, 2022a. Disponível em: <https://www.iea.org/commentaries/accelerating-energy-efficiency-what-governments-can-do-now-to-deliver-energy-savings>.

IEA. **Covid-19 impact on electricity**No Title. Paris, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/covid-19-impact-on-electricity>.

IEA. **Enhancing China's ETS for carbon neutrality: focus on power sector**. 2022b.

IEA. **Global Energy Review : CO2 Emissions in 2021**. 2022c. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>.

IEA. Russia's war on Ukraine. 2022d. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/russia-s-war-on-ukraine>. Acesso em: 20 nov. 2022.

IEMA. **INVENTÁRIO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS EM USINAS TERMELÉTRICAS: geração de eletricidade, emissões e lista de empresas proprietárias das termelétricas a combustíveis fósseis do Sistema Interligado Nacional (ano-base 2021)**. 2022. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/2o-inventario-de-emissoes-atmosfericas-em-usinas-termeletricas>.

INMET. Gráficos Anuais de Estações - Temperatura. 2021. Disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/CondicoesTempoRegistradas>.

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**. Geneva, Switzerland, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.

IPCC. **Renewable energy sources and climate change mitigation: Special report of the intergovernmental panel on climate change**. 2011. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153>.

IRENA. **Untapped potential for Climate action renewable energy in NDCs**. 2017. Disponível em: <https://irena.org/publications/2017/Nov/Untapped>

potential-for-climate-action-NDC.

JANNUZZI, G.; DANELLA, M. A.; SILVA, S. A. S. Metodologia para avaliação da aplicação dos recursos dos programas de eficiência energética. **International Energy Initiative Latin America**, n. 2, 2004. Disponível em: <http://www.iei-brasil.org/pdf/edpaper2600104.pdf>.

JANNUZZI, G. M. Algumas experiências internacionais de políticas públicas em Eficiência Energética: Mecanismos para incentivar Eficiência Energética. 2017. **Seminário de Eficiência Energética do Setor Elétrico - SEENEL [...]**. 2017. DOI 10.13140/RG.2.2.20372.81283. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319068763_Algumas_experiencias_internacionais_de_politicas_publicas_em_Eficiencia_Energetica_Mecanismos_para_incentivar_Eficiencia_Energetica.

JEAN-FRANCOIS, C.; HINESH, C.; DAN, C. Modelling multi-period carbon markets using singular forward backward SDEs. , p. 1–39, 2020. .

KIM, E. S. The politics of climate change policy design in Korea. **Environmental Politics**, v. 25, n. 3, p. 454–474, 2016. DOI 10.1080/09644016.2015.1104804. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/09644016.2015.1104804>.

KLEIN, B. C.; CHAGAS, M. F.; WATANABE, M. D. B.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R. Low carbon biofuels and the New Brazilian National Biofuel Policy (RenovaBio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, 1 nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109365>.

KOUGIAS, I.; TAYLOR, N.; KAKOULAKI, G.; JÄGER-WALDAU, A. The role of photovoltaics for the European Green Deal and the recovery plan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, n. February, p. 1–8, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111017>.

LADE, G. E.; LIN LAWELL, C. Y. C. The design and economics of low carbon fuel standards. **Research in Transportation Economics**, v. 52, p. 91–99, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2015.10.009>.

LI, R.; PERDANA, S.; VIELLE, M. Potential integration of Chinese and European emissions trading market: welfare distribution analysis. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 26, n. 5, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11027-021-09960-7>.

LUCCHESI, C.; AZEVEDO, G. B.; MILLARD, P. Com excesso de energia, setor eólico e solar no Brasil enfrenta crise sem precedente. 2025. .

MAKRIDOU, G.; DOUMPOS, M.; GALARIOTIS, E. The financial performance of firms participating in the EU emissions trading scheme. **Energy Policy**, v. 129, n. August 2018, p. 250–259, 2019. DOI 10.1016/j.enpol.2019.02.026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.02.026>.

MCTI. Fatores de emissão da margem de operação pelo método da análise de despacho. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o->

mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao.

MENDES, P. Políticas Públicas para Descarbonização do Setor de Transportes. 2021. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=TZ_a0YwPwAs. Acesso em: 20 jun. 2021.

MENKES, M. Eficiência Energética, Políticas Públicas E Sustentabilidade. , p. 277, 2004. Disponível em: https://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Arquitetural/efici%EAncia_energ%E9tica/Pesquisa/eficiencia_energetica_politicas_publicas_e_sustentabilidade.pdf.

MERCURE, J. F.; PAIM, M. A.; BOCQUILLON, P.; LINDNER, S.; SALAS, P.; MARTINELLI, P.; BERCHIN, I. I.; DE ANDRADE GUERRA, J. B. S. O.; DERANI, C.; DE ALBUQUERQUE JUNIOR, C. L.; RIBEIRO, J. M. P.; KNOBLOCH, F.; POLLITT, H.; EDWARDS, N. R.; HOLDEN, P. B.; FOLEY, A.; SCHAPHOFF, S.; FARACO, R. A.; VINUALES, J. E. System complexity and policy integration challenges: The Brazilian Energy- Water-Food Nexus. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, n. March 2018, p. 230–243, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.045>.

MME. **Conselho Nacional de Política Energética: 6ª REUNIÃO EXTRAORDINÁRIA**. 2021a. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/resolucoes-2021/6RE_CNPE_MMEV_1.pdf#:~:text=* 6ª REUNIÃO EXTRAORDINÁRIA. * 05/10/2021. * CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA.

MME. Escassez hídrica e o fornecimento de energia elétrica no Brasil. 2021b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/sala-de-imprensa/noticias/Documents/infográfico.pdf>.

MORENO-PÉREZ, O. M.; MARCOSSI, G. P. C.; ORTIZ-MIRANDA, D. Taking stock of the evolution of the biodiesel industry in Brazil: Business concentration and structural traits. **Energy Policy**, v. 110, n. September, p. 525–533, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.001>.

NACHMANY, M.; FANKHAUSER, S.; DAVIDOVÁ, J.; KINGSMILL, N.; LANDESMAN, T.; ROPPOINGI, H.; TOWNSHEND, T.; SCHLEIFER, P.; SETZER, J.; SHARMAN, A.; SINGLETON, C. S.; SUNDARESAN, J. **The 2015 Global Climate Legislation Study: A Review of Climate Change Legislation in 99 Countries**. 2015.

NARANJO TUESTA, Y.; CRESPO SOLER, C.; RIPOLL FELIU, V. Carbon management accounting and financial performance: Evidence from the European Union emission trading system. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 2, p. 1270–1282, 2021. <https://doi.org/10.1002/bse.2683>.

NERLINGER, M.; UTZ, S. The impact of the Russia-Ukraine conflict on the green energy transition: A capital market perspective. **Swiss Finance Institute Research Paper Series**, 2022. .

NIIZAWA, H.; HAYASHI, D.; LIU, X. Features and prospect of China's national

GHG emissions trading scheme. **Carbon Management**, v. 11, n. 2, p. 155–167, 2020. <https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1721975>.

NOGUEIRA, L. A. H.; CARDOSO, R. B.; CAVALCANTI, C. Z. B.; LEONELLI, P. A. Evaluation of the energy impacts of the Energy Efficiency Law in Brazil. **Energy for Sustainable Development**, v. 24, p. 58–69, 2015. DOI 10.1016/j.esd.2014.12.002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esd.2014.12.002>.

OLIVEIRA, Y. P. L. de. Desafios do Mercado de Carbono após o Acordo de Paris: Uma revisão. **Meio Ambiente**, v. 4, n. 1, p. 2–20, 2022. .

ONS. Histórico da Operação: Carga de Energia. 2025a. **Resultados da Operação**. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/carga_energia.aspx. Acesso em: 27 mar. 2025.

ONS. Histórico da Operação: Intercâmbios entre Subsistemas. 2025b. **Resultados da Operação**. Disponível em: https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/intercambios_energia.aspx.

ONU. **Acordo de Paris. Convenção Quadro sobre Mudança do Clima**. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>.

PAPIEŹ, M.; ŚMIECH, S.; FRODYMA, K. Does the European Union energy policy support progress in decoupling economic growth from emissions? **Energy Policy**, v. 170, n. September, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113247>.

PICCININI, M. S. Conservação de Energia na Indústria: As Políticas Adotadas na Época da Crise Energética. **Revista do BNDES**, v. 1, n. 2, p. 153–182, 1994. Disponível em: [https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4661/1/Conservação de Energia na Indústria_As Políticas Adotadas na Época da Crise Energética.pdf](https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4661/1/Conservação_de_Energia_na_Indústria_As_Políticas_Adotadas_na_Época_da_Crise_Energética.pdf).

PROCEL. **Procel: 20 anos**. Rio de Janeiro: Centro de Memória da Eletricidade no Brasil, 2006. Disponível em: <https://www.memoriadaeletricidade.com.br/acervo/13666/procel-20-anos>.

PROCEL. **Resultados PROCEL 2023: Ano base 2022**. 2023. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BEB580A2D-48EF-4BE7-B53F-E5751205CF66%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>.

RODRIGUES, E. CAE aprova regulamentação do mercado de redução de emissões de carbono. **Agência Senado**, Brasília, DF, 29 nov. 2022.

RODRÍGUEZ-MORALES, J. E. Convergence, conflict and the historical transition of bioenergy for transport in Brazil: The political economy of governance and institutional change. **Energy Research and Social Science**, v. 44, p. 324–335, 1 out. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.05.031>.

RUTHERFORD, A. P. Regulatory framework for biofuels in Brazil: History and challenges under the law of the WTO. **Journal of Energy and Natural Resources Law**, v. 34, n. 2, p. 213–238, 2016. <https://doi.org/10.1080/02646811.2016.1147900>.

SARAVANAN, A. P.; PUGAZHENDHI, A.; MATHIMANI, T. A comprehensive assessment of biofuel policies in the BRICS nations: Implementation, blending target and gaps. **Fuel**, v. 272, 15 jul. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117635>.

SCHWIEGER, J.; BRODMANN, U.; MICHAELOWA, A. Pricing of Verified Emission Reduction Units under Art. 6: Gaining a Better Understanding of Possible Scenarios. 2019. Disponível em: www.firstclimate.com.

SILVEIRA, S.; JOHNSON, F. X. Navigating the transition to sustainable bioenergy in Sweden and Brazil: Lessons learned in a European and International context. **Energy Research and Social Science**, v. 13, p. 180–193, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2015.12.021>.

SPIPKER, G.; NUGENT, N. Voluntary carbon market derivatives: Growth, innovation & usage. **Borsa Istanbul Review**, v. 22, p. S109–S118, 2022. DOI 10.1016/j.bir.2022.11.008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bir.2022.11.008>.

STOERK, T.; DUDEK, D. J.; YANG, J. China's national carbon emissions trading scheme: lessons from the pilot emission trading schemes, academic literature, and known policy details. **Climate Policy**, v. 19, n. 4, p. 472–486, 2019. <https://doi.org/10.1080/14693062.2019.1568959>.

STRECK, C. How voluntary carbon markets can drive climate ambition. **Journal of Energy and Natural Resources Law**, v. 39, n. 3, p. 367–374, 2021. <https://doi.org/10.1080/02646811.2021.1881275>.

SUBRAMANIAN, S.; BASTIAN, H.; HOFFMEISTER, A.; JENNINGS, B.; TOLENTINO, C.; VAIDYANATHAN, S.; NADEL, S. 2022 International Energy Efficiency Scorecard. **ACEEE Report**, n. April, p. 01–166, 2022. Disponível em: <https://www.aceee.org/international-scorecard%0Awww.aceee.org/research-report/i2201>.

SUN, R.; WANG, K.; WANG, X.; ZHANG, J. China's Carbon Emission Trading Scheme and Firm Performance. **Emerging Markets Finance and Trade**, v. 58, n. 3, p. 837–851, 2022. DOI 10.1080/1540496X.2021.1925535. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/1540496X.2021.1925535>.

TAKAES SANTOS, I. Confronting governance challenges of the resource nexus through reflexivity: A cross-case comparison of biofuels policies in Germany and Brazil. **Energy Research and Social Science**, v. 65, n. November 2019, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101464>.

TAO, M.; FAILLER, P.; GOH, L. T.; LAU, W. Y.; DONG, H.; XIE, L. **Quantify the Effect of China's Emission Trading Scheme on Low-carbon Eco-efficiency: Evidence from China's 283 Cities**. Springer Netherlands, 2022. v. 27, .

<https://doi.org/10.1007/s11027-022-10015-8>.

TEIXEIRA, A. C. R.; MACHADO, P. G.; BORGES, R. R.; MOUETTE, D. Public policies to implement alternative fuels in the road transport sector. **Transport Policy**, v. 99, p. 345–361, 1 dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2020.08.023>.

TIETENBERG, T. Carbon Pricing: Lessons Derived from Experience. **Fiscal Policy to Mitigate Climate Change A Guide for Policymakers**, , p. 218, 2012.

UN. **The Paris Agreement**. France, 2016. Disponível em: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf.

UN. **United Nations Handbook on Carbon Taxation for Developing Countries**. New York: United Nations, 2021.

UNEP. **Clean Development Mechanism**. 2006. Disponível em: https://unfccc.int/files/cooperation_and_support/capacity_building/application/pdf/unepcdmintro.pdf.

UNFCCC. **KYOTO PROTOCOL TO THE UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE**. 1998. Disponível em: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>.

VIEIRA, N. D. B. Avaliação dos impactos energéticos na redução das emissões de CO₂ associadas aos mecanismos de Eficiência Energética no Brasil: uma proposta metodológica e estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energias). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2016.

VIEIRA, N. D. B.; NOGUEIRA, L. A. H.; HADDAD, J. An assessment of CO₂ emissions avoided by energy-efficiency programs: A general methodology and a case study in Brazil. **Energy**, v. 142, p. 702–715, 1 jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.072>.

WORLD BANK. Carbon Pricing Dashboard. 2025. **ETS & Carbon Taxes**. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/compliance/price>.

WORLD BANK. **China: Country Climate and Development Report**. Washington, DC, 2022a. <https://doi.org/10.4337/9781789903621.world.bank.group>.

WORLD BANK. **Emissions Trading in Practice: a Handbook on Design and Implementation**. Washington, DC, 2016. DOI 10.4155/cmt.11.14. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/26b7dba3-911e-5d9d-950b-f8e82aabc534/content>.

WORLD BANK. **State and Trends of Carbon Pricing**. 2022b. DOI 10.1596/978-1-4648-1895-0. Disponível em: documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099045006072224607/p1780300092e910590acb201757ecd54322.

ZENG, B.; XIE, J.; ZHANG, X.; YU, Y.; ZHU, L. The impacts of emission trading scheme on China's thermal power industry: A pre-evaluation from the micro level. **Energy and Environment**, v. 31, n. 6, p. 1007–1030, 2020. <https://doi.org/10.1177/0958305X19882388>.

ZHANG, H.; DUAN, M.; DENG, Z. Have China's pilot emissions trading schemes promoted carbon emission reductions?– the evidence from industrial sub-sectors at the provincial level. **Journal of Cleaner Production**, v. 234, p. 912–924, 2019. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.06.247. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.247>.

ZHENG, Y.; SUN, X.; ZHANG, C.; WANG, D.; MAO, J. Can Emission Trading Scheme Improve Carbon Emission Performance? Evidence From China. **Frontiers in Energy Research**, v. 9, n. January 2017, p. 1–12, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.759572>.

ANEXOS

Anexo I – Fluxograma de Funcionamento do RenovaBio

