

# MECANISMOS DE PRECIFICAÇÃO DE CARBONO NO BRASIL: CUSTOS ECONÔMICOS E POTENCIAIS DE ABATIMENTO

*Micaele Martins de Carvalho*

Doutora em economia pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

*Aline Souza Magalhães*

Doutora em Economia pela UFMG e professora adjunta do Departamento de Ciências Econômicas da UFMG

*Edson Paulo Domingues*

Doutor em Economia pela Universidade de São Paulo (USP) e professor titular do Departamento de Ciências Econômicas da UFMG

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

**Tema:** (i) Mercado de crédito de carbono.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – código de financiamento 001.

## 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 estratégia nacional de mitigação. No entanto, as atuais políticas climáticas brasileiras estão aquém do necessário para atingir as metas acordadas em Paris. Portanto, medidas adicionais podem ser necessárias para o cumprimento da contribuição nacionalmente determinada (NDC). Nesse sentido, o objetivo principal deste artigo foi analisar os impactos econômicos da implementação de mercados de carbono como medida para alcançar a NDC. Para isso, foi desenvolvido um modelo de equilíbrio geral computável (EGC) com estrutura recursiva-dinâmica denominado Brazilian Energy Emissions Trading Schemes Model (BEETS). O BEETS é um modelo nacional que inova ao agregar módulos de especificação energética e ambiental, permitindo agrupar as 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 permite comparar 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. Inicialmente, o BEETS foi utilizado para analisar o potencial de redução de emissões de GEE em setores produtivos brasileiros por meio da construção de curvas de custo de abatimento marginal (MAC, do inglês *marginal abatement costs*), identificando setores produtivos com maiores potenciais de abatimento. Considerando o potencial de abatimento setorial encontrado, três diferentes cenários de controle de emissões foram construídos: (i) mercado de referência (comando e controle sem negociação); (ii) mercado amplo (mercado de carbono com todos os setores produtivos); e (iii) mercado restrito (mercado de carbono com setores selecionados). Os resultados mostraram que os mercados de carbono são eficientes para alcançar a NDC. Os resultados setoriais encontrados nas simulações permitem identificar setores produtivos estratégicos tanto no desenho de mercados de carbono como na alocação de recursos de fundos de financiamento climático. 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.

## INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas pelas quais o planeta passa têm se intensificado nas últimas décadas. De acordo com o Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021), painel internacional responsável por estudar e congrega informações sobre mudanças climáticas, as mudanças climáticas são claras, inequívocas e irreversíveis. O relatório do IPCC mostrou que, caso não haja forte e profunda redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases de efeito estufa (GEE), o aquecimento de 1,5°C a 2°C será ultrapassado ainda nas próximas décadas. Por isso, em 2015, foi firmado o Acordo de Paris, cujo objetivo era fortalecer o compromisso internacional com a preservação do clima, buscando substituir o Protocolo de Kyoto.

O encontro estabeleceu um acordo juridicamente vinculativo e universal sobre o clima, visando manter o aquecimento global abaixo dos 2°C até 2100. Como parte do acordo, cada país signatário indicou sua contribuição nacionalmente determinada (NDC) para o cumprimento de metas estabelecidas para a redução das emissões de GEE. No acordo, é ressaltada a importância da cooperação entre os principais emissores – China (27%), Estados Unidos da América (EUA) (13%), União Europeia (UE) (8%), Índia (7%), Federação Russa (6%), Japão (3%) e Brasil (2%) (WORLD BANK, 2021).

Diferenças relevantes em relação às metas podem ser vistas nas propostas de cada país. Entre os países desenvolvidos, os EUA, em sua nova NDC, apresentada em 2021, comprometeram-se com uma meta de redução da emissão de GEE, para 2030, entre 50% e 52% em relação aos

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

níveis de 2005. O Japão, por sua vez, apontou uma meta de redução da emissão de GEE de 25,4% em comparação ao mesmo ano-base de 2005, ao passo que a UE e seus Estados-membros apresentaram proposta de redução de pelo menos 55% das emissões de gases do efeito estufa até 2030, em uma comparação com 1990 (UNFCCC, 2021). Do mesmo modo, a Federação Russa se comprometeu em reduzir as emissões de GEE em 70% até 2030, em relação a 1990. Já a NDC chinesa propôs reduzir emissões em relação ao produto interno bruto (PIB) entre 60% e 65% até 2030, enquanto a Índia estabeleceu metas de redução na intensidade de carbono entre 33% e 35% de seu PIB até 2030 em relação a 2005 – ambas as metas relativas ao crescimento econômico (UNFCCC, 2021).

Nesse contexto, a proposta brasileira visa reduzir as emissões de GEE em 37% em relação aos níveis de 2005, até 2025, além de ter indicado uma contribuição subsequente de redução de 43% abaixo dos níveis de emissão de 2005, até 2030. Enquanto a grande maioria dos países têm matrizes energéticas com elevadas emissões, o Brasil apresenta matriz relativamente limpa, com grande participação das hidrelétricas (na geração de eletricidade) e da biomassa (na geração de combustíveis), assim como elevado potencial para aproveitamento de fontes renováveis alternativas, como eólica e solar. Apesar disso, ainda se apresentam grandes desafios quanto à pecuária, principal emissor direto, pela atividade, e indireto, pelo desmatamento – que, após anos de considerável redução, voltou a apresentar aumento em um cenário de flexibilização e enfraquecimento da política de combate ao desmatamento ilegal. Devido às particularidades do Brasil, quanto mais informações há sobre custos e potenciais de abatimento, maior se torna a capacidade de alcançar benefícios ambientais sujeitos a menores custos econômicos.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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

Assim, este estudo contribui para a literatura sobre o tema ao analisar opções setoriais de alocação dos recursos provenientes dos fundos de financiamento climático, partindo da estimativa econômica de curvas de custo marginal de abatimento (MAC, do inglês *marginal abatement costs*) dos principais setores emissores no Brasil, considerando tanto as emissões pela própria atividade quanto as emissões indiretas pela queima de combustível e pelo uso da terra. A análise dessas curvas pode auxiliar na criação de metas setoriais de abatimento e na decisão sobre a alocação setorial dos recursos financeiros para alcançar a NDC brasileira.

A análise das curvas também permite identificar setores estratégicos no desenho de mercados de carbono. Considerando os setores

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

mais significativos em termos de potencial de abatimento, com base nas curvas MAC, este artigo buscou analisar os impactos da adoção de mercados de crédito de carbono no Brasil. Tanto a construção das curvas MAC quanto a análise dos impactos econômicos de cenários de mercado de carbono utilizam um modelo de equilíbrio geral computável (EGC) especialmente desenvolvido para essas tarefas. O modelo de EGC construído, 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, 2021), que foram desagregadas por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias), além de incluir as emissões pela transição do uso da terra, o modelo permite abranger todas as emissões de GEE na economia brasileira.

A base de dados do BEETS 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 por meio da contabilidade de emissões de GEE em toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e).

O maior detalhamento conferido pelo modelo aos setores de energia e de emissões, incluindo as emissões provenientes do uso da terra, faz-se notadamente importante na conjuntura nacional, em que a maior parte das emissões está concentrada no uso da terra e as emissões dos setores de energia são crescentes, ganhando cada vez mais destaque.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

Uma breve apresentação da metodologia desenvolvida é apresentada na quarta seção deste artigo. Assim, acredita-se que esses procedimentos criaram uma ferramenta, adaptada ao contexto brasileiro, capaz de conectar questões energéticas, ambientais e econômicas. Os resultados e considerações finais são apresentados na quinta e sexta seções, respectivamente. Antes disso, a segunda seção contextualiza brevemente as emissões brasileiras, e a terceira apresenta os principais mecanismos de precificação adotados no Brasil e no mundo, criando o contexto que auxiliou na escolha dos cenários simulados.

## O PADRÃO DE EMISSÕES DA ECONOMIA BRASILEIRA

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

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

**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%
<b>Total</b>	<b>2.620,1</b>	<b>100%</b>	<b>2.175,7</b>	<b>100%</b>	<b>-17%</b>

Fonte: SEEG (2021).

Nota: MtCO<sub>2</sub>e = megatonelada de dióxido de carbono equivalente.

## 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 as exigências de eficiência energética mínima, ou de cunho econômico, como aquelas 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 levariam 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 fomentarem a busca por novas tecnologias ambientalmente satisfatórias (NORDHAUS, 2008).

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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). 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), 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<sub>2</sub>e) 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): a existência de direitos de propriedades bem definidos e custos de transação desprezíveis garante que as negociações entre os agentes promovam um resultado eficiente (nesse 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<sub>2</sub>e, 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

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

entre os agentes a fim de atender seus limites de emissões. Assim, o MAC das emissões direciona a decisão da empresa acerca de reduzir as emissões ou adquirir permissões. As empresas com custo baixo de mitigação investirão em redução das emissões e venderão suas permissões, enquanto aquelas 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 (CPIs, do inglês *carbon pricing instruments*) 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 (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 ETS. Em 2020, os instrumentos de precificação de carbono, globalmente, geraram US\$ 53 bilhões em receitas – um aumento de cerca de US\$ 8 bilhões em relação a 2019, em grande parte devido à elevação do preço da licença da UE. Apesar disso, os preços de carbono adotados (entre US\$ 5 e US\$ 40/t) são insuficientes para alcançar a meta estabelecida no Acordo de Paris ou conduzir à descarbo-

nização profunda (WORLD BANK, 2021). Por isso, maior clareza sobre os impactos ambientais e socioeconômicos da precificação de carbono poderia diminuir as incertezas e encorajar investimentos oportunos, em grande escala, direcionados a tecnologias de baixo carbono.

## METODOLOGIA

### Modelo

O modelo de EGC utilizado é o BEETS, 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<sub>2</sub>e), 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; entre 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 de energia. Assim, pode-se dizer que o modelo elaborado

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 MIP fornecidos 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 oito 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

---

<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>. Acesso em: 31 out. 2022. Também foram utilizadas informações da MIP 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>. Acesso em: 31 out 2022.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

combustíveis fósseis que, por exemplo, permitam que a queima de carvão libere menos  $CO_2e$  por tonelada utilizada. Apesar disso, 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 desses 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  $\times$  quantidade) que corresponde ao valor básico de uso para os combustíveis, valor da produção para as indústrias ou 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 realizar a comercialização entre os setores. Após definir o limite de emissões setoriais,  $xgascap$ , o modelo calcula endogenamente a redução necessá-

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

ria das emissões de cada setor para atender ao limite imposto. Permite também 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 ao alcance das metas setoriais.

### Bases de dados

O setor de “eletricidade, gás e outras utilidades”, presente na MIP (IBGE, 2019), foi desagregado em “eletricidade” e “gás e outras utilidades” (GAS). Em seguida, o setor 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 de energia final do Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE, 2016), cujo ano-base é 2015. Essa estrutura busca representar o atual modelo do setor elétrico, regulamentado pela Lei 10.848 de 15.3.2004. 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).

Por fim, o setor geração foi novamente subdividido nos seguintes setores: usinas hidroelétricas (UHE), pequenas centrais hidroelétricas (PCH), usinas eólicas (EOL), usinas solares (SOL), usinas termoelétricas movidas a biomassa (BIO), usinas termoelétricas movidas a carvão (UTC), usinas termoelétricas movidas a gás natural (UTG), usinas termoelétricas movidas a óleo diesel (UTOD), usinas termoelétricas movidas a óleo combustível (UTOOC), usinas termoelétricas movidas

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

a outros combustíveis fósseis e efluentes industriais (UTOF) e usinas termoeletrônicas (UTE).

Para desagregar a geração de energia elétrica por fonte, utilizaram-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, que não são bem representados 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 e significativos de consumo nos respectivos processos produtivos setoriais.

Para identificar os produtos consumidos em cada setor de eletricidade, recorreu-se a trabalhos que analisam os custos de geração de eletricidade por fonte e dados do BEN (EPE, 2016). 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 e sua compatibilização aos setores do modelo, as emissões setoriais

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 *bottom-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 MapBiomas, a partir dos detalhes metodológicos descritos em Ferreira Filho e Horridge (2014). Esses dados foram balanceados pelo método de ajuste biproportional (MILLER; BLAIR, 2009), que consiste no ajuste iterativo dos valores das linhas e colunas, considerando a proporcionalidade dos seus valores totais. Os procedimentos 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 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 os índices de emissões líquidas representativas das emissões por mudança do uso da terra entre 2015 e 2016. Assim como em Silva (2015), ao fim de tais procedimentos, um novo modelo capaz de abranger o manejo do uso

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 sejam somados os totais de linha e coluna dados.

### Fechamentos

Para encontrar as curvas de abatimento marginal, é adotado um fechamento conhecido como de “curto prazo”, dado que a intenção é captar os custos relativos à estrutura produtiva atual dos setores. Assim, as simulações consideram fixo o estoque de capital dos setores e o salário real, enquanto a taxa de retorno ao capital e emprego variam endogenamente, para encontrar o novo equilíbrio dada a introdução de um preço de carbono. O quadro 1 contém as hipóteses adotadas nesse fechamento.

**Quadro 1.** Hipóteses dos fechamentos do modelo – cenário MAC

Fechamento base	
<b>Variáveis exógenas do PIB real (lado da renda)</b>	
a1cap a1lab_o a1lnd a1tot a2tot a0com a1	Mudanças tecnológicas
<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
x3tot	Consumo das famílias
x2tot_i	Investimento real total
delx6	Demanda real de estoques por mercadoria

(Continua)

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

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

(Continuação)

<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 f1oct	
<b>Distribuição da demanda do governo</b>	
f5	Mudança de demanda do governo
<b>Distribuição do investimento entre os setores</b>	
finv3	Ativador da regra de investimento de longo prazo no modelo estático
<b>Número de famílias e preferências no consumo são exógenas</b>	
Qh	Número de famílias
a3_s	Preferências das famílias por bens
a3	
<b>Variável <i>dummy</i>: sempre exogenamente definida como 1</b>	
DelLnd	
<b>Módulo ambiental (mudanças tecnológicas e mudanças ordinárias da tributação)</b>	
Delgastot delgastax_sq deltax deltax1all deltax1st deltax1_idom deltax1_ij deltax1_is deltax2all deltax2st deltax3all deltax3comp deltax3_i deltax5 deltaxsource agascomb agasind agasfuel agasresid f_agasAct fcomp3 f_agreen fgovgen fgovgen_cap fgovgen_cap2	
<b>Módulo de uso da terra</b>	
Fqtrans	Mudança no uso da terra
Lndtwist	Mudança no uso da terra não causada por preços
<b>Numerário</b>	
phi	Taxa nominal de câmbio

Fonte: Elaboração própria.

Para a composição das simulações em dinâmica recursiva foram utilizados dois tipos de fechamento: o fechamento base e o fechamento de política. O quadro 2 define as variáveis exógenas comuns a todos os cenários.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

rios. Nele, as variáveis estão denominadas como se apresentam no código computacional do modelo, operacionalizado no *software* de modelagem econômica Gempack (HORRIDGE *et al.*, 2018). Os arquivos das simulações estão disponíveis publicamente para uso acadêmico.

**Quadro 2.** 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 a1tot 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>	
delIPTXRATE f0tax_s f1tax_csi f2tax_csi f3tax_cs f5tax_cs t0imp f4tax_trad f4tax_ntrad f1oct	
<b>Distribuição da demanda do governo</b>	
f5	Mudança de demanda do governo

(Continua)

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

(Continuação)

Distribuição do investimento entre os setores	
finv4	Ativador da regra de investimento no modelo dinâmico
Delfwage	Mecanismo de ajuste de salário real
Faccum	Mecanismo para ativar a equação de acumulação
Número de famílias e preferências no consumo são exógenas	
Qh	Número de famílias
a3_s	Preferências das famílias por bens
a3	
houslack houslack2	Mudança no consumo das famílias
Módulo ambiental (mudanças tecnológicas e mudanças ordinárias da tributação)	
Delgastot delgastax_sq deletaxrev deltax deltax1all deltax1st deltax1_idom deltax1_ij deltax1_is deltax2all deltax2st deltax3all deltax3comp deltax3_i deltax5 deltaxsource agascomb xgas agasresid f_agasAct f_agreen fgovgen fgovgen_cap fgovgen_cap2	
Mercado de carbono	
delgascap delaloc delgascap2 delaloc2 trade deltradegas trade2 deltradegas2 delgastax_sqf delgastax_sqf2	
Módulo de uso da terra	
Fqtrans	Mudança no uso da terra
Lndtwist	Mudança no uso da terra não causada por preços
Numerário	
phi	Taxa nominal de câmbio

Fonte: Elaboração própria.

Nos cenários de mercado de carbono, algumas variáveis tornam-se exógenas e outras endógenas (quadro 3). Essas mudanças possibilitam estabelecer exogenamente uma meta de abatimento (variação percentual) das emissões, que auxiliará ou não a negociar licenças para emitir em um mercado de carbono. No cenário de referência, a alteração implica a imposição da mesma redução de emissões em todos os setores, de forma que custos distintos de redução de emissões (*delgastax\_sq*) são gerados. Nas simulações de mercado de carbono, as reduções de emissões são distintas (para se atingir a meta do mercado) e o custo margi-

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

nal de redução de emissões (preço do mercado de carbono) é o mesmo para todos os setores.

**Quadro 3.** 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 (variação %)	<i>ftrade</i>	Mudança na regra do abatimento (ativa negociações)
<i>deltradegas</i>	Comércio de permissões (u)	<i>fdtradegas</i>	Mudança na regra do abatimento (desativa deltradegas)
<i>a1tot</i>	Mudança técnica total	<i>fa1tot</i>	Mudança na resposta das emissões ao preço de carbono

Fonte: Elaboração própria.

## SIMULAÇÕES E RESULTADOS

### Utilizando a abordagem de EGC para construir e interpretar curvas MAC

As simulações foram realizadas com o objetivo de analisar possíveis estratégias brasileiras para mitigar as emissões setoriais de GEE, buscando atender aos compromissos nacionais assumidos pelo país. A adoção de um conjunto de choques exógenos no modelo gera uma série de alocações intersetoriais de fatores produtivos, com alterações relevantes

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

em termos de preços relativos e nível de atividade econômica. O efeito líquido dessas alocações é visualizado no desempenho das principais variáveis de interesse do modelo e do estudo.

Os resultados representam impactos da imposição de preços de carbono e devem ser interpretados como desvios em relação ao cenário base, no qual não há taxação sobre as emissões de GEE. Um tributo sobre as emissões de GEE implica, em um primeiro momento, aumento dos custos de produção dos setores da economia que emitem diretamente, pela própria atividade ou por meio da queima de combustíveis, ou indiretamente, a partir dos insumos utilizados na produção. Esse aumento nos custos de produção é repassado para a cadeia produtiva ou demanda final (consumidores, por exemplo) em forma de aumento dos preços, o que pode engendrar redução das exportações (via perda de competitividade do produto nacional).

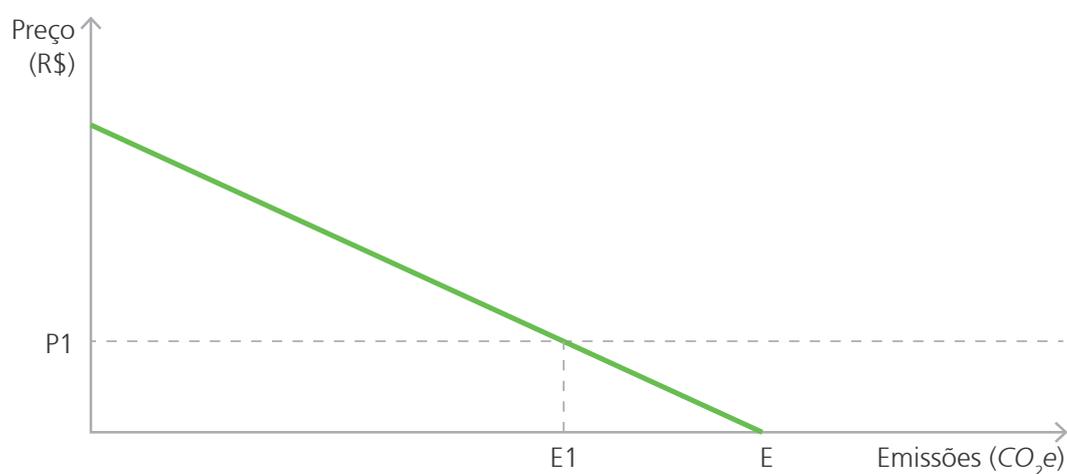
O aumento dos custos de produção faz com que o nível de atividade caia, reduzindo a demanda por fatores de produção (terra, capital e trabalho) e, conseqüentemente, sua rentabilidade, o que significa menos renda para as famílias em forma de remuneração dos fatores produtivos. A redução na taxa de retorno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

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

Dessa forma, a internalização do imposto de carbono transforma-se em um imposto monetário (aumento dos custos de produção). E, assim como explicado por Rathmann (2017), a resposta setorial a esse imposto supõe modificação endógena do uso de insumos e da produção setorial.

Com esses resultados, é possível fazer outras análises, como a de Clarke, Fraser, Waschik (2014), que geraram uma curva MAC para a Austrália a partir de um modelo de EGC estático. O custo de qualquer nível de redução das emissões como um todo é a área sob essa curva MAC. O custo para alcançar determinado nível de redução das emissões pode ser usado como teto limite para a adoção de políticas de mitigação. Se o custo for inferior ao imposto de carbono necessário para alcançar determinado nível de emissões, essa política pode ser considerada uma opção financeiramente mais viável do que o imposto. Os resultados MAC obtidos a partir da simulação de EGC podem ser explicados pela figura 1.

**Figura 1.** Custo marginal de abatimento



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

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

Na ausência de impostos de carbono ou esquemas de subsídio, as emissões agregadas serão  $E$  unidades de  $\text{CO}_2\text{e}$ . Com um imposto de  $P1$  por unidade de emissões, as empresas irão mitigar suas emissões enquanto o custo for menor que  $P1$ , e as emissões cairão para  $E1$ . Os autores ressaltam a importância das elasticidades de substituição para o MAC em qualquer setor e na economia agregada, na medida em que as elasticidades de demanda mais altas facilitam a substituição de insumos mais emissores por outros com menor nível de emissão, reduzindo o MAC. Cada ponto do gráfico representa um ponto de equilíbrio no qual o preço de carbono de equilíbrio será o MAC da economia para esse nível de emissões/abatimento.

Neste estudo, assim como em Clarke, Fraser e Waschik (2014), as emissões foram incorporadas ao modelo anexando-se carbono em proporções fixas ao uso de bens de energia pelas empresas como insumos intermediários ou pelas famílias. Portanto, o uso de dada quantidade de qualquer bem energético sempre resulta em uma determinada quantidade de emissão de  $\text{CO}_2\text{e}$ . Para simular os efeitos de um imposto sobre o carbono de forma similar ao realizado em Clarke, Fraser e Waschik (2014), foi introduzida uma faixa de preços por tonelada de emissões de  $\text{CO}_2\text{e}$  entre R\$ 10 e R\$ 1.000. Os preços são compatíveis com os sugeridos pela literatura, como o indicado pelo relatório de Stiglitz e Stern (2017) para o Banco Mundial, em que realizam uma revisão de literatura sobre precificação de carbono e concluem que o preço do carbono consistente com o alcance da meta de temperatura do Acordo de Paris deve estar pelo menos entre US\$ 40-US \$80/t em 2020 e US \$50-US \$100/t até 2030.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

A partir das curvas MAC obtidas das simulações, é possível elaborar e comparar estratégias de mitigação avaliando a importância relativa e o potencial de abatimento de cada setor nesse processo. Utilizando a abordagem de equilíbrio geral, pode-se avaliar que setores têm menores custos (setoriais e agregados) para alcançar determinados níveis de abatimento. Esse valor representa o limite de custo abaixo do qual as tecnologias disponíveis seriam adotadas. Em outras palavras, curvas MAC baseadas em modelos econômicos auxiliam a entender a relação entre o imposto sobre o carbono e os níveis de redução das emissões resultantes. Assim, os resultados ajudam a identificar que setores deveriam receber subsídios para custear o volume de abatimento desejado.

### Custo marginal de abatimento setorial

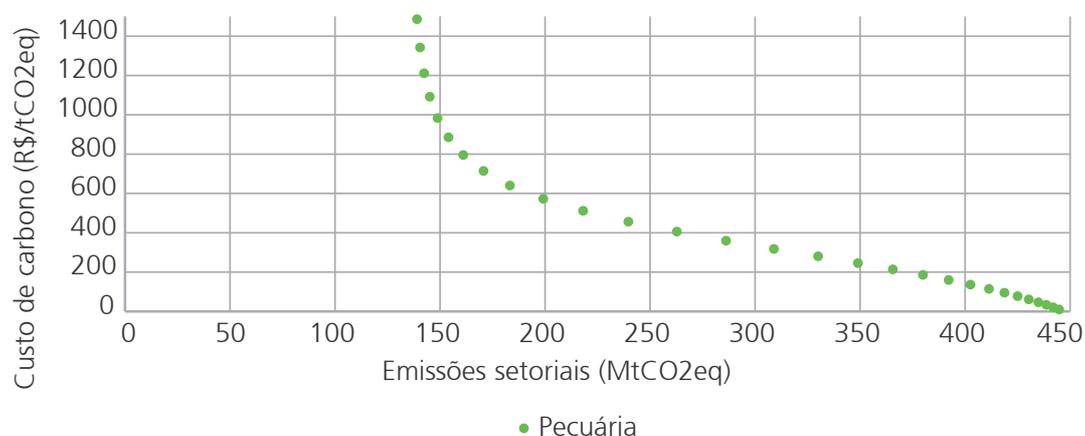
Esta seção busca analisar o potencial de abatimento setorial das emissões de GEE partindo do conceito de curvas MAC, porém adaptado ao modelo de análise em equilíbrio geral. Para tanto, uma faixa de valores de custos de carbono para as emissões associadas ao nível de atividade e à queima de combustível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

Dada a importância do setor de “bovinos e outros animais”, principal emissor setorial, a figura 2 apresenta o custo de abatimento por nível de emissão dos principais setores da pecuária. Chama-se a atenção ao eixo das abscissas, cujo valor máximo é de 400 Mt. Cada ponto do gráfico representa uma simulação específica em estática comparativa em que o preço de carbono é o custo de abatimento marginal do setor para certo nível de emissões/abatimento.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

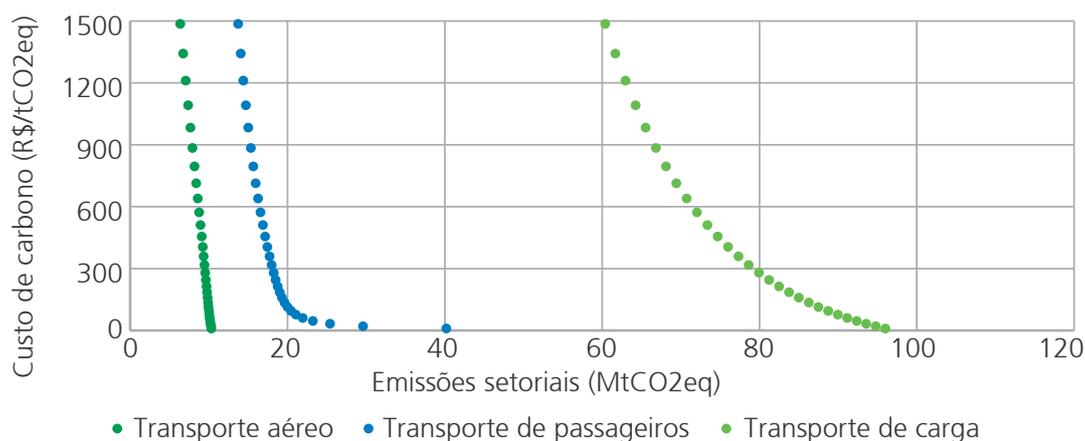
Após a pecuária, o setor de transportes é o que apresenta maior potencial de abatimento, representado na figura 3. Percebe-se que o valor máximo no eixo das abscissas nesse caso é 100 Mt, um quarto do valor máximo das emissões na representação gráfica da pecuária.

**Figura 2.** Custo de abatimento marginal dos setores da pecuária



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

**Figura 3.** Custo de abatimento marginal dos setores de transportes



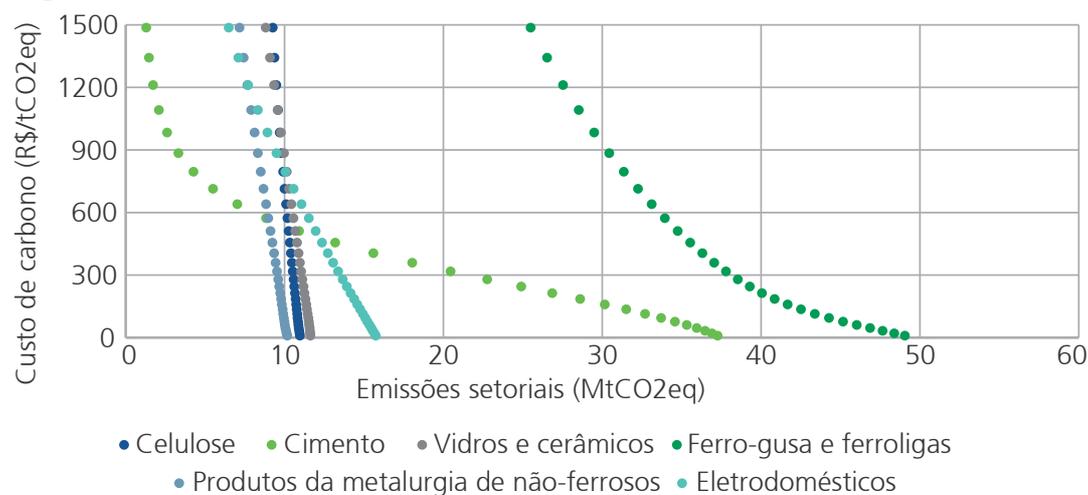
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Ainda se destacam, quanto ao potencial de mitigação, os setores industriais e agrícolas, apresentados nas figuras 4 e 5. O valor máximo das

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

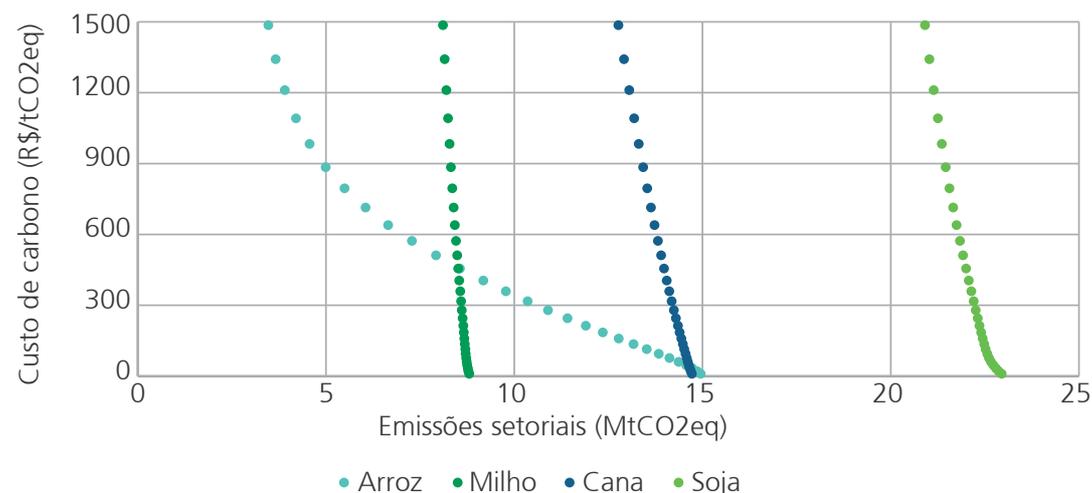
emissões das curvas MAC da indústria corresponde à metade do valor dos transportes e, conseqüentemente, a um oitavo da pecuária. Os setores agrícolas, por sua vez, têm metade do potencial da indústria.

**Figura 4.** Custo de abatimento marginal dos setores da indústria



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

**Figura 5.** Custo de abatimento marginal dos setores da agricultura

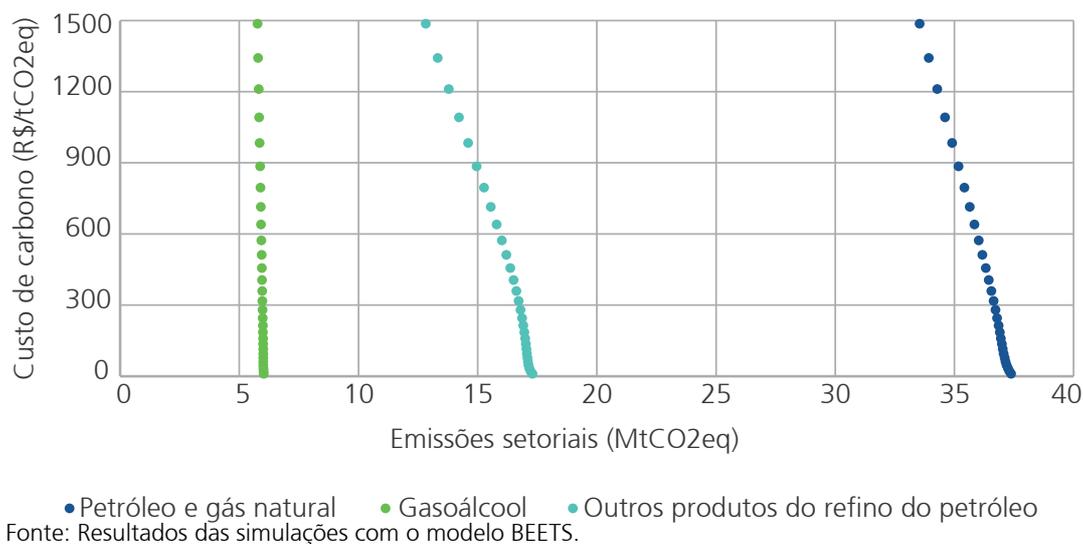


Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

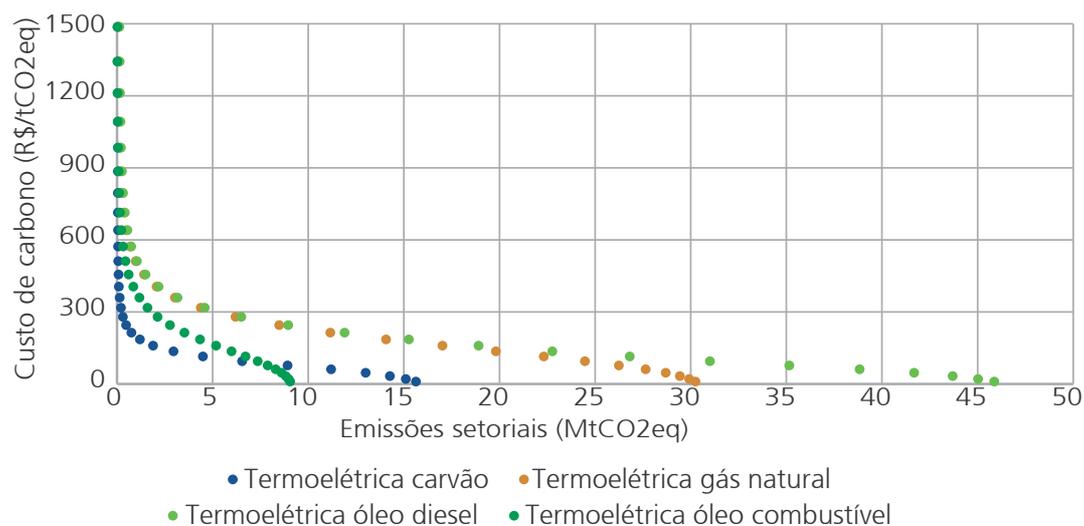
## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

Os setores de combustível e geração termoelétrica são apresentados nas figuras 6 e 7. O limite máximo do eixo das abscissas de combustíveis e termoelétricas representa um décimo da pecuária.

**Figura 6.** Custo de abatimento marginal dos combustíveis fósseis



**Figura 7.** Custo de abatimento marginal das termoelétricas



## Mercados de carbono

Nesta seção são analisados os impactos econômicos da 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 à meta, mas não há comercialização de permissões para emitir. Nesse cenário, reduções setoriais de emissões são colocadas de forma a atingir a meta do acordo. Consideram-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 para emitir (inicialmente distribuídas gratuitamente) 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 apresentadas na seção seguinte.

### 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

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 as trajetórias (cenário base e cenário com 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, as exportações, o consumo das famílias, o investimento, o consumo do governo e as exportações, conforme apresentado na tabela 2, a partir de dados observados de 2016 a 2020 na Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua trimestral (IBGE, 2021), nas Contas Nacionais Trimestrais (IBGE, 1999-) e em 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.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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

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

Fonte: Elaboração própria com base em dados do IBGE (1999-).

Os dados da exportação setorial são 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, no período de 2022 a 2030, e os gastos do governo respeitam o teto de gastos impostos pela Emenda Constitucional 95/2016 (BRASIL, 2016).

### Resultados agregados

Os cenários elaborados avaliam três situações:

- ♦ Cenário de referência: imposição de redução de emissões idêntica em todos os setores da economia;
- ♦ Cenário de mercado restrito;
- ♦ Cenário de mercado amplo.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 à matriz energética a partir de 2022. Assim, novas simulações encadeadas ano a ano permitem analisar os resultados dos três cenários até 2030. 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 COP 21 (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 Gt.

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, deve-se à imposição da meta de abatimento nos setores produtivos e à restrição ao desmatamento. Esta última, ao reduzir as emissões associadas ao uso da terra e contribuir para maiores níveis 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 consideradas duas combinações de setores participantes do mercado de carbono para alcançar a mesma meta de abatimento. O objetivo foi comparar o custo-efetividade de

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 (Mt)			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%

(Continua)

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

(Continuação)

Setores participantes do mercado	Emissões (Mt)			Participação do setor no total das emissões	
	Emissões pela atividade	Emissões pela queima de combustíveis	Emissões setoriais totais	Mercado restrito	Mercado amplo
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 à 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 Mt. 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

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 COP 21

	<b>Crescimento acumulado 2022-2030 (var. %)</b>		
	<b>Referência</b>	<b>Mercado restrito</b>	<b>Mercado amplo</b>
<b>PIB</b>	16,5	19,5	19,5
<b>Consumo das famílias</b>	19,7	19,3	19,2
<b>Investimento</b>	7,0	19,8	19,9
<b>Exportação</b>	3,0	5,9	5,7
<b>Importação</b>	0,5	0,5	0,6
<b>Emprego</b>	10,2	11,9	11,9
<b>Rentabilidade do capital</b>	12,5	16,4	16,4
<b>Preço carbono (R\$)</b>	-	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 nos mercados 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 8.

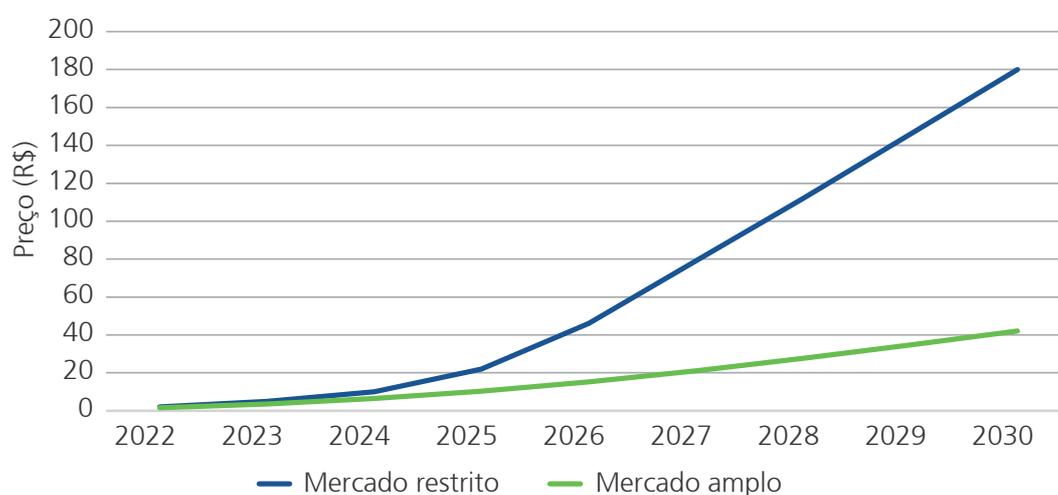
O mercado amplo apresenta o menor custo financeiro para alcançar a meta, principalmente por incorporar o setor de bovinos e outros animais, que corresponde a 33% das emissões dos setores participantes

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

do mercado. Contudo, embora apresente elevado potencial de abatimento, a participação desse setor para alcançar a meta de abatimento é especialmente custosa, 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, torna-se mais custosa em termos de sacrifício de atividade setorial.

**Figura 8.** Evolução do preço de carbono nos mercados



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

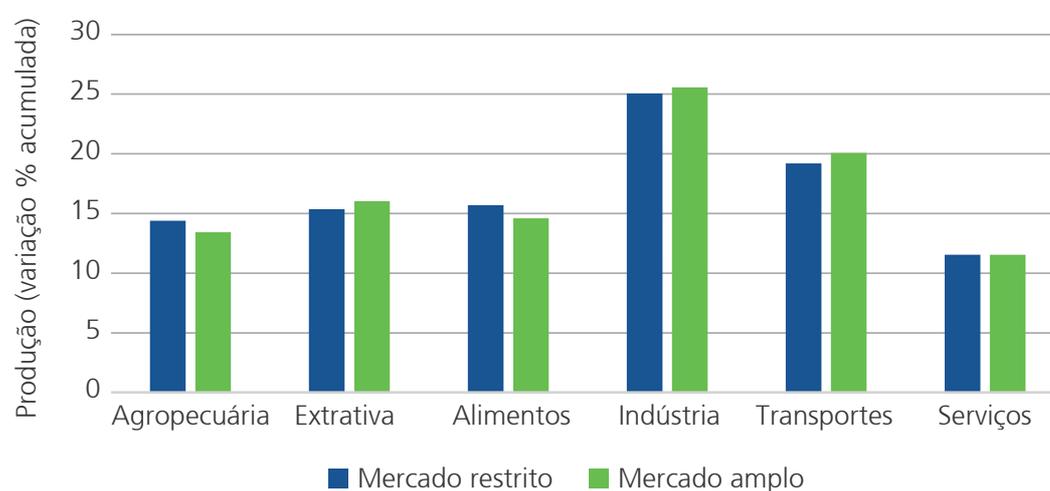
### Resultados setoriais

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

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

que compram os bens produzidos pelo setor ou que vendem insumos para 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 9 ilustra o comportamento da produção setorial nos cenários de mercado.

**Figura 9.** Dinâmica dos setores com mercados de carbono: crescimento acumulado da produção entre 2022 e 2030 (variação %)



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Nota-se que os setores extrativos, industriais e de transportes têm maior crescimento acumulado no cenário de mercado amplo, pois, quando se considera que todos os setores contribuem para alcançar a meta, a redução individual das emissões em cada setor é menos significativa e, portanto, o sacrifício que esses setores precisam fazer para alcançar a mesma meta de abatimento é menor. Por outro lado, os setores agropecuário e de alimentos têm crescimento acumulado menor no mercado amplo, pois nesse cenário eles precisam reduzir suas emissões (que não eram limitadas no mercado restrito). Cabe ressaltar que a pecuária é o principal emissor, mas foi poupada no mercado restrito.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

Por outro lado, o nível de atividade no setor de serviços não apresenta alterações significativas entre os dois cenários da figura 9, tendo em vista que não tem 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, diminuindo também seu nível de atividade. Por outro lado, no cenário em que apenas alguns setores selecionados têm suas emissões restringidas por uma meta, os que não sofrem a penalização não têm incentivo para reduzir suas emissões e, portanto, não são diretamente afetados. Ainda assim, são afetados indiretamente ao perceberem custos maiores em seus insumos intermediários, além de 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, enquanto no mercado amplo é responsável 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 ao setor de transportes, como o *RenovaBio* (Lei 13.576 de 26.10.2017). Para alcançar metas maiores de abatimento, contudo, a inclusão de outros setores nos mercados de carbono é necessária, a fim de não sobrecarregar poucos setores, exigindo preços de carbono elevados para atingir determinados objetivos.

Quanto mais setores participam do mercado, menor é a queda no nível de atividade setorial, pois, ao dividirem a meta de abatimento entre

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

eles, 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 10 apresenta a variação acumulada no consumo das famílias nos mercados restrito e amplo. O resultado agregado do consumo mostra que tais 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).

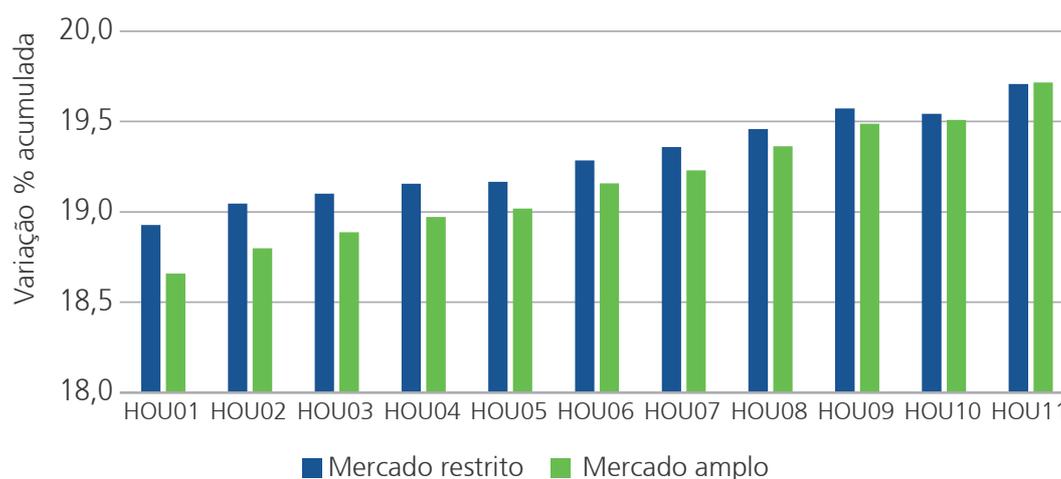
Esse efeito regressivo pode ser explicado pelo padrão de consumo de cada grupo de renda. No mercado restrito, apenas setores industriais, de transporte e de geração de eletricidade são abrangidos pela meta de abatimento, sendo, portanto, aqueles que enfrentam maiores custos para alcançar a mitigação desejada. Esses setores representam 26,8% do consumo das famílias do primeiro estrato de renda e 18,6% do consumo das famílias do grupo de poder aquisitivo mais elevado. 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 estrato –, impacta relativamente mais o consumo dessa classe. Já entre famílias dos estratos mais altos, o consumo de agropecuária e alimentos é relativamente menor, chegando a apenas 6,1% no estrato de renda mais alta. Assim,

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 de consumo é inversamente proporcional à renda, o oposto é percebido para o setor de serviços, associado a baixos níveis de poluição e, portanto, pouco afetado pelas metas de abatimento. Nas famílias do primeiro estrato, 40,1% da cesta é de bens do setor de serviços, e essa proporção aumenta para cada classe seguinte, chegando a 72,4% nas famílias de maior renda. Ou seja, com a inclusão de todos os setores no mercado de carbono, as famílias dos estratos 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 10.** Crescimento acumulado do consumo das famílias entre 2022 e 2030

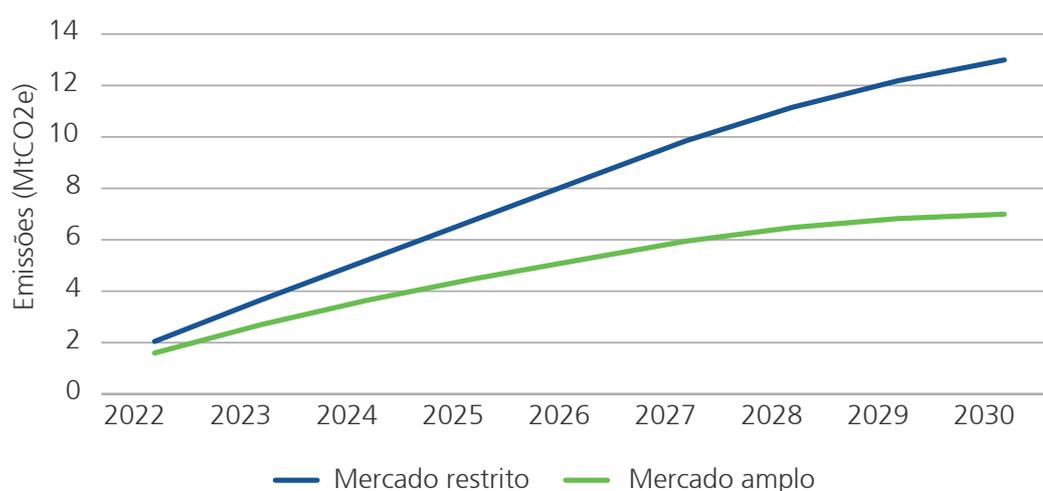


Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

Em relação às variações nas emissões do uso da terra decorrentes da própria introdução dos mercados de carbono (figura 11), nota-se que o mercado restrito provocaria emissões de 13 Mt. Já no mercado amplo, devido à queda da atividade da agropecuária, as emissões seriam de 7 Mt. O 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, é preciso notar que os mercados de carbono tendem a gerar emissões indiretas no uso da terra, embora o 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 11.** Variação acumulada das emissões da mudança do uso da terra



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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.: termoelétricas). O BEETS foi desenvolvido para dar maior detalhamento a esses dois grupos de emissões. Por desagregar o setor de eletricidade por tipo de geração, torna possível analisar a participação de cada tipo de termoelétrica nos mercados de carbono. Já ao considerar os diferentes combustíveis, permite precificar as emissões associadas ao uso de cada um deles. Por isso, os resultados relativos ao setor de eletricidade foram detalhados na seção seguinte.

### 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 termoelétricas.

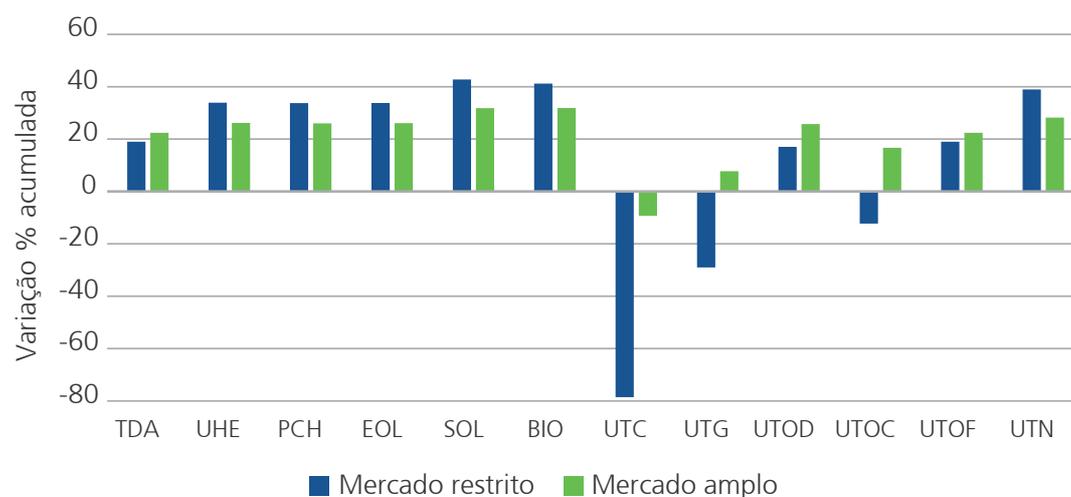
A composição da matriz energética de um país é resultante de diversos fatores – de planejamento, econômicos, sociais, tecnológicos e ambientais. Estes últimos relacionam-se principalmente à abundância de recursos energéticos, como reservas petrolíferas ou potencial hidrelétrico, eólico ou fotovoltaico, e ao combate ao aquecimento global.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 proposta pela NDC pode exigir grandes mudanças na matriz elétrica, que dependem da forma como as políticas serão executadas. Os efeitos sobre a atividade dos setores de eletricidade decorrentes da implementação do mercado restrito (preço médio de carbono a R\$ 180) e do mercado amplo (preço médio de carbono a R\$ 74) são apresentados na figura 12. 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 12.** Atividade dos setores elétricos



Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

Os setores de geração vendem apenas para o setor de TDA, responsável por repassar a energia para o consumidor final (setores e famílias). Conforme a figura 12, no mercado restrito esse setor cresce um pouco menos que no mercado amplo (aproximadamente 3% a menos acumulado ao longo do período). Então, os demais setores se deparam com uma demanda de energia similar entre os dois cenários, e o que muda significativamente é a composição dessa eletricidade. No mercado restrito, as termoeletricas a carvão reduziriam muito sua atividade, assim como as termoeletricas a gás natural e a óleo combustível. Por outro lado, as fontes renováveis aumentariam, para compensar. No mercado amplo, apenas as termoeletricas a carvão teriam redução da sua atividade, enquanto 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, com 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, diretamente associado à qualidade de vida da população. No entanto, 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 mais grave.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

É preciso ressaltar que um dos motivos para as mudanças no nível de atividade dos setores de geração de eletricidade observadas na figura 12 está relacionado 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 redução 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 de 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 TDA ao ser confrontado com custos de energia diferenciados para cada fonte em decorrência da imposição dos mercados de carbono.

As emissões associadas à matriz energética apresentam trajetória ascendente, pois o próprio crescimento econômico demanda a expansão da oferta energética. Todavia, esse não é o único motivo para que os setores energéticos tenham papel central na transição para uma economia de baixo carbono, mesmo em um país com 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 enquanto desafios ou 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.

## 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 de energia induzem à 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 e ao 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 neste artigo, são uma opção atraente para mercados nacionais. Além disso, os canais principais que levam à redução do consumo de energia são os mesmos.

Há consenso na literatura de que, caso medidas adicionais não sejam tomadas, haverá crescimento das emissões, principalmente dos setores de energia e agropecuária. São vários os estudos que simu-

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

lam os impactos da tributação sobre o carbono justamente pelo seu elevado potencial de reduzir o volume total de emissões, tais como Wills e Lefreve (2012), Chen, Timilsina e Landis (2013), Wills (2013), Magalhães (2013), Lucena *et al.* (2016), La Rovere *et al.* (2015), Grottera, Wills e La Rovere (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 se tornam maiores à medida 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 essa literatura.

Como compensação para a 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 de emissões e crescimento econômico. Por sua vez, as simulações realizadas neste 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 os efeitos positivos da reciclagem da receita, ainda que isso permita que os preços de carbono no mercado sejam menores. O objetivo dessa estratégia de simulação consistiu em aumentar a viabilidade da introdução do

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 têm observado que as metas de redução das emissões podem reduzir o número de empregos nos setores de petróleo e carvão (trabalhadores qualificados) e aumentá-lo 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, Wills e La Rovere (2016), por exemplo, defendem 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 aqui 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, Wills e La Rovere (2016) defendem 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 com maior poder aquisitivo devido a uma parcela de despesas

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

maior com esses itens. Classes mais ricas geralmente gastam mais em bens como combustíveis, para os quais os preços aumentam consideravelmente, embora não representem uma grande parcela da cesta de consumo dos mais pobres. As classes mais baixas gastam grande parcela de sua renda em produtos alimentícios, por exemplo, cujos preços permanecem praticamente inalterados.

Por outro lado, Magalhães (2013) e Carvalho *et al.* (2018) observam efeitos concentradores de renda. Ao contrário de Grottera, Wills e La Rovere (2016), Carvalho *et al.* (2018) notam que os primeiros decis de renda seriam sim prejudicados pelo aumento do preço dos alimentos. Já 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 ele depende dos incentivos adotados, especialmente da forma como a receita da tributação é utilizada.

Este trabalho observou que os efeitos sobre as famílias dependem do mecanismo de precificação adotado. Quanto maior o preço de carbono imposto aos combustíveis, maior é o efeito sobre o consumo das famílias de renda mais elevada, concordando com Grottera, Wills e La Rovere (2016). Todavia, em um mercado de carbono que inclui a agropecuária, a redução do consumo das famílias de baixa renda é maior, percebendo-se efeitos concentradores, como indicado por 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 Federação das Indústrias do Estado de São

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

Paulo (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 deste trabalho corroboram 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 os da Fiesp (2017), Gurgel e Paltsev (2019), Faccin (2019) e Oliveira, Gurgel e Tonry (2019). Esses estudos também indicam que os mercados podem gerar menor impacto negativo no PIB do que a taxação. Além disso, segundo Gurgel e Paltsev (2019), 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 destaque 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 propostos na NDC, por ser a forma economicamente menos custosa de reduzir as emissões no Brasil. Como destacam Chen, Timilsina e Landis (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.

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 disponíveis no setor de mudança do uso da terra, a inclusão de tais emissões no sistema ETS –, via compensações, por exemplo – poderia estimular o Brasil a reduzir ainda mais suas emissões, e até a 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 como os de Cembral e Gurgel (2014), Carvalho, Magalhães e Domingues (2016) e Francisco (2018) sugerem que uma política de controle do desmatamento provocaria perda apenas marginal sobre o crescimento econômico. 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 deste trabalho corroboram essa hipótese. Nas simulações realizadas, foi imposta a condição de desmatamento zero, suficiente para alcançar 170 Mt de abatimento das emissões, e não se observou mudança significativa no crescimento dos agregados econômicos para alcançar essa 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 em um contexto de economia de baixo

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

carbono. Porém, o setor energético apresenta características particulares para cada tipo de geração de energia, além de especificidades de transmissão e distribuição, mediante controlador central, via Sistema Integrado Nacional (SIN). Assim, utilizando como base os resultados dos trabalhos apresentados nesta seção, esta pesquisa 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 do uso da terra no Brasil.

## CONCLUSÕES

A introdução dos mecanismos de precificação é capaz de afetar agentes e setores da economia, e seus efeitos podem ser amplificados ou anulados dentro da cadeia de inter-relações econômicas. Este estudo contribui com a literatura ao analisar opções setoriais de mitigação de emissões a partir da estimativa de curvas de MAC dos principais setores emissores no Brasil, considerando tanto as emissões pela própria atividade quanto as emissões indiretas por meio da queima de combustível e transição do uso da terra.

Em relação aos resultados observados, é possível elaborar e comparar estratégias de mitigação avaliando a importância relativa e o potencial de abatimento de cada setor nesse processo. Utilizando a abordagem de equilíbrio geral, pode-se avaliar que setores possuem menores custos (se-

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

toriais e agregados) para alcançar determinados níveis de abatimento. Esse valor representa o limite de custo, abaixo do qual as tecnologias que se encontrarem disponíveis seriam adotadas.

Em outras palavras, curvas MAC baseadas em modelos econômicos auxiliam a entender a relação entre o imposto sobre o carbono e os níveis de redução das emissões resultantes. Assim, os resultados ajudam a identificar que setores deveriam receber subsídios para custear o volume de abatimento desejado. Ao introduzir preços de carbono entre R\$ 10 e R\$ 2.000, o maior volume de redução das emissões é observado na pecuária, seguido pelo setor de transportes, uma vez que são os principais emissores. Menor volume de abatimento é observado entre as termoelétricas; porém, devido à possibilidade de substituição entre as fontes de geração de eletricidade, o aumento de custos associados a um preço de carbono relativamente baixo é suficiente para provocar queda no nível de atividade e emissões setoriais relativamente altas. Por isso, as termoelétricas a carvão, a óleo combustível, a gás natural e a óleo diesel estão entre as cinco que mais reduzem suas emissões em relação ao total de emissão do setor, com preços entre R\$ 100 e R\$ 500 por tonelada de CO<sub>2</sub>e, por exemplo. Além das térmicas, outra categoria que reduz seu volume de emissões em relação ao total é a de transporte de passageiros, devido à possibilidade de alternância entre gasolina e etanol.

A análise dessas curvas pode auxiliar na criação de metas setoriais de abatimento e na decisão sobre a alocação setorial dos recursos financeiros para alcançar a NDC brasileira. Essa identificação, por sua vez, permite discutir alternativas para desenho de mercados de carbono eficientes para diferentes metas de abatimento, conforme os dados mais recentes e

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

as metas propostas, olhando tanto para mercados de carbono mais amplos quanto restritos a setores com menores custos de abatimento.

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, que têm 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 a 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 aqueles 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 outros presentes na 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 reduzir o preço de carbono necessário para alcançar a meta de abatimento, pode ter efeitos

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

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 renda mais elevada 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 a partir da venda das permissões para emitir.

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

Outro aspecto 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 acarretaria alterações no cenário de referência, demandando maior redução das emissões setoriais, pela quei-

## Mecanismos de precificação de carbono no Brasil: custos econômicos e potenciais de abatimento

ma 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 de mecanismos de precificação de carbono no Brasil, em termos de agregados econômicos e volume de emissões – como o presente artigo buscou fazer –, é preciso levar em consideração o contexto em que as políticas ambientais devem ser construídas.

Em resumo, o artigo buscou, como contribuição principal, analisar o impacto econômico da implementação de mercados de carbono no Brasil e, como contribuição secundária, estimar as curvas MAC dos principais setores emissores do país. Espera-se que os resultados aqui encontrados possam auxiliar na formulação de metas setoriais de abatimento e nas decisões sobre a alocação dos recursos financeiros para alcançar a NDC brasileira, incentivando setores produtivos estratégicos no desenho de mercados de carbono e revertendo possíveis efeitos distributivos negativos, de modo a proteger as famílias de menor renda e garantir crescimento econômico ambientalmente sustentável e que considere especificidades nacionais.

## REFERÊNCIAS

ADAMS, P. D.; HORRIDGE, M.; PARMENTER, B. R. *MMRF-GREEN: a dynamic, multi-sectoral, multi-regional model of Australia*. Melbourne: Monash University, Centre of Policy Studies, 2000.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório de Evolução das Tarifas Residências*. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <https://portalrelatorios.aneel.gov.br/luznatarifa/basestarifas>. Acesso em: 31 out. 2022.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. *Relatório V: formação de custos e preços de geração e transmissão de energia elétrica*. Brasília, DF, 2015. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos>. Acesso em: 15 nov. 2019.

BCB – BANCO CENTRAL DO BRASIL. *Sistema de expectativas de mercado*. Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/expectativas2/#/consultas>. Acesso em: 7 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, DF, p. 2, 16 mar. 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, DF, p. 4, 27 dez. 2017.

**Mecanismos de precificação de carbono no Brasil:**  
custos econômicos e potenciais de abatimento

CABRAL, C. D. S. R.; GURGEL, A. C. Análise econômica da limitação do desmatamento no Brasil utilizando um modelo de equilíbrio geral computável. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA*, 41., 2014, Palmas. *Anais [...]*. Niterói, RJ: Anpec, 2014.

CCEE – CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. *Resultados Consolidados*. 2019. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/mercado/leilao-mercado>. Acesso em: 15 set. 2019.

CARVALHO, T. S. *Uso do solo e desmatamento nas regiões da Amazônia legal brasileira: condicionantes econômicos e impactos de políticas públicas*. 2014. Tese (Doutorado em Economia) – Faculdade de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

CARVALHO, M. M. *et al.* *Simulação dos impactos econômicos da proposta brasileira na COP21: uma abordagem de equilíbrio geral computável*. *In: Encontro Nacional de Economia*, 44., 2018, Foz do Iguaçu, PR. *Anais [...]*. Niterói: 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*, Amsterdam, v. 130, p. 436-446, 2013.

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

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

**Mecanismos de precificação de carbono no Brasil:**  
custos econômicos e potenciais de abatimento

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

FACCIN, F. *Impactos das metas do Acordo de Paris sobre a economia brasileira*: uma abordagem de equilíbrio geral computável. 2019. Dissertação (Mestrado em Economia) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2019.

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

FIESP – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. *Mudança do clima*: avaliação dos reflexos das metas de redução de emissões sobre a economia e a indústria brasileira. São Paulo: Fiesp, 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. Dissertação (Mestrado em Agronegócio) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2018.

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: GREEN GROWTH KNOWLEDGE PLATFORM (GGKP) ANNUAL CONFERENCE, 4., 2016, Jeju Island. *Proceedings* [...]. Geneva: GGKP, 2016.

GURGEL, A. G.; PALTSEV, S. The impacts of the Brazilian NDC and their contribution to the Paris agreement on climate change. *Environment and Development Economics*, Cambridge, v. 24, n. 4, p. 395-412, 2019.

**Mecanismos de precificação de carbono no Brasil:**  
custos econômicos e potenciais de abatimento

HORRIDGE, J.M. *et al.* Solution Software for Computable General Equilibrium Modeling. In: DIXON, P.B.; JORGENSEN, D. (ed.). *Handbook of Computable General Equilibrium modeling*. Amsterdam: Elsevier, 2012. p. 1331-1381.

HORRIDGE J.M. *et al.* *GEMPACK manual*. 2018. Disponível em: <https://www.copsmodels.com/gpmanual.htm>. Acesso em: 20 out. 2022.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Sistema de Contas Nacionais Trimestrais*. Rio de Janeiro, RJ, 1999-. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=72121>. Acesso em: 10 mar. 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Matriz de insumo-produto: Brasil 2015*. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua trimestral*. Rio de Janeiro, RJ, 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q>. Acesso em: 10 fev. 2021.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: *Climate change 2021: the physical science basis*. Cambridge: Cambridge University, 2021.

LA ROVERE, E. L. *et al.* *Pathways to deep decarbonization in Brazil*. Paris: IDDRI, 2015.

**Mecanismos de precificação de carbono no Brasil:**  
custos econômicos e potenciais de abatimento

LEFEVRE, J. *Hybridization challenges in energy-economy integrated models and representation of the low carbon transition: an application to the Brazilian case*. 2016. Tese (Doutorado em Economia e Finanças)–. Université Paris Saclay, Paris, 2016.

LUCENA, A. *et al.* Climate policy scenarios in Brazil: a multi-model comparison for energy. *Energy Economics*, Amsterdam, 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. Tese (Doutorado em Economia) – Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

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

MARKAKI, M. *et al.* The impact of clean energy investments on the Greek economy: An input–output analysis (2010–2020). *Energy Policy*, Amsterdam, v. 57, p. 263-275, 2013.

MILLER, R.; BLAIR, P. *Input-Output analysis: foundations and extensions*. Hoboken, NJ: Prentice-Hall, 2009.

NORDHAUS, W. D. *A question of balance: weighing the options on global warming policies*. New Haven, CT: 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*, Amsterdam, v. 56, p. 600-614, 2016.

**Mecanismos de precificação de carbono no Brasil:**  
custos econômicos e potenciais de abatimento

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

PIGOU, A. C. *The economics of welfare*. London: Palgrave Macmillan, 2013.

RATHMANN, R. (org.). *Modelagem integrada e impactos econômicos de opções setoriais de baixo carbono*. Brasília, DF: MCTI, 2017.

RATHMANN, R. et al. (org.). *Trajetórias de mitigação e instrumentos de políticas públicas para alcance das metas brasileiras no acordo de Paris*. Brasília, DF: MCTI, 2017.

SILVA, D. I. *Demanda por ocupações em cenários de investimentos em geração de energia elétrica no Brasil*. 2020. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

SILVA, J. G. *Essays on land-use change and greenhouse gas emissions in Brazil*. 2015. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. *Tabela geral de dados: Brasil e Estados*. 2021. Disponível em: <http://seeg.eco.br/download>. Acesso em: 15 dez. 2021.

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

STERN, N.; STIGLITZ, J. E. Report of the high-level commission on carbon prices. Washington, DC: Carbon Pricing Leadership Coalition, 2017. Entrevista (vídeo).

**Mecanismos de precificação de carbono no Brasil:**  
custos econômicos e potenciais de abatimento

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

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Nationally determined contributions under the Paris Agreement. Synthesis report. 3. ed. Glasgow: UNFCCC, 2021.

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.

WILLS, W. *Modelagem dos efeitos de longo prazo das políticas de mitigação de gases de efeito estufa no Economia brasileira*. 2013. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

WORLD BANK. *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. Washington, DC, 2021. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>. Acesso em: 31 out. 2022.

ISBN: 978-65-87493-03-9

CRL



9 786587 493039

Editado pelo Departamento de Comunicação  
do Gabinete da Presidência do BNDES



MINISTÉRIO DA  
ECONOMIA

