

Economia de baixo carbono no Brasil: custos setoriais e potenciais de abatimento

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

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

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

RESUMO

O Brasil é um dos maiores emissores de gases de efeito estufa (GEE) do mundo e, como tal, as políticas nacionais de mitigação de emissões são de grande relevância para o combate ao Aquecimento Global. A redução do desmatamento tem sido a principal proposta como estratégia nacional de mitigação. No entanto, as atuais políticas climáticas brasileiras estão aquém do que é necessário para atingir as metas acordadas em Paris. Portanto, medidas adicionais podem ser necessárias o cumprimento da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), que inclui reduzir as emissões de GEE em 43% até 2030, em comparação com os níveis de 2005. De forma a identificar setores estratégicos para políticas setoriais de mitigação, este artigo avaliou o potencial de redução de emissões de GEE em setores produtivos brasileiros por meio de curvas de Custo de Abatimento Marginal (MAC) por meio do modelo de Equilíbrio Geral Computável (CGE) com estrutura recursiva-dinâmica denominado BEETS (*Brazilian Energy Emissions Trading Schemes model*). O modelo desenvolvido inclui módulos de especificação energética e ambiental que permitem o agrupamento das emissões por agente emissor (combustíveis, indústrias e residências), atividade emissora e mudança de uso da terra. O modelo ainda especifica um conjunto de 11 famílias representativas, divididas por classes de rendimento, o que possibilitou comparar as mudanças no padrão de consumo entre as diferentes classes devido à implementação do mercado de emissões de carbono. Além disso, os setores de geração de energia foram desagregados para incorporar as mudanças na matriz elétrica, fonte relevante de emissão.

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

Área de submissão: 9 - Meio ambiente, recursos naturais e sustentabilidade

JEL: Q52

ABSTRACT

Brazil is one of the world's largest greenhouse gases (GHG) emitters, and as such, national emission mitigation policies are highly relevant to combat Global Warming. Reducing deforestation has been the main proposal as a national mitigation strategy. However, current Brazilian climate policies are to fall short of what is needed to reach the goals agreed in Paris. Therefore, additional measures can be necessary to achieve the targets at Nationally determined contribution (NDC), which includes to cut its greenhouse gases emissions by 43% until 2030, compared to 2005 levels. This thesis evaluated the potential for GHG emissions abatement on productive Brazilian sectors through Marginal Abatement Cost curves (MAC) to identify strategic sectors for sectoral mitigation policies, through the Computable General Equilibrium (CGE) model with a recursive-dynamic structure named BEETS (*Brazilian Energy Emissions Trading Schemes model*). The model developed includes energetic and environmental specification modules that allow for emissions grouping by emitting agent (fuel, industries and households), emitting activity and land use change. A set of 11 representative families were specified, divided by yield classes, which made it possible to compare the consumption pattern changes between different classes due to implementation of carbon emission trading. Furthermore, the electricity generation sectors were disaggregated to incorporate changes in the electrical matrix, which is increasingly relevant as an emission source.

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

1. Introdução

As mudanças climáticas pelas quais passam o planeta têm se intensificado nas últimas décadas. De acordo com o IPCC (2021), painel internacional responsável por estudar e congrega informações sobre mudanças climáticas, as mudanças climáticas são claras, inequívocas e irreversíveis. As mudanças recentes no clima não têm precedentes ao longo dos últimos milênios, sendo que cada uma das últimas cinco décadas tem sido sucessivamente mais quente do que qualquer outra década que a precedeu. Os últimos 8 anos foram os mais quentes já registrados e a temperatura da Terra aumentou 1,07° C em relação ao período pré-industrial (1850-1900).

O relatório do IPCC mostrou que o aquecimento de 1,5° C a 2° C será ultrapassado ainda nas próximas décadas se não houver forte e profunda redução nas emissões de dióxido de carbono (CO_2) e outros Gases de Efeito Estufa (GEE). Diante desse quadro, 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, comprometeu-se com uma meta de redução da emissão de GEE para 2030 entre 50% e 52% em comparação com os níveis de 2005. O Japão, por sua vez, apontou uma meta de redução da emissão de GEE em 25,4% em comparação ao mesmo ano base de 2005, ao passo que UE e seus Estados-Membros apresentaram proposta de redução de pelo menos 55% das emissões de gases do efeito estufa até 2030, numa comparação com 1990 (UNFCCC, 2021). Assim como a Federação Russa, que se comprometeu em reduzir as emissões de GEE em 70% até 2030, em relação a 1990. A NDC chinesa, por sua vez, propõe reduzir emissões em relação ao PIB entre 60% e 65% até 2030, enquanto 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, o Brasil destaca-se por ser o único país em desenvolvimento a adotar uma meta absoluta de redução das emissões. 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, em 2030. Dentre as medidas para alcançar a meta brasileira, formalizada pela NDC, destacam-se a redução do desmatamento e reflorestamento de áreas degradadas além da ampliação da participação de fontes renováveis na matriz energética e aumento da eficiência energética, promoção do uso de tecnologias limpas no setor industrial e de medidas de eficiência no setor de transporte público. Como esses esforços de mitigação apresentam impactos econômicos e ambientais muito diversos, analisá-los caso a caso torna-se necessário.

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. Além de elevado potencial para aproveitamento de fontes renováveis alternativas como eólica e solar. Porém, há grandes desafios quanto a pecuária, principal emissor direto pela atividade e indiretamente, pelo desmatamento que, após anos de considerável redução, voltou a apresentar aumentos em um cenário de flexibilização e enfraquecimento da política de combate ao desmatamento ilegal.

Devido às particularidades do Brasil, quanto maiores informações sobre custos e potenciais de abatimento, maior a capacidade de alcançar benefícios ambientais sujeitos a menores custos econômicos.

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

Assim, o presente estudo contribui com a literatura no tema ao analisar opções setoriais de alocação dos recursos provenientes dos fundos de financiamento climático, a partir da estimativa econômica de curvas de Custo Marginal de Abatimento (*Marginal Abatement Costs* - MAC) 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 a criação de metas setoriais de abatimento e a decisão sobre a alocação setorial dos recursos financeiros para alcançar a NDC brasileira.

Para tanto, utilizou-se um modelo de Equilíbrio Geral Computável especialmente desenvolvido para tratar das emissões setoriais de GEE no Brasil, utilizando os dados mais recentes da Matriz de Insumo-Produto ano base de 2015 (IBGE, 2019) e de emissões setoriais desagregadas (SEEG, 2021). A metodologia, brevemente apresentada na terceira seção, foi escolhida por sua capacidade em captar os efeitos sistêmicos, diretos e indiretos, entre os setores da economia, e tratar explicitamente emissões por atividade, uso de combustíveis e uso da terra. Os resultados serão apresentados na quarta seção e as considerações finais, na quinta. A segunda seção apresenta brevemente uma revisão de literatura sobre os custos de abatimento no Brasil.

2. Custo Marginal de Abatimento no Brasil

Segundo Motta, Couto e Castro (2012), há, em geral, duas abordagens para estimação das curvas MAC: a tecnológica e a baseada em modelos econômicos. As curvas MAC de abordagem tecnológica buscam, de acordo com Motta, Couto e Castro (2012), descrever os custos de abatimento e a quantidade de medidas potenciais de abatimento, baseando-se em práticas usuais ou em projetos de engenharia. Os custos de cada tecnologia são apresentados em ordem crescente, associando as tecnologias aos níveis incrementais de redução das emissões. Por isso, permite considerar custos negativos associados aos potenciais de abatimento, ou seja, admite a existência de medidas de mitigação cujos benefícios financeiros superam os custos associados à sua implementação, o que pode superestimar os resultados.

Já as curvas MAC baseadas em modelos econômicos buscam otimizar o custo setorial de mitigação das emissões de GEE. Dessa forma, os resultados estão associados às elasticidades preço e substituição dos setores emissores, impossibilitando custos negativos. Assim, ao integrar as funções de oferta e demanda, os modelos econômicos podem ser vantajosos por abordar falhas de mercado e barreiras à entrada em relação aos modelos tecnológicos, que consideram apenas custos de engenharia.

A crescente literatura sobre avaliação de estratégias de descarbonização de baixo custo através da comparação entre o custo financeiro das tecnologias existentes (abordagem tecnológica) tem mostrado a relevância do tema. Entre os estudos que estimam os diferentes custos de tecnologias limpas, bem como os impactos econômicos de sua adoção, destacam-se

Wills (2013), La Rovere et al. (2015), Lucena et al. (2016), Fiesp (2017), Rathmann (2017) e Brasil (2020). Esses trabalhos comparam os custos de investimentos em medidas de mitigação considerando diferentes níveis de preço de carbono.

De forma geral, os estudos concluem que mudanças tecnológicas nos processos produtivos industriais e agropecuários, na produção e uso de energia e nos padrões de consumo podem ser necessárias para alcançar uma ampla descarbonização da economia brasileira. Entre as principais estratégias, segundo La Rovere et al. (2015), há enorme potencial de abatimento de emissões de GEE no país, através de medidas adicionais de mitigação com baixo custo: eficiência energética, uso de fontes renováveis de energia (hidrelétrica e etanol) e de técnicas para uma agropecuária de baixo carbono, mudança de modais de transporte, captura de metano em projetos de saneamento básico e reflorestamento com espécies nativas e de crescimento rápido.

Aspecto importante comum a esses trabalhos é o papel dos investimentos em tecnologia. Rathmann (2017), por exemplo, realizou uma extensa análise de diversas tecnologias para encontrar as Melhores Tecnologias Disponíveis (MTD) para reduzir as emissões em cada setor econômico de acordo com o custo-efetividade para mitigar as emissões de GEE. Nesse sentido, Lucena et al. (2016) também ressaltaram a importância dos investimentos em infraestrutura e tecnologia para viabilizar os cenários de mitigação projetados.

Outro aspecto importante é o papel dos preços de carbono. Wills (2013), por exemplo, modelou medidas de mitigação para a indústria e com custos marginais de abatimento menores que 50 R\$/tCO_{2e}. O autor defende que uma taxa de carbono de 22 R\$/tCO_{2e} poderia gerar resultados satisfatórios em termos de crescimento econômico e emissões, mas ressalta que esse valor é bastante sensível às opções de mitigação consideradas. Enquanto isso, La Rovere *et al.* (2016) defendem ainda que se não houver um esforço adicional de mitigação, a tendência entre 2020 e 2030 é de aumento das emissões, principalmente devido ao ritmo de crescimento da queima de combustíveis fósseis e da agropecuária. Para os autores, o impacto sobre o PIB da implementação de tecnologias limpas financiadas por taxação de carbono depende do nível da taxa: até US\$20/tCO_{2e}, o PIB não reduz; mas com a taxa de US\$100/tCO_{2e}, haveria redução do crescimento PIB em razão de uma queda na atividade econômica como um todo, gerada pela imposição da taxa.

Por fim, em estudo recente, o Projeto PMR Brasil 2020 analisou cenários de precificação de carbono via taxação. Modelos parciais forneceram as ofertas e demandas setoriais que foram incorporadas ao modelo nacional de EGC, que estimou os resultados macroeconômicos da política. Os resultados mostram maior PIB per capita, associado ao maior nível de atividade, aumento no número de empregos e na taxa de investimento, graças a reciclagem de receitas, implementadas em conjunto com a precificação de carbono.

Além disso, os autores destacam a ausência de impactos regressivos da precificação de carbono. O preço de carbono para atingir a contribuição dos setores produtivos para alcançar a NDC brasileira em 2030 ficou em torno de R\$ 26,50/tCO_{2e}. Essa contribuição levou em conta um ‘gap’ a ser coberto por instrumentos de precificação de carbono de 96 Mt CO_{2e} e 184 Mt CO_{2e} em 2025 e 2030, respectivamente. Esse valor foi obtido considerando o total necessário para alcançar a meta, reduzido da parcela esperada de redução que deve vir do combate ao desmatamento.

Dessa forma, é possível concluir que a principal contribuição dessas análises, como destaca Wills (2013), não seria o valor em si, mas mostrar que de acordo com a política climática implementada e da destinação das receitas de carbono, é possível encontrar uma faixa de taxas de carbono que combine redução das emissões e crescimento econômico. Eles mostram que medidas de mitigação adicionais às já em andamento podem contribuir para um maior crescimento econômico, dependendo da forma como são implementadas.

De forma geral, esses trabalhos permitem identificar os efeitos da inclusão de determinadas tecnologias. Nesses trabalhos, a curva MAC é estimada com base nos custos das tecnologias disponíveis e são dados de entrada para os modelos de EGC, quando utilizados. Mas, apesar de economicamente viáveis, não há como garantir que serão adotadas, dadas as barreiras à entrada de novas tecnologias. Portanto, para complementar a análise dos custos setoriais de abatimento, torna-se interessante comparar os resultados por outra ótica. Em que os custos de abatimento não sejam definidos exogenamente, mas resultado da estrutura produtiva atual.

Neste contexto, este trabalho busca analisar o potencial de abatimento e o custo de carbono setorial dada a estrutura produtiva da economia. O modelo calcula endogenamente o custo de carbono necessário, sem internalização de mudanças tecnológicas. Esses resultados representam, assim, o custo máximo que o setor enfrentaria para alcançar determinado nível de abatimento. Essa informação, combinada com as opções tecnológicas disponíveis, pode ser útil para identificar setores cujo abatimento deve ser financiado.

Esse tipo de abordagem busca responder, dada a estrutura produtiva da economia, quais setores são mais sensíveis à imposição de um custo de carbono e quais apresentam maiores potenciais de abatimento. Um exemplo de aplicação desse tipo de análise pode ser visto em Magalhães (2013), que encontra as trajetórias de preços de carbono para alcançar metas de abatimento para o Brasil, mas para metas agregadas do país.

Apesar da crescente literatura, poucos trabalhos estimam os custos marginais de abatimento e analisam seus impactos a partir modelos nacionais de EGC. O presente trabalho busca contribuir com a discussão utilizando um modelo construído com nível de desagregação setorial e dados recentes da economia brasileira, viabilizando a análise dos custos marginais setoriais e seus efeitos sobre variáveis macroeconômicas, considerando a tecnologia atual e efeitos indiretos da substituição entre fatores de produção e insumos e mudança do uso da terra. Assim, as estimativas complementam a literatura existente, especialmente em relação aos setores de geração de energia elétrica desagregados especialmente nesse modelo.

3. Metodologia

3.1. Modelo e Bases de dados

O BEETS (*Brazilian Energy Emission Trade System*) parte da estrutura teórica dos modelos BeGreen (Magalhães, 2013) e REGIA (Carvalho, 2014). Do BeGreen são incorporados o módulo especificação energética; o módulo ambiental, que permite a projeção de políticas de redução de emissões através da contabilidade de emissões de GEE (CO_2e), separando-as por agente emissor (combustíveis, indústrias e famílias); e a estrutura de dinâmica recursiva. Do REGIA é incorporado o módulo de transição do uso da terra, permitindo, assim, abranger todas as emissões de GEE na economia brasileira.

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

O modelo é do tipo Johansen, cuja estrutura matemática é representada por um conjunto de equações linearizadas e as soluções são obtidas na forma de taxas de crescimento (JOHANSEN, 1960). O BEETS é calibrado com os dados oriundos da Matriz de Insumo Produto (IBGE, 2015) e dados mais recentes sobre emissões setoriais de GEE, oriundos do Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2020) do Observatório do Clima.

O banco de dados é composto por 138 setores e produtos. Os setores energéticos apresentam maior desagregação, possibilitando a adoção de cenários de eficiência energética e redução de emissões, compreendendo setores de Gás natural, Transmissão e distribuição de energia, Hidroelétricas, Pequenas centrais hidroelétricas, Energia solar, Energia eólica, Térmica à biomassa, Térmica a carvão, Térmica a gás, e Energia nuclear. O modelo apresenta 5 componentes de demanda final, sendo uma família representativa, consumo do governo, investimento, exportações e estoques.

Para dividir o valor da produção de cada setor entre Eletricidade e Gás foram utilizados dados do consumo final energético do BEN (EPE, 2016), cujo ano base é 2015. Em seguida, o valor da produção de Eletricidade foi subdividido em Geração e Transmissão e Distribuição por meio de dados do Relatório de Evolução das Tarifas Residenciais (ANEEL, 2020). E, por fim, para desagregar a geração de energia elétrica por fonte, utilizou-se dados de capacidade instalada de geração elétrica por fonte (EPE, 2016) conjugados a dados dos preços dos leilões de energia elétrica (CCEE, 2019).

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

As emissões setoriais de GEE podem ser divididas em três grupos: emissões por queima de combustíveis, emissões decorrentes do próprio processo produtivo e emissões pela mudança de uso da terra. Os dados relativos às emissões foram extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2020) e distribuídos entre os 138 setores do modelo. Nesses dados, as emissões originadas da queima de combustíveis são calculadas através de uma abordagem *button-up*, o que torna possível associá-las aos respectivos setores de uso final de energia e centros de transformação.

Em relação ao módulo de uso da terra, mudanças no uso da terra e florestas são tratadas endogenamente por meio de uma matriz de transição calibrada com dados do MapBiomass. Detalhes metodológicos da matriz de transição seguem os descritos em Ferreira Filho e Horridge (2014). Os dados para a matriz foram balanceados através do método de ajuste bi-proporcional (MILLER; BLAIR, 2009). Este método consistiu no ajuste iterativo dos valores das linhas e colunas, considerando a proporcionalidade dos seus valores totais. O procedimento para identificar as emissões associadas às mudanças no uso da terra foram embasados em Silva (2015). Os dados sobre as emissões por mudança do uso do solo foram agregados nas categorias lavoura, pasto, floresta plantada e área não utilizada.

A estrutura do BEETS é composta por blocos de equações que determinam relações de oferta e demanda, condicionadas por hipóteses de otimização e de equilíbrio de mercado. Setores produtivos minimizam custos de produção, sujeitos à tecnologia de retornos constantes de escala. A demanda das famílias utiliza uma função de utilidade não homotética de Stone-Geary (Peter *et al.*, 1996). A composição do consumo entre doméstico e importado é definido por uma função de elasticidade de substituição constante (CES). Em relação às exportações, o modelo adota a hipótese de país pequeno no comércio internacional, com curvas de demanda por exportações negativamente associadas aos custos domésticos de produção. O consumo do governo é exógeno, podendo ser vinculado ao consumo das famílias ou a arrecadação de impostos. Os estoques se acumulam de acordo com a variação da produção (Magalhães; Domingues, 2016).

O mecanismo de dinâmica recursiva é intertemporal, considerando os resultados dos períodos anteriores (*backward looking*) como parâmetro para os períodos subsequentes, de

forma que a disponibilidade de capital e demais condições econômicas correntes são endogenamente orientadas pelos períodos anteriores e não afetados por expectativas futuras (*forward looking*). Os mecanismos de acumulação e alocação intersetorial do estoque de capital e dos níveis de investimento seguem taxas de depreciação e taxas de retorno. Em relação ao mercado de trabalho, as alocações do fator trabalho entre os setores e os ajustes intertemporais são orientados pelo salário real, emprego presente e emprego tendencial. Por fim, o módulo ambiental discrimina as emissões decorrentes do uso de combustíveis entre famílias, indústrias e atividades. As emissões são proporcionais ao uso e à produção (Magalhães; Domingues, 2016).

O módulo de emissões permite ainda incorporar um mercado de emissões (*cap-and-trade*), tornando possível definir metas setoriais de emissão e permitir a comercialização entre os setores. Após definir o limite de emissões setoriais, o modelo calcula endogenamente a redução necessária das emissões de cada setor para atender ao limite imposto. O modelo permite que as emissões sejam alocadas entre os setores através de um mercado de emissões comerciais que podem ter um valor inicial exógeno (alocação inicial das permissões), sendo posteriormente atualizadas endogenamente para representar o custo necessário para alcançar as metas setoriais.

3.2. 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 em termos de preços relativos e nível de atividade econômica. O efeito líquido dessas alocações é visualizado pelo 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 taxa sobre as emissões de GEE. Um tributo sobre as emissões de GEE implica, em um primeiro momento, um aumento dos custos de produção dos setores da economia que emitem diretamente pela própria atividade ou através da queima de combustíveis ou indiretamente, através 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. E isso significa menos renda para as famílias em forma de remuneração aos fatores produtivos. A redução na taxa de retorno do capital tende a reduzir o investimento 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, por consequência, redução do PIB. A redução da renda das famílias, por consequente, tem efeito sobre as importações, o que ajuda a reduzir o efeito negativo sobre o PIB.

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

Com esses resultados, é possível fazer outras análises, como em Clarke, Fraser, Waschik (2014), que geraram uma curva MAC para a Austrália a partir de um modelo de equilíbrio geral computável estático. O custo de qualquer nível de redução das emissões como um todo é a área sob esta 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 como opção financeiramente mais viável do que o imposto. Os resultados MAC obtidos a partir da simulação de EGC podem ser explicados através da Figura 1.

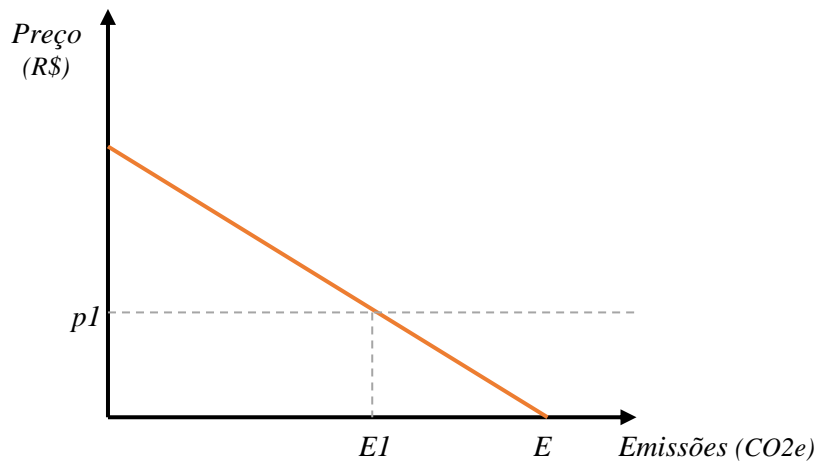


Figura 1: Custo Marginal de Abatimento
Fonte: Adaptado de Clarke, Fraser e Waschik (2014).

Na ausência de imposto de carbono ou esquemas de subsídio, as emissões agregadas serão E unidades de CO_2e . Com um imposto de pI por unidade de emissões, as empresas irão mitigar suas emissões enquanto o custo for menor que pI e as emissões cairão para EI . Os autores ressaltam a importância das elasticidades de substituição para o MAC em qualquer setor e na economia agregada: as elasticidades de demanda mais altas tornam mais fácil substituir insumos mais emissores por outros com menor nível de emissão, reduzindo o MAC. Cada ponto do gráfico representa um ponto de equilíbrio onde o preço de carbono de equilíbrio será o custo marginal de abatimento da economia para esse nível de emissões/abatimento.

No presente estudo, assim como em Clarke, Fraser e Waschik (2014), as emissões foram incorporadas ao modelo anexando 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 CO_2e . 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 CO_2e entre R\$10-R\$1000. Preços são compatíveis com os da literatura, como o indicado pelo relatório de Stiglitz e Stern (2017) para o Banco Mundial, 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 ser de pelo menos US\$40-80 em 2020 e US\$50-100 / tCO_2e até 2030.

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 individualmente nesse processo. Utilizando a abordagem de equilíbrio geral, pode-se avaliar quais setores possuem menores custos (setoriais e agregados) para alcançar determinados níveis de abatimento. Esse custo representa o limite de custo, abaixo do qual, as tecnologias disponíveis que se encontrarem, 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 quais setores deveriam receber subsídios para custear o volume de abatimento desejado.

4. Resultados

4.1. Potencial Agregado de Abatimento

A Figura 2 apresenta o potencial agregado de abatimento, distribuído por tipo de emissão, enquanto a Tabela 1 apresenta os principais custos macroeconômicos da imposição de metas de abatimento, considerando um cenário de longo prazo (2022-2050). As metas são alcançadas pela imposição, endogenamente, de preço de carbono sobre as emissões setoriais pelo nível de atividade e pela queima de combustíveis. Porém, o total abatido reflete o total de emissões reduzidas no período. Ou seja, além das emissões por processos produtivos e uso de combustíveis, os resultados incluem também as emissões relacionadas à transição do uso da terra, que são indiretamente afetadas pela mudança no nível de atividade dos setores agropecuários emissores, sujeitos à tributação, por exemplo. Assim, os resultados captam as emissões indiretas relacionadas às mudanças endógenas no uso e cobertura da terra, decorrentes da precificação de carbono sobre os setores produtivos da economia.

Tabela 1: Resultados Macroeconômicos da imposição de Metas Agregadas de Redução das Emissões

	Meta de redução (variação % acumulada entre 2022-2050)				
	10%	20%	30%	40%	50%
PIB real	-0,6	-1,9	-3,7	-5,5	-9,4
Investimento	-2,3	-6,0	-11,5	-17,0	-29,0
Consumo das Famílias	-1,0	-2,9	-5,6	-8,3	-13,5
Exportações	0,5	1,4	3,2	5,5	10,9
Importações	-3,6	-9,3	-16,7	-22,9	-33,6
Salário real	-2,0	-6,1	-11,8	-17,0	-25,6
Emprego	-0,3	-0,7	-1,3	-2,0	-4,1
Índice de preços ao consumidor	-0,8	-2,4	-5,1	-8,1	-14,7
Pagamento aos fatores primários	-2,2	-6,6	-12,8	-18,9	-30,7
Rentabilidade do capital	-1,5	-4,5	-8,9	-13,5	-24,0
Rentabilidade do trabalho	-2,9	-8,4	-16,3	-23,7	-36,6
Rentabilidade da terra	-5,7	-15,2	-25,4	-32,7	-42,4

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS

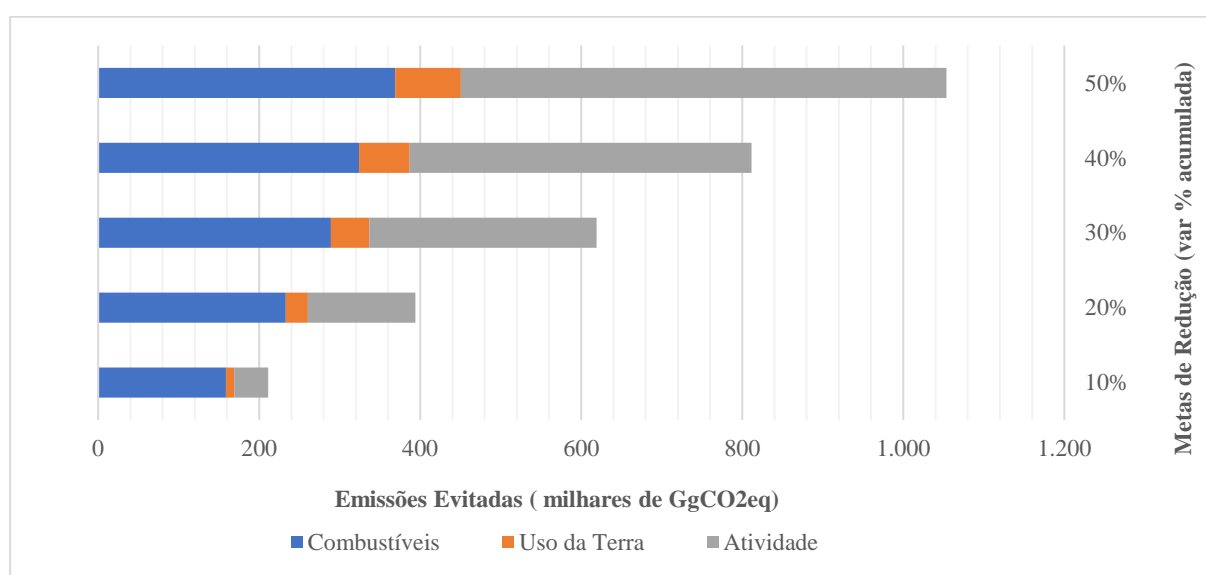


Figura 2: Total de emissões evitadas dada meta de abatimento

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS

A meta total, que representa a variação acumulada ao longo do período, é dividida em metas anuais de redução das emissões, de forma que os preços se ajustam anualmente para alcançá-las. Os preços variam entre R\$0,50 - 2,60 por tonelada de CO₂e para uma redução de 10% das emissões acumuladas e entre R\$4,20 - 40,6 para reduzir em 50% as emissões totais associadas à queima de combustível e produção setorial em 2050. Ou seja, em resposta aos preços impostos endogenamente, ocorrem reduções anuais nas emissões para que o total emitido em 2050 seja a metade daquilo que seria emitido na ausência da tributação. Em outras palavras, consiste em uma meta relativa de abatimento.

É possível observar que as emissões pelo nível de atividade são as mais impactadas pela imposição de metas mais ambiciosas de redução de emissões. Com uma meta de 10%, as emissões pelo nível de atividade caem 42 mil GgCO₂e, já com uma meta de 50%, recuam 603 mil GgCO₂e, 14 vezes mais. As emissões pela queima de combustível, por sua vez, têm queda de 159 mil GgCO₂e para alcançar a meta agregada de 10% e 369 mil GgCO₂e para alcançar a meta de 50%, redução esta duas vezes maior.

O abatimento das emissões do uso da terra tem uma menor resposta frente ao custo de carbono. Representaria 4,8% da redução das emissões totais para alcançar a meta de 10% e 7,7% da redução para alcançar a meta de 50%, embora indiquem participação crescente, dado que os setores agropecuários, usuários do fator terra, teriam que reduzir cada vez mais seu nível de atividade para alcançar metas cada vez maiores de mitigação.

Os setores com maiores reduções no nível de emissões devido à imposição da meta agregada de abatimento estão representados na Figura 3, em que é possível comparar a redução percentual relativa das emissões e do nível de atividade. Da Figura 3 é possível observar que o setor de transporte de passageiros possui a maior redução relativa em suas emissões, cerca de 72% menos do que emitiria na ausência de tributação. E sua atividade foi cerca de 1% menor. A queda nas emissões ocorre devido à queda da atividade setorial, além de realocações no uso de insumos produtivos dadas mudanças nos preços relativos dos insumos intensivos em carbono. Por isso, oito entre os setores com maiores reduções percentuais em suas emissões (Figura 3) estão entre os dez com maiores quedas no nível de atividade. São eles o setor de Outros produtos do laticínio, Ferro-gusa e ferroligas, Termoelétrica Óleo Diesel, Pescado industrializado, Carvão mineral, Termoelétrica Óleo Combustível, Termoelétrica Gás Natural e Termoelétrica a carvão.

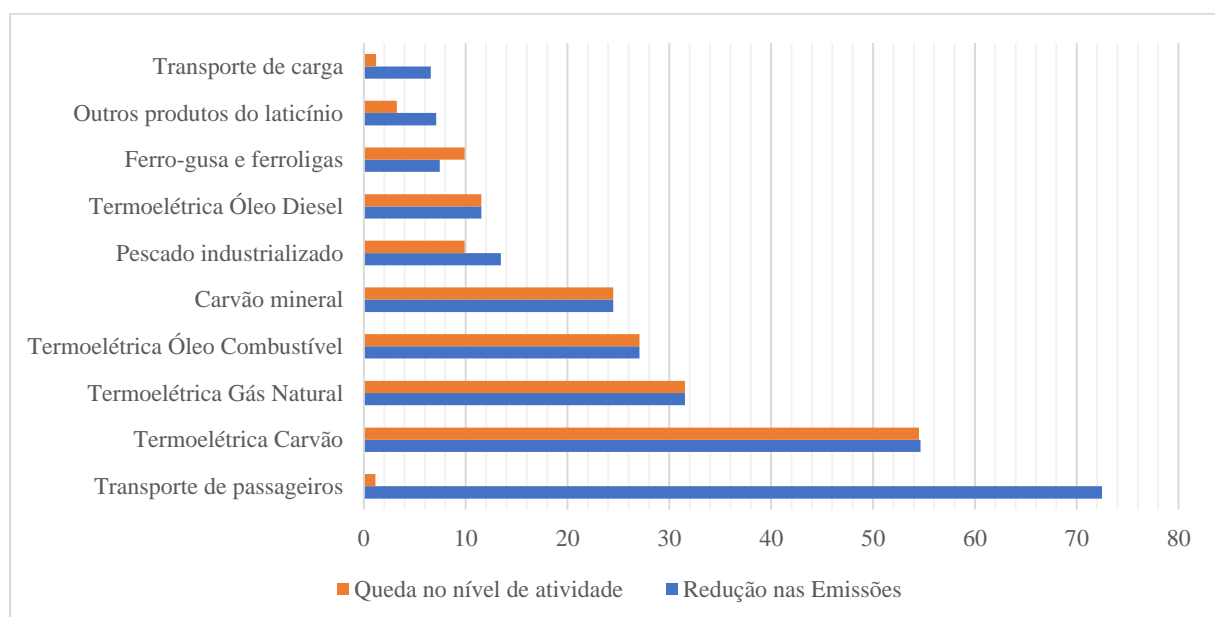


Figura 3: 10 setores com maiores reduções nas emissões
 Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS

Os principais destaques desses resultados dizem respeito aos setores de transporte e setores elétricos. Os setores de transporte de carga e de passageiro são exceções à regra observada. Esses setores se destacam por apresentarem grandes reduções em suas emissões setoriais sem correspondente queda em seus níveis de atividade, dada a possibilidade de substituição entre combustíveis de origem fóssil e biocombustíveis em seus processos produtivos. Enquanto isso, nos setores de eletricidade, a substitubilidade entre tipos geração faz com que as termoelétricas sejam bastante impactadas pela taxa, uma vez que as fontes limpas se tornam relativamente mais baratas. Devido à importância dos parâmetros de substituição para tais resultados, análises de sensibilidade foram realizadas especialmente nesses parâmetros. Os resultados estão em anexo.

Os resultados dessas simulações, em particular, estão condicionados ao fato de que para alcance das metas de emissões, o modelo taxa igualmente todos os setores. Mas essa pode ser uma estratégia muito custosa em termos de crescimento econômico, uma vez que alguns setores possuem menor potencial de abatimento ou maior custo para mitigar. Depende das elasticidades e da estrutura produtiva. Portanto, a seção 4.2 busca identificar os setores mais atraentes em termos de suas características (estruturas produtivas e potencial de abatimento).

4.2. Custo Marginal de Abatimento Setorial

Esta seção busca analisar o potencial de abatimento setorial das emissões de GEE partindo do conceito de curvas MAC, mas 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 Bovinos e outros animais, principal emissor setorial, a Figura 4 apresenta o custo de abatimento por nível de emissão dos principais setores da pecuária. Chama-se atenção ao eixo das abscissas, cujo valor máximo é de 400 MtCO₂e. 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. Após a pecuária, o setor transporte é o que apresenta maior potencial de abatimento, representado na Figura 5. Percebe-se que o valor máximo no eixo das abscissas nesse caso é 100 MtCO₂e, um quarto do valor máximo das emissões na representação gráfica da pecuária.

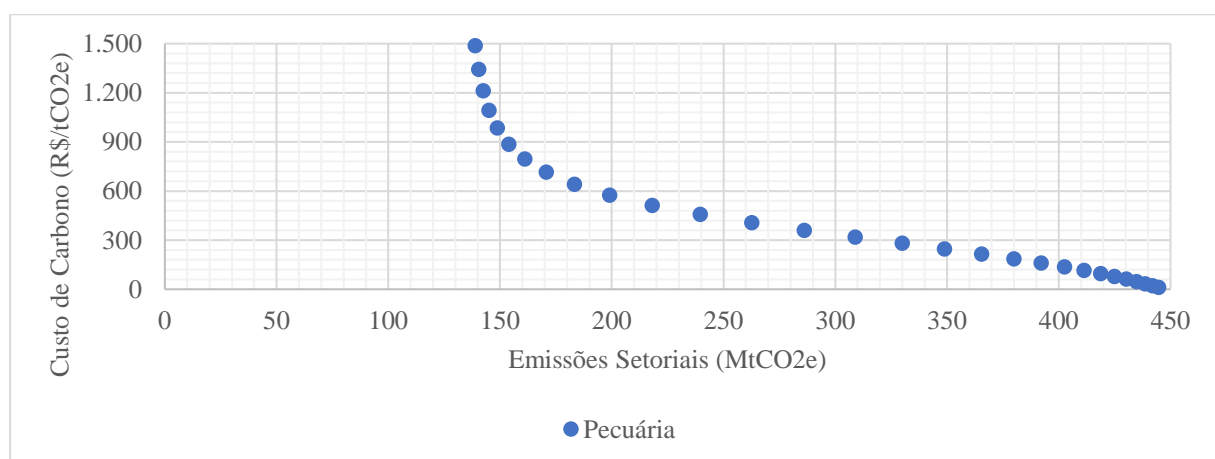


Figura 4: Custo de Abatimento Marginal dos setores da pecuária
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

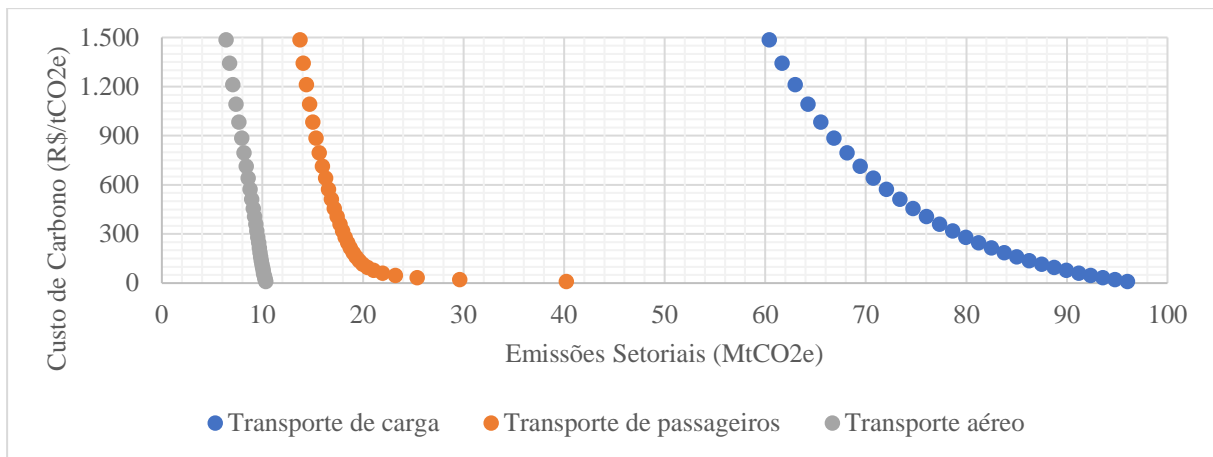


Figura 5: Custo de Abatimento Marginal dos setores de transportes
 Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Ainda se destacam quanto a potenciais de mitigação, os setores industriais e agrícolas, apresentados nas Figuras 6 e 7. O valor máximo das emissões das curvas MAC da indústria corresponde à metade do valor dos transportes e, conseqüentemente um oitavo da pecuária. Os setores agrícolas, por sua vez, têm metade do potencial da indústria.

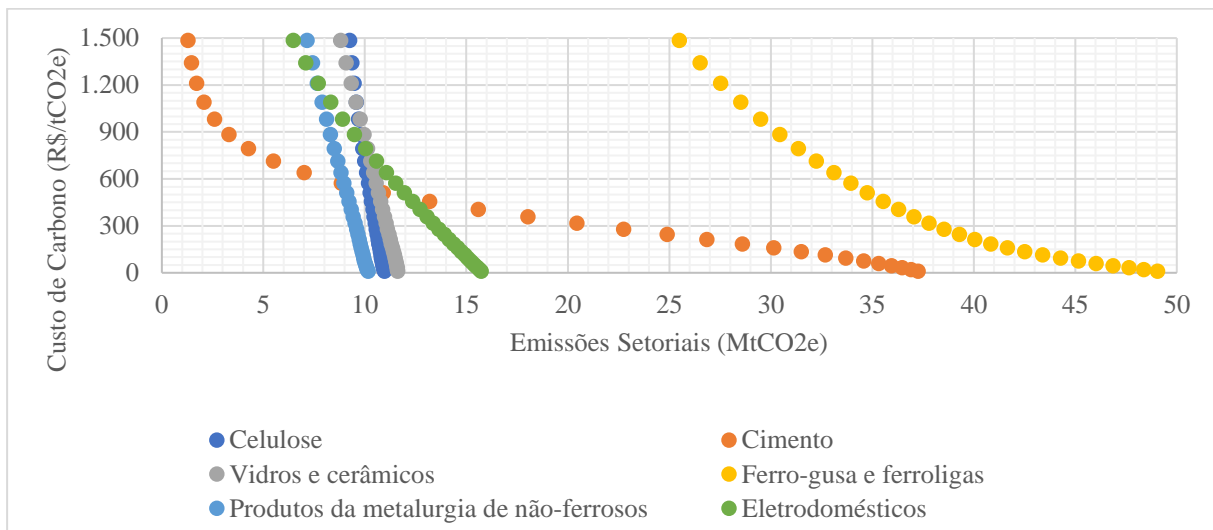


Figura 6: Custo de Abatimento Marginal dos setores da indústria
 Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

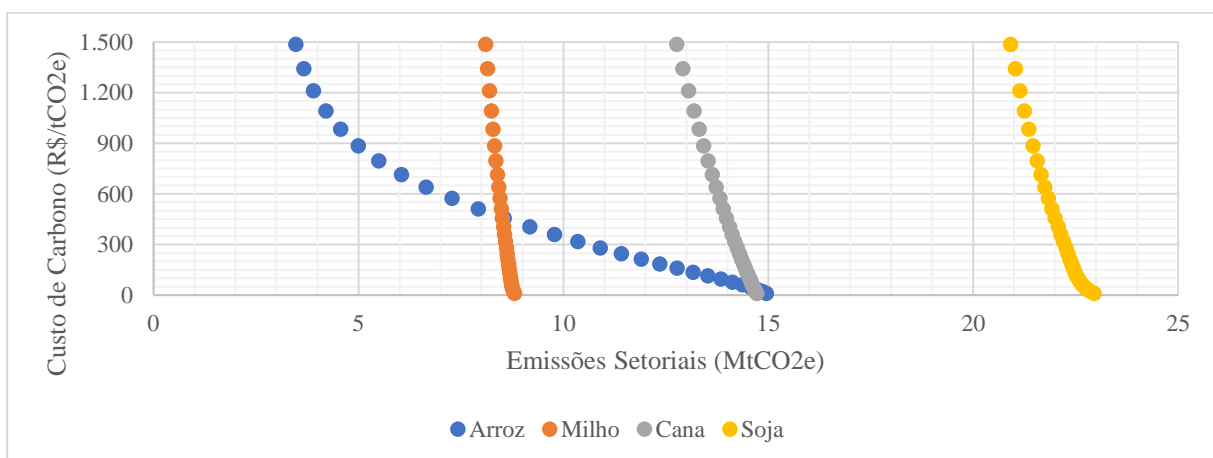


Figura 7: Custo de Abatimento Marginal dos setores da agricultura
 Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Os setores de combustível e geração termoeétrica são apresentados nas Figuras 8 e 9. O limite máximo do eixo das abscissas de combustíveis e termoeletricas representa um décimo da pecuária.

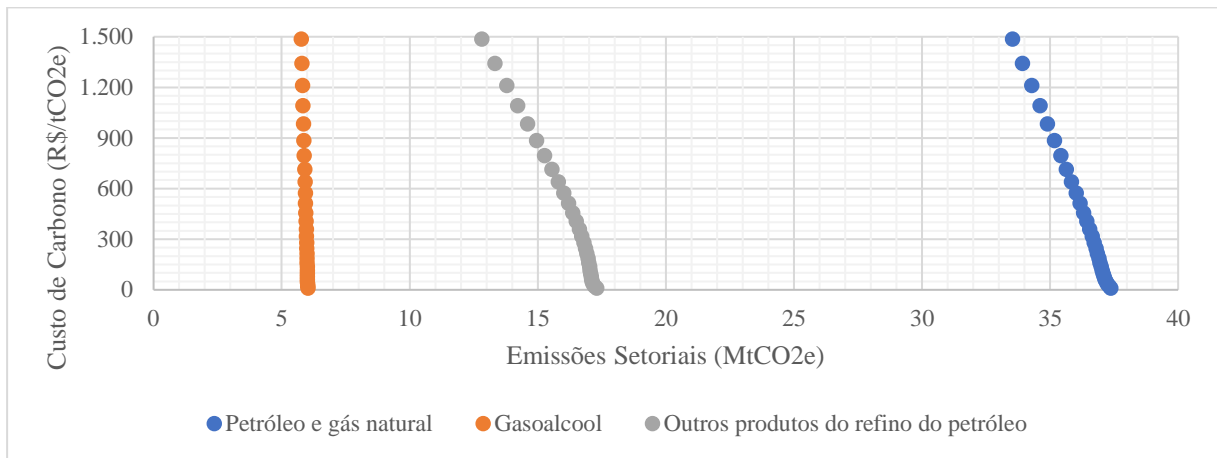


Figura 8: Custo de Abatimento Marginal dos combustíveis fósseis
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

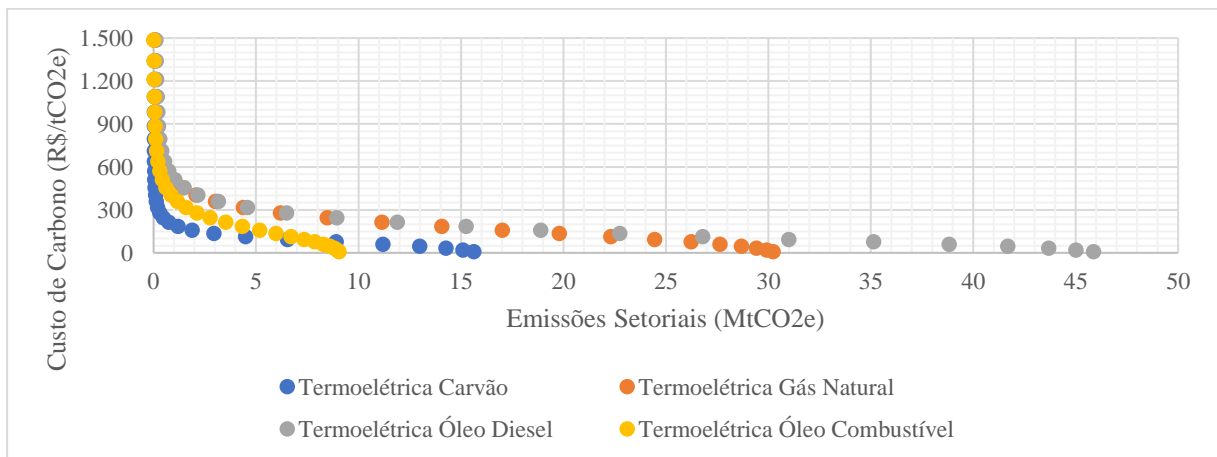


Figura 9: Custo de Abatimento Marginal das termoeletricas
Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

A redução das emissões no setor sujeito ao custo e na economia como um todo decorrente desse custo setorial são apresentados nas Tabelas 2 e 3. Os setores apresentados nessas tabelas correspondem a 98% das emissões setoriais, concentrando a maior parcela do potencial de abatimento do país. Quando combinadas metas para diferentes setores, os efeitos encadeados podem assumir magnitudes e direções diferentes, uma vez que se trata de uma abordagem de equilíbrio geral. Portanto, além do impacto sobre as emissões setoriais, é interessante analisar o resultado agregado da imposição do custo setorial, que envolvem efeitos indiretos ao longo da cadeia produtiva, demanda final, mudança do uso do solo e toda a economia. Na Tabela 2 estão os setores cuja redução agregada das emissões é superior à redução setorial. Ou seja, as emissões da economia como um todo reforçam o efeito mitigador da imposição do custo setorial. Enquanto isso, na Tabela 3 estão os setores em que o resultado agregado da mitigação é inferior ao resultado setorial, indicando que os efeitos substituição e efeitos indiretos decorrentes da transição do uso da terra atuam reduzindo os impactos ambientais da redução setorial.

Tabela 2: Emissões evitadas e custo associado - Setores em que os efeitos indiretos aumentam o abatimento total

Setores	Emissões Evitadas (milhares de tCO ₂ e) e Custo de Carbono (R\$/tCO ₂ e)											
	Emissões Setoriais Evitadas a cada Custo Marginal						Emissões Agregadas Evitadas a cada Custo Marginal					
	R\$10	R\$100	R\$250	R\$500	R\$1.000	R\$2.000	R\$10	R\$100	R\$250	R\$500	R\$1.000	R\$2.000
Bovinos e outros animais	2285	27203	95438	224368	291312	300719	4698	41446	124006	262055	320055	312523
Transporte de carga	1086	8507	17133	26068	34440	43634	1129	9283	19882	32626	47758	70923
Transporte de passageiros	38716	58065	61320	63733	65992	68427	38688	58040	61370	63924	66448	69412
Leite de vaca e de outros animais	118	1045	2327	3871	5616	7992	935	6086	13019	23036	37867	65768
Cimento	358	4003	12497	26206	34377	35919	364	4100	12989	27314	36624	39735
Água, esgoto e gestão de resíduos	213	2104	5221	9220	13545	18205	293	2597	6471	11914	18937	29639
Ferro-gusa e ferroligas	572	5255	10314	14940	20235	11007	565	5196	10268	14953	20278	27405
Aves e ovos	18	163	372	662	1088	2073	187	1307	3032	6062	11754	26364
Outros produtos do refino do petróleo	21	290	898	1995	3861	7508	50	733	2535	5939	11510	21397
Suínos	10	89	206	362	558	862	181	1320	3116	6076	10975	21033
Arroz, trigo e outros cereais	68	1177	3619	7128	10497	11988	169	2252	6040	10759	14536	15894
Vidros e cerâmicos	16	161	422	896	1772	3707	30	294	863	1923	3808	7756
Gasoolcool	1	16	45	96	183	365	31	340	946	2010	3843	7580
Soja em grão	29	265	646	1161	1767	2608	49	464	1174	2265	3891	6967
Milho em grão	9	85	209	377	590	927	32	290	705	1372	2451	4659
Outros da lavoura temporária	16	151	361	648	1009	1569	33	313	756	1443	2509	4611
Petróleo e gás natural	24	239	688	1506	2900	5677	33	313	756	1443	2509	4611
Cana-de-açúcar	17	190	473	898	1504	2567	31	273	679	1342	2400	4539
Transporte aéreo	28	270	708	1488	2824	5320	32	239	581	1168	2129	3794
Açúcar	0	5	15	30	59	125	6	49	121	245	461	934

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Tabela 3: Emissões evitadas e custo associado - Setores em que os efeitos indiretos reduzem o abatimento total

Setores	Tipo de Emissão e Custo de Carbono (R\$/tCO ₂ e)											
	Custo Marginal						Custo Marginal					
	R\$10	R\$100	R\$250	R\$500	R\$1.000	R\$2.000	R\$10	R\$100	R\$250	R\$500	R\$1.000	R\$2.000
Termoelétrica Gás Natural	331	7514	24400	31800	32144	31733	304	6510	19957	24168	24283	24913
Termoelétrica Carvão	381	10154	16741	17171	16985	16744	356	9318	14597	14826	14928	15031
Eletrodomésticos	77	736	1895	3858	6901	11007	77	673	1680	3374	6021	9599
Termoelétrica Óleo Combustível	97	2258	7148	9560	9929	9944	77	1605	4554	5466	5651	6088
Produtos da metalurgia de não-ferrosos	18	199	561	1193	2228	4009	14	133	416	938	1829	3486
Celulose	15	143	370	754	1325	2130	10	107	274	559	999	1668
Termoelétrica Óleo Diesel	28	616	2286	4594	5719	5938	12	201	591	916	803	944

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

A primeira parte é o custo explícito do setor. A segunda parte é o custo implícito, da economia como um todo, em que há efeito substituição e emissões indiretas decorrentes do uso da terra. Esse tipo de análise, a partir das curvas MAC, pode ser usada como ferramenta de auxílio para responder perguntas como quanto abatimento pode ser financiado com determinado valor monetário.

A partir das Tabelas 2 e 3 é possível comparar o potencial de abatimento dos setores sobre diferentes preços. Os setores estão ordenados segundo sua participação nas emissões, destacando-se o elevado potencial do setor de Transporte de Passageiros para reduzir emissões, sujeito a custos relativamente baixos. Ressalta-se também o elevado potencial de abatimento do setor de Bovinos e outros animais, embora a preços de carbono mais significativos.

Em relação às Termoelétricas, conforme Tabela 2, nota-se que a redução setorial é sempre superior à redução agregada das emissões. Uma vez que o custo das emissões pela queima de combustíveis é aplicado apenas ao setor em análise, os demais setores geradores de energia se beneficiam pelo aumento relativo dos custos desse setor e obtém, pelo efeito substituição da demanda, aumentos em seus níveis de atividade, aumentando suas emissões e reduzindo o efeito agregado da precificação setorial.

Além disso, segundo Clarke, Fraser e Waschik (2014), a introdução de qualquer política de redução de emissões geralmente terá três efeitos:

- a) Efeito de escala: à medida que as emissões de carbono se tornam mais caras, a escala de produção de insumos intensivos em carbono diminui;
- b) Efeito de substituição: os usuários de bens energéticos substituem os insumos mais poluentes por outros mais limpos;
- c) Efeito da mudança tecnológica: conforme a tecnologia suja se torna mais cara com a introdução de um preço do carbono, o preço relativo de tecnologias mais limpas cai.

Embora a introdução de políticas de redução de emissões geralmente encoraje todos os três efeitos, o modelo EGC desenvolvido nesta tese para simular os efeitos de um imposto de carbono incorpora os dois primeiros. Os resultados não incluem os efeitos da mudança tecnológica, portanto, os resultados encontrados para os custos de abatimento podem ser considerados um limite superior do custo da mitigação das emissões de GEE.

Ainda sobre como os setores comportam-se a dado preço, Figura 10 ilustra a redução das emissões setoriais aos preços de R\$100 e R\$500 por tonelada de CO_2e . Os setores estão ordenados por sua participação no total de emissões. Assim, o primeiro setor seria aquele que mais emite por sua própria atividade e/ou queima de combustíveis.

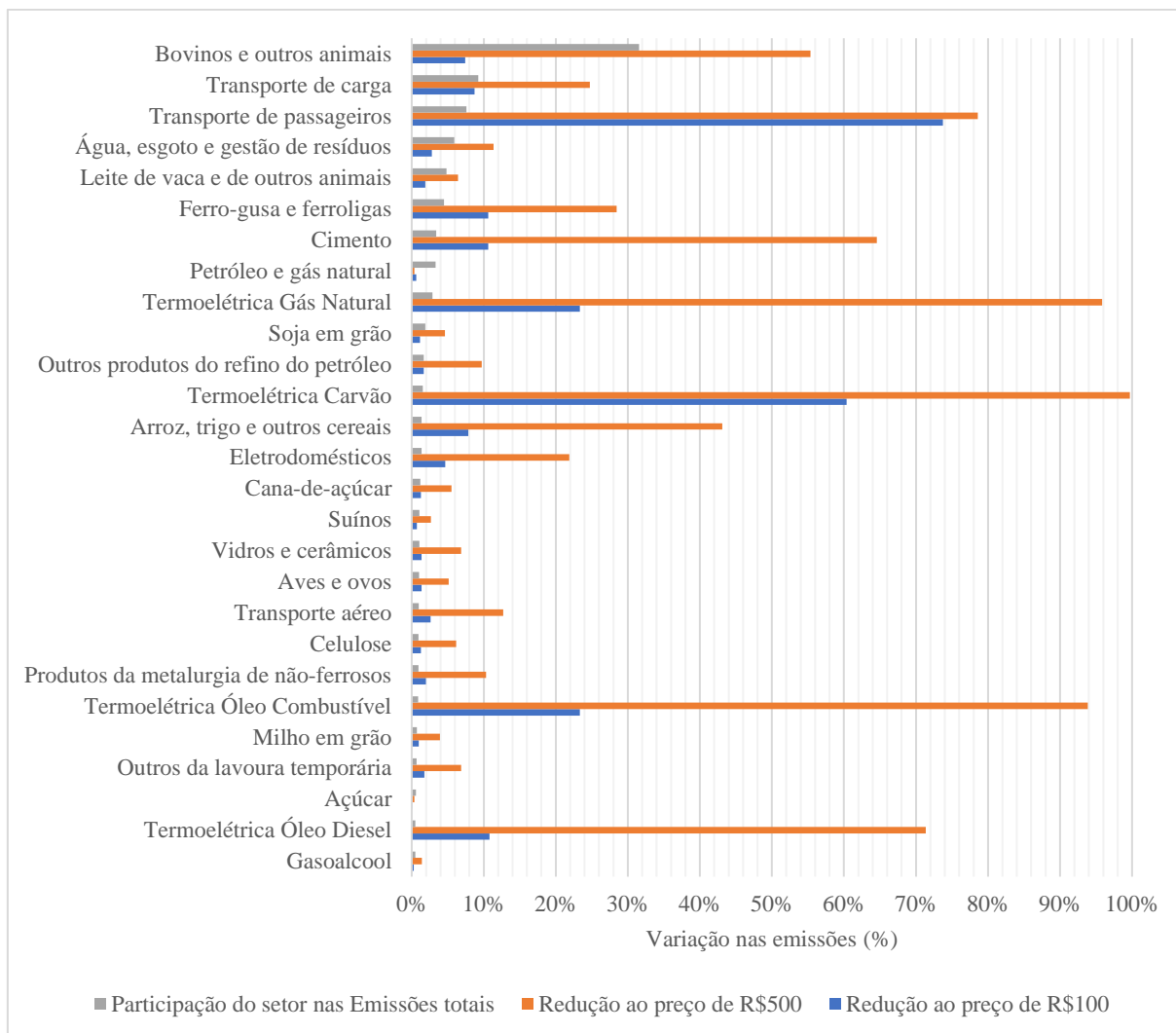


Figura 10: Reduções setoriais de emissão de CO_2e para um imposto de carbono de R\$100 e R\$500

Fonte: Resultados das simulações com o modelo BEETS.

Ao preço de R\$100, dois setores têm redução das emissões acima de 30%, são eles, Transporte de Passageiros e Termoelétrica a Carvão. Reduções acima de 20% são observadas nos setores de Termoelétrica a Gás natural e a óleo combustível e acima de 10% nos setores de Ferro-Gusa e Ferroligas, Cimento, e Termoelétrica a óleo diesel. Portanto, ao preço de R\$100, esses setores são os que mais reduzem suas emissões setoriais em relação ao total emitido pelo setor na ausência do mecanismo.

Ao preço de R\$ 500, o efeito em cada setor é maior, mas os setores com maiores variações são similares aos observados ao preço de R\$ 100. Nos dois níveis de preço, os setores que mais reduzem suas emissões seriam Transporte de passageiros, Termoelétrica Carvão, Termoelétrica Óleo Combustível, Termoelétrica Gás Natural e Termoelétrica Óleo Diesel. Esse preço (R\$ 500) poderia reduzir em mais de 90% as emissões das Termoelétricas a Gás Natural, Carvão e Óleo Combustível, em mais de 70% as emissões das Termoelétricas a Óleo Diesel e do Transporte de passageiros e em mais de 50% as emissões dos setores de Cimento e Bovinos. Desses, destaca-se o setor de Bovinos, que a esse preço tem uma resposta relativamente maior e entra para a lista dos setores com maior variação percentual em suas emissões. Por outro lado, entre os principais emissores, o setor de Transporte de Carga continua apresentando variação relativamente menor em suas emissões. Portanto, devido à tecnologia de produção do setor, preços maiores seriam necessários para alcançar variações percentuais nas emissões setoriais

similares às percebidas por esses outros setores. Indicando que o abatimento das emissões desse setor é mais custoso.

Os demais setores apresentam relativamente baixos potenciais de mitigação frente a imposição de preços de carbono. Neste grupo, incluem-se setores do transporte aéreo, da indústria, como celulose, e agropecuários como cana-de-açúcar, milho, soja, suínos e aves. As exceções à regra são as termoeletricas a óleo diesel e óleo combustível que apresentam elevados potenciais em reduzir suas emissões (acima de 60% ao preço de R\$500) e baixo potencial de impactar as emissões totais, pois é possível substituir a geração de eletricidade da fonte fóssil taxada por outra fonte fóssil não taxada. Portanto, para os setores de geração de energia, é especialmente relevante considerar a taxação simultânea de todos os combustíveis utilizados pelas termoeletricas.

Na Figura 10 é possível notar mudanças relativas nas posições dos setores em termos de redução das emissões. Alguns setores subiram posições como Termoelétrica Carvão, Termoelétrica Gás Natural, Termoelétrica Óleo Combustível, Bovinos e outros animais e Arroz, trigo e outros cereais. Indicando que ao preço de R\$500 as emissões totais desses setores são relativamente mais afetadas, quando comparado ao preço de R\$100. Outros setores como Transporte de passageiros, Ferro-gusa e ferroligas e Transporte de carga perderam posições entre os que mais reduzem as emissões dado o preço de R\$500, quando comparado ao preço de R\$100.

Quanto maior a redução das emissões, maior tende a ser o impacto sobre a atividade setorial. Todavia, devido à estrutura produtiva, a magnitude desse impacto pode variar entre os setores. Este resultado está condicionado ao preço, alguns respondem mais que outros a determinados preços. Sobre esses resultados, cabe ainda ressaltar que ao considerar ausência de mudanças tecnológicas permite analisar o custo setorial de mitigação dada a estrutura produtiva atual, encontra-se o custo limite para alcançar determinado nível de abatimento setorial das emissões de GEE.

Dessa forma, a adoção de novas tecnologias que possuam custos menores do que os estimados pelas curvas MAC torna-se atraente para alcançar o abatimento desejado. Além disso, mesmo que todos os setores estejam sujeitos ao mesmo preço de carbono, o custo da mitigação setorial em relação ao valor da produção do setor varia de acordo com particularidades do setor, tais como intensidade do uso dos fatores de produção, insumos intermediários utilizados e quantidade demandada.

Por isso, além de analisar o nível de abatimento desejado para cada setor, é preciso levar em conta ainda os efeitos encadeados da imposição desse custo setorial. Nesse ponto, o quanto cada setor consegue reduzir das emissões agregadas e o custo setorial em termos de queda do valor da produção são aspectos que precisam ser ponderados. Setores que sacrificam menos de sua produção para alcançar reduções significativas no volume de emissões são, portanto, opções atraentes para políticas de mitigação. Assim, identificados esses setores, é possível, por exemplo, desenhos de políticas de regulamentação de emissões e de mercados de carbono (*cap* ou *cap-and-trade*). A questão, portanto, não é se o Brasil deve ou não se comprometer em mitigar suas emissões, mas qual a melhor estratégia a ser adotada para otimizar os benefícios ambientais alcançáveis, levando em conta as particularidades setoriais nacionais.

5. Considerações Finais

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. O presente estudo contribui com a literatura ao analisar opções setoriais de mitigação de emissões, a partir da estimativa de curvas de Custo de Abatimento Marginal (Marginal Abatement Costs - MAC) dos principais setores emissores no Brasil, considerando

tanto as emissões pela própria atividade quanto as emissões indiretas através 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 individualmente nesse processo. Utilizando a abordagem de equilíbrio geral, pode-se avaliar quais setores possuem menores custos (setoriais e agregados) para alcançar determinados níveis de abatimento. Esse custo representa o limite de custo, abaixo do qual, as tecnologias disponíveis que se encontrarem, 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 quais setores deveriam receber subsídios para custear o volume de abatimento desejado. Ao introduzir preços de carbono entre R\$10-R\$2.000, o maior volume de redução das emissões é observado na pecuária, seguida pelo setor de transportes. Pois são os principais emissores.

Menor volume de abatimento é observado entre as termoeletricas, 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 alta. Por isso, Termoeletrica Carvão, Termoeletrica Óleo Combustível, Termoeletrica Gás Natural e Termoeletrica Óleo Diesel estão entre os cinco setores que mais reduzem suas emissões em relação ao total de emissões do setor com preços de R\$100 ou R\$500 por tonelada de CO_2e , por exemplo. Além das térmicas, outro setor que reduz seu volume de emissões em relação ao total de emissões é Transporte de passageiros, devido à possibilidade de substituição entre gasolina e etanol.

A análise dessas curvas pode auxiliar a criação de metas setoriais de abatimento e a decisão sobre a alocação setorial dos recursos financeiros para alcançar a NDC brasileira. Esta 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 metas propostas, olhando tanto para mercados de carbono mais amplos quanto restrito a setores com menores custos de abatimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório V – Formação de custos e preços de geração e transmissão de energia elétrica**. 2015. Disponível em:

<https://www.ccee.org.br/precos/conceitos-precos>. Acesso em: nov. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Relatório de Evolução das Tarifas Residências**. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/relatorio-evolucao-tarifas-residenciais>.

Acesso em: set. 2020.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Resultados**

Consolidados. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/mercado/leilao-mercado>. Acesso em: set. 2019.

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

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**, v. 33, n. 4, p. 315-326, 2014.

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

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

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

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

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge University, 2021.

LA ROVERE, E. L.; WILLS, W.; PEREIRA JR, A. O.; DUBEUX, C. B. S.; CUNHA, S. H. F.; OLIVEIRA, B. C. P.; MOREIRA, M.M.R.; WATANABE, S.; LOUREIRO, S. M.; GROTTA, C.; HARFUCH, L.; WEISS, M.; SANTOS, L. A. S.; CARVALHO, P.T.; KISHINAMI, R.; ZVEIBIL, V.; SANTOS, L.; ELY, R. N.; MOREIRA, L. S. S.C.; KIMURA, W.; SANTOS, T.; TONI, A.; LEFREVE, J.; BACHION, L. C.; LIMA, R.; ZAMBIANCO, W.; NASSAR, A.; WALTER, M. K. C.; ZICARELLI, I.; e OLIVEIRA, L. D. B.; **Implicações Econômicas e Sociais de Cenários de Mitigação de Gases de Efeito Estufa no Brasil até 2030**: Projeto IES-Brasil, Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas – FBMC. COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro, 2016.

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

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

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

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

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

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

PETER, M. W., HORRIDGE, J., MEAGHER, G., NAQVI, F., & PARMENTER, B. R. **The theoretical structure of MONASH-MRF**. Preliminary Working Paper n. OP-85. Centre of Policy Studies, Monash University, 1996.

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

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

STERN, N.; STIGLITZ, J. E. **Report of the high-level commission on carbon prices**. World Bank, Washington D.C., 2017.

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

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

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

WORLD BANK. **Total greenhouse gas emissions**. 2021c. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.GHGT.KT.CE>. Acesso em: dez 2021.