

EMPRESAS POLUENTES NO MODELO MICRO-MACRO MULTISSETORIAL (MMM): Impostos ambientais ou incentivos fiscais? Qual é o mais eficaz na diminuição de emissão de CO₂?

Iuri Everson Silva Monteiro ¹

Resumo: As atuais propostas de transição ecológica geralmente partem de dois tipos de instrumentos de ação direto: Impostos ambientais ou incentivos fiscais. Esse estudo visa avaliar a eficácia de impostos sobre CO₂ e subsídios para P&D na transição de empresas poluentes para práticas sustentáveis. valendo-se de um modelo MMM, o estudo simula os efeitos dessas políticas sobre as emissões de CO₂ em três cenários: sem intervenções, com subsídios para P&D, e com impostos e subsídios combinados. Os resultados indicam que a combinação de impostos e subsídios é a abordagem mais eficaz para reduzir as emissões de CO₂ em comparação com a aplicação isolada de cada política.

Palavras-Chave: Emissões de CO₂; Impostos ambientais; Subsídios; P&D; Modelo Micro-Macro Multissetorial (MMM).

Abstract: Current proposals for ecological transition generally rely on two types of direct action instruments: environmental taxes or fiscal incentives. This study aims to assess the effectiveness of CO₂ taxes and R&D subsidies in transitioning polluting companies to sustainable practices. Using an MMM model, the study simulates the effects of these policies on CO₂ emissions in three scenarios: without interventions, with R&D subsidies, and with a combination of taxes and subsidies. The results indicate that the combination of taxes and subsidies is the most effective approach to reducing CO₂ emissions compared to the isolated application of each policy.

Keywords: CO₂ Emissions; Environmental Taxes; Subsidies; R&D; Micro-Macro Multisectoral Model (MMM).

1 INTRODUÇÃO

As recentes mudanças climáticas, os choques ecológicos e os severos efeitos da produção industrial humana, a algum tempo vem demandando novas e imediatas ferramentas de condução tanto da política macroeconômica, quanto da ação no nível de empresa. As buscas por novas fontes de energia por um lado vem sendo contrabalançadas pela incorporação de novas ferramentas de coordenação e incentivos na redução do lançamento de CO₂ na atmosfera (WIENERS et al., 2022). É diante desse quadro que emergem algumas dúvidas pertinentes sobre a eficácia de medidas como a taxação e o subsídio para empresas ou setores inteiros que gerem mais ou menos emissões.

¹ Doutorando em Economia pelo Instituto de Economia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (IE/UFRJ). E-mail: iurieverson@gmail.com. ORCID n°: 0000-0002-8445-2535.

Nesse contexto, temos por um lado as políticas fiscais verdes emergindo como importantes ferramentas para a transição para uma economia de baixo carbono. Impostos e subsídios têm sido amplamente utilizados para incentivar a adoção de práticas e produtos mais sustentáveis, tanto por produtores quanto por consumidores. No entanto, a aplicação dessas políticas levanta questões sobre possíveis efeitos colaterais, como a inflação e o impacto sobre a competitividade industrial². Há uma necessidade de uma abordagem equilibrada para evitar consequências adversas.

Para promover uma transição efetiva, é essencial considerar a utilização de instrumentos econômicos que alteram os incentivos financeiros para produtos e práticas sustentáveis. O uso de subsídios para tecnologias limpas e a tributação de práticas poluidoras podem influenciar significativamente as decisões empresariais e comportamentais dos consumidores, gerando uma demanda crescente por inovações verdes. Além disso, tais políticas podem desempenhar um papel central na criação de empregos e na recuperação econômica.

Nesse contexto, os modelos baseados em agentes (ABM) surgem como uma ferramenta promissora para analisar essas dinâmicas. Esses modelos proporcionam uma visão detalhada e abrangente da economia, superando as limitações das análises empíricas tradicionais, que muitas vezes enfrentam escassez de dados e limitações metodológicas (CARMICHAEL; HADŽIKADIĆ, 2019). Assim, os ABMs permitem avaliar criticamente políticas econômicas, como impostos ambientais e subsídios, antes de sua implementação, ampliando o entendimento da economia contemporânea.

Dentre esses modelos, os de caráter micro-macro-multisetorial são particularmente relevantes. Eles apresentam um marco teórico alternativo aos modelos neoclássicos tradicionais, propondo uma abordagem mais adequada às características da economia capitalista e aos processos de desenvolvimento econômico. Esses modelos buscam integrar a análise dos níveis micro e macroeconômicos, proporcionando uma estrutura analítica eficaz para investigar a interação entre setores econômicos e a demanda agregada. Ao explorar a inter-relação entre esses elementos, destacam como a demanda efetiva e as especificidades setoriais moldam o desempenho econômico de forma integrada ((DWECK, 2006) (VIANNA, 2024).

Diante disso, este estudo tem como objetivo implementar no modelo Micro-Macro Multisectoral (MMM) as emissões de CO₂ das empresas e as políticas fiscais ambientais, por meio da aplicação de impostos sobre a produção e subsídios para pesquisa e desenvolvimento (P&D). A proposta busca simular o impacto dessas políticas no comportamento das emissões de CO₂ nos setores produtivos, analisando a eficácia de uma abordagem integrada de desincentivos fiscais (impostos) e incentivos à inovação (subsídios) para a redução das emissões e promoção de tecnologias mais sustentáveis.

A escolha pelo modelo MMM justifica-se por sua estrutura que permite a análise de interações complexas entre setores econômicos, empresas e políticas públicas, com ênfase nos

² No presente artigo, partiremos de uma simplificação das políticas propostas, não será realizada uma análise detalhada dos efeitos colaterais das políticas estudadas como a inflação e o impacto sobre a competitividade industrial. No entanto, é importante reconhecer que a implementação de tais políticas pode gerar consequências significativas, que merecem consideração em estudos futuros.

impactos macroeconômicos. O modelo possibilita a incorporação de diferentes mecanismos de resposta das empresas às mudanças nas políticas ambientais, oferecendo um cenário dinâmico para a avaliação de políticas fiscais.

Dito isso, além dessa breve introdução, o presente artigo está dividido da seguinte forma: na segunda seção, será apresentada uma breve revisão teórica sobre a eficiência e o uso de subsídios e taxas em diferentes contextos micro e macroeconômicos, visando à mitigação das emissões de CO₂. Na terceira parte, serão descritos os procedimentos metodológicos, nos quais propomos uma modificação do modelo micro-macro-multissetorial, inspirado no trabalho de Vianna (2024), Dweck (2006) e Pereira (2021), para incluir a taxa e subsídios. A primeira política é uma medida aplicada sobre a produção, onde quanto mais a empresa produz, mais ela emite CO₂. Por outro lado, o segundo refere-se a incentivos em PD, onde, à medida que a empresa investe mais em PD, suas emissões de CO₂ diminuem. Na quarta parte, será apresentado o resultado em um modelo micro-macro-multissetorial e, por último, a conclusão.

2 REVISÃO TEÓRICA

O Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC) recomenda que as concentrações de emissões sejam estabilizadas em 450 partes por milhão (ppm) até o ano de 2050 (VUUREN et al., 2007). Atualmente, essas concentrações encontram-se em 768 ppm. Para que essa meta seja atingida, seria necessário uma redução anual de 4,93% nas emissões até 2050 (LEE et al., 2023). Nesse cenário, a intensidade global de emissão de CO₂ por dólar deveria ser de 40 gramas por dólar, o que representa um desafio significativo para ser alcançado (DRÖGE; SCHRÖDER, 2005).

Dentro desse cenário, o uso de impostos ou subsídios são as ferramentas mais comuns de intervenção pública por parte do Estado no âmbito das medidas que ficaram popularmente conhecidas como ‘políticas fiscais verdes’, com o objetivo de alcançar determinados resultados ou estabelecer ‘cotas verdes’ para efetivar a mitigação das emissões de carbono. Sobre sua relevância enquanto instrumento, Dröge e Schröder (2005) e Ferrari e Landi (2024) em seus estudos destacam que, geralmente, as políticas ambientais costumam focar em tornar indústrias específicas mais sustentáveis, promovendo uma maior adoção de práticas e produtos limpos em relação aos poluentes o que também levanta questões sobre os efeitos colaterais do uso de políticas fiscais verde na transição ecológica como os efeitos inflacionários.

Para alcançar essas metas de ‘cotas verdes’, é necessário incentivar produtores e consumidores a substituírem produtos poluentes por alternativas mais ecológicas dentro da mesma indústria. Além de medidas de comando e controle, como proibições ou padrões, e acordos voluntários que muitas vezes precedem a imposição de cotas por regulamentação, os principais mecanismos para alterar padrões de produção e consumo são instrumentos econômicos, como impostos, subsídios e investimentos públicos verdes (DAFERMOS; NIKOLAIDI, 2019). Esses instrumentos (políticas fiscais verdes) baseados no mercado são essenciais para promover a transição para uma economia mais verde, além de proporcionar a criação de mais empregos e

gerar multiplicadores fiscais mais altos do que os investimentos não verdes sendo ainda mais essencial a priorização dos gastos verdes na recuperação econômica como O’Callaghan, Yau e Hepburn (2022) reforça.

Esses instrumentos econômicos, ao oferecerem incentivos financeiros, desempenham um papel central na transformação dos mercados, uma vez que alteram os custos relativos de produtos poluentes e sustentáveis. Ao implementar subsídios para tecnologias limpas ou tributar práticas poluidoras, os governos podem influenciar diretamente as decisões das empresas e dos consumidores (DAFERMOS; NIKOLAIDI, 2019). No caso dos produtores, a pressão para adotar tecnologias e processos mais ecológicos se intensifica à medida que as práticas tradicionais tornam-se mais caras e menos competitivas. Para os consumidores, a disponibilidade de alternativas sustentáveis a preços competitivos gera maior adesão a escolhas ambientalmente responsáveis, criando um ciclo de demanda por inovações verdes (DRÖGE; SCHRÖDER, 2005).

Wieners et al. (2022) chama a atenção para a urgência em reduzir as emissões de gases de efeito estufa emerge como uma questão central na mitigação das mudanças climáticas. Os impactos de um aumento de 2°C nas temperaturas globais são mais graves do que as estimativas anteriores sugerem, o que enfatiza a necessidade de uma transição robusta para uma economia de baixo carbono (LUGO-MORIN, 2021). Essa transformação implica uma reavaliação do uso de combustíveis fósseis e dos recursos naturais. Se a transição ocorrer de maneira tardia ou abrupta, os custos associados podem ser elevados e desafiadores, tornando essencial encontrar um equilíbrio entre a rapidez da mudança e suas repercussões econômicas

Neste contexto, as recentes descobertas de Wieners et al. (2022) revelam que a tributação excessiva sobre o carbono pode resultar em efeitos adversos para a descarbonização. Embora essas taxas sejam necessárias para promover mudanças, se estabelecidas em níveis excessivamente altos, podem levar ao aumento do desemprego e a taxas elevadas de falências, especialmente em decorrência da elevação dos preços da energia. Por outro lado, políticas que proíbem a construção de usinas a combustíveis fósseis, em conjunto com subsídios para tecnologias sustentáveis, demonstram ser eficazes na promoção de uma transição ordenada. Essas estratégias não apenas aceleram a adoção de soluções ecológicas, mas também garantem a demanda por mão de obra, mantendo os custos orçamentários em níveis gerenciáveis.

O estudo de Zheng, Li e Duan (2023) investiga o impacto de impostos ambientais e incentivos fiscais à pesquisa e desenvolvimento (P&D) sobre a inovação verde em empresas de manufatura na China, no período de 2013 a 2021. Utilizando um modelo de Diferenças em Diferenças (DID) para realizar testes de efeitos fixos, os autores avaliam como a combinação de políticas regulatórias ambientais pode influenciar a inovação tecnológica sustentável, com foco em países em desenvolvimento. Os principais resultados mostram que tanto os impostos ambientais quanto os incentivos fiscais de P&D promovem a inovação verde nas empresas, e sua combinação gera um efeito de reforço mútuo, potencializando os impactos positivos sobre a inovação. Os impostos ambientais também desempenham um papel corretivo, melhorando a qualidade da inovação ao mitigar problemas estratégicos decorrentes do uso isolado de incentivos fiscais de P&D, reforçando a governança ambiental.

Além disso, o estudo revela que um ambiente de execução forte e eficaz na aplicação de impostos ambientais favorece a implementação e a supervisão das políticas regulatórias, o que, por sua vez, aumenta a inovação verde. A análise de heterogeneidade mostra que os efeitos dessas políticas são mais fortes em empresas estatais e em empresas não classificadas como de alta tecnologia. Dessa forma, Zheng, Li e Duan (2023) contribuem para o entendimento do papel dos portfólios de políticas ambientais em países em desenvolvimento, sugerindo que o design e a supervisão adequados das políticas podem otimizar a inovação verde, oferecendo suporte à hipótese de Porter, que defende que regulamentações ambientais rigorosas podem induzir inovações que aumentam a competitividade das empresas.

Alguns modelos são empregados na tentativa de captar as interações e os efeitos do uso de políticas fiscais verdes, no entanto, quase todos esbarram em algum tipo de limitação, ainda que todos possam ter certas restrições como a falta de uma análise holística; Fadiran, Fadiran e Ibn-Mohammed (2017) ressaltam a importância do uso de uma modelagem baseada em agentes (ABM) como uma solução eficaz para superar a limitação de desconsiderar as interações entre múltiplos fatores. Carmichael e Hadžikadić (2019) salientam que essa técnica permite a criação de eventos heterogêneos de atividades, fundamentados em regras de decisão e em processos de aprendizado que operam de forma ascendente permitindo uma maleabilidade ausente nas abordagens tradicionais em termos de representação. Uma das principais vantagens do ABM é a sua capacidade de integrar diversas disciplinas, como ciência cognitiva, economia evolutiva e ciência da computação, proporcionando uma abordagem sistemática para enfrentar questões do mundo real.

Assim, o ABM se apresenta como uma alternativa valiosa, oferecendo uma representação mais rica e abrangente da economia, sem os obstáculos frequentemente encontrados na análise empírica devido à limitação de abordagens e dos dados (CARMICHAEL; HADŽIKADIĆ, 2019). Dessa forma, pode ser uma ferramenta poderosa para aprofundar a compreensão da economia contemporânea e, mais importante, para avaliar criticamente muitas estratégias políticas que, muitas vezes, são adotadas sem uma análise cuidadosa antes de sua implementação (FADIRAN; FADIRAN; IBN-MOHAMMED, 2017).

A integração econômica e climática é crucial para avaliar como as atividades produtivas e mudanças ambientais influenciam o crescimento econômico e o bem-estar social. Modelos que abordam essa interdependência ajudam a analisar o impacto de políticas econômicas e ambientais na produtividade e sustentabilidade. Assim, esses modelos são fundamentais para formular políticas de mitigação e adaptação climática mais eficazes. Lamperti et al. (2018) propuseram o modelo distópico *Schumpeter meeting Keynes (DSK)*, um modelo de avaliação integrada baseado em agentes, que incorpora empresas heterogêneas dos setores de bens de capital, bens de consumo e energia. O modelo destaca a relação entre produção, geração de energia e emissões de gases de efeito estufa, cujos efeitos não lineares sobre a temperatura desencadeiam uma série de danos climáticos.

Esses danos afetam a produtividade do trabalho, a eficiência energética e o capital das empresas, emergindo de interações entre agentes fora do equilíbrio, em um cenário de

racionalidade limitada. O modelo DSK é capaz de replicar regularidades empíricas tanto micro quanto macroeconômicas, além de mostrar que diferentes choques econômicos e climáticos têm impactos heterogêneos sobre o crescimento econômico, o desemprego e a ocorrência de crises.

Dentro dessa perspectiva Dafermos e Nikolaidi (2019) tem como objetivo principal fornecer uma avaliação comparativa dos efeitos de diferentes políticas fiscais verdes, utilizando o modelo *DEFINE* (*Dynamic Ecosystem-Finance-Economy*), uma abordagem baseada na modelagem macroeconômica ecológica pós-keynesiana. O estudo destaca a importância dos impostos sobre o carbono, subsídios verdes e investimentos públicos como ferramentas para mitigar as mudanças climáticas, ao mesmo tempo em que examina os impactos macroeconômicos dessas políticas.

Os resultados mostraram que os impostos sobre o carbono são eficazes na redução do aquecimento global, mas geram riscos financeiros ao impactarem negativamente a lucratividade das empresas e limitarem o acesso ao crédito. Por outro lado, subsídios verdes e investimentos públicos aumentam a eficiência ecológica e estimulam a inovação tecnológica, porém seus benefícios ambientais podem ser parcialmente anulados pelos efeitos de recuperação econômica, conhecidos como *rebound effects* (DAFERMOS; NIKOLAIDI, 2019). O estudo concluiu que a combinação dessas políticas fiscais oferece os melhores resultados, equilibrando a redução das emissões de carbono com a minimização dos impactos macroeconômicos adversos, quando comparadas à aplicação isolada de cada política.

Sobre o efeito da taxa ou subsídios ambientais, Jiang, Xu e Zhou (2023) ao lista um conjunto de empresas chinesas após o decreto governamental do país, alterando o ordenamento fiscal do país para incentivar energias mais limpas e taxar empresas mais poluentes notaram uma associação positiva entre a concessão de subsídios voltados à proteção ambiental e o desenvolvimento de inovações verdes por parte das empresas. No entanto, a relação entre a aplicação de impostos ambientais e a inovação em P&D segue um padrão não linear. Em um primeiro momento, a imposição de tributos ambientais tende a frear as iniciativas inovadoras, mas, com o passar do tempo, esse cenário se inverte, e a taxa ou subsídios passa a promover o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis. Além disso, a discrepância entre o desempenho das empresas e as expectativas do mercado se mostra um fator que modula a influência dos subsídios sobre os processos de inovação.

A dinâmica de mercado exerce uma função central nesse contexto, amplificando os efeitos dos subsídios e tributos sobre a capacidade das empresas de inovar de maneira sustentável. A competição acirrada entre empresas no setor força uma adaptação mais ágil e assertiva às pressões ambientais e econômicas, incentivando-as a adotar práticas mais verdes. Essa competição faz com que os incentivos financeiros, como subsídios ou a introdução de impostos, tenham maior impacto sobre o comportamento corporativo, aumentando a capacidade das empresas de integrar inovações sustentáveis em seus processos produtivos (JIANG; XU; ZHOU, 2023)

Esses achados fornecem uma fundamentação teórica valiosa para que os governos possam desenhar políticas públicas eficazes, estimulando a adoção de práticas inovadoras e sustentáveis no setor empresarial. Através de uma combinação adequada de incentivos e regulações, é possível

incentivar as empresas a investir em tecnologias verdes, o que contribui significativamente para o desenvolvimento sustentável e para a transição rumo a uma economia de baixo impacto ambiental. Para Ferrari e Landi (2024) a política de incentivo à redução de emissões, por meio de subsídios e impostos ambientais, é um componente essencial da transição ecológica, suas análises demonstram que o aumento gradual das taxas sobre emissões, se bem estruturado, pode exercer efeitos complexos sobre a economia. Inicialmente, o aumento da taxa ambiental gera pressões inflacionárias devido ao repasse de custos para os preços, especialmente quando os agentes econômicos não antecipam corretamente os impactos futuros.

Contudo, Ferrari e Landi (2024) ponderam as ‘expectativas’ e um modelo novo-keynesiano, na qual um aumento futuro dos impostos pode ter um efeito deflacionário, ao desestimular o consumo no presente, já que os agentes antecipam uma redução na renda disponível e ajustam seu comportamento de consumo a transição pode inicialmente levar a um aumento nos preços, antes que os benefícios deflacionários de longo prazo se manifestem. Essa ambiguidade nos efeitos imediatos é uma característica que deve ser considerada na formulação de políticas ambientais.

Portanto, políticas bem projetadas, que equilibrem incentivos e regulações, podem mitigar pressões e estresses econômicos e resolver questões de eficiência competitiva e criar novos mecanismos garantindo uma transição verde economicamente viável, ambientalmente sustentável assim como investimentos em P&D, todos esses temas são perfeitamente possíveis ao empregarmos os modelos ABM como os micro-macro-multisetorial e expandir a compreensão dos efeitos subsequentes das taxas e subsídios.

3 METODOLOGIA

Uma classe de modelos ABM bastante relevante são os modelos micro-macro-setoriais. Desenvolvido a partir da tese de Mario Possas, escrita em 1983, e posteriormente aperfeiçoado por Dweck (2006) e Vianna (2024), é um modelo de simulação que busca explorar as dinâmicas de economias capitalistas. Ancorado em uma combinação de teorias pós-keynesianas, kaleckianas e schumpeterianas, o modelo se destaca por representar as interações entre setores produtivos, além de incorporar a distribuição de renda entre classes e as decisões empresariais em nível microeconômico, gerando efeitos em escala macroeconômica (PEREIRA, 2021).

No modelo micro-macro-multisetorial de Dweck (2006) temos uma proposta de um arcabouço teórico alternativo ao modelo neoclássico, voltado para abordar as particularidades da dinâmica econômica capitalista e o processo de desenvolvimento econômico. O principal é fornecer uma estrutura analítica mais adequada às questões relacionadas ao crescimento e à interação entre diferentes setores econômicos, destacando a importância de uma análise integrada entre os níveis micro e macroeconômico.

Dweck (2006) estabelece um modelo dinâmico multisetorial de simulação que explora a inter-relação entre os aspectos microeconômicos e macroeconômicos, com ênfase na demanda efetiva e nas características setoriais que influenciam as trajetórias econômicas. A tese se distingue por incorporar a dinâmica macroeconômica orientada pela demanda, ao lado das

estruturas setoriais e do progresso tecnológico, salientando, ainda, a relevância dos componentes autônomos da demanda agregada, como o investimento, o consumo, os gastos públicos e as exportações, para o comportamento econômico de longo prazo.

A proposta de Dweck (2006) afasta-se das abordagens tradicionais que priorizam choques de oferta, oferecendo uma visão alternativa do desenvolvimento econômico. Sua pesquisa destaca como a interação entre demanda agregada e estruturas setoriais pode impactar o crescimento econômico, sugerindo que uma abordagem mais holística e setorialmente integrada pode fornecer uma compreensão mais abrangente dos processos de crescimento e desenvolvimento em economias capitalistas.

Nessa mesma linha de pesquisa, Vianna (2024), em seu trabalho mais recente, apresenta um modelo micro-macro-multisetorial frisando a política monetária em economias com estruturas oligopolísticas, onde as empresas enfrentam restrições financeiras. Um dos principais destaques apresentado pelo autor foi a insuficiência dos modelos tanto convencionais quanto dos kaleckianos e pós-keynesianos para controlar a inflação, o que configurou-se um dos principais achados, sendo o mais relevantes o paradoxo de Gibson, em que o aumento da taxa de juros não apenas elevou os preços, mas também aumentou a volatilidade do PIB, gerando um dilema para a política econômica, que, sob tais condições, não atinge seus objetivos inflacionários. Vianna (2024) destaca que o paradoxo observado reforça a necessidade de uma compreensão mais aprofundada dos efeitos da política monetária em contextos de oligopólios financeiros.

Além disso, Vianna (2024) pontua que o principal impacto identificado refere-se à distribuição da renda entre diferentes agentes econômicos, especialmente no que diz respeito ao efeito das taxas de juros sobre a renda dos detentores de títulos. Com o aumento das taxas de juros, há um incremento na remuneração de detentores de títulos públicos, geralmente concentrados entre os bancos e indivíduos ricos, ao passo que empresas enfrentam custos financeiros mais elevados. Enquanto as empresas podem repassar esses custos ao consumidor por meio de aumentos de preços, às famílias, por outro lado, não possuem essa mesma flexibilidade. Esse descompasso na capacidade de adaptação entre empresas e famílias agrava a desigualdade, pois as empresas mantêm ou ampliam suas margens de lucro, enquanto as famílias veem seus rendimentos estagnados.

Nesta seção metodológica, será empregado o Modelo Micro-Macro Multisetorial (*MMM Core 2.9*), uma versão simplificada desenvolvida por Pereira (2021). Conforme supracitado, esse modelo deriva dos trabalhos originais de Mário Possas, Esther Dweck e Matheus Vianna. O objetivo central dessa versão simplificada é preservar as principais propriedades dinâmicas do modelo original, enquanto busca torná-lo mais intuitivo e fácil de utilizar (PEREIRA, 2021).

O *MMM Core 2.9* foi selecionado para este estudo devido à sua estrutura mais simplificada e eficiente, o que facilita a introdução das adaptações necessárias para a investigação proposta. A simplicidade adicional não compromete a geração dos resultados, mas sim permite um manejo mais direto das variáveis e parâmetros, além de manter as principais dinâmicas setoriais e macroeconômicas do modelo original (PEREIRA, 2021). Entre as modificações, destacam-se a redução no número de variáveis e parâmetros, a eliminação de um setor de bens intermediários,

bem como a simplificação dos setores governamental e externo, sendo assim, essas simplificações foram feitas para aumentar a praticidade do modelo, mantendo sua capacidade de analisar as dinâmicas econômicas em um contexto capitalista (PEREIRA, 2021).

Neste trabalho, foram realizadas importantes modificações no Modelo em questão para incorporar dinâmicas ambientais. As alterações incluem a implementação de um mecanismo para calcular as emissões de CO₂ das empresas (*Firm_CO2_Emissions*), baseado em seus gastos em P&D (*Firm_RND_Expenses*) e produção efetiva (*Firm_Effective_Production*), refletindo o impacto tecnológico na sustentabilidade. Diante disso, os arquivos que foram alterados foram: *mmm_core_firm_production*, *mmm_core_firm_rnd*, *mmm_core_firm_profit* e *mmm_core_sector_aggregates*. Além disso, foram introduzidos impostos (*CO2_Tax_Rate*) sobre as emissões de CO₂ que ultrapassam determinados limites e a implementação de subsídios (*CO2_Subsidy_Rate*) destinados a incentivar gastos em P&D.

Incorporar as emissões de CO₂ no modelo Micro-Macro Multissetorial (MMM) é uma abordagem essencial para integrar as dinâmicas econômicas e ambientais, proporcionando uma análise mais completa que abrange tanto o desempenho econômico quanto o impacto ambiental das empresas. A inclusão das emissões reflete a realidade contemporânea, marcada por pressões regulatórias e políticas voltadas à redução de gases de efeito estufa, e permite avaliar como o comportamento das empresas em relação ao investimento em P&D e inovação tecnológica afeta a transição para uma economia sustentável.

Simular as emissões de CO₂, Figura 1, no modelo possibilita a análise de diferentes políticas ambientais, como impostos sobre carbono e subsídios à inovação verde, o que facilita a compreensão de como essas medidas influenciam a redução das emissões corporativas e seus efeitos macroeconômicos. O cálculo das emissões, considerando os investimentos em P&D e as probabilidades de sucesso na inovação e imitação, reflete a importância da evolução tecnológica na redução do impacto ambiental das empresas.

$$EMISS_{CO_2} = CO2_{base} * x_{i,t}^* * \left(1 - \left(\frac{rnd_{i,t}}{100}\right)\right) * (1 - prob^{inov}) * (1 - prob^{imi}) \quad (1)$$

Onde:

$EMISS_{CO_2}$: Emissões de CO₂;

$CO2_{base}$: Fator base de emissões de CO₂;

$x_{i,t}^*$: Produção efetiva da empresa;

$rnd_{i,t}$: Despesas em P&D da empresa;

$prob^{inov}$: Probabilidade de sucesso da inovação, calculada como $1 - e^{(-inov * rnd_{i,t})}$;

$prob^{imi}$: Probabilidade de sucesso da imitação, calculada como $1 - e^{(-imi * rnd_{i,t})}$

A inclusão da produção efetiva, $x_{i,t}^*$, no cálculo das emissões de CO₂ é essencial porque as emissões estão diretamente relacionadas ao nível de atividade produtiva de uma empresa. Quanto maior a produção de uma firma, maior será o consumo de energia, matérias-primas e insumos, o que tende a aumentar as emissões de gases poluentes, como o CO₂. Dessa forma, ao

usar a produção efetiva como um fator no cálculo, o modelo captura a relação entre o volume de produção e a quantidade de emissões geradas, refletindo de maneira mais realista o impacto ambiental da atividade produtiva. Isso permite que as emissões variem conforme o desempenho produtivo da empresa, tornando o cálculo mais dinâmico e fiel à realidade operacional.

Já a inclusão dos gastos em P&D e de um fator base de emissões de CO₂ no cálculo das emissões é importante para refletir o impacto que a inovação tecnológica e a eficiência produtiva têm na redução das emissões, sendo assim, os gastos em P&D são usados para medir os esforços da empresa em inovação e melhorias tecnológicas, que podem resultar em uma produção mais limpa e eficiente. Quanto maiores os investimentos em P&D, maior a probabilidade de desenvolver tecnologias que reduzam as emissões, tornando o cálculo mais realista ao considerar a capacidade de inovação da empresa para mitigar seu impacto ambiental.

Além disso, a divisão dos gastos em P&D por 100 no cálculo das emissões de CO₂ é feita para normalizar o impacto desses investimentos, garantindo que a influência dos gastos em inovação seja proporcional e adequadamente dimensionada no modelo. Essa normalização evita que valores elevados de despesas em P&D tenham um efeito desproporcional na redução das emissões. O fator base de emissões estabelece um nível inicial de poluição, representando as emissões que ocorreriam sem intervenções. Assim, o modelo captura a relação entre inovação e emissões, permitindo a análise de como os esforços em P&D podem influenciar a sustentabilidade.

Dentro dessa perspectiva, ainda é possível utilizar os modelos micro-macro-multisetorial para o avanço da análise dos efeitos dos vários tipos de políticas fiscais - o que inclui as taxas e subsídios - mais usualmente empregadas pelos governos no combate às emissões de CO₂. Os impostos sobre emissões de CO₂ têm um papel crucial na regulação ambiental e na promoção de práticas sustentáveis nas empresas.

Neste modelo, os impostos são aplicados à produção efetiva das empresas quando estas ultrapassam um determinado limite máximo de emissões de CO₂ permitidas. Caso a empresa exceda esse valor máximo, o imposto é calculado e subtraído da produção efetiva, resultando em uma produção ajustada que reflete o custo ambiental associado ao excesso de emissões. Por outro lado, se as emissões estiverem dentro dos limites estabelecidos, a produção permanece inalterada, ou seja, a produção efetiva será considerada normal. Essa abordagem busca incentivar as empresas a reduzir suas emissões, promovendo a responsabilidade ambiental sem comprometer a produção das que operam dentro dos limites legais. Se as emissões E ultrapassarem E_{max} , a produção é ajustada subtraindo o imposto, que é o excesso de emissões $(E - E_{max})$ multiplicado pela taxa T . Caso contrário, a produção permanece P .

$$P_{adj} = \begin{cases} P - (E - E_{max}) * T, & \text{se } E > E_{max} \\ \text{Caso contrário, } P \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

P : Produção efetiva da empresa

E : Emissões de CO2 da empresa

E_{max} : Limite máximo de emissões de CO2 permitido

T : Taxa de imposto sobre o excesso de emissões

P_{adj} : Produção ajustada pela aplicação do imposto

Os subsídios para despesas em pesquisa e desenvolvimento (P&D) desempenham um papel essencial na promoção de inovações sustentáveis e na redução das emissões de CO2. Neste modelo, os subsídios são aplicados às despesas em P&D das empresas quando suas emissões de CO2 estão abaixo de um determinado limite, conhecido como limite de subsídio. Se a empresa se enquadrar nessa condição, um subsídio é calculado com base na taxa de subsídio e nas despesas em P&D, resultando em um aumento nos recursos disponíveis para inovação. Isso incentiva as empresas a investirem mais em tecnologias limpas e processos eficientes, melhorando sua capacidade de reduzir as emissões ao longo do tempo. Por outro lado, se as emissões estiverem acima do limite estabelecido, as empresas não recebem o subsídio, o que pode limitar sua capacidade de investimento em P&D. Essa abordagem visa estimular a responsabilidade ambiental e fomentar a inovação nas empresas que operam de forma sustentável, contribuindo para um futuro mais verde.

$$RND_{adj} = \begin{cases} RND_{i,t} * \sigma_i & \text{se } EMISS_{CO2,i,t} \leq E_{max} \\ \text{Caso contrário, } RND_{i,t} \end{cases} \quad (3)$$

Notação:

RND_{adj} : Despesas em P&D ajustadas da empresa i no período t

$RND_{i,t}$: Despesas em P&D da empresa i no período t

σ_i : Taxa de subsídio (ex:20%)

$EMISS_{CO2,i,t}$: Emissões de CO2 da empresa i no período t

E_{max} : Limite máximo de emissões de CO2 permitido

Para este modelo, definimos alguns parâmetros exógenos: a emissão base de CO2 é fixada em 1000, o limite máximo de emissão de CO2 para a concessão de subsídios é estabelecido em 400, enquanto o limite máximo de emissão para a aplicação de impostos é de 450. A taxa de imposto sobre emissões de CO2 é definida em 25%, e a taxa de subsídio é de 15%. Essas escolhas de parâmetros são fundamentais para a modelagem, pois estabelecem limites claros que ajudam a determinar as condições sob as quais as empresas serão incentivadas ou penalizadas por suas práticas de emissão.

A emissão base de CO2 de 1000 serve como referência para medir o desempenho das empresas em relação às suas emissões. O limite de 400 para a concessão de subsídios é projetado para estimular as empresas a investirem em práticas de redução de emissões, enquanto o limite de 450 para a aplicação de impostos busca desencorajar práticas poluentes. Ainda que incipientes e com inúmeras limitações, devemos considerar alguns pontos de partida para a compreensão dos efeitos de taxas e subsídios sobre o total de emissões, que são: i) dificuldades em definir critérios

claros para o uso de taxas ou subsídios e ii) riscos e impactos econômicos para a competitividade entre firmas.

A dificuldade para a definição de critérios claros para diferenciar as empresas mais poluentes das menos poluentes se dá porque a produção de poluição não é uniforme, variando conforme o setor econômico, a tecnologia empregada e a eficiência operacional de cada empresa. Assim, a criação de parâmetros adequados para medir e avaliar as emissões é uma tarefa complexa, pois um sistema de taxa ou subsídio que não considere essas variações pode gerar resultados injustos ou ineficazes.

Por fim, os resultados gerados³ se concentram nas emissões de CO₂ em diferentes cenários. No caso base, serão calculadas as emissões de CO₂ sem intervenções governamentais. No caso base, foram calculadas as emissões de CO₂ sem intervenções governamentais. Em seguida, foi analisado o impacto da implementação de impostos ambientais, ajustando a produção efetiva para refletir as novas condições tributárias e suas implicações nas emissões. Em outro cenário, foi avaliado o efeito dos subsídios direcionados para despesas em pesquisa e desenvolvimento (P&D) sobre as emissões de CO₂. Por fim, a combinação dessas duas políticas — impostos ambientais e incentivos fiscais para P&D — para verificar se a junção das medidas resulta em efeitos amplificados na redução das emissões.

Esta pesquisa apresenta algumas limitações significativas que devem ser reconhecidas. Primeiramente, as alterações realizadas no modelo não incorporam o setor energético e carecem de uma instância exclusiva para o clima, como observado em outros modelos existentes (DAFERMOS; NIKOLAIDI, 2019)(LAMPERTI et al., 2018). Essa ausência limita a abrangência da análise e pode restringir a capacidade de avaliar de forma holística as interações entre o setor energético e as políticas ambientais.

Além disso, a implementação dos subsídios e impostos não está ligada a uma instância governamental formal; em vez disso, foi feita de maneira *ad hoc*, o que representa uma limitação importante. Essa abordagem pode resultar em uma avaliação não sistemática dos efeitos das políticas, comprometendo a robustez das conclusões. Por último, é relevante destacar que o cálculo das emissões, da produção e das despesas em P&D não é realizado de maneira recursiva (em loop), mas sim de forma manual. Isso pode reduzir a eficiência e a precisão das simulações, limitando a capacidade do modelo de capturar dinâmicas complexas e interdependências que são fundamentais para a análise das políticas fiscais e ambientais.

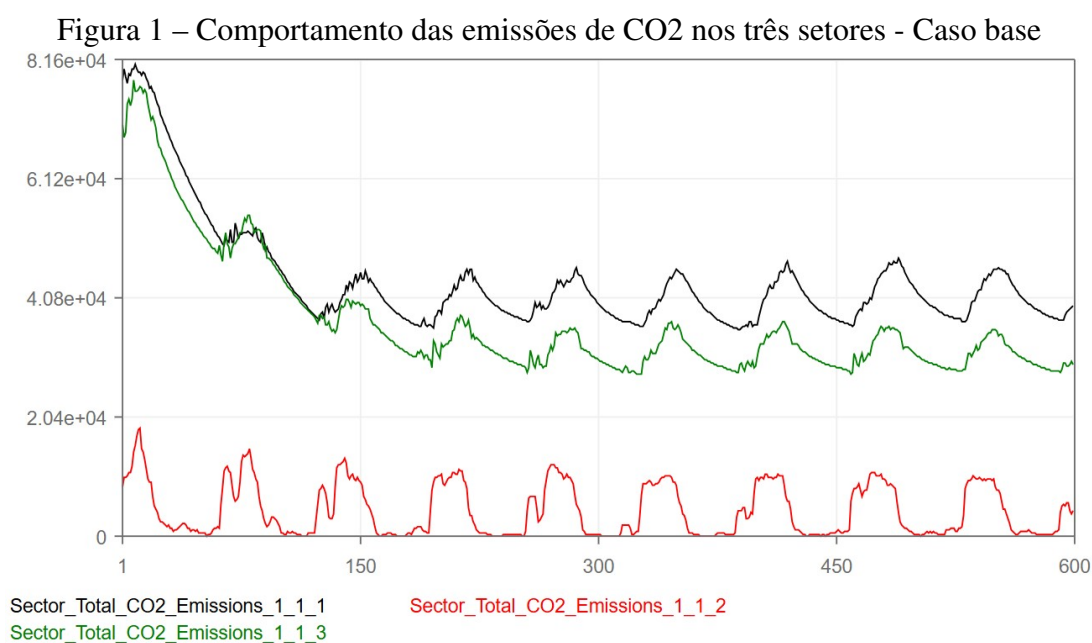
³ A simulação de Monte Carlo é essencial em modelos ABM, pois permite testar a robustez dos resultados ao lidar com incertezas e variações estocásticas. Com múltiplas execuções, é possível analisar a distribuição dos resultados e a sensibilidade a diferentes parâmetros. No entanto, para este estudo, as simulações de Monte Carlo não foram realizadas devido à limitação de tempo e recursos computacionais. Optou-se por uma única execução para fornecer uma análise preliminar dos cenários propostos, ciente de que a inclusão de simulações adicionais poderia enriquecer a robustez das conclusões.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na descrição do modelo, não está claro quais setores estão sendo analisados, já que os setores são referenciados apenas como Setor 1_1_1, Setor 1_1_2 e Setor 1_1_3, sem especificações adicionais. Diante dessa falta de clareza, decidiu-se que eles serão analisados da forma como estão, sem caracterizações prévias. Essa abordagem permite avançar na discussão e realizar a análise sem atribuir características específicas a cada setor, preservando a integridade do modelo conforme apresentado por Pereira (2021).

A Figura 1 apresenta o Comportamento das Emissões de CO₂ nos três setores do Modelo para o Cenário Base. O gráfico apresenta uma análise das emissões de CO₂ dos setores 1_1_1, 1_1_2 e 1_1_3 ao longo do tempo que vai até o período 600, sob o cenário base do modelo. Os setores 1_1_1 e 1_1_3 iniciam o período com emissões nas faixas de 81.600, evidenciando uma tendência semelhante de queda até o período 150. A partir desse ponto, o setor 1_1_3 diminui suas emissões em um ritmo mais acentuado do que o setor 1_1_1. Ambos os setores, no entanto, apresentam variações similares e se estabilizam em níveis inferiores a 40.800, com o setor 1_1_1 permanecendo como o mais poluente, mantendo suas emissões acima desse valor até o final do período.

Um fator que pode contribuir para essa discrepância nas emissões é a quantidade de empresas em cada setor no momento inicial: há 63 firmas no setor 1_1_1, 10 no setor 1_1_2 e 49 no setor 1_1_3. Essa diferença no número de empresas sugere que o setor 1_1_1, com sua quantidade substancial de firmas, pode ser responsável por uma maior quantidade de emissões, uma vez que mais empresas operando tendem a resultar em um maior impacto ambiental. Em contrapartida, o setor 1_1_2 destaca-se por suas emissões significativamente inferiores, não ultrapassando 20.400. Este valor é substancialmente menor em comparação aos outros setores.



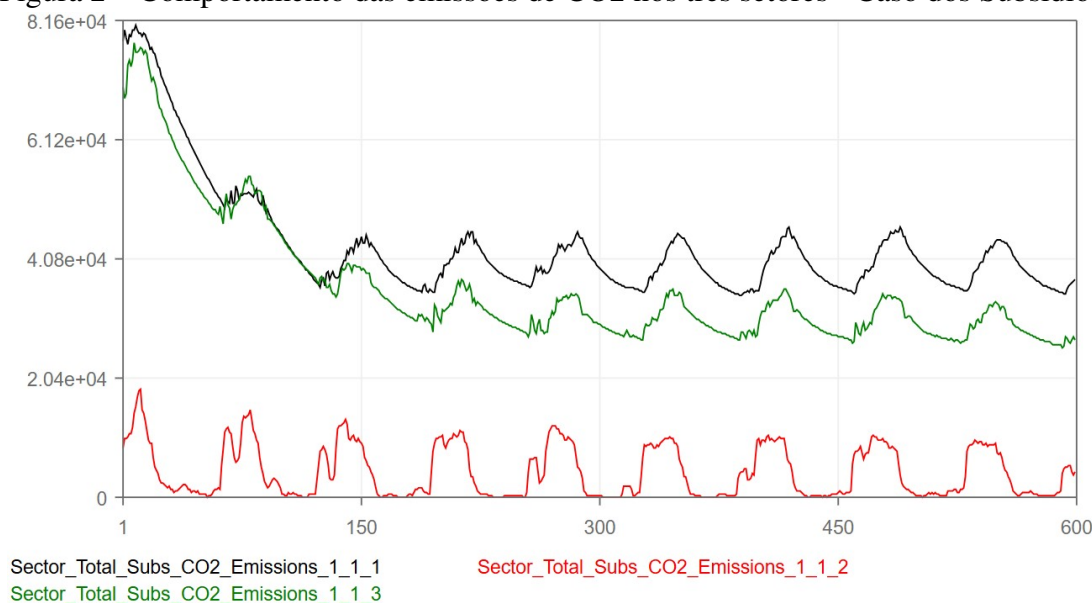
Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 2 ilustra o Comportamento das Emissões de CO₂ nos três setores do modelo sob o Cenário de Implementação de Subsídio. O gráfico revela que, de modo geral, as tendências de emissões nos setores 1_1_1, 1_1_2 e 1_1_3 são bastante semelhantes às observadas no Cenário Base, apresentando uma leve diminuição nas emissões de CO₂ ao longo do tempo.

Entretanto, essa redução modesta pode ser atribuída a diversos fatores, sendo um dos principais a forma como os subsídios foram incorporados na construção da fórmula do modelo. Especificamente, as despesas em pesquisa e desenvolvimento (P&D) foram normalizadas, o que pode ter limitado o impacto potencial dos subsídios nas emissões. Essa normalização pode ter restringido a capacidade das empresas de investir em tecnologias mais limpas e eficientes, resultando em uma diminuição das emissões que não se traduz em uma mudança substancial em comparação ao cenário base.

Dessa forma, embora o cenário de subsídios tenha promovido uma leve redução nas emissões de CO₂, a eficácia das políticas implementadas pode ser questionada, dado o impacto limitado observado. Essa análise sugere que, para que os subsídios tenham um efeito mais significativo na mitigação das emissões, pode ser necessário considerar ajustes na forma como as despesas em P&D são tratadas no modelo, permitindo que as empresas se beneficiem plenamente dos incentivos financeiros.

Figura 2 – Comportamento das emissões de CO₂ nos três setores - Caso dos Subsídios



Fonte: Elaboração Própria.

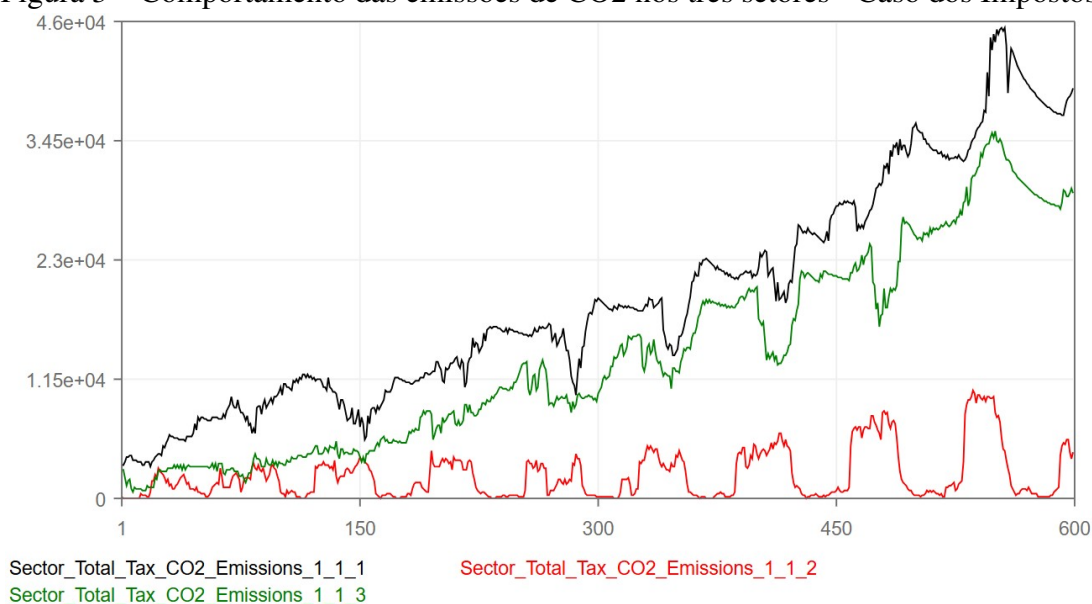
A Figura 3 apresenta o Comportamento das Emissões de CO₂ nos setores 1_1_1, 1_1_2 e 1_1_3 sob o Cenário de Implementação de Impostos. Os setores 1_1_1 e 1_1_3 iniciam o período com emissões em níveis inferiores a 11.500, mas ao longo do tempo, suas emissões apresentam uma tendência de aumento, embora em uma escala consideravelmente menor em comparação ao cenário base. Embora ambos os setores sigam a mesma trajetória ascendente, o setor 1_1_1 se mantém em níveis superiores ao setor 1_1_3 durante todo o período de análise.

Ao final do período, as emissões do setor 1_1_1 atingem aproximadamente 46.000, enquanto o setor 1_1_3 alcança cerca de 34.500.

Em contraste, o setor 1_1_2 se destaca por sua capacidade de manter suas emissões abaixo de 11.500, demonstrando um desempenho significativamente inferior em comparação aos outros setores. A diminuição das emissões nos setores 1_1_1 e 1_1_3 pode ser explicada pela aplicação de um imposto de 25% sobre a produção efetiva, que foi implementado quando as emissões de muitas empresas ultrapassaram o limite máximo de 450. Essa imposição do imposto atua como um forte desincentivo, levando as empresas a reduzir suas emissões drasticamente para evitar penalidades.

A comparação entre os setores evidencia que a estratégia tributária, ativada pela superação do limite de emissões, pode ser uma ferramenta eficaz para a redução das emissões de CO₂, especialmente no setor 1_1_1, que, embora continue a apresentar um aumento, o faz de maneira mais controlada do que no cenário base.

Figura 3 – Comportamento das emissões de CO₂ nos três setores - Caso dos Impostos



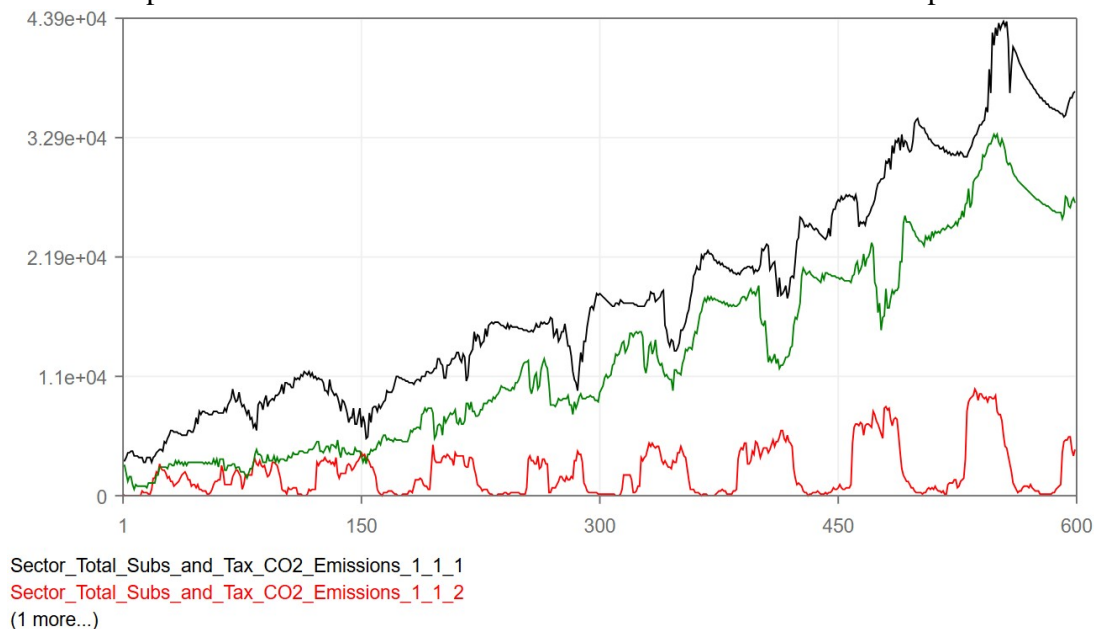
Fonte: Elaboração Própria.

A Figura 4 ilustra o Comportamento das Emissões de CO₂ nos setores 1_1_1, 1_1_2 e 1_1_3 sob o Cenário de Implementação de Impostos e Subsídios. Os três setores exibem tendências semelhantes às observadas no cenário de imposto, mas com valores de emissão significativamente menores. Especificamente, o setor 1_1_1 se estabiliza na faixa de 43.900, enquanto o setor 1_1_3 apresenta emissões na faixa de 32.900. Por sua vez, o setor 1_1_2 mantém suas emissões em um nível inferior a 11.000.

Essa redução nas emissões pode ser atribuída não apenas ao fator punitivo do imposto de 25% sobre a produção efetiva, que atua como um desincentivo para as empresas aumentarem suas emissões, mas também à implementação de um subsídio de 15% para gastos em pesquisa e desenvolvimento (P&D). Esse subsídio é concedido às empresas que mantêm suas emissões abaixo do limite de 400, incentivando-as a adotar tecnologias mais limpas e a melhorar sua

eficiência produtiva. Dessa forma, o cenário combina medidas de incentivo e desincentivo, resultando em uma diminuição geral das emissões de CO₂ nos setores analisados. A combinação do imposto e do subsídio reforça a ideia de que políticas ambientais integradas podem ser mais eficazes na promoção da sustentabilidade e na redução das emissões nos setores industriais.

Figura 4 – Comportamento das emissões de CO₂ nos três setores - Caso dos Impostos e Subsídios



Fonte: Elaboração Própria.

A Tabela 1 apresenta uma comparação das médias de emissões de CO₂ por setor sob diferentes cenários de políticas fiscais, destacando a efetividade dos subsídios e impostos na redução das emissões. A análise revela um padrão claro de diminuição nas emissões nos setores 1_1_1, 1_1_2 e 1_1_3 à medida que as políticas fiscais se tornam mais rigorosas.

No Setor 1_1_1, as emissões sob o cenário base são de 43.700 unidades, que se reduzem ligeiramente para 42.900 unidades com a implementação de subsídios. No entanto, a introdução de impostos resulta em uma queda significativa, com as emissões caindo para 19.300 unidades. A combinação de impostos e subsídios demonstra ainda mais eficiência, com as emissões médias reduzidas para 18.500 unidades. Esses resultados indicam que as políticas fiscais, especialmente a aplicação de impostos, exercem um impacto substancial na redução das emissões deste setor.

No Setor 1_1_2, a média das emissões sob o cenário base é consideravelmente menor, em 4.400 unidades. A implementação de subsídios reduz levemente as emissões para 4.330 unidades. Contudo, a aplicação de impostos resulta em uma diminuição significativa, levando a média para 2.250 unidades. Com a combinação de impostos e subsídios, as emissões alcançam o nível mais baixo, de 2.180 unidades. Esses dados sugerem que, mesmo em um setor menos poluente, a aplicação de políticas fiscais pode levar a uma redução efetiva das emissões.

Tabela 1 – Comparação das Médias de Emissões de CO₂ por Setor sob Diferentes Cenários de Políticas Fiscais

Setor	Cenário	Média das Emissões (Unidades)
Setor 1_1_1	Base	43.700
	Subsídios	42.900
	Impostos	19.300
	Impostos e Subsídios	18.500
Setor 1_1_2	Base	4.400
	Subsídios	4.330
	Impostos	2.250
	Impostos e Subsídios	2.180
Setor 1_1_3	Base	36.600
	Subsídios	35.800
	Impostos	13.700
	Impostos e Subsídios	12.900

Fonte: Elaboração Própria.

Por fim, no Setor 1_1_3, as emissões sob o cenário base são de 36.600 unidades, que caem para 35.800 unidades com subsídios. A introdução de impostos provoca uma redução expressiva, com as emissões médias caindo para 13.700 unidades. A combinação de impostos e subsídios leva a uma nova diminuição, alcançando 12.900 unidades. Assim como no Setor 1_1_1, a aplicação de políticas fiscais demonstra um impacto considerável na redução das emissões desse setor.

Em suma, a tabela evidencia que tanto os subsídios quanto os impostos são eficazes na diminuição das emissões de CO₂ nos três setores analisados. A tendência geral mostra que a implementação de impostos tende a ter um efeito mais pronunciado na redução das emissões em comparação aos subsídios. A combinação de ambas as políticas fiscais mostra-se como a estratégia mais eficaz, resultando nas menores médias de emissões em todos os setores. Esses resultados reforçam a importância de estratégias fiscais robustas para mitigar as emissões de CO₂ e promover a sustentabilidade ambiental.

Os resultados desta pesquisa indicam que a combinação de impostos ambientais e subsídios para pesquisa e desenvolvimento (P&D) é uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de CO₂ nos setores produtivos. Esse resultado se alinha à literatura recente que analisa os efeitos de diferentes políticas fiscais sobre a sustentabilidade ambiental e a inovação tecnológica. Em linhas gerais, observa-se que as políticas fiscais têm um impacto positivo na redução das emissões, mas apresentam nuances que devem ser levadas em consideração, como os efeitos macroeconômicos adversos e o risco de efeitos colaterais.

Estudos como os de Wieners et al. (2022), Dafermos e Nikolaidi (2019) e Zheng, Li e Duan (2023) sugerem que a implementação de impostos sobre carbono pode ser uma ferramenta

eficaz, mas deve ser aplicada com cuidado para evitar impactos negativos na economia, como aumento do desemprego, falências e pressão inflacionária. Os resultados encontrados neste estudo reforçam essa perspectiva, mostrando que o imposto de 25% sobre a produção efetiva provocou uma redução significativa das emissões, mas também foi acompanhado pela necessidade de subsídios para mitigar efeitos potencialmente adversos sobre a competitividade das empresas.

De maneira geral, a implementação de políticas fiscais, como impostos sobre carbono e subsídios para P&D, desempenha um papel crucial na promoção da sustentabilidade e na redução das emissões de CO₂. A literatura corrobora com os resultados obtidos nessa pesquisa ao destacar a eficácia dessas políticas, mas também alerta para os riscos associados, como impactos econômicos adversos e a necessidade de uma supervisão cuidadosa. A combinação dessas políticas mostra-se como uma abordagem equilibrada, maximizando os benefícios ambientais enquanto minimiza os efeitos negativos, sendo, portanto, uma estratégia recomendada para enfrentar os desafios da transição ecológica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do impacto de políticas fiscais ambientais no modelo MMM revela que tanto impostos sobre a produção quanto subsídios para P&D desempenham papéis importantes na redução das emissões de CO₂. No entanto, a combinação de ambos se destaca como a abordagem mais eficaz para impulsionar a transição de empresas poluentes para práticas mais sustentáveis. A penalização por meio de impostos desincentiva comportamentos poluidores, enquanto os subsídios estimulam o desenvolvimento de inovações verdes, criando um ciclo virtuoso de adaptação tecnológica.

A utilização de subsídios incentiva as empresas a investir em tecnologias limpas e eficientes, permitindo uma redução sustentável de suas emissões. Porém, quando aplicados isoladamente, os subsídios têm um impacto mais modesto em comparação com os impostos. A aplicação de impostos sobre a produção força as empresas a ajustarem suas práticas produtivas, resultando em uma redução significativa das emissões nos setores mais poluentes.

A pesquisa também aponta que os efeitos macroeconômicos dessas políticas não podem ser negligenciados. A aplicação de impostos, embora eficaz na redução de emissões, pode trazer impactos adversos, como aumento nos custos de produção e perda de competitividade internacional. Assim, o equilíbrio entre incentivos para inovação e penalizações por práticas poluentes torna-se essencial para evitar impactos econômicos negativos.

Outro ponto relevante é a flexibilidade proporcionada pelo modelo Micro-Macro Multissetorial. A capacidade de integrar dinâmicas ambientais e econômicas permite que diferentes cenários de políticas sejam testados, oferecendo uma visão abrangente dos efeitos de medidas fiscais sobre a sustentabilidade. O modelo destaca a importância de intervenções políticas bem projetadas, que consigam promover a inovação tecnológica e a sustentabilidade ambiental sem comprometer o crescimento econômico.

Dessa forma, a combinação de impostos ambientais e incentivos para P&D mostra-se uma estratégia eficaz para mitigar as emissões de CO₂ e acelerar a transição para uma economia de baixo carbono. As políticas ambientais integradas, quando bem implementadas, podem maximizar os benefícios ecológicos, ao mesmo tempo em que minimizem os efeitos econômicos adversos, demonstrando que o caminho para a sustentabilidade depende de abordagens equilibradas e baseadas em incentivos robustos.

O artigo apresenta contribuições significativas ao explorar o impacto de impostos ambientais e subsídios de P&D sobre a transição de empresas poluentes para práticas sustentáveis, utilizando o Modelo Micro-Macro Multissetorial (MMM). No entanto, algumas limitações precisam ser destacadas. Primeiramente, o modelo utilizado não inclui um setor energético detalhado, nem um mecanismo climático mais amplo, o que limita a análise das interações entre energia, produção e políticas ambientais. A ausência dessas variáveis restringe a capacidade do modelo de capturar integralmente os impactos ambientais e suas interdependências econômicas, sugerindo a necessidade de uma abordagem mais integrada em estudos futuros.

Além disso, a implementação das políticas fiscais foi realizada de maneira simplificada, sem uma formalização governamental que refletisse uma dinâmica realista de tomada de decisões políticas. Essa abordagem pode comprometer a avaliação das políticas e seus impactos no longo prazo, já que as interações entre governo, empresas e mercado não são plenamente capturadas. Para pesquisas futuras, seria interessante incorporar uma instância governamental formal e explorar diferentes formas de implementação de impostos e subsídios, incluindo simulações de diferentes níveis de intervenção estatal.

Outro ponto a ser considerado é a ausência de simulações em múltiplos cenários estocásticos, como as simulações de Monte Carlo. O estudo se baseia em uma única execução do modelo, o que pode limitar a robustez das conclusões devido à falta de variabilidade nos resultados. Para melhorar a precisão e generalização das conclusões, futuras pesquisas devem considerar a inclusão de simulações estocásticas, permitindo a análise da sensibilidade dos parâmetros e das dinâmicas complexas presentes no modelo, garantindo uma avaliação mais confiável dos impactos das políticas ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARMICHAEL, T.; HADŽIKADIĆ, M. **The fundamentals of complex adaptive systems**. [S.l.]: Springer, 2019. Nenhuma citação no texto.

DAFERMOS, Y.; NIKOLAIDI, M. **Fiscal policy and ecological sustainability: a post-Keynesian perspective**. [S.l.]: Springer, 2019. Nenhuma citação no texto.

DRÖGE, S.; SCHRÖDER, P. J. How to turn an industry green: Taxes versus subsidies. **Journal of Regulatory Economics**, Springer, v. 27, p. 177–202, 2005. Nenhuma citação no texto.

DWECK, E. **Uma análise da interação micro-macro com base em um modelo dinâmico multissetorial de simulação**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro., 2006. Nenhuma citação no texto.

FADIRAN, G.; FADIRAN, D.; IBN-MOHAMMED, T. Macroeconomic policy effects on development transition—views from agent based model. 2017. Nenhuma citação no texto.

FERRARI, A.; LANDI, V. L. Will the green transition be inflationary? expectations matter. **IMF Economic Review**, Springer, p. 1–65, 2024. Nenhuma citação no texto.

JIANG, Z.; XU, C.; ZHOU, J. Government environmental protection subsidies, environmental tax collection, and green innovation: evidence from listed enterprises in china. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, v. 30, n. 2, p. 4627–4641, 2023. Nenhuma citação no texto.

LAMPERTI, F. et al. Faraway, so close: Coupled climate and economic dynamics in an agent-based integrated assessment model. **Ecological Economics**, Elsevier, v. 150, p. 315–339, 2018. Nenhuma citação no texto.

LEE, H. et al. Ipcc, 2023: Climate change 2023: Synthesis report, summary for policymakers. contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [core writing team, h. lee and j. romero (eds.)]. ipcc, geneva, switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2023. Nenhuma citação no texto.

LUGO-MORIN, D. R. Global future: low-carbon economy or high-carbon economy? **World**, MDPI, v. 2, n. 2, p. 175–193, 2021. Nenhuma citação no texto.

O'CALLAGHAN, B.; YAU, N.; HEPBURN, C. How stimulating is a green stimulus? the economic attributes of green fiscal spending. **Annual review of Environment and Resources**, Annual Reviews, v. 47, n. 1, p. 697–723, 2022. Nenhuma citação no texto.

PEREIRA, M. d. C. Micro-macro multisectoral model (mmm) - core version 2.9. Laboratory for Simulation Development (LSD), 2021. Nenhuma citação no texto.

VIANNA, M. T. Monetary policy and income distribution in a multisectoral ab-sfc model. **Review of Political Economy**, Taylor & Francis, p. 1–23, 2024. Nenhuma citação no texto.

VUUREN, D. P. V. et al. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. **Climatic change**, Springer, v. 81, p. 119–159, 2007. Nenhuma citação no texto.

WIENERS, C. et al. Macroeconomic policy for a rapid and orderly transition. 2022. Nenhuma citação no texto.

ZHENG, Q.; LI, J.; DUAN, X. The impact of environmental tax and r&d tax incentives on green innovation. **Sustainability**, MDPI, v. 15, n. 9, p. 7303, 2023. Nenhuma citação no texto.

ANEXO A – Estatísticas Descritivas dos Setores

Figura 5 – Estatísticas Descritivas dos Setores

Time series descriptive statistics:						
600 Cases	Average	Median	Std.Dev.	Min.	Max.	
Sector_Total_CO2_Emissions 1_1_1 (600)	4.37e+04	4.07e+04	9.44e+03	3.54e+04	8.08e+04	
Sector_Total_CO2_Emissions 1_1_2 (600)	4.4e+03	2.13e+03	4.44e+03	0	1.85e+04	
Sector_Total_CO2_Emissions 1_1_3 (600)	3.66e+04	3.26e+04	1.08e+04	2.76e+04	7.79e+04	
Time series descriptive statistics:						
600 Cases	Average	Median	Std.Dev.	Min.	Max.	
Sector_Total_Tax_CO2_Emissions 1_1_1 (600)	1.93e+04	1.65e+04	1.08e+04	3.14e+03	4.55e+04	
Sector_Total_Tax_CO2_Emissions 1_1_2 (600)	2.25e+03	1.42e+03	2.37e+03	0	1.04e+04	
Sector_Total_Tax_CO2_Emissions 1_1_3 (600)	1.37e+04	1.19e+04	9.48e+03	561	3.54e+04	
Time series descriptive statistics:						
600 Cases	Average	Median	Std.Dev.	Min.	Max.	
Sector_Total_Subs_CO2_Emissions 1_1_1 (600)	4.29e+04	3.99e+04	9.73e+03	3.46e+04	8.08e+04	
Sector_Total_Subs_CO2_Emissions 1_1_2 (600)	4.33e+03	2.11e+03	4.38e+03	0	1.85e+04	
Sector_Total_Subs_CO2_Emissions 1_1_3 (600)	3.58e+04	3.17e+04	1.12e+04	2.55e+04	7.79e+04	
Time series descriptive statistics:						
600 Cases	Average	Median	Std.Dev.	Min.	Max.	
Sector_Total_Subs_and_Tax_CO2_Emissions 1_1_1 (600)	1.85e+04	1.6e+04	1.03e+04	3.12e+03	4.35e+04	
Sector_Total_Subs_and_Tax_CO2_Emissions 1_1_2 (600)	2.18e+03	1.4e+03	2.25e+03	0	9.76e+03	
Sector_Total_Subs_and_Tax_CO2_Emissions 1_1_3 (600)	1.29e+04	1.11e+04	8.84e+03	558	3.33e+04	

Fonte: Elaboração Própria.