

# SIMULANDO O IMPACTO DE POLÍTICAS EM EMISSÕES DE CARBONO DE FIRMAS<sup>1</sup>

Bernardo Alves Furtado<sup>2</sup>

Gustavo L. Rocha Lima<sup>3</sup>

Olandia F. Lopes<sup>4</sup>

## SINOPSE

O texto antecipa resultados centrais de um estudo que explora como diferentes instrumentos de política pública – em especial, a taxação de emissões das firmas e os subsídios ao investimento em inovação no processo produtivo – alteram indicadores de produção e de desigualdade na economia em geral. Esses resultados foram obtidos por meio de um modelo baseado em agentes, denominado *PolicySpace3*, que vincula interações entre trabalhadores, famílias e firmas em diversos mercados. O modelo apoia-se em ampla base de dados empíricos e em sólida fundamentação teórica. Além disso, o estudo descreve o procedimento de validação realizado. Os achados são consistentes com a literatura: a taxação de carbono mostra-se efetiva na redução de emissões, embora implique queda da produção e ligeiro aumento da desigualdade, enquanto os subsídios têm impacto limitado. Em síntese, o estudo sugere a existência de um *trade-off* entre redução de emissões e indicadores econômicos e sociais.

**Palavras-chave:** emissões das firmas; modelagem baseada em agentes; políticas ambientais; simulação; taxação de emissões.

## 1 INTRODUÇÃO

Em 2024, foi criado o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE)<sup>5</sup>, marco regulatório voltado à redução dos gases de efeito estufa por meio de mecanismos de mercado. O sistema, ainda pendente de regulamentação, abrange firmas que emitem a partir de 10.000 tCO<sub>2</sub>e (dez mil toneladas de dióxido de carbono equivalente) por ano. A expectativa é que tal medida estimule processos de inovação e de adaptação tecnológica.

Evidências empíricas sugerem que sinais de preços são relevantes para alterar o comportamento das firmas (Aghion *et al.*, 2016). Paralelamente, estudos demonstram que taxas e restrições sobre emissões – especialmente, quando combinadas – contribuem para maior sustentabilidade empresarial (Hoppe *et al.*, 2023; Shahzad, 2020).

Embora a participação relativa das emissões industriais ainda seja menor que a do desmatamento, sua magnitude vem crescendo. De fato, processos industriais abrangem apenas cerca de 6,4% das emissões totais, de acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia. Ou seja, isso limita o escopo da análise realizada, bem como da própria aplicação do SBCE. Nesse contexto, investigar as emissões das firmas – ainda que crescentes – torna-se relevante, sobretudo, diante da heterogeneidade setorial e da diversidade regional de seus impactos.

1. DOI: <https://dx.doi.org/10.38116/radar80art1>.

2. Técnico de planejamento e pesquisa na Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais, de Inovação, Regulação e Infraestrutura do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Diset/Ipea). *E-mail:* [bernardo.furtado@ipea.gov.br](mailto:bernardo.furtado@ipea.gov.br).

3. Assistente de pesquisa e ciência de dados sênior do Programa de Incentivo à Pesquisa Aplicada (Pipa) na Diset/Ipea. *E-mail:* [gustavo.lima@ipea.gov.br](mailto:gustavo.lima@ipea.gov.br).

4. Ex-pesquisadora bolsista na Diset/Ipea. *E-mail:* [olandialopes@ifba.edu.br](mailto:olandialopes@ifba.edu.br).

5. Ver: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2024/lei-15042-11-dezembro-2024-796690-publicacaooriginal-173745-pl.html>.

Este estudo busca explorar justamente essa transição: como diferentes instrumentos de política pública – taxas sobre emissões e subsídios à inovação limpa – podem moldar o futuro da economia e das emissões no Brasil.<sup>6</sup>

## 2 MODELO BASEADO EM AGENTES: O *POLICYSPACE*

Para avaliar as consequências de diferentes políticas ambientais, utilizamos uma versão adaptada do modelo computacional *PolicySpace2*, que incorpora ampla base de dados municipais oficiais, para simular cenários futuros (Alves Furtado, 2022). Esse tipo de ferramenta – descrita na literatura como modelos baseados em agentes (MBA ou, em inglês, *agent-based models* – ABM) – representa empresas, famílias, trabalhadores, governo e bancos como agentes que interagem mensalmente em diversos mercados, como de trabalho, de crédito, de imóveis e de bens e serviços.

A partir de condições iniciais exógenas, os agentes seguem regras explícitas fundamentadas na literatura, o que permite gerar trajetórias socioeconômicas e ambientais plausíveis. Nessas condições, o objetivo central do modelo não é prever, mas explorar cenários possíveis e comparáveis, de forma a avaliar o desempenho relativo de políticas distintas. Os resultados se expressam por meio de indicadores em diferentes escalas – tanto locais quanto agregadas –, evidenciando vantagens e limitações de cada estratégia de intervenção.

Os processos mensais, de forma resumida, estão descritos a seguir.

- 1) As firmas, georreferenciadas a partir de dados oficiais, distribuem-se em doze setores. Cada empresa decide contratar, produzir, investir ou inovar com base em resultados passados e nas condições de mercado. A produção utiliza insumos setoriais adquiridos localmente ou, quando necessário, em outras regiões do país.
- 2) Os trabalhadores atuam individualmente nas firmas e no mercado de trabalho. A correspondência entre firmas ofertantes e candidatos é definida por um cálculo ponderado que considera localização, qualificação e salários oferecidos.
- 3) As famílias operam com orçamento único: compram bens, pagam aluguel e decidem como alocar sua renda, observando preços e distância. Firms de construção produzem novas casas e as disponibilizam no mercado.
- 4) O governo municipal arrecada impostos – *proxies* de tributos sobre consumo, propriedade, transações imobiliárias e renda de famílias e de firmas. Os recursos retornam à sociedade por meio de investimentos em infraestrutura urbana e na prestação de serviços públicos.
- 5) Os mercados de trabalho, de crédito, de habitação e de produtos estão interligados. As 185 regiões metropolitanas brasileiras são representadas no modelo, ao longo de vinte anos (2010-2030).

O diferencial do modelo é capturar diferenças entre setores (como construção, transporte, agricultura e serviços) e entre regiões, permitindo analisar como as políticas afetam não apenas o país como um todo, mas também áreas e atividades específicas.

Como todo modelo, o *PolicySpace3* baseia-se em hipóteses e em simplificações necessárias. Destacam-se, em particular:

- i) a ausência de dados detalhados sobre emissões municipais e setoriais, o que limita a calibração precisa das emissões das firmas;<sup>7</sup> em especial, isso condiciona os resultados a apenas indicativos exploratórios;

6. Ver Lima, Furtado e Lopes (2025), para uma revisão mais detalhada da literatura, descrição do modelo e resultados setoriais preliminares.

7. Estão disponíveis dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG) em: <https://seeg.eco.br>. Entretanto, os dados encontram-se agregados entre os setores de energia, mudança do uso da terra, agropecuária, resíduos e processos industriais. Na plataforma utilizada para modelagem, utilizamos setores agregados do *International Standard Industrial Classification* rev.4, compatíveis com as categorias da CNAE brasileira e distintos dos cinco setores do SEEG. Alvarenga Júnior (2024) propõe metodologia e estima as emissões para cada um de 42 setores, porém os dados não se encontram disponíveis.

- ii) a suposição de que a inovação tecnológica tem taxa de sucesso aleatória, o que pode não refletir tecnologias já maduras; e
- iii) o uso de hipóteses gerais sobre o comportamento dos agentes (firmas, trabalhadores e consumidores) que, embora fundamentadas na literatura, ainda implicam certo grau de discricionariedade.

Nesse sentido, as análises apresentadas neste documento têm caráter exploratório: indicam trajetórias plausíveis e permitem a comparação entre políticas alternativas ao contexto modelado.

### 3 O PROCESSO AMBIENTAL INTERNO ÀS FIRMAS

A hipótese central do modelo é que as firmas emitem gases de efeito estufa (GHG) como subproduto de seu processo produtivo.<sup>8</sup> Para capturar a relação entre produção e impactos ambientais, utilizamos o conceito de ecoeficiência (Caiado *et al.*, 2017). Os dados são provenientes do Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras – documento de preenchimento obrigatório, consolidado pelo Ministério do Meio Ambiente – e permitem estimar a média de emissões para os doze setores considerados no modelo. Assim, a variabilidade setorial empírica é incorporada como ecoeficiência-base.

Ao longo da simulação, a cada mês, utilizamos os salários endógenos do modelo  $W$  da firma  $i$  no período  $t$  para estimar suas emissões mensais. Nesse sentido, os salários funcionam como *proxies* do nível de atividade, de modo que as emissões variam linearmente com a produção, com o setor e com o nível de eficiência produtiva de cada firma.

Cada firma também tem um nível inicial de eficiência ambiental produtiva, fixado em valor unitário, igual para todas, mas que evolui endogenamente, na medida em que investem em melhorias de seus processos produtivos, visando otimizar sua ecoeficiência. Investimentos bem-sucedidos reduzem simultaneamente o uso de insumos e as emissões proporcionais à produção: após investir, a firma consegue produzir com menos insumos e menos emissões.

A decisão de investir depende do cálculo dos ganhos esperados com tais reduções, levando-se em conta o tamanho do investimento em relação aos salários pagos, às taxas incidentes sobre emissões e aos eventuais subsídios disponíveis.

Ainda assim, dada a necessidade de restrições de modelagem e de disponibilidade de dados, os resultados e os testes apresentados a seguir são apenas preliminares e exploratórios.

### 4 TESTE DE POLÍTICAS

O estudo simulou quatro cenários: um cenário de referência, sem políticas ambientais; um cenário com taxas sobre emissões, com valor de aproximadamente R\$ 40,00 por tonelada de carbono equivalente tCO<sub>2</sub>; outro, com subsídios à inovação para processos ambientalmente eficientes, cobrindo 25% dos investimentos realizados, como se fossem subsídios aos juros ou isenção fiscal; e, finalmente, um cenário que combinava taxas e subsídios, no qual os recursos arrecadados pelas taxas financiariam os subsídios, buscando neutralidade fiscal.

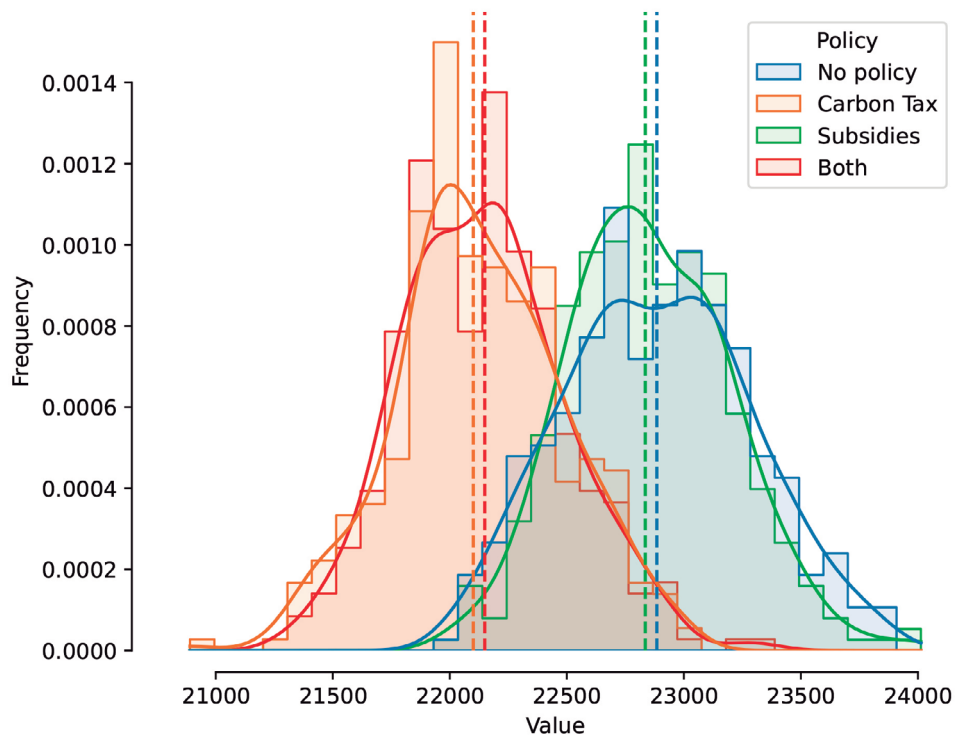
8. Consideramos os seguintes poluentes atmosféricos para efeito de emissões: material particulado, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e óxidos de enxofre (SOx).

## 5 RESULTADOS

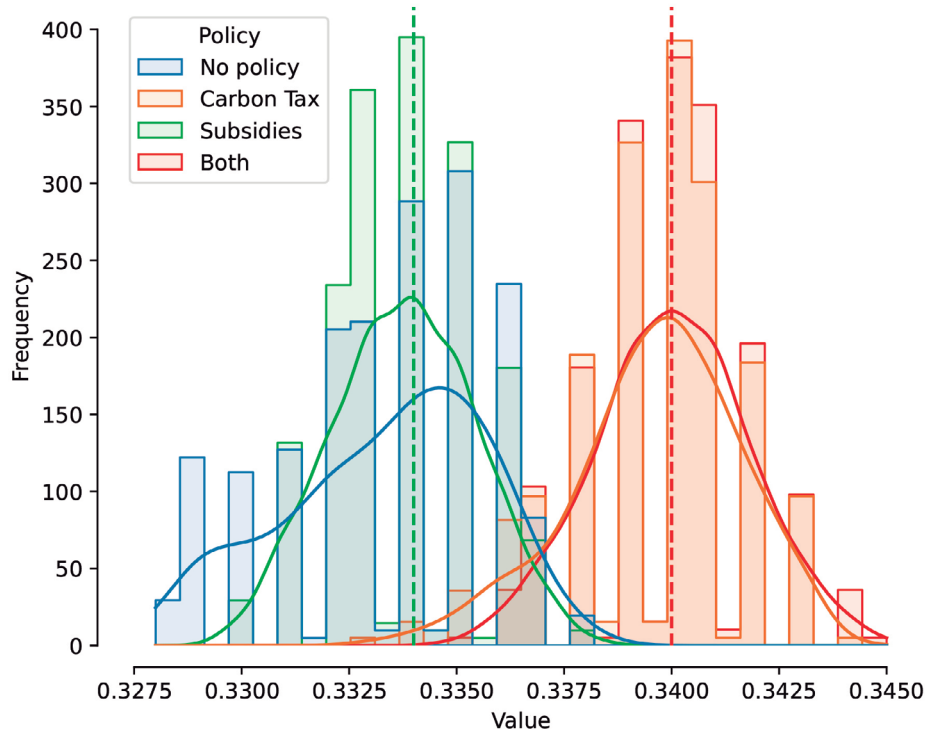
### GRÁFICO 1

Comparação dos quatro cenários de política

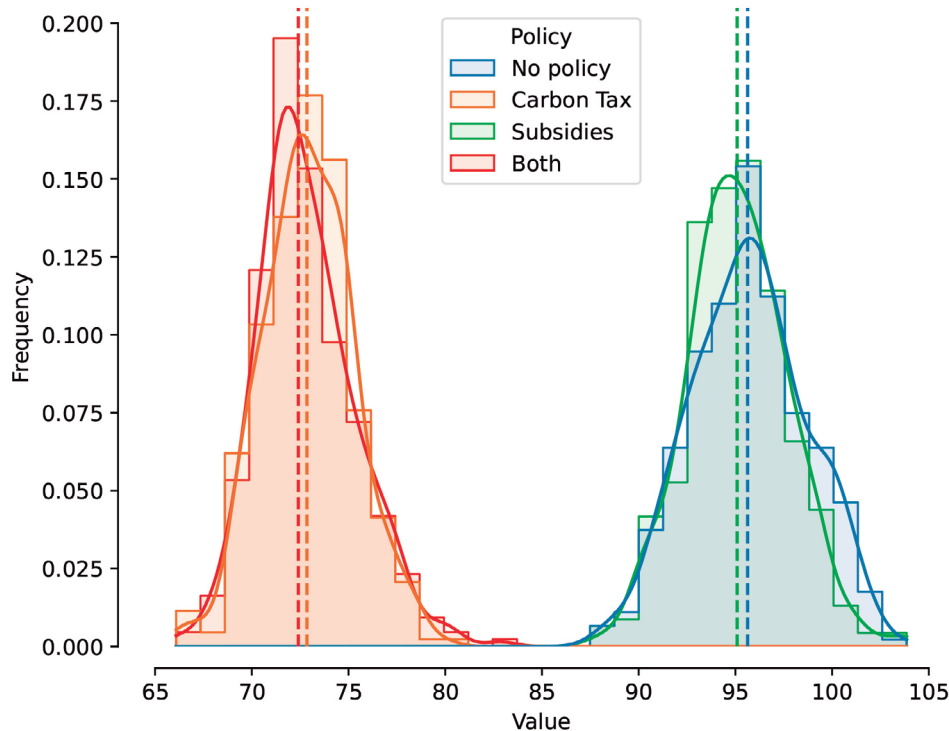
1A – Resultados de GDP



1B – Resultados do coeficiente de Gini



1C – Emissões totais



Elaboração dos autores.

Obs.: Ilustração reproduzida conforme o original (nota do Editorial).

No gráfico 1A, apresentamos os resultados de GDP: *taxação* e *taxação mais subsídios* implicam perda da ordem de 4% na produção. No 1B, estão os resultados do coeficiente de Gini: sugestão de aumento da desigualdade na implementação das políticas, quando incluída taxa. E em 1C, expomos as emissões totais: redução mais relevante, novamente, quando incluída taxa sobre emissões.

O gráfico 1 mostra que os cenários se agrupam em dois blocos: de um lado, a taxa sobre emissões e a política combinada (taxas mais subsídios); do outro, o cenário de referência e os subsídios isolados. Isso sugere que a capacidade dos subsídios de alterar os resultados é menor que a da taxa.

Os resultados indicam que a ausência de políticas ou a aplicação apenas de subsídios não afetam significativamente a *performance* econômica nem reduzem emissões. A taxa, com ou sem subsídios, promove redução das emissões, ainda que com pequena perda de produtividade. Os subsídios isolados contribuem modestamente para a melhoria da desigualdade, mas não têm efeito sobre as emissões. Em resumo, as taxas de carbono são efetivas ambientalmente, enquanto os subsídios isolados impactam pouco a economia e o ambiente.

## 5.1 Discussão

Os achados evidenciam que, se o objetivo principal é reduzir emissões, mecanismos de preço, como a taxa de carbono, são essenciais. Subsídios podem ser úteis para manter a capacidade produtiva e reduzir a desigualdade. A combinação das políticas ajuda a equilibrar essas dimensões, mas exige ajustes finos no desenho – como alíquotas, abrangência e avaliação de impactos setoriais.

A análise setorial revela heterogeneidades importantes. Setores como construção e agricultura respondem melhor à taxa pura do que à política combinada, enquanto serviços como finanças e imóveis apresentam baixa

intensidade de emissões e pouca alteração frente às políticas. Isso reforça a necessidade de políticas ambientais adaptadas às características e aos perfis de emissões de cada setor, em vez de soluções homogêneas.

O modelo também demonstra consistência interna, ao reproduzir dinâmicas macroeconômicas, como desemprego, distribuição de renda e níveis de produção. Apesar de simplificado, gera resultados dentro de faixas empíricas plausíveis e evidencia mecanismos causais potenciais entre comportamento das firmas, respostas das famílias e intervenções políticas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostra que uma política isolada não consegue atingir simultaneamente metas ambientais, econômicas e de equidade social. Subsídios tendem a aumentar ligeiramente a produção e reduzir a desigualdade, mas têm efeito limitado sobre as emissões. A taxa de carbono reduz emissões de forma significativa, ainda que possa impactar a atividade econômica e ter efeitos regressivos sobre a distribuição de renda. Esses resultados são harmônicos aos disponíveis na literatura (Grottera *et. al*, 2022).

A aplicação combinada dos instrumentos mitiga as limitações individuais, promovendo equilíbrio entre desempenho econômico, redução de emissões e melhoria distributiva. A heterogeneidade setorial evidencia que políticas eficazes devem considerar perfis econômicos e de emissões específicos, reforçando que a efetividade das intervenções depende do contexto e do desenho institucional. Apesar das limitações do modelo, os resultados fornecem um quadro exploratório para compreender *trade-offs* e complementaridades em transições sustentáveis, servindo como base para decisões de política pública adaptadas a diferentes setores e objetivos.

## REFERÊNCIAS

- AGHION, Philippe *et al.* Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: evidence from the auto industry. **Journal of Political Economy**, v. 124, n. 1, p. 1-51, fev. 2016.
- ALVARENGA JÚNIOR, Marcio. **Towards a structural carbonization of the Brazilian economy**: the implications of recent structural changes for the country's green house gas emissions. Tese (Doutorado em Economia da Indústria e da Tecnologia) – Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.
- CAIADO, Rodrigo Goyannes Gusmão *et al.* Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 890-904, 2017.
- GROTTERA, Carolina *et al.* Energy policy implications of carbon pricing scenarios for the Brazilian NDC implementation. **Energy Policy**, v. 160, 112664, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112664>.
- HOPPE, Janna *et al.* Three decades of climate mitigation policy: what has it delivered? **Annual Review of Environment and Resources**, v. 48, p. 615-650, 2023.
- LIMA, Gustavo Libório Rocha; FURTADO, Bernardo Alves; LOPES, Olandia Ferreira. Modelling environmental policy impacts on firms' carbon emissions. *In: SOCIAL SIMULATION CONFERENCE*, 20., 2025, Delft. **Anais [...]**. Delft: Delft University of Technology, ago. 2025. Disponível em: <https://surfdrive.surf.nl/s/eTUN9yCbwrkGfrj?dir=/&cediting=false&openfile=true>.
- SHAHZAD, Umer. Environmental taxes, energy consumption, and environmental quality: theoretical survey with policy implications. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 24848-24862, 2020.