

# MECANISMOS DE PRECIFICAÇÃO DE CARBONO NO BRASIL: CUSTOS ECONÔMICOS E BENEFÍCIOS AMBIENTAIS

Micaele Martins de Carvalho (Secretaria de Economia e Planejamento - ES)

Aline Souza Magalhães (Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional - UFMG)

Edson Paulo Domingues (Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional - UFMG)

## RESUMO

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

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

**Área de submissão:** Área 11 - Economia Agrícola e do Meio Ambiente

**JEL:** Q52

## ABSTRACT

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

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

## 1. Introdução

Embora seja um dos principais emissores, o país possui uma das matrizes energéticas mais limpas. Isso se deve à elevada participação da hidroeletricidade na geração de energia e ao uso de biocombustíveis, especialmente o etanol. Por outro lado, apesar dos esforços observados nos últimos anos para a redução das emissões associadas ao desmatamento, estimativas de emissões têm mostrado crescimento destas emissões devido ao afrouxamento das políticas de combate ao desmatamento (SEEG, 2020).

Além disso, entre as emissões setoriais brasileiras destaca-se a participação crescente dos setores energéticos através da queima de combustíveis e da geração de eletricidade por fontes fósseis. Por isso, mecanismos de mitigação, como a precificação de carbono, especialmente voltados para esses setores podem viabilizar grandes abatimentos das emissões nacionais. Porém, por serem insumos importantes para a produção de diversos setores, custos maiores associados aos setores energéticos afetam negativamente toda a cadeia produtiva.

Assim, o presente artigo buscou analisar os impactos da adoção de mercados de crédito de carbono no Brasil em pauta tanto na COP26 como em iniciativas internas como o Projeto de Lei Projeto de Lei 528/21, que visa instituir o Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE) para regular a compra e venda de créditos de carbono. Buscando identificar caminhos alternativos para a concretização de tais mercados considerando o potencial de abatimento e a estrutura produtiva nacionais.

Para tanto, o presente trabalho utilizou um modelo de Equilíbrio Geral Computável que possibilita analisar a estrutura produtiva dos principais setores emissores e como eles reagem a incentivos à mitigação das emissões. O modelo de EGC utilizado neste trabalho, *Brazilian Energy Emission Trade System* (BEETS), foi especialmente desenvolvido para tratar das emissões setoriais de GEE no Brasil. Usando dados mais recentes da Matriz de Insumo-Produto (MIP) ano base de 2015 (IBGE, 2019) e de emissões setoriais (SEEG, 2020), que foram desagregadas por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias), além de incluir as emissões pela transição do uso da terra, permitindo, assim, abranger todas as emissões de GEE na economia brasileira.

A base de dados conta ainda com a desagregação do setor de Eletricidade e Gás por fontes de geração, transmissão e distribuição. Além disso, o modelo foi especificado para capturar os efeitos de políticas de *cap-and-trade* entre setores da economia brasileira, especialmente os setores de geração de eletricidade e combustíveis, permitindo a projeção de políticas de redução de emissões através da contabilidade de emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e).

O maior detalhamento dado no modelo aos setores de energia e de emissões, incluindo as emissões provenientes do uso da terra, faz-se notadamente importante na conjuntura nacional, onde maior parte das emissões concentra-se no uso da terra e as emissões dos setores de energia são crescentes e ganham cada vez mais destaque. Uma breve apresentação da metodologia desenvolvida é apresentada na quarta seção deste artigo. Assim, acredita-se que estes procedimentos criaram uma ferramenta, adaptada ao contexto brasileiro, capaz de conectar questões energéticas, ambientais e econômicas.

Foi definida, com base nas estimativas de emissões e estudos recentes, uma meta de abatimento das emissões pela queima de combustível e nível de atividade para o Brasil buscando viabilizar as metas nacionais de emissões e foram estimados os impactos do atingimento dessa meta via mercados de créditos de carbono. Ademais, quando são analisados custos econômicos necessários para alcançar determinada meta dada a estrutura produtiva atual, como realizado neste trabalho, é preciso levar em conta a superestimação de tais custos, uma vez que a própria imposição de mecanismos de precificação estimula o uso de tecnologias limpas. Por isso, foram estudados também os ganhos de produtividade necessários para alcançar a meta do mercado de carbono sem sacrifícios econômicos. Os resultados e considerações finais são apresentados na quinta e sexta seção respectivamente. Antes disso, a segunda seção contextualiza brevemente as emissões brasileiras e a terceira seção apresenta os principais mecanismos de precificação adotados no Brasil e no mundo, criando o contexto que auxiliou na escolha dos cenários simulados.

## 2. O padrão de emissões da economia brasileira

Preocupações com as consequências do aquecimento global provocado pelas emissões de GEE de atividades humanas são crescentes. Esta seção apresenta brevemente as principais características das emissões de GEE no Brasil com o objetivo de identificar questões centrais para efetividade de políticas de

mitigação. Nesse sentido, a Tabela 1 apresenta a participação das principais fontes de emissões, juntamente com sua evolução entre 2005 e 2020, no Brasil. É possível observar forte queda na participação do setor de Mudança no uso do solo e florestas, de 64% para 46% do total das emissões brutas do período, explicado pela redução das taxas de desmatamento, embora a partir de 2017 tenha ocorrido uma reversão dessa tendência de queda (SEEG, 2021).

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

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

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

Fonte: SEEG (2021).

Nota: <sup>1</sup> Megatonelada de dióxido de carbono equivalente.

A grande participação das emissões associadas à mudança do uso da terra e à agropecuária são particularidades brasileiras que merecem destaque quando o assunto é emissões de GEE. Em 2020, a agropecuária foi responsável por 27% das emissões brutas do Brasil. Desse total, 95% decorreram da pecuária: 87% da fermentação entérica e 6% do manejo de dejetos de animais. Em relação à agricultura, destaca-se o cultivo de arroz, responsável por 2% de todas as emissões da agropecuária. O restante decorre das emissões dos solos manejados (4%) e queima de resíduos agrícolas (0,1%). Portanto, apesar do protagonismo do desmatamento para as emissões nacionais de GEE, vem ganhando cada vez mais relevância o controle sobre as emissões originadas pela estrutura produtiva, especialmente aquelas associadas à geração de eletricidade e aos processos industriais. Em 2020, das 100 MtCO<sub>2</sub>e emitidas pela indústria, destaca a participação da Produção de Ferro Gusa e Aço (39%) e Cimento (22%).

### 3. Tributação e Sistemas de Comércio de Emissões

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

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

Um dos principais mecanismos de precificação adotado pelos países tem sido a tributação das emissões, que segue o princípio do poluidor-pagador formalizado por Pigou (2013 [1920]). As taxas pigouvianas de internalização de custos ambientais buscam igualar o custo marginal social e o privado, corrigindo a falha de mercado. Um imposto sobre as emissões seria, segundo Stern (2006), um elemento essencial das

políticas de combate às mudanças climáticas. Sobre os impostos de carbono na América Latina, destacam-se as iniciativas do Chile, Colômbia, Argentina e México, que recentemente, implementaram tributações de carbono. Em 2020, as maiores taxas de carbono (por tonelada de  $CO_2e$ ) em iniciativas nacionais foram observadas na Islândia (entre US\$20-US\$35), Holanda (US\$35), Irlanda (US\$39), Luxemburgo (entre US\$23- US\$40), França (US\$52), Noruega (US\$4- US\$69), Finlândia (US\$62- US\$73), Suíça (US\$101) e Suécia (US\$137) (WORLD BANK, 2021).

Outro mecanismo para internalizar o custo social das emissões são os sistemas de comércio de emissões, ou *Emissions Trading Systems* (ETS). O princípio básico desses mecanismos é a definição de direitos de propriedade (COASE, 2000 [1960]), segundo o qual a existência de direitos de propriedades bem definidos e custos de transação desprezíveis, as negociações entre os agentes promoverá um resultado eficiente (neste caso, o nível ótimo de poluição) independente da alocação inicial de recursos.

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

Em 2021, o ETS da China foi o maior esquema de comércio de emissões de gases de efeito estufa, envolvendo múltiplos países e setores. Segundo dados do World Bank (2021), existem 64 Instrumentos de Precificação de Carbono (em inglês, *Carbono Pricing Instruments – CPIs*) em operação. A cobertura das emissões por esses instrumentos cresceu de 15,1% em 2020 para 21,5% em 2021 devido, principalmente, ao lançamento do ETS nacional da China. O anúncio do pacote de recuperação do Acordo Verde Europeu (em inglês, *European Green Deal*) e das novas metas de mitigação para 2030 também desencadearam amplas mudanças para o ETS da UE.

Apesar da pandemia de *COVID-19* e da crise econômica, o número de projetos de mercados de crédito de carbono registrados aumentou 11%, passando de 16.854 em 2019 para 18.664 em 2020. Em relação aos preços das permissões, observou-se breve queda, seguida de rápida recuperação na maioria dos ETSs. Em 2020, os instrumentos de precificação de carbono, globalmente, geraram US\$ 53 bilhões em receitas. Esse é um aumento de cerca de US\$ 8 bilhões em relação a 2019, em grande parte devido ao aumento no preço da licença da UE. Apesar disso, os preços de carbono adotados (entre US\$5 e US\$40/ $tCO_2e$ ) são insuficientes para alcançar a meta estabelecida no Acordo de Paris ou conduzir à descarbonização profunda. (WORLD BANK, 2021). Por isso, maior clareza sobre os impactos ambientais e socioeconômicos da precificação de carbono poderiam diminuir as incertezas e encorajar investimentos oportunos, em grande escala, em tecnologias de baixo carbono.

## 4. Metodologia

### 4.1. Modelo

O modelo de EGC utilizado é o BEETS (*Brazilian Energy Emissions Trading Schemes model*), que parte da estrutura teórica dos modelos BeGreen (MAGALHÃES, 2013) e REGIA (CARVALHO, 2014). Do BeGreen são incorporados o módulo de especificação energética; o módulo ambiental, que permite a projeção de políticas de redução de emissões pela contabilidade de emissões de GEE ( $CO_2e$ ), separando-as por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias); e a estrutura de dinâmica recursiva. Do REGIA é incorporado o módulo de transição do uso da terra, permitindo, assim, abranger todas as emissões de GEE na economia brasileira.

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

Assim, pode-se dizer que o modelo elaborado neste artigo permite analisar políticas de mitigação das emissões de GEE em toda economia, especialmente nos setores energéticos.

O modelo desenvolvido é composto por 138 produtos, além de cinco componentes da demanda final (consumo das famílias, consumo do governo, investimento, exportações e estoques), três fatores primários (capital, trabalho e terra), dois setores de margens (comércio e transportes), importações por produto, um agregado de impostos indiretos e um agregado de impostos sobre a produção. O modelo foi calibrado para o ano de 2015, que representa os dados mais recentes da Matriz de Insumo Produto fornecido pelo Sistema de Contas Nacionais<sup>1</sup>.

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

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

$$E.I/P.Q \quad (1)$$

Em que:

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

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

Uma vez que a mudança normal na alíquota *ad valorem*,  $v$ , corresponde a um aumento de R\$1 por tonelada em um imposto de emissão específico,  $s$ , a receita do imposto pode ser reciclada. O módulo de emissões permite ainda incorporar um mercado de emissões (*cap-and-trade*), tornando possível definir metas setoriais de emissão e permitir a comercialização entre os setores. Após definir o limite de emissões setoriais,  $xgascap$ , o modelo calcula endogenamente a redução necessária das emissões de cada setor para alcançar atender ao limite imposto. O modelo permite que as emissões sejam alocadas entre os setores por meio de um mercado de emissões comerciais que podem ter um valor inicial exógeno sendo posteriormente atualizadas endogenamente para representar o custo necessário para alcançar as metas setoriais.

## 4.2. Bases de dados

O setor “Eletricidade, Gás e Outras Utilidades”, presente na Matriz de Insumo Produto (IBGE, 2019), foi desagregado em Eletricidade e Gás e outras utilidades (GAS). Em seguida, o setor de Eletricidade foi subdividido entre Geração e Transmissão, distribuição e armazenagem (TDA). Para dividir o valor da produção de cada setor entre Eletricidade e GAS foram utilizados dados do consumo final energético do BEN (EPE, 2016), cujo ano base é 2015. Essa estrutura busca representar o atual modelo do setor elétrico,

---

<sup>1</sup> O Sistema de Contas Nacionais (SCN) é elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e apresenta informações sobre a geração, a distribuição e o uso da renda no país. Entre elas, as Tabelas de Recursos e Usos (TRU), que mostram os fluxos de oferta e demanda dos bens e serviços e a geração da renda e do emprego em cada atividade econômica. Elas foram utilizadas como insumos no modelo e estão disponíveis em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html?=&t=resultados>.

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

regulamentado pela Lei nº 10.848 de 2004. Em seguida, o valor da produção de Eletricidade foi subdividido em Geração e TDA por meio de dados do Relatório de Evolução das Tarifas Residenciais (ANEEL, 2020).

Em termos práticos, o ONS é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, localizados principalmente na região Norte, mas que vêm sendo gradativamente interligadas ao SIN. Esse sistema permite o intercâmbio da energia produzida em todo território nacional, transportadas através de linhas interligadas de transmissão. Assim, apesar da participação significativa dos consumidores livres, uma vez que o Brasil possui mais de mil consumidores livres cujo consumo de energia corresponde a aproximadamente 18% do consumo total, quase toda energia comercializada no Brasil utiliza o sistema de transmissão/distribuição e, portanto, integra o SIN (ANEEL, 2017).

E, por fim, para desagregar a geração de energia elétrica por fonte, utilizou-se dados de capacidade instalada de geração elétrica por fonte (EPE, 2016) conjugados a dados dos preços dos leilões de energia elétrica (CCEE, 2019). Assim, tais percentuais foram utilizados para distribuir os valores da produção do setor original, “Eletricidade, Gás e Outras Utilidades”, entre os 13 setores derivados. Entretanto, cada setor derivado possui sua própria tecnologia de produção, consumindo diferentes insumos intermediários, não sendo bem representada pela média do consumo do setor original. Por isso, para melhor representatividade, buscou-se detalhar a tecnologia de produção de cada setor derivado, identificando fluxos específicos de consumo de insumos de consumo significativo nos respectivos processos produtivos setoriais.

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

Em relação à construção da base de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e sua compatibilização aos setores do modelo, as emissões setoriais de GEE podem ser divididas em dois grupos: emissões por queima de combustíveis e emissões decorrentes do próprio processo produtivo. Os dados relativos às emissões foram extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021) e distribuídos entre os 138 setores do modelo. Nos dados do SEEG, as emissões originadas da queima de combustíveis são calculadas pela abordagem *button-up*, o que torna possível associá-las aos respectivos setores de uso final de energia e centros de transformação.

Mudanças no uso da terra e florestas são tratadas endogenamente por meio de uma matriz de transição calibrada com dados do *MapBiomass*. Detalhes metodológicos são descritos em Ferreira Filho e Horridge (2014). Estes dados foram balanceados pelo método de ajuste bi-proporcional (MILLER; BLAIR, 2009). Este método consistiu no ajuste iterativo dos valores das linhas e colunas, considerando a proporcionalidade dos seus valores totais. O procedimento para identificar as emissões associadas às mudanças no uso da terra apresentados a seguir foram embasados em Silva (2015). Em linhas gerais, os dados sobre as emissões por mudança do uso do solo foram extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2021) e agregados nas categorias lavoura, pasto, floresta plantada e área não utilizada.

A matriz de transição obtida do procedimento de balanceamento foi atribuída às emissões de GEE de acordo com cada categoria de uso do solo. Os dados sobre as emissões por mudança do uso da terra entre 2010 e 2016 ( $tCO_2e$ ) foram utilizados para calcular índices de emissões líquidas representativas das emissões por mudança do uso da terra entre 2015-2016. Assim como em Silva (2015), ao fim de tais procedimentos, um novo modelo capaz de abranger o manejo do uso do solo e suas emissões de GEE emergiu endogenamente. Para tanto, foi utilizado o método RAS<sup>2</sup>, que consiste no ajuste de uma matriz de modo que some os totais de linha e coluna dados.

---

<sup>2</sup> O procedimento RAS é indicado para eliminar pequenas inconsistências que surgiram durante a manipulação de dados ou que podem ser atribuídas ao uso de dados de várias fontes mutuamente inconsistentes.

### 4.3. Fechamentos

O fechamento em um modelo de EGC é o responsável por representar as hipóteses sobre o funcionamento da economia por meio da definição de um conjunto de variáveis exógenas e endógenas. Para a composição das simulações em dinâmica recursiva foram utilizados dois tipos de fechamento: o Fechamento Base e o Fechamento de Política. O Quadro 1 define as variáveis exógenas comuns a todos os cenários. Neste quadro as variáveis estão denominadas como se apresentam no código computacional do modelo, operacionalizado no *software* de modelagem econômica Gempack (Horridge *et al.*, 2018).

**Quadro 1: Hipóteses do fechamento do modelo nas simulações**

<b>Fechamento Base</b>	
<b>Variáveis exógenas do PIB real (lado da renda)</b>	
rnorm	Taxa de retorno bruta
gtrend	Taxa bruta de retorno setorial tendencial
emptrend	Emprego tendencial
a1cap a1lab_o a1lnd altot a2tot a0com a1 a1nren a1ren	Mudanças tecnológicas
x0gdpinc	PIB real
<b>Variáveis exógenas do PIB real (lado do gasto)</b>	
delB	Razão saldo comercial nominal / PIB nominal
invslack	Investimento agregado determinado pelas configurações do investimento setorial
x5tot	Demanda real do governo
fx6	Mudança na regra de estoques
<b>Condições externas: preços das importações fixos; curvas de demanda por exportações fixas no preço e quantidade</b>	
pf0cif	Preços externos das importações
f4p f4q	Deslocamento das Exportações setoriais
f4qtot	Mudança geral da quantidade nas demandas de exportação
f4p_ntrad f4q_ntrad	exportações coletivas
<b>Todos os impostos são exógenos</b>	
delPTXRATE f0tax_s f1tax_csi f2tax_csi f3tax_cs f5tax_cs t0imp f4tax_trad f4tax_ntrad fl0ct	
<b>Distribuição da demanda do governo</b>	
f5	Mudança de demanda do governo
<b>Distribuição do investimento entre os setores</b>	
finv4	Ativador da regra de investimento modelo dinâmico
delfwage	Mecanismo de ajuste de salário real
faccum	Mecanismo para ativar a equação de acumulação
<b>Número de famílias e preferências no consumo são exógenas</b>	
qh	Número de famílias
a3_s	Preferências das famílias por bens
a3	
houslack houslack2	Mudança no consumo das famílias
<b>Módulo ambiental (Mudanças tecnológicas e Mudanças ordinárias da tributação)</b>	
Delgastot delgastax_sq deletaxrev deltax deltax1all deltax1st deltax1_idom deltax1_ij deltax1_is deltax2all deltax2st deltax3all deltax3comp deltax3_i deltax5 deltaxsource agascomb xgas agasresid f_agasAct f_agreen fgovgen fgovgen_cap fgovgen_cap2	
<b>Mercado de carbono</b>	
delgascap delaloc delgascap2 delaloc2 trade deltradeagas trade2 deltradeagas2 delgastax_sqf delgastax_sqf2	
<b>Módulo de uso da terra</b>	
fqtrans	Mudança de uso da terra
lndtwist	Mudança no uso da terra não causada por preços
<b>Numerário</b>	
phi	Taxa nominal de câmbio

Fonte: Elaboração própria.

Nos cenários de mercado de carbono, algumas variáveis tornam-se exógenas, enquanto outras, endógenas (Quadro 2). Essas mudanças tornam possível estabelecer exogenamente uma meta de abatimento (variação percentual) das emissões, que poderão ou não negociar licenças para emitir em um mercado de carbono. No cenário de referência, a alteração implica a imposição da mesma redução de emissões em todos

os setores, de forma que custos distintos de redução de emissões (*delgastax\_sq*) são gerados. Nas simulações de mercado de carbono, as reduções de emissões são distintas (para atingir a meta do mercado) e o custo marginal de redução de emissões (preço do mercado de carbono) é o mesmo para todos os setores.

**Quadro 2: Cenários de Mercado de Carbono**

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

Fonte: Elaboração própria.

Uma inovação na operação do modelo é um mecanismo endógeno e paramétrico de abatimento de emissões, que procura capturar respostas custo-neutra dos setores a preços de carbono. Tornando a mudança técnica total endógena (*altot*) e permitindo alterações na resposta das emissões ao preço de carbono (tornando *faltot* exógena), é possível definir ganhos de eficiência ambiental (*agasact*) para os setores produtivos. Para tanto, considera-se que os setores respondem ao preço de carbono adotando novas tecnologias que permitem reduzir a relação entre quantidade emitida e produção setorial. Uma mudança de 1% em *agasact* significa que é necessário 1% menos de emissão para uma unidade produzida pelo setor. O custo desse ganho de eficiência ambiental é compensado por uma deterioração tecnológica do parâmetro *altot*, de forma que a mudança seja neutra em termos de custos para os setores. Portanto, ao assumir valores para o *agasact*, assume-se que os setores são incentivados a adotar alguma mudança tecnológica mais eficiente em emissões.

## 5. Simulações e resultados

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

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

### 5.1. Cenários de Referência

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

Tal construção possibilita visualizar duas trajetórias para cada variável de interesse: uma trajetória que mostra como a variável mudaria ao longo do tempo desconsiderando a questão que se deseja estudar (mercados de carbono); e a trajetória de como a variável se comportaria com a política em vigor, que no caso desta simulação ilustrativa refere-se a políticas de mitigação de emissões de GEE via precificação de carbono. A diferença entre estas trajetórias (cenário base e o cenário com o choque de política, ou seja, com



mercados de carbono) representa o efeito adicional da tributação sobre a economia. Normalmente, essas diferenças são acumuladas ao longo do período de análise para ilustrar o impacto total sobre determinada variável.

Para a construção do cenário de referência, foram adotadas estimativas em termos de variações percentuais, para o PIB real, exportações, consumo das famílias, investimento, consumo do governo e exportações, conforme apresentado na Tabela 2, a partir de dados observados de 2016 a 2020 da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua trimestral (IBGE, 2021a), das Contas Nacionais Trimestrais (IBGE, 2021b) e projeções baseadas em estimativas do Banco Central do Brasil para o período 2022-2030 (BCB, 2021). A essa linha de base será adicionada a meta de redução de emissões em um conjunto de setores, o que implica que o crescimento do PIB ficará abaixo dos números apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2: Principais variáveis do cenário macroeconômico de linha de base (var. % real)**

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

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

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

## 5.2. Resultados Agregados

Os cenários elaborados avaliam 3 situações:

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

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

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

Nas simulações de mercado foram considerados duas combinações de setores participantes do mercado de carbono para alcançar a mesma meta de abatimento. O objetivo é comparar o custo-efetividade de diferentes configurações de mercado de carbono para alcançar a mesma meta agregada de redução de emissões. Os setores participantes de cada mercado estão detalhados na Tabela 3.

**Tabela 3: Cenários de Precificação via Mercados de Crédito de Carbono**

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

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

Os dois cenários de *cap-and-trade* (Restrito e Amplo) foram associados a imposição do desmatamento zero como estratégia de mitigação das emissões para a mudança de uso da terra e florestas. Ressalta-se que os dados são relativos ao desmatamento resultante da expansão das atividades produtivas, excluindo desmatamento ilegal, grilagem ou mineração. Dessa forma, os resultados obtidos com o modelo BEETS indicam que a contribuição desse setor para alcançar a meta seria uma redução de aproximadamente 170 MtCO<sub>2</sub>e. Considerando as estimativas mais recentes de emissões (SEEG, 2021) e descontando a redução esperada das emissões do desmatamento, as demais emissões (diretamente pela atividade e pela queima de combustível) precisariam de uma redução acumulada de 10% entre 2022-2030. No cenário de referência, adota-se a mesma redução percentual (10%) de emissões em todos os setores, de forma que não há preço de carbono comum, mas custos setoriais distintos. A Tabela 4 apresenta os principais resultados macroeconômicos dos cenários alternativos analisados.

**Tabela 4: Resultados Macroeconômicos dos Cenários de reduções de emissões para alcançar meta brasileira proposta na COP21**

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

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Os cenários com mercado são mais eficientes, pois incentivam a mitigação em setores com menores custos de abatimento, que é financiada pelos setores com maiores custos ao comprarem licenças para emitir (se, por exemplo, fossem dadas permissões gratuitas referentes a 10% das emissões de cada setor). Os resultados agregados observados no Mercado Restrito e Amplo são similares, exceto pelo preço de carbono. Para alcançar a meta em cada cenário preços diferentes de carbono são exigidos (endogenamente). Seus valores anuais são representados pela Figura 1.

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

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

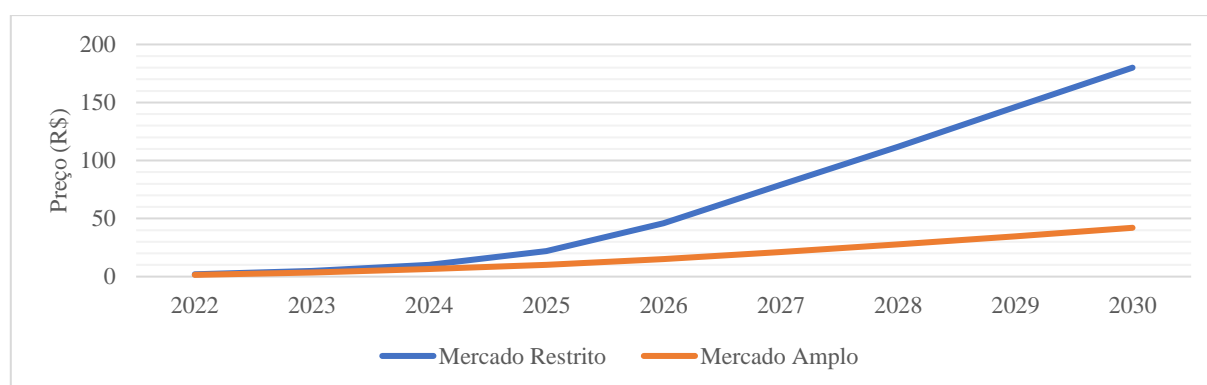


Figura 1: Evolução do preço de carbono nos mercados  
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

### 5.2.1. Resultados setoriais

Quando o setor participante do mercado de carbono é sujeito às restrições de suas emissões, espera-se queda da sua produção e de seu consumo de combustíveis. Isso tem efeitos indiretos para os outros setores que compram os bens produzidos pelo setor ou que vendem insumos pra ele. Dessa forma, é possível identificar setores estratégicos para a formação de um mercado de carbono no Brasil dada a estrutura produtiva do país. A Figura 2 ilustra o comportamento da produção setorial nos cenários de mercado.

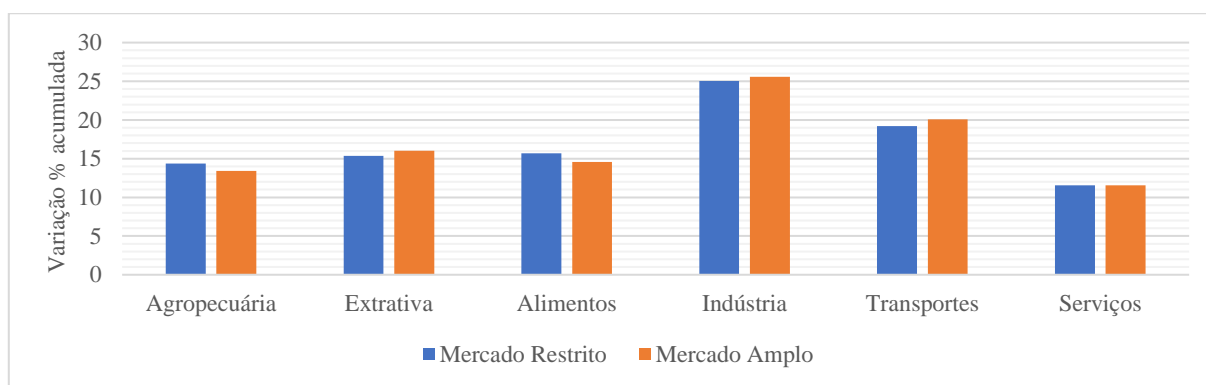


Figura 2: Dinâmica dos setores com mercados de carbono: crescimento acumulado da produção entre 2022-2030 (var. %) Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Nota-se que os setores extrativos, industriais e transportes têm crescimento acumulado maior no cenário Mercado Amplo, pois quando se considera que todos os setores contribuem para alcançar a meta, a redução das emissões em cada setor, individualmente, é menor e, portanto, menor o sacrifício que esses setores precisam fazer para alcançar a mesma meta de abatimento. Por outro lado, os setores agropecuário e de alimentos têm crescimento acumulado menor no Mercado Amplo, pois nesse cenário esses setores precisam reduzir suas emissões (que não eram limitadas no Mercado Restrito). Cabe ressaltar que a pecuária é o principal setor emissor e foi poupado no Mercado Restrito. Por outro lado, o nível de atividade no setor de serviços não apresenta alterações significativas entre os dois cenários da Figura 2, tendo em vista que não apresenta emissões significativas.

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

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

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

Além dos resultados setoriais, é interessante analisar o consumo das famílias, um indicador do impacto de bem-estar econômico. A Figura 3 apresenta a variação acumulada no consumo das famílias no Mercado Restrito e no Mercado Amplo. O resultado agregado do consumo mostra que estas variações são semelhantes nos dois experimentos de mercado, mas as famílias de menor classe de renda são as que têm o consumo mais afetado no Mercado Amplo (o crescimento do seu consumo seria maior no Mercado Restrito).

Esse efeito regressivo pode ser explicado pelo padrão de consumo de cada grupo de renda. No Mercado Restrito, apenas setores industriais, de transporte e de geração de eletricidade são abrangidos pela meta de abatimento, sendo, portanto, aqueles que enfrentam maiores custos para alcançar a mitigação desejada. Esses setores representam 26,8% do consumo das famílias do primeiro extrato de renda e 18,6% do

consumo das famílias do grupo de renda mais elevada. No Mercado Amplo, contudo, a incorporação dos demais setores, especialmente os agropecuários e de alimentos, que correspondem a 29,4% do consumo das famílias do primeiro extrato, impacta relativamente mais o consumo dessa classe. Já as famílias dos extratos mais altos, o consumo de agropecuária e alimentos é relativamente menor, chegando a apenas 6,1% no extrato de renda mais alta. Assim, as famílias de maior renda são menos impactadas pela imposição de metas de abatimento aos setores agropecuário e alimentos.

Enquanto a proporção do consumo de bens agropecuários e alimentos em relação ao total consumo é inversamente proporcional à renda, o oposto é percebido em relação ao setor de serviços, associado a baixos níveis de poluição e, portanto, pouco afetado pelas metas de abatimento. Nas famílias do primeiro extrato, 40,1% da sua cesta é de bens do setor de serviços, essa proporção aumenta para cada classe seguinte, chegando a 72,4% nas famílias de maior renda. Ou seja, ao incluir todos os setores no mercado de carbono, as famílias dos extratos de menor renda são mais afetadas, já que o setor de serviços é relativamente limpo, enquanto a agropecuária concentra grande parte das emissões de GEE. Portanto, apesar de alcançar a meta de abatimento com menor preço de carbono, o Mercado Amplo teria um efeito distributivo negativo.

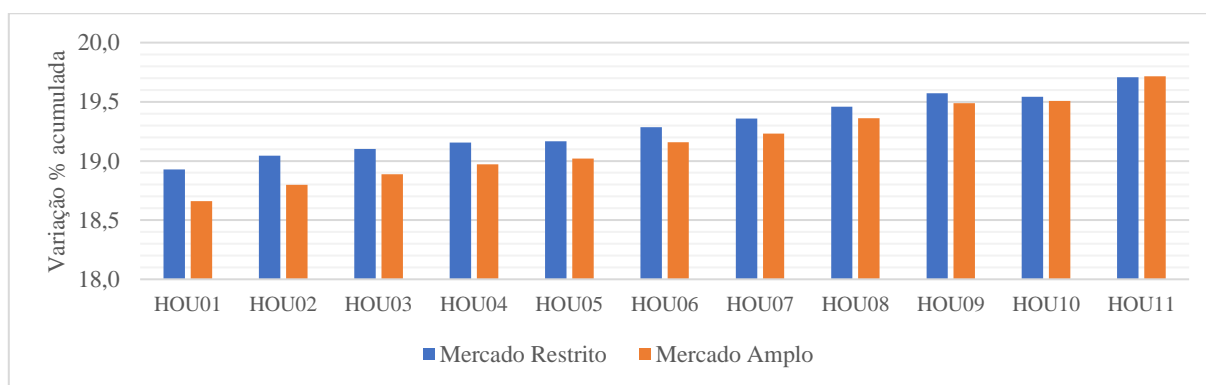


Figura 3: Crescimento acumulado do consumo das famílias entre 2022-2030  
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Em relação às variações nas emissões do uso da terra decorrentes da própria introdução dos mercados de carbono (Figura 4), nota-se que o Mercado Restrito provocaria emissões decorrentes do uso da terra de 13 MtCO<sub>2</sub>e. Já o mercado amplo, devido a queda da atividade da agropecuária, as emissões seriam de 7 MtCO<sub>2</sub>e. E esse aumento das emissões do uso da terra em decorrência da implementação de um mercado de carbono precisa ser considerado para que as emissões totais fiquem dentro da meta, ou seja, os mercados de carbono tenderiam a gerar emissões indiretas no uso da terra; embora um mercado amplo diminua consideravelmente esse efeito (por incluir a agropecuária). Esse resultado condiz com aquilo que é observado nos mercados de carbono implementados no mundo: medidas complementares aos mecanismos de precificação também são necessárias para enfrentar as barreiras não relacionadas a preços e reduzir as emissões em setores não cobertos pela precificação do carbono (WORLD BANK, 2021).

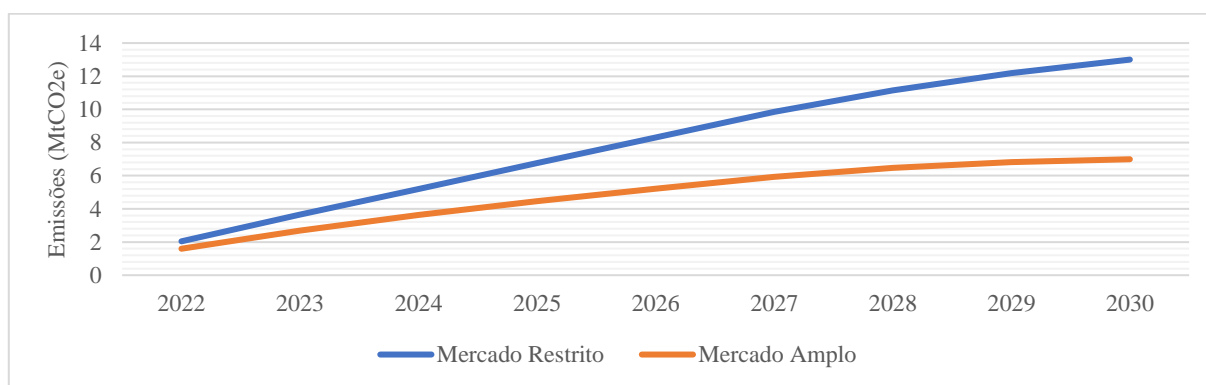


Figura 4: Variação acumulada das emissões da Mudança do Uso da Terra  
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

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

### 5.2.2. Resultados do Setor Elétrico

Os setores participantes do mercado, por sofrerem diretamente com os custos para alcançar a meta, também são os que mais reduzem a atividade. Entretanto, o setor de eletricidade é um caso particular. Destaca-se nesse conjunto o setor de Transmissão e distribuição de energia que não emite diretamente, mas recebe a energia e repassa ao consumidor final. Portanto, tem a atividade afetada pelo resultado das usinas termoeletricas.

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

Atingir a meta de abatimento das emissões propostas pela NDC pode exigir grandes mudanças na matriz elétrica, que dependem da forma com que as políticas serão executadas. Os efeitos sobre a atividade dos setores de eletricidade decorrentes da implementação do Mercado Restrito (preço médio de carbono R\$180) e do Mercado Amplo (preço médio de carbono a R\$74) são apresentados na Figura 5. Eles representam a mudança que ocorreria na matriz energética a partir da participação dos setores de geração de energia em mercados nacionais de carbono.

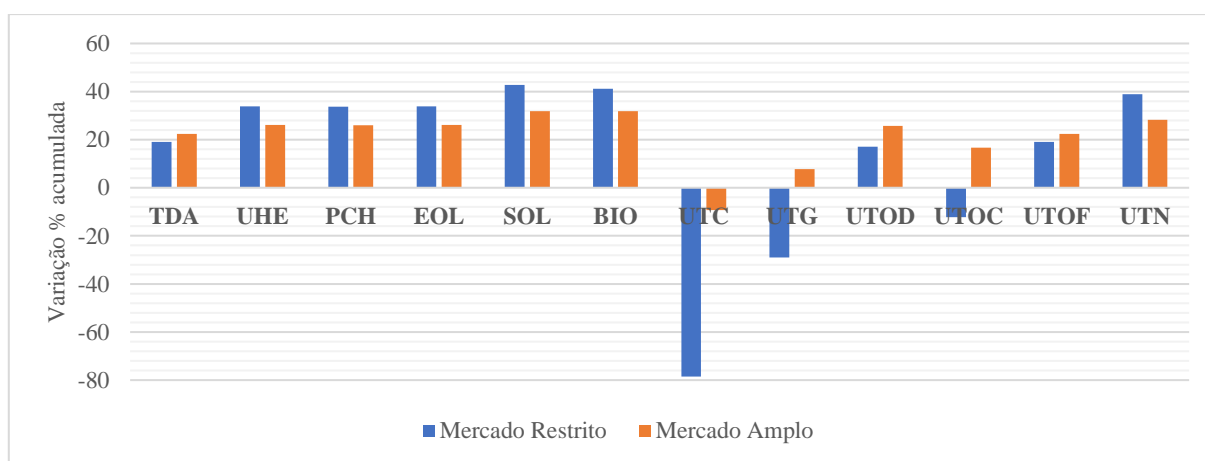


Figura 5: Atividade dos setores elétricos  
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Os setores de geração vendem apenas para o setor de transmissão e distribuição (TDA), responsável por repassar a energia para o consumidor final (setores e famílias). Conforme Figura 5, no Mercado Restrito esse setor cresce um pouco menos que no mercado amplo (aproximadamente 3% menos acumulado ao longo do período). Então, os demais setores se deparam com uma demanda de energia similar entre os dois cenários. O que muda significativamente é a composição dessa eletricidade. No Mercado Restrito, as Termoeletricas à Carvão reduziriam muito sua atividade. As Termoeletricas a gás natural e a óleo combustível também. Em compensação, as fontes renováveis crescem para compensar. No Mercado

Amplo, apenas as Termoeletricas a Carvão teriam redução da sua atividade. Os demais setores apresentariam crescimento da atividade ao longo do período, embora as fontes alternativas não crescessem tanto quanto no Mercado Restrito.

Todavia, reduzir o uso das termoeletricas não é tarefa simples. Elas são importantes para garantir a estabilidade da rede em um contexto de aumento das fontes intermitentes. Além disso, elevar a participação dos renováveis exige investimentos altos que tem reduzida capacidade de gerar efeitos encadeados positivos para o país, dada a dependência de bens de capital importados nesses setores. Além disso, o aumento da participação das fontes intermitentes compromete a confiabilidade da rede e pode encarecer a geração de eletricidade, que é insumo básico para toda a cadeia produtiva e está diretamente associado à qualidade de vida da população. Mas o aumento das emissões ocorrido nas últimas décadas mostra que, se deixadas à própria sorte, as emissões dos setores de energia serão um problema cada vez maior.

Porém, é preciso ressaltar que um dos motivos para as mudanças no nível de atividade dos setores de geração de eletricidade observadas na Figura 5 relaciona-se à estrutura teórica do BEETS. Como o modelo considera retornos constantes de escala, as emissões são proporcionais ao nível de atividade dos setores e ao uso de energia e combustíveis. Assim, uma queda nas emissões implica queda no nível de produção do setor. Em outras palavras, as emissões são reduzidas devido à substituição de insumos energéticos via mudança de preços relativos, não sendo considerada a existência de mudanças tecnológicas ou cenários alternativos que pudessem reduzir as emissões dos setores. Portanto, a mudança na composição de fontes de energia é resultante apenas da escolha do setor de transmissão e distribuição (TDA) ao ser confrontado com custos de energia diferenciados para cada fonte em decorrência da imposição dos mercados de carbonos.

As emissões associadas à matriz energética apresentam trajetória ascendente, pois o próprio crescimento econômico demanda a expansão da oferta energética. Todavia, esse não é o único motivo para que os setores energéticos tenham papel central na transição para uma economia de baixo carbono mesmo sendo um país com uma matriz energética relativamente limpa e cujas principais fontes emissoras estejam associadas à agropecuária e ao desmatamento. O crescimento da demanda energética, o progresso tecnológico e as pressões ambientais podem assumir papel significativo como desafios/oportunidades no contexto nacional. A relação entre o uso de energia e o crescimento da produção é especialmente importante no contexto brasileiro, de país em desenvolvimento e de industrialização tardia.

### 5.3. Discussão dos resultados

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

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

Há consenso na literatura que, caso medidas adicionais não sejam tomadas, haverá crescimento das emissões, principalmente dos setores de energia e agropecuária. São vários os estudos que simulam os impactos da tributação sobre o carbono justamente pelo seu elevado potencial para reduzir o volume total de emissões, tais como Wills e Lefreve (2012), Chen *et al.* (2013), Wills (2013), Magalhães (2013), Lucena *et al.* (2016), La Rovere *et al.* (2015), Grottera *et al.* (2016) Lefreve *et al.* (2016), Octaviano, Paltsev e Gurgel (2016), Rathmann (2017), Rathmann *et al.* (2017), Carvalho *et al.* (2018), Brasil (2020) e Brasil (2021). No geral, a imposição de metas de emissão implica redução do PIB real devido aos aumentos dos

custos de produção associados ao pagamento de impostos de carbono. Os impactos negativos em termos de produção, atividade econômica e bem-estar são maiores à medida em que as metas de redução de GEE tornam-se mais ambiciosas devido aos aumentos dos custos de produção associados ao pagamento de impostos de carbono (MAGALHÃES, 2013). Os resultados encontrados neste artigo estão alinhados a esta literatura.

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

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

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

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

O presente trabalho observou que os efeitos sobre as famílias dependem do mecanismo de precificação adotado. Quanto maior o preço de carbono imposto aos combustíveis, maior o efeito sobre o consumo das famílias de maior renda, concordando com Grottera *et al.* (2016). Todavia, em um mercado de carbono que inclui a agropecuária, a redução do consumo das famílias de baixa renda é maior, percebendo efeitos concentradores, como em Magalhães (2013) e Carvalho *et al.* (2018).

Outro ponto de divergência entre os trabalhos sobre taxação de carbono diz respeito aos valores da tonelada de emissões necessários para alcançar determinados patamares de emissões de GEE. Segundo o estudo realizado pela Fiesp (2017), essa divergência é consequência da existência de diferentes oportunidades setoriais de mitigação a baixos custos, que poderiam ser melhor aproveitadas em mercados *cap-and-trade*. Assim, os mecanismos de comércio de emissões poderiam reduzir os custos de mitigação. Os resultados do presente trabalho corroboram com essa hipótese. De fato, é possível observar que no



Cenário de Referência, em que não há mercado, os agregados econômicos apresentam desempenho pior do que nos Cenários de Mercado Amplo e Restrito.

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

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

Pela mesma razão, os mecanismos de tributação de carbono seriam menos custosos se incluíssem as emissões pela mudança do uso da terra. Segundo Oliveira, Gurgel e Tonry (2019) devido às oportunidades de mitigação existentes disponíveis no setor de mudança do uso da terra, sua inclusão no sistema ETS, via compensações, por exemplo, poderia estimular o Brasil para reduzir ainda mais e até mesmo exportar licenças para a Europa. A importância de políticas de desmatamento também é ressaltada por Octaviano, Paltsev e Gurgel (2016).

Em termos da estrutura produtiva nacional, estudos sugerem que uma política de controle do desmatamento provocaria perda apenas marginal sobre o crescimento econômico, tais como Cabral e Gurgel (2014), Carvalho, Magalhães e Domingues (2016), Francisco (2018). Os resultados desses trabalhos mostram que o *trade-off* entre preservação ambiental e crescimento econômico não é significativo para o caso do desmatamento na Amazônia porque não afeta significativamente a produção do setor agropecuário. Além disso, um pequeno aumento da produtividade da agropecuária na Amazônia Legal de (1% ao ano) seria suficiente para compensar o sacrifício econômico para combater o desmatamento. Os resultados do presente trabalho corroboram com essa hipótese. Nas simulações realizadas neste artigo foi imposta a condição de desmatamento zero, suficiente para alcançar 170 MtCO<sub>2</sub>e de abatimento das emissões, e não se observou mudança significativa no crescimento dos agregados econômicos para alcance dessa meta.

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

## 6. CONCLUSÕES

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

Os mecanismos de precificação têm efeitos encadeados em toda estrutura produtiva, por isso, torna-se útil a construção de modelos preditivos que possam indicar que tipo de impacto econômico é esperado a partir da implementação desses mecanismos sobre a estrutura produtiva brasileira, especialmente sobre os

setores energéticos, com participação crescente nas emissões nacionais. Entre os estudos encontrados na literatura, há divergências quanto a esses impactos. A utilização de mecanismos de precificação para alcançar metas de abatimento de emissões frequentemente exige sacrifícios em termos de PIB e emprego, no entanto, quando incorporam reciclagem de receitas, os resultados podem ser opostos.

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

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

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

Em geral, os resultados do presente trabalho também mostraram que o Brasil possui elevado potencial de abatimento das emissões de GEE com reduzido custo econômico. Todavia, cabe ressaltar que se espera mudanças do lado da demanda cujos efeitos não estão efetivamente representados nos cenários estudados, embora sejam incentivados pelas precificações de carbono adotadas nos cenários.

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

Por fim, ressalta-se que, para analisar os possíveis impactos, em termos de agregados econômicos e volume de emissões, de mecanismos de precificação de carbono no Brasil, como o presente artigo buscou fazer, é preciso levar em consideração o contexto ao qual políticas energéticas e ambientais devem ser construídas, especialmente no caso brasileiro, devido tanto aos aspectos de formação econômica do país quanto à recente flexibilização de políticas ambientais e deterioramento de indicadores de sustentabilidade ambiental.

## REFERÊNCIAS

- ADAMS, P. D.; HORRIDGE, M.; PARMENTER, B. R. **MMRF-GREEN: A Dynamic, Multi-sectoral, Multi-regional Model of Australia**. Monash University, Centre of Policy Studies. Melbourne, 2000.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Fundamentos do Setor Elétrico**. 1ª edição. Brasília, 2017. Disponível em: [http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4\\_uni1\\_sl17.html](http://www.labtime.ufg.br/modulos/aneel/mod4_uni1_sl17.html). Acesso em: mar. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório V – Formação de custos e preços de geração e transmissão de energia elétrica**. 2015. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos>. Acesso em: nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório de Evolução das Tarifas Residenciais**. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/relatorio-evolucao-tarifas-residenciais>. Acesso em: set. 2020.

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Sistema de Expectativas de mercado**. 2021. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/expectativas2/#/consultas>. Acesso em: jul. 2021.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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