

Sensibilidade setorial e eficiência energética: um estudo dos setores ecoinovadores no Brasil

Mariana Armelin Duarte¹;
Natália Gabriela da Silva Cruz²;
Rosa Livia Gonçalves Montenegro³;
Admir Antonio Betarelli Junior⁴

Resumo: O presente estudo analisa a sensibilidade dos principais setores ecoinovadores brasileiros—Indústria Extrativa, Indústria de Transformação, Transporte, Energia e Gás— à redução no uso de insumos fósseis em seus processos produtivos. Utilizando um modelo de Equilíbrio Geral Computável (EGC) com um módulo de emissões e uma Matriz de Contabilidade Social (MCS), o estudo avalia como o aumento da produtividade nesses setores pode melhorar a eficiência energética, reduzir emissões de poluentes e impactar o bem-estar das famílias e a economia. Os resultados indicam que choques de produtividade aumentariam o PIB, o consumo das famílias e a balança comercial no longo prazo. A Indústria de Transformação destacar-se-ia com os maiores ganhos econômicos, mas também apresentaria aumento nas emissões de CO₂. Em contraste, os setores de Indústria Extrativa, Transporte e Energia mostrariam reduções nas emissões. Esses achados ressaltam a complexidade das interações entre produtividade, economia e sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: EGC; Ecoinovação; Indústria de Transformação

Abstract: This study examines the sensitivity of Brazil's key eco-innovative sectors—Extractive Industry, Manufacturing Industry, Transportation, Energy, and Gas—to the reduction in the use of fossil inputs in their production processes. Using a Computable General Equilibrium (CGE) model with an emissions module and a Social Accounting Matrix (SAM), the study assesses how productivity gains in these sectors can enhance energy efficiency, reduce pollutant emissions, and impact household welfare and the economy. The findings indicate that productivity shocks would increase GDP, household consumption, and the trade balance in the long run. The Manufacturing Industry would stand out with the most significant economic gains but would also see an increase in CO₂ emissions. In contrast, the Extractive Industry, Transportation, and Energy sectors would experience reductions in emissions. These findings highlight the complexity of the interactions between productivity, economic performance, and environmental sustainability.

Keywords: CGE; Eco-innovation; Manufacturing Industry

Código JEL: C68; O14; Q55

Área Temática: 10 - Empreendedorismo, redes, arranjos produtivos e inovação

¹ Doutoranda – PPGE/UFJF. E-mail: marmelinduarte@gmail.com.

² Doutoranda – PPGE/UFJF. E-mail: natalia.cruz@estudante.ufjf.br.

³ Professora Adjunta – PPGE/UFJF. E-mail: rosa.livia@ufjf.br.

⁴ Professor Adjunto – PPGE/UFJF. E-mail: admir.betarelli@ufjf.br.

1. Introdução

As questões climáticas têm ganhado destaque nos debates públicos globais, refletindo o paradoxo entre a necessidade de crescimento econômico e a preservação das condições essenciais humanas (Ribas, 2013). O cenário preocupante tem gerado crescente interesse em estudos sobre inovação ambiental, especialmente entre os formuladores de políticas (Berkhout, 2011; Borghesi et al., 2013; Costantini et al., 2015; Markard et al., 2012). Nesse sentido, pesquisas sobre o tema da ecoinovação representam uma estratégia fundamental, pois integra a dimensão ambiental às práticas empresariais e a promoção do uso eficiente de recursos. A ecoinovação é influenciada por uma complexa interação entre reguladores, empresas e outros atores (Del Río et al., 2010, Levidow et al., 2016). Os principais drivers desse processo incluem regulamentações ambientais, pressões de mercado e a busca por redução de custos das empresas (Miranda et al., 2023). Entretanto, a mitigação dos principais riscos ambientais depende não apenas dessas regulamentações, dos incentivos econômicos e mudanças institucionais, mas também de um contínuo progresso tecnológico e mais eficiente (Freeman, 1996). As inovações que são desenvolvidas a partir de fontes de energia renováveis podem impactar profundamente as perspectivas futuras de melhorias do meio ambiente.

Assim, a transição para práticas sustentáveis no cenário atual, com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas, não é apenas uma questão de conformidade, mas uma oportunidade para inovar ambientalmente. É, portanto, essencial entender como diferentes setores respondem aos *drivers* da ecoinovação, sobretudo às exigências em investimentos da P&D. Segundo Porter e Der Linde (1995), as empresas precisam reconhecer que a ineficiência representa um custo significativo principalmente quando não se busca integrar a melhoria ambiental com a produtividade de recursos. Nesse sentido, Łacka e Brzezicki (2022) fizeram uma análise de ecoinovação e ecoeficiência dos países da União Europeia (UE). Alguns de seus resultados apontaram que países menos desenvolvidos da UE fazem mudanças de curto e médio prazo no campo da infraestrutura, o que aumenta a ecoinovação. Além disso, ressaltam que a necessidade de sua introdução decorre não apenas da necessidade de respeitar a política do Acordo Verde da UE, mas também constituem uma oportunidade para melhorar a competitividade da economia e suas entidades.

Logo, as políticas voltadas para questões climáticas não devem se limitar à redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da energia. Ademais, devem incluir a limitação do uso de matérias-primas nos processos produtivos (Durán-Romero et al., 2020). Por exemplo, setores altamente regulamentados, como o energético, sofrem pressão para reduzir suas emissões de carbono, levando à adoção de tecnologias mais limpas e eficientes. Em 2022, o cultivo e a colheita de biomassa, a extração de recursos minerais e fósseis, além da transformação de materiais, combustíveis e alimentos, representaram mais de 55% das emissões globais de GEE, percentual que ultrapassa 60% quando incluídos os impactos das mudanças no uso da terra. Esse aumento em relação a 2015 indica que os esforços para mitigar as mudanças climáticas têm negligenciado os impactos relacionados ao uso de recursos materiais (IRP, 2024). A magnitude do crescimento da produção, impulsionada pelo consumo excessivo e pelo uso intensivo dos recursos naturais, mantém uma contínua pressão sobre esses recursos em termos absolutos (Abramovay, 2012).

No Brasil, conforme dados da PINTEC (2017), as inovações ambientais que visam a redução da contaminação do solo, da água, do ar e do ruído, bem como a reciclagem de resíduos, a diminuição da pegada de CO₂, a substituição de matérias-primas por alternativas menos poluentes e a transição de combustíveis fósseis para fontes de energia renovável, estão

concentradas em setores específicos: Indústrias extrativas, Indústria de Transformação, Energia e Gás e Serviços. Esses setores também lideram o consumo de energia e combustíveis no país. Em 2017 houve um aumento no uso de energia, especialmente na Indústria de Transformação, no Refino de Petróleo e no Transporte Terrestre, que se destacam como os principais consumidores. A Indústria de Transformação, em particular, responde por mais de 43% do consumo intermediário de energia, enquanto os setores de Transporte e Energia consomem 22,54% e 6,71%, respectivamente (IBGE, 2017).

Diante desse cenário, este trabalho busca realizar uma análise de sensibilidade dos principais setores — Indústria Extrativa, Indústria de Transformação, Transporte e Energia e Gás — que são os mais propensos a investir em inovação ambiental. O objetivo é avaliar se um aumento na produtividade desses setores pode contribuir para melhorar a eficiência energética e, conseqüentemente, reduzir a emissão de poluentes e melhorar a atividade econômica. Para atingir esses objetivos foi utilizada a metodologia de Equilíbrio Geral Computável (EGC). Tal método captura as repercussões dos choques entre os diversos agentes e setores econômicos (Burfisher, 2021). Portanto apresenta uma análise completa e intrincada utilizada para análises de preço, tributo e custos de mitigação.

O modelo utilizado incorpora um módulo de emissões, permitindo capturar as emissões por uso. Além disso, conta com uma Matriz de Contabilidade Social (MCS). Esses elementos proporcionam uma análise detalhada das emissões e das implicações econômicas e sociais, oferecendo uma visão abrangente das conseqüências das políticas ambientais e dos choques econômicos no contexto brasileiro. Este estudo está organizado em seis partes. Após esta introdução, a próxima seção aborda a fundamentação teórica sobre o meio ambiente. Em seguida, é oferecida uma contextualização específica para o Brasil. O método de Equilíbrio Geral Computável é detalhado na quarta parte. A quinta seção analisa os resultados e promove a discussão, enquanto a última parte apresenta as conclusões, limitações e sugestões para pesquisas futuras.

2. Revisão de literatura

Alguns estudos avaliam a existência de uma relação entreecoinovação e setores de atividades da indústria extrativa e de transformação, eletricidade e gás e serviços. Carvalho (2022), Sperotto e Tartaruga (2021), buscaram identificar as principais características, diferenças e intensidade na implementação de ecoinovações nas firmas brasileiras. Carvalho (2022) busca classificar as atividades econômicas, avaliando principalmente os quatro setores destacados acima, de acordo com o seu esforço ou propensão a ecoinnovar. Segundo a autora a relação entre ecoinovação e setor da indústria se justifica porque, se por um lado, a indústria é o principal agente no processo de inovação, por outro, também é o que mais polui em seus processos produtivos causando prejuízos ao meio ambiente.

De acordo com Sperotto e Tartaruga (2021), a partir dos dados da última Pintec (triênio 2015-2017) e sob a ferramenta do método *cluster heatmap* observou-se que as alternativas tecnológicas e oportunidades de ecoinovação são diferentes entre os setores. Em outras palavras, o grau de articulação e de comprometimento podem afetar de forma diferentes alguns setores. O estudo apontou que as indústrias de transformação em oposição às indústrias extrativas podem ter mais dificuldades de ecoinnovar. Isso se deve ao fato da dificuldade de cooperação com outras empresas ou instituições, falta de informações sobre a tecnologia e sobre o mercado e, ainda, diante uma escassez de serviços técnicos externos e elevados custos da inovação.

Hecksher *et al.* (2024), por sua vez, em um estudo preliminar, buscaram evidências sobre a relação entre produtividade dos setores de atividade no Brasil e desempenho ambiental. Os autores observaram que, dos setores da indústria que analisaram, os mais produtivos também são os que mais inovam em questões ligadas ao meio ambiente. Silva Jr. *et al.* (2015), apesar de não avaliarem inovações ambientais, analisaram a relação entre produtividade, inovação e estrutura de mercado da indústria de transformação química. Os autores concluíram que essas indústrias estão muito aquém da eficiência e que não há uma relação de fato entre inovações e produtividade, levando-as a um esforço de inovações apenas para atender exigências regulatórias.

Kirikkaleli e Adebayo (2024) avançaram ao avaliar os efeitos das finanças verdes, crescimento econômico, risco político, globalização social e inovação verde na qualidade ambiental no Brasil. O estudo usou dados abrangendo 2000 a 2018 e modelo ARDL dinâmico. Para avaliar a qualidade ambiental utilizaram o fator de capacidade de carga como uma *proxy*. Seus resultados mostraram relações positivas entre risco político, finanças verdes, inovação verde e qualidade ambiental e negativa entre crescimento econômico e qualidade ambiental. Os autores apontam que no Brasil, o nível esperado de inovação ainda não foi alcançado devido à falta de financiamento de P&D, bem como à incapacidade dos inovadores brasileiros de transferir suas tecnologias. Desse modo, acreditam que ampliar essa capacidade de inovações verdes no futuro próximo terá um impacto significativo na qualidade ambiental do Brasil.

Por outro lado, outros estudos se concentram em analisar a sensibilidade a políticas climáticas. Esses estudos se valem da metodologia de Equilíbrio Geral Computável (EGC) para as análises dado sua capacidade de resposta. Maluf (2014) aponta que as análises feitas por meio de modelos EGC tendem a ser mais robustas, especialmente quando esses modelos são aplicados em estudos de sensibilidade. Essa abordagem permite compreender de forma mais detalhada os impactos das hipóteses mais relevantes que podem influenciar os resultados do modelo em avaliação. Nesse sentido, Weitzel (2017) investiga o impacto da incerteza nos custos de mitigação do CO₂ e nas mudanças no sistema de energia, revelando que as diferenças de custo entre políticas climáticas são mais significativas do que as variações tecnológicas, especialmente em nível regional. Haddad *et al.* (2019) analisam a bioeconomia florestal na União Europeia e concluem que uma transição para essa bioeconomia poderia aumentar a produção florestal e reduzir emissões, desde que acompanhada por políticas e inovações tecnológicas adequadas.

Liang *et al.* (2022) exploram como a combinação de impostos sobre o carbono, comércio de carbono e avanços tecnológicos pode reduzir significativamente as emissões sem afetar negativamente o crescimento econômico, ao contrário da precificação do carbono isoladamente, que poderia levar a recessões econômicas. Zhu *et al.* (2023) avaliam o impacto das tecnologias de economia de energia em indústrias intensivas, como cimento e aço, e encontram que a adoção dessas tecnologias pode aumentar a produção e reduzir os preços, com o cenário de Implementação Generalizada sendo mais vantajoso economicamente. Por fim, Alexeeva-Talebi *et al.* (2012) mostram que a desagregação setorial detalhada é crucial para revelar variações nos impactos de políticas climáticas, que podem ser ocultadas por uma agregação excessiva dos dados. Eles destacam a necessidade de precisão nas elasticidades de *Armington* e nas especificações tecnológicas para obter análises mais robustas, embora o nível macroeconômico ainda possa ser bem avaliado com dados agregados convencionais.

Além disso, é importante avançar frente aos efeitos sobre a produtividade na adoção de inovações ambientais conforme Santos *et al.* (2023). Os autores analisaram os efeitos das inovações ambientais sobre a produtividade de empresas do setor da indústria de transformação

em Minas Gerais considerando o período de 2000 a 2014. Nesse caso, entretanto, os autores utilizaram um modelo de dados em painel e buscaram observar como a relação dessas inovações nos processos de produção mais sustentável poderiam afetar os ganhos de produtividade das firmas com objetivo de alcançar estratégias e políticas mais sustentáveis. Assim, a literatura que trabalha modelos de EGC e ecoinovações ainda é incipiente, sobretudo em análises de sensibilidade setorial. Nesse sentido, buscamos preencher essa lacuna ao analisar choques de produtividade sobre setores ecoinovadores e altamente poluentes para identificar como esse aumento da produtividade pode trazer ganhos de eficiência energética.

3. Contexto brasileiro

O Brasil, de forma histórica, tem se engajado ativamente no combate às mudanças climáticas, assumindo posição pioneira ao ser o primeiro país a ratificar a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) (Ribas, 2013). Assinando o acordo de Paris em 2016, a proposta brasileira busca reduzir as emissões em 37% até 2025, em relação aos níveis de 2005, e em 43% até 2030. Para alcançar essas metas, o país tomou medidas relacionadas ao setor florestal como, redução do desmatamento ilegal da Amazônia até 2030. Além disso, se comprometeu com a transição de sistemas de energia baseado em fontes renováveis (Carvalho, 2022). E se destaca por ter 44% de sua matriz energética renovável, com destaque para os setores de derivados da cana-de-açúcar e hidrelétrico (EPE, 2021).

Inserida nessa mudança na matriz energética, e por consequência na transição energética, estão programas para a expansão das fontes renováveis. Especificamente no setor de combustíveis, o Brasil tem um histórico positivo na criação de programas estratégicos. Na década de 1970, em resposta à crise do petróleo, o país buscou autonomia em relação aos combustíveis fósseis, lançando o Programa Brasileiro de Álcool (Proálcool). Esse programa impulsionou a produção de biocombustíveis, posicionando o Brasil como o segundo maior produtor mundial, atrás apenas dos Estados Unidos (Khanna et al., 2016; Nuñez & Önal, 2016; OCDE-FAO, 2023). Em 2003, já começa a ser pensado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) contudo, a regulamentação marco que inseriu o biodiesel na matriz energética nacional foi a Medida Provisória (MP) nº214/2004. E como consequência dessa medida, o PNPB foi lançado. O Programa leva em consideração a diversidade de oleaginosas do país, assim como a qualidade e a competitividade frente aos demais combustíveis. Mais recente, em 2024, foi criado o Programa de Mobilidade Verde (MOVER), que busca melhorar vários aspectos do setor automotivo e logístico no Brasil (Brasil, 2024).

Contudo, as inovações ambientais no Brasil não se limitam ao setor automotivo. Segundo dados da PINTEC (2017), de um total de 39.329,2 empresas que implementam inovações ambientais, 34.395,64 pertencem ao setor da Indústria de Transformação, 4.428,37 aos Serviços, 336,18 às Indústrias Extrativas e 169 ao setor de Eletricidade e Gás. Entretanto, entre as empresas que reduzem o impacto ambiental através da substituição de matérias-primas, todos os quatro setores consideram o impacto da inovação sobre o meio ambiente como irrelevante. No caso da substituição de energia de combustíveis fósseis por energia renovável, o setor de Eletricidade e Gás se destaca, com 27,45% das empresas afirmando que o impacto ambiental da inovação é alto e 43,82% que é médio. Nos outros setores, cerca de 60% das empresas relatam que a tecnologia implementada é irrelevante (IBGE, 2017).

As inovações voltadas para a redução da contaminação do solo, água, ruído ou ar são mais consideradas de alto impacto no setor da Indústria Extrativa (44,58%). No setor da Indústria de Transformação, 28,85% acreditam que o impacto seja alto e 24,10% que é médio. No setor de

Eletricidade e Gás, mais de 57% consideram o impacto baixo ou irrelevante. Já a inovação na reciclagem de resíduos, águas residuais ou materiais mostra maior impacto nos setores da Indústria Extrativa e de Transformação, sendo baixo ou nulo para o setor de Eletricidade e Gás. Por fim, ao avaliar o impacto da inovação na redução da 'pegada' de CO₂, mais de 55% das empresas dos setores da Indústria de Transformação e Eletricidade e Gás consideram a inovação irrelevante. Apenas o setor da Indústria Extrativa apresenta, em pouco mais de 57% das respostas, um impacto ambiental alto (IBGE, 2017).

O consumo interno de energia, considerando os setores de combustíveis carvão mineral e petróleo e gás, representam, de 2010 a 2021, cerca de 7% no total do consumo interno no país. Entretanto, é válido ressaltar que houve um aumento no consumo de energia de 188,4% no mesmo período (IBGE, 2024). A Tabela 1 reporta os setores econômicos mais demandantes de energia no país.

Tabela 1 – Setores produtivos que mais consomem energia no Brasil (Part. %)

Setores econômicos	2010	2013	2017	2021
Transporte aéreo	3.16	3.41	3.42	2.23
Transporte terrestre	19.62	16.54	22.84	19.10
Refino de petróleo e coquerias	40.77	48.32	33.89	38.85
Transporte aquaviário	0.52	0.36	0.55	0.59
Energia elétrica, gás natural e outras utilidades	4.81	5.40	4.47	6.41
Extração de carvão mineral e de minerais não-metálicos	0.35	0.30	0.34	0.37
Extração de minério de ferro, inclusive beneficiamentos e a aglomeração	0.71	0.63	1.15	2.21
Extração de minerais metálicos não-ferrosos, inclusive beneficiamentos	0.36	0.32	0.43	0.32
Produção de ferro-gusa/ferroligas, siderurgia e tubos de aço sem costura	3.05	1.82	3.27	2.62
Extração de petróleo e gás, inclusive as atividades de apoio	3.44	2.72	3.53	2.45
Produção florestal; pesca e aquicultura	0.19	0.19	0.21	0.18
Atividades de vigilância, segurança e investigação	0.14	0.14	0.18	0.16
Metalurgia de metais não-ferrosos e a fundição de metais	0.88	0.61	0.89	0.95
Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	2.84	2.44	3.91	3.16
Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	1.16	0.93	1.33	1.12
Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	0.48	0.42	0.63	0.62
Água, esgoto e gestão de resíduos	0.29	0.22	0.30	0.29
Fabricação e refino de açúcar	0.54	0.38	0.42	0.52
Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	2.81	2.78	4.11	3.98
Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	0.57	0.60	0.54	0.60
Resíduo	13.33	11.45	13.60	13.26
Soma	100.00	100.00	100.00	100.00

Fonte: Sistema de Contas Nacionais do (IBGE, 2024).

Nota: Os setores energéticos contemplam carvão mineral; Petróleo, gás natural e serviços de apoio; Combustíveis para aviação; Gasoálcool, Óleo combustível, Diesel, Etanol e outros biocombustíveis

No ano da PNAD, 2017, destacam-se a atividade de Refino de petróleo e coquerias (33,89%),

Transporte terrestre (22,84%), Energia elétrica, gás natural e outras utilidades (4,47%), Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores (4,11%) e Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita (3,91%). Ou seja, as atividades da Indústria de transformação representam 43,53% do total de consumo intermediário de energia no país. Com menor grau de absorção, algumas atividades da cadeia de alimentos também se destacam, tais como a Agricultura, inclusive o apoio à agricultura (3,16%), pecuária (1,12%) e Produção florestal; pesca e aquicultura (0,18%).

Assim, diante dos esforços para implementar processos mais eficientes em termos de recursos e práticas ambientais, é possível inferir que o Brasil ainda está em um estágio inicial rumo àecoinovação. Embora haja iniciativas nesse sentido, o país necessita de investimentos mais robustos em P&D e tecnologias avançadas, especialmente para reduzir o consumo de energia. Conforme Sperotto e Tatataruga (2021), uma análise setorial indica que as ecoinovações no Brasil são, em sua maioria, de baixa complexidade e baseadas em técnicas de fim de linha. Portanto, é urgente fortalecer políticas públicas e promover avanços tecnológicos mais sofisticados. O modelo EGC foi escolhido como metodologia por permitir uma avaliação detalhada de como aumentos de produtividade nos principais setores podem melhorar a eficiência energética, reduzir emissões e impulsionar a economia, destacando o impacto das ecoinovações nesses resultados.

4. Metodologia

O modelo utilizado para a pesquisa é um modelo multissetorial de Equilíbrio Geral Computável (EGC). Baseado na Matriz de Insumo Produto (MIP) brasileira de 2015, composta por 67 setores e 127 produtos, utilizando 3 fatores primários para produção: terra, capital e trabalho (IBGE, 2024). Os parâmetros comportamentais foram calibrados conforme (Betarelli Junior et al., 2021; Betarelli Junior, et al., 2020). Por exemplo, o parâmetro de Frisch foi calibrado com o valor de -1,94 conforme (Almeida, 2008). As elasticidades de gastos foram obtidas de Hoffmann et al. (2010). Por outro lado, para os mecanismos recursivos, aplica-se o valor de 4,8 para a elasticidade do investimento, conforme Perobelli (2004); e 0,66 para a elasticidade salarial, seguindo Gonzaga e Corseuil, (2001). Além disso, assume-se um estado estacionário de 2,2%, uma proporção de investimentos físicos em relação ao estoque físico de capital de 8,5%, o que resulta em uma taxa de depreciação cerca de 6%.

Além disso, o modelo utiliza uma Matriz de Contabilidade Social (MCS), que é elaborada a partir da matriz de insumo-produto e segue o princípio da contabilidade de dupla entrada como pode ser observado no Quadro 1. Esta matriz captura as receitas e despesas, possibilitando a análise dos fluxos econômicos entre diversos setores institucionais, como empresas, famílias, governo e o resto do mundo (Fochezatto, 2011). Os modelos EGC com módulo fiscal e fluxo de pagamentos fornecem uma análise detalhada da origem, alocação e transferência de renda entre agentes econômicos importantes (Cardoso, 2016; Martins, 2021).

Quadro 1 – Estrutura da MCS

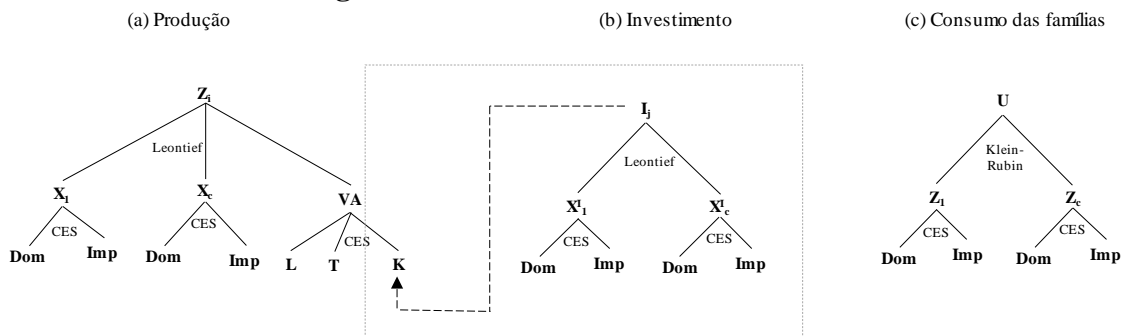
		Setores Produtivos	Valor Adicionado			Taxa	Conta Corrente			Conta Capital	Restante do Mundo	Total Rcebido	
		1...i...N	L	R	K	T _x	F	H	G	Investimento	Setor Externo		
Setores Produtivos	1...i...N	Consumo Intermediário					Consumo Final			FBCF	Exportações	D_i	
Valor Adicionado	L	VA pago pelos setores produtivos										L	
	R											R	
	K											K	
Taxa	T	T_i					T_H	T_G	T_I		T_E	T	
Conta Corrente	F		VA recebido pelas instituições			T	Renda de Propriedade e Transferências Correntes				Transferências Correntes recebidas do RM		Y_F
	H												Y_H
	G												Y_G
Conta Capital	Invest.						Poupança			Transferências de Capital	Transferências de Capital recebidas do RM	S	
Restante do Mundo	Setor Externo	Importações	Renda enviada ao RM				Transferências Correntes enviadas ao RM			Transferências de Capital enviadas ao RM		M	
Total pago		Z_i	L	R	K	T	C_F	C_H	C_G	I	C_E		

Fonte: Martins (2021).

4.1 Estrutura teórica

A demanda dos agentes econômicos é modelada por um sistema de equações, assumindo-se que eles são otimizadores de custos e tomadores de preços (Horridge, 2003). Esses conjuntos de equações determinam a relação entre oferta e demanda, advinda desse comportamento otimizador e das condições de equilíbrio de mercado (Domingues & Haddad, 2005). Os setores econômicos se estruturam em uma função de produção que relaciona a composição dos produtos fabricados, a demanda por insumos intermediários e fatores de produção, interconectados pelo nível de atividade setorial. Ao empregar uma função de agregação CET (Constant Elasticity of Transformation), os setores têm a capacidade de ajustar suas ofertas para se adequar a mercados mais vantajosos, optando, por exemplo, por priorizar o mercado externo em vez do mercado nacional (Perobelli et al., 2017). Adicionalmente, a estrutura de demanda dos produtores é representada por funções do tipo Leontief e CES, conforme mostrado na Figura 1, como evidenciado por Dixon (1982).

Figura 1 – Estrutura teórica aninhada



Fonte: Betarelli Junior et al. (2020).

No primeiro nível da estrutura de produção, as indústrias geram um ou mais bens combinando insumos intermediários (X_i) e fatores primários (VA) em proporções fixas, conforme estabelecido por uma função Leontief. No segundo nível, cada composto é derivado de uma função CES, que permite a substituição imperfeita entre os insumos ou fatores de produção devido às suas características distintas (Armington, 1969). Essa substituição é influenciada pelos preços relativos dos insumos domésticos (Dom) e importados (Imp), aplicando-se tanto à produção quanto ao investimento. Na produção, o valor agregado resulta da combinação imperfeita dos fatores de produção: trabalho (L), terra (T), e capital (K). A estrutura hierárquica

de produção em dois níveis é descrita por Betarelli Junior et al. (2020) como:

$$Z_i = \min\left(\frac{X_i}{a_i^X}, \frac{V_i}{a_i^V}\right) \quad (1)$$

A variável Z_i denota o produto; os termos a_i^X e a_i^V a eficiência produtiva de cada fator; X_i os insumos intermediários e V_i é o valor adicionado, respectivamente caracterizados como:

$$X_i = \left[\sum_{s=1}^s \delta_{s,i} X_{s,i}^{-\rho^X}\right]^{-\frac{1}{\rho^X}} \quad \forall \quad s = (D, I) \quad (2)$$

tal que:

$$V_i = \left[\sum_{f=1}^f \delta_{f,i} V_{f,i}^{-\rho^V}\right]^{-\frac{1}{\rho^V}} \quad \forall \quad f = (L, T, K) \quad (3)$$

em que δ é um parâmetro que satisfaz $\sum_{i=1}^f \delta_{f,i} = 1$ ou $\sum_{s=1}^s \delta_{s,i} = 1$ e ρ expressa um parâmetro de substituição entre os fatores X_i e V_i pela indústria. A formulação teórica é uniforme para todo os setores, apresentando variações apenas nas elasticidades de substituição e nas proporções de insumos e fatores primários (Betarelli Junior et al., 2020).

O padrão de demanda das famílias adota um modelo hierárquico análogo ao da demanda de investimento, utilizando as funções Klein-Rubin ou Stone-Geary para categorizar os diferentes bens, o que culmina na formação do Sistema Linear de Gastos (LES) (Domingues & Haddad, 2005; Proque, 2019). Nesse modelo, uma parte fixa do orçamento das famílias é alocada para necessidades básicas, enquanto a parte restante, conhecida como "gastos de luxo", é variável e ajusta-se conforme a renda, gerando diferentes combinações de bens consumidos. A função LES é considerada quase-homotética, ou seja, as quantidades dos bens demandados acima do nível de subsistência variam de maneira proporcional à renda. As proporções dos gastos com bens essenciais aumentam quando a renda diminui e diminuem quando a renda aumenta (Betarelli Junior et al., 2020; Burfisher, 2021).

O modelo de EGC empregado neste estudo possibilita a análise dos efeitos das políticas sobre as emissões de CO₂, sendo uma abordagem crescente na avaliação de políticas ambientais (Magalhães, 2013). Conta com um módulo ambiental baseado no MMRF-GREEN de Adams et al., (2002), que converte preços ou impostos relacionados à tributação de carbono em alíquotas ad-valorem, integrando-os ao modelo. Esse módulo calcula as variações nas emissões com base em variáveis como consumo de combustíveis, nível de atividade e gasto das famílias (Adams et al., 2002; Magalhães, 2013). Os dados setoriais de emissões utilizados vêm do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases com Efeito de Estufa (SEEG, 2022) e avaliam todas as fontes de emissões — Agropecuária, Energia, Mudanças de Uso da Terra, Processos Industriais e Resíduos — com o mesmo nível de detalhe presente nos inventários de emissões.

De acordo com o Monash Multi-Regional Forecasting Model (MMRF) de Adams et al. (2010), as emissões resultantes da queima de combustíveis são modeladas como sendo diretamente proporcionais ao consumo de combustível (ou seja, indústrias e domicílios). Portanto, a variação ordinária em toneladas de CO₂ emitidas pelo uso de combustível ($\Delta G_{e,u}$) é definida como:

$$\Delta G_{e,u} = 0.01 * g_{e,u} * G_{e,u}$$

onde $g_{e,u}$ representa a variação percentual na quantidade demandada de cada combustível (e) por cada usuário (u) e $G_{e,u}$ é o volume de toneladas de CO2 emitidas pela queima de combustível. Existem oito tipos de combustíveis (e), como lenha proveniente de florestas, extração de carvão, combustível de aviação, gasolina, petróleo fóssil, diesel, etanol e biocombustível, e outros produtos refinados. Por sua vez, os usuários (u) são divididos entre 67 indústrias e domicílios (Magalhães, 2013).

4.2 Encerramentos e simulação

O cenário de *baseline* é construído com base nas variações reais da demanda final até 2022 e nas projeções até 2040. A simulação é realizada em duas fases: inicialmente, reproduz o cenário de referência (*business-as-usual*) de 2016 a 2040, conforme descrito por Betarelli Junior et al. (2021). Em seguida, aplicam-se os choques de política conforme especificado na Tabela 2, de acordo com as projeções da Estratégia Federal de Desenvolvimento do Brasil para 2020 a 2031 (Brasil, 2020).

Tabela 2 – Choques no fechamento da baseline, em variações reais (%)

Indicadores econômicos	Observado							Prospectivo*	
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023-2027 (a.a.)	2028-2040 (a.a.)
PIB	-3.3	1.3	1.8	1.2	-3.3	5.0	2.9	2.2	2.2
Consumo das famílias	-3.8	2.0	2.4	2.6	-4.6	3.7	4.3	-	-
Gastos do governo	0.2	-0.7	0.8	-0.4	-3.7	3.5	1.5	0.0	2.2
Exportações	0.9	4.9	4.1	-2.6	-2.3	5.9	5.5	-	-
Investimentos	-12.1	-2.6	5.2	4.0	-1.8	16.5	0.9	-	-
Emprego Nacional	-1.6	1.3	2.7	1.6	-6.4	-	-	-	-
Emprego Tendencial	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2	2.2
População	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Fonte: IBGE (2021, 2022); Brasil (2020) e OCDE-FAO (2023).

Nota: * Valores ocultos ("-") denotam que as variáveis são endógenas no período.

Para o experimento de simulação, considera-se um cenário em que os principais setores que investem em inovação ambiental no Brasil recebem choques de produtividade de 1%. Esses setores incluem a Indústria Extrativa, a Indústria de Transformação, o Transporte e a Energia. No setor de extrativa consideramos as atividades de carvão mineral não metálico, petrogás, minério de ferro e mineração de metais não ferrosos. Na indústria de transformação, o choque é dado nas atividades de refino do petróleo, produção metálica, refino de açúcar, produção mineral não metálica, fabricação de aço e derivados e metais não ferrosos. Já para o setor de transportes, o choque é sobre as principais atividades de transporte terrestre, aquaviário e aéreo. Essas atividades foram selecionadas segundo observações dos setores que mais consomem energia dentro do Sistema de Contas Nacionais. Ressalta-se que os choques serão aplicados para esses setores, apenas para o insumo combustível, uma vez que se pretende avaliar eficiência energética. Assume-se que a produção aumentará sem a necessidade de mais insumos, implicando que um ganho em eficiência energética estimularia tanto a economia quanto a adoção de práticas de baixa emissão de carbono. A simulação avaliará o impacto econômico e social desses choques, bem como as possíveis variações nas emissões de gases de efeito estufa, proporcionando uma visão abrangente dos efeitos desses investimentos no contexto brasileiro.

5. Resultados

5.1 Macroeconômicos

Com base nos objetivos apresentados no artigo, as projeções dos ganhos de produtividade nos setores com maior intensidade deecoinovação indicaram desvios percentuais em relação ao cenário de referência da economia, acumulados anualmente. A Tabela 3 apresenta esses desvios acumulados (%) para os setores de Indústria Extrativa, Indústria de Transformação, Transporte e Energia, associados aos ganhos de eficiência energética. A análise dessas variáveis visa proporcionar uma compreensão abrangente dos impactos desses choques simulados no modelo sobre as variáveis macroeconômicas. Para todos os setores, projeta-se um aumento do PIB em relação ao cenário de referência, com destaque para o setor da Indústria de Transformação, que apresentaria as maiores variações: 0,62% em 2030 e 0,13% em 2040. O efeito líquido dos cenários resultaria em um acréscimo de 0,17% no PIB em comparação ao *baseline*. Em resumo, o resultado indica que, para cada 1% de aumento na produtividade, o PIB apresentaria uma variação proporcionalmente menor, sugerindo uma elasticidade de 0,17 no longo prazo. Isso implica que o impacto do choque de produtividade não se transfere integralmente ao PIB, possivelmente devido à presença de moderadores econômicos, como ineficiências e rigidezes no mercado de trabalho.

O deflator do PIB indicaria valores positivos para todos os setores analisados em 2030. Contudo, esses valores diminuiriam e se tornariam negativos no médio e longo prazo, com um efeito líquido de 1% negativo, refletindo uma redução dos preços agregados da economia. Tal comportamento ocorre porque ganhos de produtividade geralmente aumentam a eficiência no uso de recursos, permitindo que os setores produzam mais com os mesmos ou menores custos, o que tende a reduzir os preços dos bens e serviços.

A partir dos resultados apresentados, destaca-se o papel da ecoeficiência, no qual representa um indicador de sustentabilidade, em que promove a mudança de paradigma do desenvolvimento tradicional para o que pode ser chamado de desenvolvimento sustentável. Ou seja, na criação de mais produtos e serviços com menos recursos e menor poluição. Assim, com a redução dos custos de produção, há um aumento da oferta, o que pode exercer uma pressão descendente sobre os preços. Esse efeito inicial pode resultar em uma balança comercial negativa no curto prazo, devido ao aumento dos preços internos e possíveis impactos sobre as exportações.

No entanto, a maior acessibilidade dos produtos locais em comparação aos importados, conforme modelado pela função CES, contribui para uma posição superavitária na balança comercial brasileira a longo prazo. A competitividade dos produtos brasileiros, impulsionada pelos ganhos de produtividade, tenderia a aumentar as exportações e melhoraria a balança comercial, superando o impacto negativo observado no curto prazo. Esse resultado corrobora os achados de Ahmad e Jabben (2024) para União Europeia (UE). Segundo os autores, que fizeram uma análise de 1995 a 2014 para alguns países da UE, o enriquecimento da inovação verde não apenas melhora diretamente a ecoeficiência, mas também modera positivamente a influência da abertura econômica e da diversificação de exportações de produtos relacionados à ecoeficiência. Logo, é possível observar a capacidade de alinhamento do progresso econômico com as metas globais de sustentabilidade.

Além disso, após o choque de produtividade, há um aumento inicial no investimento para os quatro setores, seguido por uma possível diminuição no longo prazo devido aos retornos

marginais decrescentes e ao ajuste econômico geral. A acumulação de capital, a médio prazo dado seu efeito defasado, estimula mais investimento. Entretanto à medida que o capital adicional se torna menos produtivo, o investimento pode diminuir e até se tornar negativo. O aumento de produtividade impactaria o salário real e o emprego. No curto prazo, os salários seriam negativos em todos os cenários, mas variariam em 0,93% até 2040 em relação ao cenário de referência, devido ao descompasso entre produtividade e demanda final. Com maior produtividade, as empresas poderiam produzir mais com os mesmos recursos, incluindo mão de obra, o que, inicialmente, resultaria em excesso de oferta de trabalho e pressão para redução salarial. Com o ajuste econômico, a produção e a demanda por trabalho aumentariam, elevando os salários.

Entretanto, o aumento da produtividade poderia reduzir o número total de empregos, pois as empresas precisariam de menos trabalhadores para alcançar seus níveis de produção. Destarte, o ganho de produtividade dos quatro setores também provocaria ganhos para as famílias. As quais teriam um efeito líquido de aumento do consumo, em relação ao cenário de referência, 1,07%. Do mesmo modo, no longo prazo, o consumo das famílias é elástico em relação ao choque de produtividade, responderia mais que proporcionalmente ao ganho de produtividade. Isso pode estar atrelado ao fato de que os salários aumentariam e os preços dos bens diminuiriam, resultando em um aumento da renda disponível. Outrossim, haveria aumento da utilidade das famílias com um efeito líquido de 0,32% em 2040.

Em suma, os choques de produtividade nos setores brasileiros com maior intensidade deecoinovação gerariam impactos positivos no PIB, consumo das famílias e na balança comercial brasileira a longo prazo, apesar de uma resposta menos que proporcional do PIB, sugerindo elasticidade limitada. Nesse caso, a eficiência energética reduziria os custos de produção, resultando em menor pressão sobre os preços, o que inicialmente poderia afetar negativamente a balança comercial, mas favoreceria a competitividade e as exportações no longo prazo. Por sua vez, no mercado de trabalho, os ganhos de produtividade aumentariam os salários reais e o consumo, embora pudessem reduzir o nível de emprego, refletindo um ajuste entre a oferta de trabalho e a nova demanda induzida pelos ganhos de eficiência. É válido ressaltar que os investimentos em tecnologias sustentáveis não apenas promovem eficiência energética e ganhos de produtividade, mas também ampliam o potencial exportador, ao atender às crescentes demandas por produtos e processos de baixo impacto ambiental nos mercados globais (COSTANTINI e MAZZANTI, 2012; SU *et al.* (2023). No contexto brasileiro, os ganhos obtidos no consumo das famílias e nos resultados reais, mesmo diante dos ajustes no nível de emprego, indicam que a ecoinovação pode atuar como um motor para um crescimento mais equilibrado e sustentável (Ervilha *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2023).

Tabela 3 – Efeitos sobre as principais variáveis macroeconômicas (*Baseline = 2024*)

Variáveis	Unidade	Extrativa			Transformação			Transporte			Energia			Efeito líquido
		2022-2030	2022-2035	2022-2040	2022-2030	2022-2035	2022-2040	2023-2030	2023-2035	2023-2040	2023-2030	2023-2035	2023-2040	2023-2040
PIB	Var. %	0.02	0.02	0.01	0.62	0.53	0.13	0.14	0.12	0.03	0.01	0.01	0.00	0.17
Investimento	Var. %	0.06	0.04	-0.02	1.66	1.18	-0.70	0.36	0.26	-0.16	0.03	0.02	-0.02	-0.87
Consumo das famílias	Var. %	0.02	0.02	0.00	0.64	0.56	0.10	0.14	0.13	0.02	0.01	0.01	0.00	1.07
Utilidade das famílias	Var. %	0.05	0.04	0.00	1.14	0.19	0.29	0.05	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.32
Emprego agregado	Var. %	0.04	0.02	-0.01	0.93	0.41	-0.37	0.20	0.09	-0.08	0.02	0.01	-0.01	-0.46
Salário real	Var. %	-0.02	0.01	0.02	-0.46	0.25	0.73	-0.09	0.06	0.17	-0.01	0.01	0.02	0.93
Estoque de capital	Var. %	0.01	0.02	0.02	0.21	0.57	0.57	0.05	0.12	0.12	0.00	0.01	0.01	0.72
Renda total do governo	Var. %	0.04	0.01	-0.02	1.04	0.24	-0.69	0.23	0.06	-0.15	0.02	0.00	-0.02	-0.86
Despesa total do governo	Var. %	0.00	0.00	0.00	0.12	0.03	-0.01	0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.01	-0.03
Receita tributária do governo	Var. %	0.04	0.01	-0.02	0.93	0.21	-0.68	0.21	0.05	-0.14	0.02	0.00	-0.02	-0.84
Deflator do PIB	Var. %	0.02	-0.01	-0.03	0.48	-0.24	-0.79	0.10	-0.06	-0.18	0.01	-0.01	-0.02	-1.00
Termos de comércio	Var. %	0.00	-0.01	-0.03	0.18	-0.14	-0.49	0.03	-0.04	-0.12	0.00	0.00	-0.01	-0.63
Exportações	Var. %	0.00	0.01	0.03	-0.20	0.14	0.53	-0.03	0.04	0.13	0.00	0.00	0.01	0.68
Importações	Var. %	0.03	0.01	-0.01	0.70	0.37	-0.24	0.15	0.08	-0.06	0.01	0.01	-0.01	-0.31
Balança comercial	Var. %	-0.03	0.00	0.04	-0.91	-0.23	0.77	-0.18	-0.03	0.77	-0.02	0.00	0.77	1.58

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: *desvio % acumulado em relação ao cenário base.

5.2 Setoriais

Além disso, os ganhos de eficiência produtiva promoveriam mudanças significativas nos setores econômicos (Tabela 4). Embora os setores que receberam choques apresentassem aumentos na produção, o impacto mais relevante seria observado na intervenção feita na Indústria de Transformação, que experimentaria a maior variação em relação ao cenário base. Da mesma forma, o setor da agropecuária apresentaria aumento da produção com um efeito líquido de 0,45% em 2040. Já o setor da indústria extrativa elevaria sua produção em resposta a todos os choques, destacando-se o minério de ferro como o produto com o maior aumento de produção. Em contrapartida, o setor de petróleo, gás natural e serviços de apoio apresentaria uma redução na produção em três dos quatro cenários considerados. O comportamento supracitado ocorreria porque, com o aumento da produtividade nesses setores, a dependência por combustíveis fósseis seria reduzida, resultando em uma diminuição na produção desses insumos. O setor de Alimentos também apresentou aumento da produção com uma variação de 0,37% para o setor.

No longo prazo, todos os setores, exceto o de bens de consumo duráveis, e o setor de bens intermediários, para o choque de produtividade no transporte, teriam ganhos de produtividade. Esse resultado adverso do setor de bens duráveis poderia ocorrer porque, apesar da redução de custos e do aumento da competitividade dos produtos brasileiros, a concomitante redução do emprego e o aumento dos salários reduziria a renda disponível geral. Essa diminuição da renda afetaria negativamente o poder de compra e a demanda por bens de consumo duráveis. Além disso, a reorientação da demanda para produtos mais competitivos poderia impactar desfavoravelmente a produção desses bens, levando a uma redução na produção a longo prazo.

A redução na produção de bens intermediários, observada quando há um choque de produtividade nos setores de transporte, pode ser explicada pela menor demanda por combustíveis, decorrente do aumento da eficiência no transporte. Esse ganho de eficiência reduz a necessidade de combustíveis, que são insumos essenciais para vários setores industriais. Como resultado, uma menor produção de combustíveis pode levar a um aumento no custo desses insumos ou a uma limitação no seu uso, afetando a produção de bens intermediários que deles dependem.

A atividade de serviços, que engloba os transportes, apresentaria uma variação reduzida em relação ao *baseline* de 0,06% para os quatro choques. Nota-se que, quando o aumento de produtividade é aplicado ao setor de transporte, a produção de combustíveis reduzir-se-ia, enquanto a produção dos serviços, como transporte rodoviário e ferroviário de carga e transporte metroferroviário de passageiros, aumentaria. Isso se deve ao fato de que, com a implementação de maior eficiência nos veículos, a demanda por combustíveis fósseis diminuiria, uma vez que esses veículos operariam de maneira mais eficiente, necessitando de menos insumos fósseis (Hawkins et al., 2013; Krause et al., 2020; Tsemekidi Tzeiranaki et al., 2023).

Em resumo, os ganhos de eficiência produtiva promoveriam mudanças nos setores econômicos analisados. O destaque, por sua vez seria na Indústria de Transformação devido a maior variação em relação ao cenário base, refletindo o impacto mais intenso dos choques. O setor agropecuário veria um aumento na produção, enquanto a indústria extrativa também responderia positivamente, especialmente com o minério de ferro. Em contraste, o setor de petróleo e gás apresentaria uma redução na produção, devido à menor dependência de combustíveis fósseis. O setor alimentício também experimentaria crescimento. A longo prazo,

a maioria dos setores se beneficiaria de ganhos de produtividade, com exceção de bens de consumo duráveis e bens intermediários no caso do transporte. A redução de emprego e o aumento dos salários poderiam reduzir a demanda por bens duráveis, impactando negativamente sua produção. Por fim, o setor de serviços de transporte seria afetado por uma variação pequena, com a maior eficiência dos veículos diminuindo a necessidade de combustíveis fósseis, mas aumentando a demanda por serviços de transporte. Lena, Pasurka e Cucculelli (2022) em uma análise do crescimento da produtividade das indústrias italianas frente a políticas de regulamentação ambiental, encontraram resultados controversos. Segundo os autores, as empresas de vários setores fizeram grandes avanços na redução das emissões atmosféricas. Ao reduzir as emissões atmosféricas, algumas indústrias adotaram investimentos em estratégia de tecnologia ambiental (ou seja, progresso técnico), enquanto outras adotaram medidas de gestão de melhores práticas (ou seja, eficiência aprimorada).

Tabela 4 – Efeitos setoriais dos choques de sensibilidade (*Baseline* = 2024)

Setores	Extrativa	Transformação	Transporte	Energia	Efeito líquido
	2022-2040	2022-2040	2023-2040	2022-2040	2022-2040
Produção					
Agropecuária	0.01	0.35	0.09	0.01	0.45
Indústria extrativa	0.04	0.32	0.01	0.00	0.36
Carvão mineral	0.03	-0.13	0.08	-0.08	-0.10
Petróleo, gás natural e serviços de apoio	-0.02	0.08	-0.22	-0.02	-0.18
Minério de ferro	0.03	0.38	0.09	0.01	0.51
Alimentos	0.01	0.27	0.08	0.01	0.37
Café em grão	0.02	0.65	0.14	0.01	0.82
Bens de consumo	0.00	0.09	0.03	0.00	0.13
Bens de consumo duráveis	-0.01	-0.21	-0.04	-0.01	-0.26
Bens intermediários	0.00	0.21	-0.04	0.00	0.16
Combustíveis para aviação	-0.09	0.54	-0.32	-0.01	0.12
Gasoálcool	-0.01	0.25	-0.12	-0.01	0.11
Naftas para petroquímica	-0.01	0.55	-0.14	-0.01	0.39
Etanol e outros biocombustíveis	-0.04	-0.43	-0.15	-0.01	-0.63
Adubos e fertilizantes	0.01	0.36	0.09	0.01	0.47
Bens de capital	0.01	0.08	0.03	0.00	0.12
Serviços	0.00	0.05	0.01	0.00	0.06
Eletricidade, gás e outras utilidades	0.01	0.12	0.03	0.01	0.17
Transporte ferroviário de carga	0.03	0.33	0.08	0.01	0.45
Transporte rodoviário de carga	0.00	0.13	0.03	0.00	0.16
Transporte metroferroviário de passageiros	0.01	0.16	0.13	0.00	0.30
Transporte rodoviário passageiros munic e metropol	0.01	0.16	0.13	0.00	0.30
Transporte rodoviário coletivo de passageiros, com itine	0.01	0.18	0.14	0.00	0.33
Emprego					
Agropecuária	0.00	0.14	0.04	0.00	0.19
Indústria extrativa	0.01	-0.28	-0.14	-0.02	-0.43
Alimentos	0.00	0.06	0.04	0.00	0.10
Bens de consumo	-0.01	-0.14	-0.02	0.00	-0.17
Bens de consumo duráveis	-0.01	-0.30	-0.06	-0.01	-0.38
Bens intermediários	-0.01	-0.17	-0.05	0.00	-0.23
Bens de capital	0.00	-0.03	0.00	0.00	-0.03
Serviços	-0.02	-0.45	-0.09	-0.01	-0.57

Fonte: Resultados da pesquisa.

Nota: *desvio % acumulado em relação ao cenário base.

5.3 Emissões

Ademais, os choques de produtividade podem proporcionar uma produção maior e mais eficiente com emprego de menores níveis de energia, ou seja, maior ganho de eficiência energética, refletindo em uma diminuição das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). No que tange ao choque de produtividade sobre o setor de indústria extrativa, a Tabela 5 reporta a variação das emissões de CO₂ por tipo de combustível ou fonte de emissão, nas projeções até

2040. Segundo os resultados, todos os tipos de fonte de emissão – carvão mineral, combustível para aviação, gás natural, nafta petroquímica, óleo combustível diesel, outro combustível derivado do petróleo e etanol – apresentaram uma redução nas emissões de GEE. Os combustíveis de carvão mineral, gasolina e álcool e diesel B apresentaram as maiores reduções com 0,99%, seguido do etanol (0,97%) em relação ao cenário de referência.

Tabela 5 – Variações nas emissões para o setor da Indústria Extrativa (Baseline = 2024)

Combustíveis	2030				2035				2040			
	Carvão mineral	Petróleo e gás	Minério ferroso	Minerais metais não ferrosos	Carvão mineral	Petróleo e gás	Minério ferroso	Minerais metais não ferrosos	Carvão mineral	Petróleo e gás	Minério ferroso	Minerais metais não ferrosos
Carvão mineral	-0.95	-1.00	-0.95	-0.65	-0.95	-1.00	-0.94	-0.63	-0.96	-0.99	-0.92	-0.62
Combustível de aviação	-0.95	-0.48	-0.95	-0.90	-0.95	-0.48	-0.94	-0.89	-0.96	-0.48	-0.92	-0.88
Gasóócool	-0.95	-1.00	-0.95	-0.90	-0.95	-1.00	-0.94	-0.89	-0.96	-0.99	-0.92	-0.88
Óleo combustível	-0.90	-0.92	-0.95	-0.86	-0.90	-0.92	-0.94	-0.85	-0.92	-0.92	-0.92	-0.84
Diesel B	-0.95	-1.00	-0.95	-0.90	-0.95	-1.00	-0.94	-0.89	-0.96	-0.99	-0.92	-0.88
Outros produtos do refino de petróleo	-0.85	-0.73	-0.69	-0.65	-0.85	-0.73	-0.68	-0.64	-0.87	-0.73	-0.66	-0.63
Etanol B	-0.95	-0.97	-0.95	-0.90	-0.95	-0.97	-0.94	-0.89	-0.96	-0.97	-0.92	-0.88
Atividade	0.05	0.00	0.05	0.10	0.05	0.00	0.06	0.11	0.04	0.01	0.08	0.12

Fonte: Resultados da pesquisa

Dentre as atividades que compõem o setor de transformação, definidos neste estudo, apenas para a atividade refino do petróleo, o choque de produtividade teve como resultado, uma pequena variação negativa nas emissões associadas às fontes de emissão. Para o setor como um todo, no longo prazo, o ganho de produtividade provocaria uma elevação nas emissões principalmente para o carvão mineral e outros produtos do refino do petróleo de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 – Variações nas emissões por tipo de combustível (Baseline = 2024)

Combustíveis	Indústria Extrativa			Indústria de Transformação			Transporte			Energia		
	2030	2035	2040	2030	2035	2040	2030	2035	2040	2030	2035	2040
Carvão mineral	-3.55	-3.52	-3.49	0.06	0.08	0.09	-2.86	-2.81	-2.77	-0.72	-0.72	-0.72
Combustível de aviação	-3.28	-3.26	-3.24	-0.01	0.01	0.01	-2.39	-2.35	-2.31	-0.99	-0.99	-0.99
Gasóócool	-3.80	-3.78	-3.75	-0.01	0.01	0.01	-2.86	-2.81	-2.77	-0.99	-0.99	-0.99
Óleo combustível	-3.63	-3.61	-3.60	-0.01	0.01	0.01	-2.76	-2.71	-2.67	-0.94	-0.94	-0.94
Diesel-Biodiesel	-3.80	-3.78	-3.75	-0.01	0.01	0.01	-2.86	-2.81	-2.77	-0.99	-0.99	-0.99
Outros produtos do refino do petróleo	-2.92	-2.90	-2.89	0.00	0.02	0.02	-2.37	-2.33	-2.28	-0.73	-0.73	-0.74
Etanol	-3.77	-3.75	-3.73	-0.01	0.01	0.01	-2.82	-2.78	-2.74	-0.99	-0.99	-0.99

Fonte: Resultados da pesquisa.

Essa elevação das emissões associada ao choque de produtividade estaria potencialmente relacionada a um aumento na produção total, visto que as atividades industriais passariam a produzir mais com a mesma quantidade de insumos. Além disso, por ser um dos setores que mais emitem CO₂ e consomem energia, conforme demonstrado na Seção 3, este impacto seria particularmente relevante. No caso do setor de transportes, a alteração na produtividade provocaria um efeito de redução das emissões associadas a todas as fontes de combustíveis, conforme ilustrado na Tabela 7. Combustíveis como carvão mineral, gasolina, álcool, diesel B e etanol B apresentariam as maiores reduções, sendo estes combustíveis tradicionais conhecidos por sua alta geração de emissões. Em 2040 a redução das emissões deste setor apresentaria uma redução de mais de 2% em relação ao cenário de referência.

Tabela 7 – Variações nas emissões para o setor de Transportes (Baseline = 2024)

Combustíveis	2030			2035			2040		
	Terrestre	Aquaviário	Aéreo	Terrestre	Aquaviário	Aéreo	Terrestre	Aquaviário	Aéreo
Carvão mineral	-0.95	-1.01	-0.90	-0.95	-0.99	-0.88	-0.94	-0.96	-0.87
Combustível de aviação	-0.95	-1.01	-0.44	-0.95	-0.99	-0.42	-0.94	-0.96	-0.41
Gasócool	-0.95	-1.01	-0.90	-0.95	-0.99	-0.88	-0.94	-0.96	-0.87
Óleo combustível	-0.95	-0.91	-0.90	-0.95	-0.89	-0.88	-0.94	-0.86	-0.87
Diesel B	-0.95	-1.01	-0.90	-0.95	-0.99	-0.88	-0.94	-0.96	-0.87
Outros produtos do refin de petróleo	-0.71	-0.76	-0.90	-0.70	-0.74	-0.88	-0.70	-0.72	-0.87
Etanol B	-0.91	-1.01	-0.90	-0.91	-0.99	-0.88	-0.91	-0.96	-0.87

Fonte: resultados da pesquisa

Para o setor de energia, como pode ser observado na Tabela 8, uma variação negativa nas emissões de CO2 associadas às fontes de combustíveis. A maior redução estaria associada aos combustíveis de aviação, gasolina e álcool, diesel B e etanol B que apresentariam uma redução de 0,98% em 2040. O resultado sinaliza um ganho em eficiência energética alcançado nesse setor, refletindo uma menor intensidade de emissões por unidade de energia consumida.

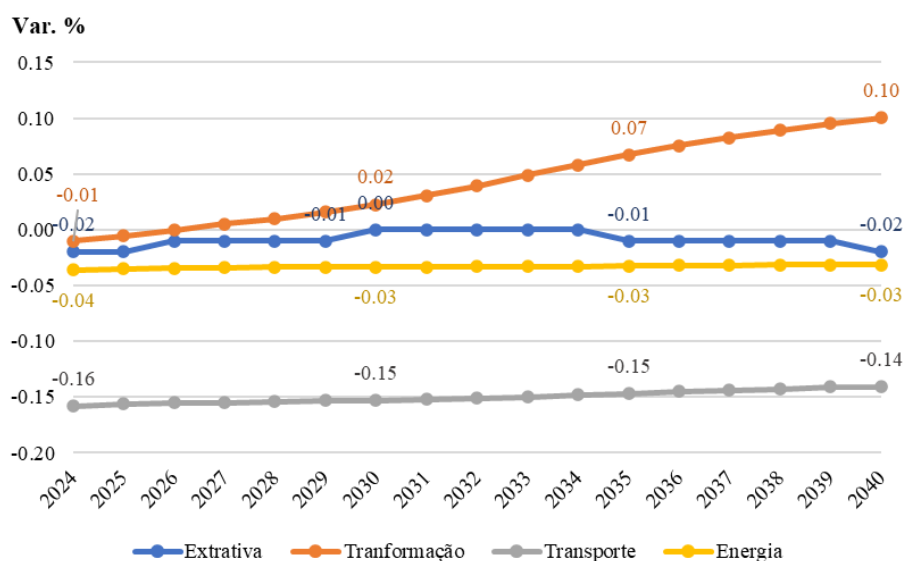
Tabela 8 – Variações nas emissões para o setor de Energia (Baseline = 2024)

Combustíveis	2030	2035	2040
	Eletricidade e gás	Eletricidade e gás	Eletricidade e gás
Carvão mineral	-0.72	-0.72	-0.72
Combustível de aviação	-0.99	-0.99	-0.99
Gasócool	-0.99	-0.99	-0.99
Óleo combustível	-0.94	-0.94	-0.94
Diesel B	-0.99	-0.99	-0.99
Outros produtos do refin de petróleo	-0.73	-0.73	-0.74
Etanol B	-0.99	-0.99	-0.99

Fonte: Resultados da pesquisa

As emissões totais para o Brasil, observadas no gráfico 1 mostram que, os ganhos de produtividade do choque sobre os setores, teriam efeitos maiores sobre os transportes. O setor apresentou uma variação negativa praticamente constante em termos de reduções de CO2. No entanto, o setor da indústria de transformação seguiria uma tendência crescente de emissões ao longo dos anos, corroborando os resultados apresentados pela análise dos setores em relação às fontes de emissão.

Gráfico 1 – Total de emissões por setor (Baseline = 2024)



Em síntese, os choques de produtividade resultariam em impactos variados nas emissões de CO₂ entre os setores econômicos. Na indústria extrativa, haveria uma redução nas emissões de todas as fontes de combustíveis, especialmente carvão mineral, gasolina, álcool e diesel B. Em contraste, a indústria de transformação apresentaria aumento nas emissões, salvo uma leve redução no refino de petróleo, refletindo o crescimento da produção com o mesmo nível de insumos. No setor de transportes, as emissões cairiam significativamente, com uma redução superior a 2% em 2040. O setor de energia também registraria diminuições, impulsionadas pela maior eficiência energética. Esses resultados indicariam que, enquanto a produtividade poderia melhorar a eficiência e reduzir emissões em setores como extração, transporte e energia, poderia, por outro lado, aumentar as emissões no setor de transformação, provavelmente, devido à expansão da produção industrial. Resultados semelhantes são encontrados por Halkos, Alba e Bampatsou (2024). Os autores compararam as indústrias da Ásia e Europa e notaram que as indústrias europeias embora estejam acima da média mundial em eficiência ambiental, enfrentam uma desaceleração na produtividade refletida na queda nos índices de eficiência técnica. Em comparação, a Ásia destaca-se em capacidade de gestão, alocação de recursos e economias de escala, o que contribui para o maior crescimento da produtividade na região. Entretanto, as regiões, conseguiram reduzir tanto o consumo de energia e recursos quanto as emissões por unidade de valor industrial agregado ao longo do período analisado. Ainda segundo os autores, os resultados superiores da Ásia em relação a Europa estariam relacionados à redução drástica de sua intensidade energética, o que indica progresso tecnológico e consequente promoção da sustentabilidade ambiental.

Todavia, os resultados da simulação, como afirmam Moutinho e Madaleno (2021), sugerem que a eficiência econômica ou choque de produtividade, não implica necessariamente eficiência ambiental, uma vez que os processos de produção a partir do consumo de combustíveis utilizando tecnologias fósseis, embora tecnicamente eficientes e possuidores de baixo custo, têm efeitos nocivos como altos níveis de emissões ou outros poluentes com altos impactos ambientais. Ademais, a natureza de consumo desses setores é diferente, o que geraria resultados diferentes em termos de eficiência na produtividade.

6. Considerações Finais:

Esse estudo buscou identificar qual o impacto de um aumento da produtividade sobre os setores da economia brasileira que mais ecoinovam segundo dados da PINTEC 2015-2017, em relação a melhorias na eficiência energética e redução das emissões de gases de efeitos estufa. Segundo a PINTEC, os setores Indústria Extrativa, Indústria de Transformação, Transporte, Energia e Gás tem buscado medidas e uso de novas tecnologias para mitigar os impactos de sua produção sobre o meio ambiente. Em contrapartida, segundo dados do Sistema de Contas Nacionais, esses setores também são os que mais consomem energia para a produção. Nesse sentido, utilizamos um modelo de Equilíbrio Geral Computável para analisar se ao receberem o choque de produtividade, esses setores responderiam de forma satisfatória sobre eficiência.

Os principais resultados do choque de produtividade sobre os setores com maior intensidade de ecoinovação no Brasil trariam impactos positivos no PIB, no consumo das famílias e na balança comercial no longo prazo. As análises obtidas mostram que, embora o PIB cresça menos que proporcionalmente aos ganhos de produtividade (elasticidade de 0,17), a eficiência energética reduz os custos de produção, diminuindo a pressão sobre os preços e aumentando a competitividade das exportações. Esse efeito tem como resultado uma balança comercial superavitária a longo prazo, apesar do impacto inicial negativo. No mercado de trabalho, apesar do aumento da produtividade vir a reduzir o nível de emprego, pode gerar elevação dos salários

reais e o consumo das famílias, resultando em um ganho líquido de bem-estar.

No tocante às emissões de CO₂, o presente estudo revela variações entre os setores. Nesse sentido, a indústria extrativa e os setores de transporte e energia apresentariam reduções significativas nas emissões, devido a melhorias na eficiência energética e menor dependência de combustíveis fósseis. Por outro lado, a indústria de transformação, apesar dos ganhos de produtividade, veria um aumento nas emissões, especialmente associadas ao uso de carvão mineral e produtos de refino de petróleo, refletindo a expansão da produção industrial. Esses resultados indicam que, enquanto as ecoinovações podem promover melhorias significativas na eficiência e redução de emissões em alguns setores, em outros, podem estar associadas a aumentos nas emissões, dependendo da natureza e do tipo de atividades produtivas envolvidas. Os resultados são corroborados por outros estudos que compararam a produtividade de indústrias em outras regiões e obtiveram resultados controversos dada a natureza e forma de consumo energético dessas indústrias.

Em outras palavras, é possível considerar que os setores não são homogêneos. Ao contrário, existe uma variedade de características que os diferenciam, como a intensidade tecnológica, a qualificação da mão de obra e a cadeia produtiva. Esses fatores influenciam diretamente a produtividade e, conseqüentemente, o impacto sobre as emissões. Assim, as alternativas tecnológicas e as oportunidades de ecoinovação terão efeitos distintos sobre as emissões de cada setor. Ou seja, a produtividade de cada setor e suas especificidades determinarão quais tecnologias limpas são mais eficazes, resultando em diferentes impactos na redução das emissões para cada um.

Assim, apesar de serem verificadas melhorias nos setores, a eficácia e eficiência ainda exigem estratégias coordenadas que levem em consideração as especificidades de cada setor, seu tipo de produção e relação com outros setores da economia. A adoção de táticas integradas de algumas atividades, principalmente da indústria de transformação, pode trazer melhores benefícios e maiores impactos sobre o meio ambiente e mudanças climáticas.

Referências:

- Adams, P. D., Horridge, J. M., & Parmenter, B. R. (2000). *MMRF-Green: a dynamic, multi-sectoral, multi-regional model of Australia*. <http://www.monash.edu.au/policy/>
- Almeida, A. N. De. (2008). Elasticidades Renda e Preços: Análise do Consumo Familiar a Partir dos Dados. In *Núcleo de Economia Regional e Urbana da Universidade de São Paulo (NEREUS)*.
- Armington, P. S. (1969). A Theory of Demand for Products Distinguished by Place of Production. *Staff Papers - International Monetary Fund*, 16(1), 159. <https://doi.org/10.2307/3866403>
- Betarelli Junior, A. A., Faria, W. R., Gonçalves Montenegro, R. L., Bahia, D. S., & Gonçalves, E. (2020). Research and development, productive structure and economic effects: Assessing the role of public financing in Brazil. *Economic Modelling*, 90, 235–253. <https://doi.org/10.1016/J.ECONMOD.2020.04.017>
- Betarelli Junior, A. A., Faria, W. R., Montenegro, R. L. G., Bahia, D. S., & Gonçalves, E. (2020). Research and development, productive structure and economic effects: Assessing the role of public financing in Brazil. *Economic Modelling*, 90, 235–253. <https://doi.org/10.1016/J.ECONMOD.2020.04.017>
- Betarelli Junior, A. A., Faria, W. R., Proque, A. L., Perobelli, F. S., & de Almeida Vale, V. (2021a). COVID-19, public agglomerations and economic effects: Assessing the recovery time of passenger transport services in Brazil. *Transport Policy*, 110, 254–272. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2021.06.004>
- Betarelli Junior, A. A., Faria, W. R., Proque, A. L., Perobelli, F. S., & de Almeida Vale, V. (2021b). COVID-19, public agglomerations and economic effects: Assessing the recovery time of passenger transport services in Brazil. *Transport Policy*, 110, 254–272. <https://doi.org/10.1016/J.TRANPOL.2021.06.004>
- Burfisher, M. E. (2021). *Introduction to Computable General Equilibrium Models*. Cambridge University Press. <https://books.google.com.br/books?hl=pt->

[BR&lr=&id=eSoNEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR14&ots=hWHRsXwElq&sig=W0XkGxASUeVcB26vQVY91oSMrE4&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://doi.org/10.11606/1980-5330/ea161617)

Cardoso, D. F. (2016). *Capital e trabalho no Brasil no século XXI: o impacto de políticas de transferência e de tributação sobre desigualdade, consumo e estrutura produtiva* [Tese]. Universidade Federal de Minas Gerais.

Dixon, P. B. (1982). *ORANI: a multisectorial model of the Australian economy*. North-Holland.

Domingues, E. P., & Haddad, E. A. (2005). Sensitivity Analysis in Computable General Equilibrium Models: An Application for the Regional Effects of the Free Trade Area of the Americas (FTAA). *Brazilian Review of Econometrics*, 25(1), 115–137. <https://periodicos.fgv.br/bre/article/view/2674/1625>

Ervilha, G. T., da Cruz Vieira, W., & Fernandes, E. A. (2019). Determinantes daecoinovacao na industria de transformacao Brasileira: Uma analise empirica. *Economia Aplicada*, 23(4), 145–174. <https://doi.org/10.11606/1980-5330/ea161617>

Estratégia Federal de Desenvolvimento Para o Brasil No Período de 2020 a 2031. Decreto No 10.531, de 26 de Outubro de 2020. (2020). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10531.htm

Fochezatto, A. (2011). Estrutura da Demanda Final e Distribuição de Renda no Brasil: Uma Abordagem Multissetorial Utilizando uma Matriz de Contabilidade Social. *Economia*, 12(1), 111–130.

Gonzaga, G., & Corseuil, C. H. (2001). Emprego Industrial no Brasil: Análise de Curto e Longo Prazos. *Revista Brasileira de Economia*, 55(4), 467–491. <https://doi.org/10.1590/S0034-71402001000400002>

Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53–64. <https://doi.org/10.1111/J.1530-9290.2012.00532.X>

Hoffmann, D., Fuchs, T. C., Henzler, T., Matheis, K. A., Herget, T., Dekant, W., Hewitt, P., & Mally, A. (2010). Evaluation of a urinary kidney biomarker panel in rat models of acute and subchronic nephrotoxicity. *Volume 277, Issue 1-3, Pages 49 - 58, 277(1–3)*, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2010.08.013>

Horridge, M. (2003). ORANI-G: A generic single-country computable general equilibrium model. *Centre of Policy Studies, Monash University*. <http://www.monash.edu.au/policy/elecprapr/op-93.htm>

IBGE. (2024). *Sistema de Contas Nacionais: Brasil*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9052-sistema-de-contas-nacionais-brasil.html>

Krause, J., Thiel, C., Tsokolis, D., Samaras, Z., Rota, C., Ward, A., Prenninger, P., Coosemans, T., Neugebauer, S., & Verhoeve, W. (2020). EU road vehicle energy consumption and CO2 emissions by 2050 – Expert-based scenarios. *Energy Policy*, 138, 111224. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2019.111224>

Magalhães, A. S. (2013). *Economia de baixo carbono no Brasil: alternativas de políticas e custos de redução de emissões de gases de efeito estufa*. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Martins, M. A. (2021). *Lei de informática, sistema produtivo e efeitos econômicos: uma análise das diretrizes requisitadas pela OMC no Brasil* [Dissertação]. Universidade Federal de Juiz de Fora.

Perobelli, F. S., Junior, A. A. B., Vale, V. de A., & Cunha, R. G. (2017). Impactos Econômicos do Aumento das Exportações Brasileiras de Produtos Agrícolas e Agroindustriais para Diferentes Destinos. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 55(2), 343–366. <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550208>

Proque, A. L. (2019). *Estrutura Produtiva, Renda e Consumo: Os Efeitos Econômicos da Cide e Contrapartidas ao Transporte Rodoviário de Passageiros no Brasil*. Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF.

Santos, M. A. F. dos, Santos, E. C. dos, & Maia, M. de F. R. (2023). Produtividade e inovação ambiental: uma análise da indústria de transformação de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Inovação*, 22, e023003. <https://doi.org/10.20396/RBI.V22I00.8667755>

Tsemekidi Tzeiranaki, S., Economidou, M., Bertoldi, P., Thiel, C., Fontaras, G., Clementi, E. L., & Franco De Los Rios, C. (2023). “The impact of energy efficiency and decarbonisation policies on the European road transport sector.” *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 170, 103623. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2023.103623>