

Transição Energética e Estrutura Produtiva do Transporte Terrestre no Brasil: uma Análise Insumo-Produto

Energy Transition and the Productive Structure of Land Transport in Brazil: An Input–Output Analysis

Guilherme Henrique Fonseca Nogueira

Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais (MG), Brasil

Ian Michael Trotter

Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais (MG), Brasil

SOBER GT04 - Meio ambiente, agroecologia, sustentabilidade e mudanças climáticas

Resumo

A transição energética configura-se como um dos eixos centrais do debate contemporâneo sobre desenvolvimento sustentável, mudanças climáticas e segurança energética. No contexto brasileiro, o setor de transportes destaca-se pela elevada dependência de combustíveis fósseis, em contraste com a matriz elétrica majoritariamente renovável do país. Este estudo tem por objetivo analisar os impactos econômicos da transição energética no transporte nacional, por meio de um modelo de insumo-produto híbrido. São simulados três cenários: i) eliminação completa de derivados de petróleo e gás natural, com substituição por biocombustíveis e eletricidade; ii) eletrificação parcial da frota de veículos leves; e iii) ampliação intensiva do uso de biocombustíveis, mantendo participação residual dos fósseis. Os resultados mostram que a transição gera impactos setoriais heterogêneos, com forte expansão de agricultura, biodiesel, etanol e geração de energia elétrica, e retração acentuada em extração e refino de petróleo, gás natural e atividades a eles encadeadas. Em termos agregados, verifica-se expansão do valor adicionado em todos os cenários simulados e variação heterogênea da produção, com retração no cenário de eletrificação isolada e expansão nos cenários ancorados em bioenergia. Os efeitos sobre o emprego são positivos nas rotas ancoradas em bioenergia e negativos na rota de eletrificação. Conclui-se que o Brasil dispõe de vantagens comparativas para liderar uma transição de baixo carbono no transporte, mas que uma estratégia combinando biocombustíveis e eletromobilidade, articulada a políticas de transição justa, é mais adequada do que a adoção exclusiva de uma única rota tecnológica.

Palavras-chave: biocombustíveis; setor de transportes; matriz insumo-produto.

Abstract

The energy transition stands as one of the central axes of contemporary debate on sustainable development, climate change, and energy security. In the Brazilian context, the transport sector is notable for its high dependence on fossil fuels, in contrast with the country's predominantly renewable electricity matrix. This study aims to analyze the economic impacts of the energy transition in national transport through a hybrid input-output model. Three scenarios are simulated: i) complete elimination of petroleum derivatives and natural gas, replaced by biofuels and electricity; ii) partial electrification of the light vehicle fleet; and iii) intensive expansion of biofuel use, maintaining a residual share of fossil fuels. The results show that the transition generates heterogeneous sectoral impacts, with strong expansion in agriculture, biodiesel, ethanol, and electricity generation, and sharp contraction in oil extraction and refining, natural gas, and their downstream activities. In aggregate terms, value added expands across all simulated scenarios, while output variation is heterogeneous, contracting in the isolated electrification scenario and expanding in the bioenergy-anchored pathways. Employment effects are positive along bioenergy-anchored pathways and negative along the isolated electrification route. It is concluded that Brazil holds comparative advantages to lead a low-carbon transition in transport, but that a strategy combining biofuels and electromobility, articulated with just transition policies, is more appropriate than the exclusive adoption of a single technological pathway.

Keywords: biofuels; transport sector; input–output matrix.

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

A transição energética consolidou-se, nas últimas décadas, como uma das estratégias centrais para enfrentar os desafios interligados das mudanças climáticas, da segurança energética e do desenvolvimento sustentável (NETO, 2024). O mesmo autor enfatiza que a intensificação do aquecimento global, fortemente associada à crescente emissão de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da queima de combustíveis fósseis, tem provocado impactos sistêmicos de natureza econômica, social e ambiental.

Diante desse cenário, a reestruturação dos sistemas energéticos globais tem sido objeto de esforços coordenados por governos, organismos multilaterais e agentes privados. Esses agentes buscam

fomentar a expansão de fontes limpas e renováveis, incentivar a eficiência energética e promover a descarbonização dos setores mais intensivos em emissões, como a indústria, a agricultura e os transportes (STERN, 2007).

No debate sobre a transição energética, o caso brasileiro apresenta singularidades relevantes. O Brasil é reconhecido mundialmente por sua matriz energética relativamente limpa, com uma considerável proporção de fontes renováveis, posicionando-se entre as grandes economias com uma das mais avançadas abordagens sustentáveis. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025), 50% da matriz energética total brasileira é composta por fontes renováveis - valor muito superior à média mundial, que gira em torno de 10,4%, reportada pela IEA (Key World Energy Statistics).

A capacidade da matriz elétrica brasileira decorre, em grande medida, do potencial hídrico, historicamente explorado desde a segunda metade do século XX, como discutido por Silva e Soares (2021). Nos últimos anos, o crescimento da capacidade instalada de geração eólica e solar também contribuiu para a diversificação da oferta energética renovável, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste (EPE, 2023). Como divulgado no Balanço Energético Nacional (BEN), a adoção de políticas públicas como os leilões de energia, o marco legal da microgeração e minigeração distribuída e incentivos ao desenvolvimento tecnológico nacional permitiram avanços relevantes na expansão dessas fontes, com benefícios econômicos e ambientais. Ainda assim, a matriz energética na totalidade, que inclui, além da eletricidade, os insumos energéticos para transporte, indústria e aquecimento, mantém elevada dependência de combustíveis fósseis, sobretudo petróleo e derivados.

Apesar desses avanços, a descarbonização da economia mundial enfrenta desafios importantes, sobretudo nos setores mais intensivos em combustíveis fósseis, como o de transportes. Globalmente, o setor de transportes é responsável por cerca de 22,6% das emissões diretas de dióxido de carbono (CO₂) oriundas da queima de combustíveis. Segundo estimativas da IEA (IEA, 2023), o setor de transportes emitiu aproximadamente 8,3 gigatoneladas de CO₂ de um total global de 36,8 Gt em 2022.

Nesse contexto, trata-se de um setor historicamente associado ao elevado consumo de derivados de petróleo, estrutura modal predominantemente rodoviária e barreiras institucionais à inovação tecnológica (IEA, 2023). Essa configuração confere ao setor uma inércia tecnológica significativa e torna sua descarbonização mais complexa do que em outros segmentos econômicos. Dessa forma, a eletrificação da frota, o desenvolvimento de biocombustíveis de segunda geração, o uso de hidrogênio verde e a reorganização dos sistemas modais são algumas das estratégias em curso para promover sua transformação, como demonstrado nos resultados de Rimpas et al. (2025).

No que se refere aos biocombustíveis, o Brasil ocupa posição de destaque no cenário internacional. Em 2022, o país foi o segundo maior produtor mundial de etanol e um dos principais produtores de biodiesel, com uma cadeia produtiva fortemente integrada à agroindústria e ao setor sucroenergético (IEA, 2023). Segundo dados do EPE (2023), a produção de etanol combustível ultrapassou 30 bilhões de litros, enquanto a de biodiesel superou 6 bilhões de litros, movimentando volumes expressivos de valor adicionado, emprego e investimentos ao longo da cadeia produtiva. Apesar disso, a expansão do uso de biocombustíveis enfrenta restrições econômicas associadas à volatilidade de preços agrícolas, à competição por uso da terra e aos custos logísticos de distribuição.

Por fim, a transição energética não se resume à simples troca de combustíveis fósseis por fontes renováveis. Ela envolve a reestruturação dos sistemas de produção, o desenvolvimento de novas tecnologias, a adaptação de políticas públicas e o engajamento da sociedade na adoção de padrões de consumo mais sustentáveis (MARKARD; ROSENBLOOM, 2022). Assim sendo, a análise dos impactos econômicos da transição energética no setor de transportes, em nível nacional, revela-se central para a formulação de políticas públicas mais justas e integradas, constituindo o problema de pesquisa deste estudo.

1.2 O Problema e Sua Importância

A elevada dependência de combustíveis fósseis no setor de transportes contrasta com a predominância de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira. Esse descompasso evidencia um

desafio da política energética nacional: promover a descarbonização do transporte sem comprometer o dinamismo econômico. Diante disso, considerando a substituição de combustíveis fósseis por fontes limpas, a pergunta que orienta este estudo é: quais são os impactos econômicos da transição energética no setor de transportes do Brasil?

Responder essa questão é fundamental para subsidiar políticas públicas alinhadas aos objetivos do Plano Nacional de Energia (PNE 2055) e do Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE 2034), que estabelecem diretrizes de longo prazo para o setor energético nacional. Para mais, a análise ganha relevância diante dos compromissos assumidos pelo Brasil em acordos internacionais e da necessidade de compatibilizar metas ambientais com desenvolvimento econômico e inclusão produtiva. Assim, este trabalho concentrar-se-á em nível nacional, com base na matriz insumo-produto recentemente desenvolvida pela EPE (2023), que oferece maior desagregação dos setores energéticos e será explorada com mais profundidade no referencial analítico.

Parte-se da hipótese de que a transição energética no setor de transportes no Brasil, caracterizada pela substituição gradual de combustíveis fósseis por fontes de energia mais limpas, resultará em impactos econômicos heterogêneos entre os setores da economia nacional. Essa hipótese encontra respaldo em estudos que indicam que a transição para uma economia de baixo carbono tende a favorecer setores vinculados à produção e difusão de tecnologias limpas, enquanto impõe desafios aos segmentos intensivos em combustíveis fósseis (SACHS, 2015; MARKARD; ROSENBLOOM, 2022; JACOBSON et al., 2022; JANNUZZI, 2024).

O objetivo geral deste trabalho é analisar os impactos econômicos e setoriais da transição energética no setor de transportes brasileiro, em nível nacional, considerando a introdução e/ou expansão de fontes alternativas de energia limpas. Portanto, a proposta é investigar como as mudanças na matriz energética do transporte afetam o desempenho econômico dos diferentes segmentos produtivos do país, identificando setores beneficiados e setores que possam enfrentar desafios de reestruturação.

- Para atingir esse objetivo, o estudo será guiado pelos seguintes objetivos específicos:
- Caracterizar a matriz energética atual do setor de transportes no Brasil e projetar a sua evolução segundo os cenários oficiais de transição energética;
- Identificar as principais estratégias e tecnologias envolvidas na descarbonização do transporte, como a eletrificação e os biocombustíveis;
- Utilizar e adaptar uma matriz insumo-produto existente, de modo a capturar os efeitos diretos e indiretos da substituição de fontes fósseis por renováveis;
- Simular os impactos econômicos e setoriais de diferentes cenários de transição energética sobre indicadores como Produto Interno Bruto (PIB), emprego e estrutura produtiva.

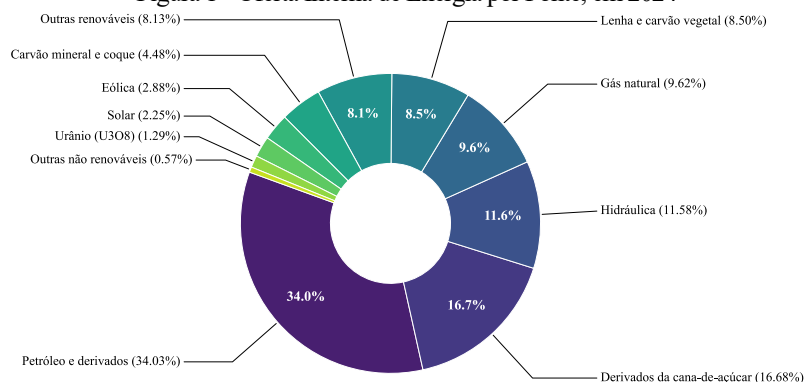
2. Referencial Teórico

2.1 Transição energética: conceitos, desafios e oportunidades

A transição energética configura-se como um dos maiores desafios globais do século XXI, sendo essencial para a construção de um futuro sustentável e resiliente frente às crescentes ameaças das mudanças climáticas (JACOBSON et al., 2022). Este processo envolve a substituição das fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis por alternativas renováveis, como a energia solar, eólica, hidrelétrica, biomassa, entre outras. Além das mudanças tecnológicas e econômicas, a transição energética está intrinsecamente ligada a um redesenho das políticas públicas, que devem ser desenhadas de modo a facilitar a adoção dessas novas fontes de energia, ao mesmo tempo em que mitigam os impactos sociais e econômicos dessa mudança (MARKARD; ROSENBLOOM, 2023).

No contexto brasileiro, a transição energética adquire características particulares devido à elevada participação de fontes renováveis em sua matriz, que permanece uma das mais limpas entre as grandes economias mundiais, conforme introduzido anteriormente. A Figura 1 mostra a composição da oferta interna de energia, para o ano de 2024, no Brasil.

Figura 1 - Oferta Interna de Energia por Fonte, em 2024

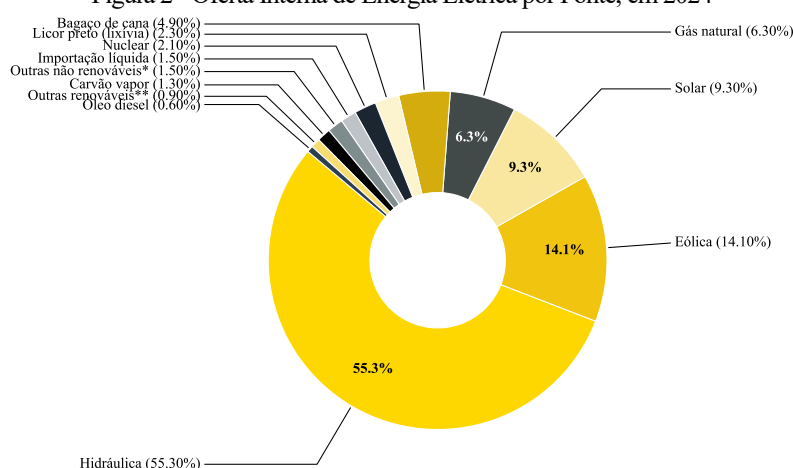


Fonte: Elaboração própria a partir de EPE (2025)

Com base na representação apresentada na Figura 1, verifica-se que as fontes não renováveis somam 50,0% (petróleo e derivados 34,0%, gás natural 9,6%, carvão mineral e coque 4,5%, urânio 1,3% e outras não renováveis 0,6%), enquanto as renováveis totalizam 49,0%. No grupo renovável, o bloco bioenergético destaca-se: derivados da cana 16,7%, lenha e carvão vegetal 8,5% e outras renováveis 8,1%, superando a hidráulica (11,6%) e evidenciando o peso da biomassa no padrão brasileiro. A eólica (2,9%) e solar (2,2%) aparecem na matriz, ainda que com uma participação menor, indicando espaço para uma possível expansão.

No que se refere à matriz elétrica, o Brasil apresenta um perfil amplamente renovável, com cerca de 83% da eletricidade proveniente de fontes limpas, sobretudo hidrelétrica, eólica, biomassa e solar fotovoltaica (EPE, 2025). Esse padrão reflete os avanços obtidos por meio de políticas públicas e incentivos tecnológicos voltados à descarbonização do sistema elétrico nacional. A Figura 2 apresenta a distribuição da Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte no Brasil para o ano de 2024.

Figura 2 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte, em 2024



Fonte: Elaboração própria a partir de EPE (2025)

Notas:

* Inclui Óleo Combustível, Gás de Coqueria, Outras Secundárias e Outras Não-Renováveis

** Inclui Lenha, Biodiesel e Outras renováveis

Na matriz elétrica, a participação de renováveis é muito elevada: 86,1% da oferta interna de eletricidade provém de fontes renováveis (88,0% ao incluir a importação líquida, majoritariamente hidrelétrica), conforme mostrado na Figura 2. Entre as fontes, destacam-se hidráulica (61,9%), eólica (11,8%), solar fotovoltaica (4,4%) e biomassa (bagaço de cana 4,7% e lixívia/licor negro 2,5%) além

de outras renováveis (0,8%). No grupo não renovável, figuram gás natural (6,1%), nuclear (2,1%), carvão vapor (1,2%), óleo diesel (0,9%) e outras não renováveis (1,8%).

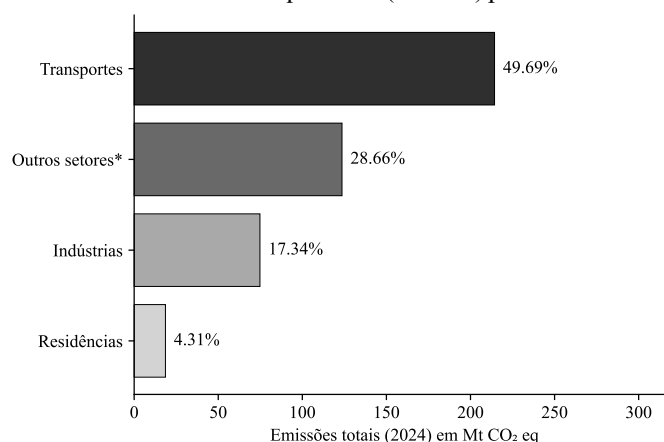
O conceito de transição energética, segundo Sachs (2015), vai além da simples mudança de fontes de energia. Ele enfatiza que a transição energética é uma reestruturação do setor energético, que engloba a geração de energia, a distribuição, o consumo e, principalmente, a integração de sistemas inteligentes de gestão de energia. De acordo com o autor, a implementação de energias renováveis exige investimentos em infraestrutura e tecnologia, além da criação de novos mercados e modelos de negócios que permitam a integração eficiente dessas fontes ao sistema energético existente, de maneira economicamente viável. Sachs argumenta que, para que a transição seja bem-sucedida, é necessário um avanço tecnológico, mas, sobretudo, uma transformação nos sistemas econômicos, sociais e políticos.

Portanto, a transição energética é um processo que, quando bem gerido, pode trazer oportunidades para o desenvolvimento econômico sustentável (FALCONE, 2023). Nesse contexto, o setor de transportes desempenha um papel fundamental, visto que é responsável por uma parcela significativa das emissões e do consumo de energia. Por isso, para que a transição seja bem-sucedida, é essencial que as políticas públicas promovam soluções de mobilidade sustentável, garantindo a colaboração entre governos, empresas e sociedade civil (TOSUN; RINSCHIED, 2021).

2.2 Transporte e energia: interações e políticas públicas

O setor de transportes no Brasil ainda representa um dos principais desafios para a sustentabilidade da matriz energética nacional. Por ser altamente dependente de combustíveis fósseis, esse setor responde por parcela significativa das emissões nacionais, refletindo a necessidade de avanços na eletrificação, no uso de biocombustíveis e na diversificação modal. A Figura 3 apresenta as Emissões Totais de CO₂ equivalente (MtCO₂e) por Setor no Brasil em 2024.

Figura 3 – Emissões Totais de CO₂ equivalente (MtCO₂e) por Setor no Brasil em 2024



Fonte: Elaboração própria a partir de EPE (2025)

Notas:

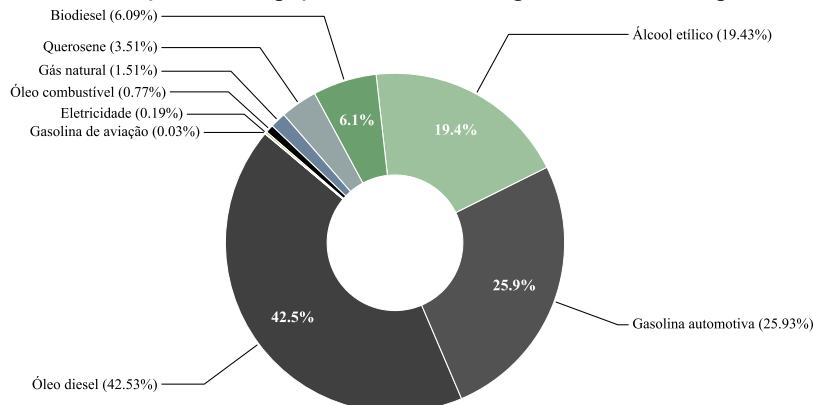
* Inclui os setores Agropecuário, Serviços, Energético, Centrais Elétricas e as Emissões Fugitivas

Em 2024, como mostrado na Figura 3, o setor de transportes foi responsável por 49,7% das emissões totais de CO₂ equivalente, totalizando 214,3 MtCO₂e. Isso coloca o setor como o maior emissor dentro do setor energético, superando as indústrias (17,3%), outros setores (28,7%) e as residências (4,3%). Esses dados evidenciam a importância de reduzir as emissões no setor de transportes para avançar na transição energética e atingir as metas climáticas do país.

A elevada participação de derivados de petróleo na matriz energética do transporte explica, em grande medida, o volume expressivo de emissões do setor. Em 2024, segundo o Balanço Energético Nacional, os combustíveis fósseis (especialmente o diesel e a gasolina) responderam pela maior parte do consumo energético do transporte nacional, enquanto as fontes renováveis, como etanol e biodiesel,

representaram uma fração menor, embora crescente. A Figura 4 apresenta a distribuição da participação das fontes de energia no setor de transportes no Brasil em 2024.

Figura 4 – Distribuição da Participação de Fontes de Energia no Setor de Transportes em 2024



Fonte: Elaboração própria a partir de EPE (2025)

O grupo de combustíveis fósseis é o maior responsável pela energia consumida no setor de transportes. O óleo diesel lidera, representando 42,5% da oferta, equivalente a $40.760 \times 103 \text{ tep (toe)}$, seguido pela gasolina automotiva, com 25,9% ou $24.846 \times 103 \text{ tep (toe)}$. O querosene, utilizado na aviação, contribui com 3,5%, ou $3.367 \times 103 \text{ tep (toe)}$, enquanto o gás natural tem uma participação de 1,5%, equivalente a $1.448 \times 103 \text{ tep (toe)}$. O óleo combustível representa 0,8%, ou $736 \times 103 \text{ tep (toe)}$, sendo utilizado principalmente em setores industriais e no transporte marítimo.

No que diz respeito aos biocombustíveis, o etanol e o biodiesel juntos somam 21,5% da energia consumida no setor de transportes, o que equivale a $20.457 \times 103 \text{ tep (toe)}$. O biodiesel tem uma participação de 6,1% ou $5.835 \times 103 \text{ tep (toe)}$, enquanto o álcool etílico (etanol) responde por 19,4%, ou $18.622 \times 103 \text{ tep (toe)}$. Esse padrão revela uma discrepância entre a matriz elétrica e a matriz energética do transporte, sinalizando a necessidade de políticas públicas que considerem tanto a diversificação da oferta quanto a reorganização da demanda por modais mais sustentáveis.

Diante desse cenário, o setor de transporte possui grande relevância para a transição energética, devido à sua influência nas emissões de gases de efeito estufa e na demanda por energia. Nesse sentido, o trabalho de Gonçalves, Goes e D'Agosto (2020) analisa como a transição no Brasil pode contribuir para adequar o setor de transportes com as metas climáticas globais estabelecidas pelo Acordo de Paris. A pesquisa destaca a necessidade urgente de descarbonização do setor, enfatizando a transição para tecnologias mais limpas, como veículos elétricos, e a integração dessas tecnologias com uma matriz energética renovável.

O estudo também aborda como as políticas públicas brasileiras devem ser adaptadas para acelerar a adoção de soluções sustentáveis no setor de transportes, incluindo o incentivo à eletromobilidade e ao transporte público eficiente. Em complemento, a introdução de biocombustíveis também é apontada como um meio fundamental para a redução de emissões no curto e médio prazo, principalmente, em setores onde a eletrificação do transporte permanece um desafio, tal qual o transporte rodoviário de cargas.

Além do mais, o artigo enfatiza uma abordagem integrada que conecte políticas de transporte, energia e infraestrutura. Essa perspectiva reconhece que a transição energética brasileira exige adaptações nas infraestruturas urbanas e rurais para criar um sistema de transporte mais eficiente e sustentável. Assim, políticas coordenadas, que considerem as particularidades regionais (como diversificação energética e perfis de mobilidade locais), garantem benefícios equitativos da transição para todas as regiões do país.

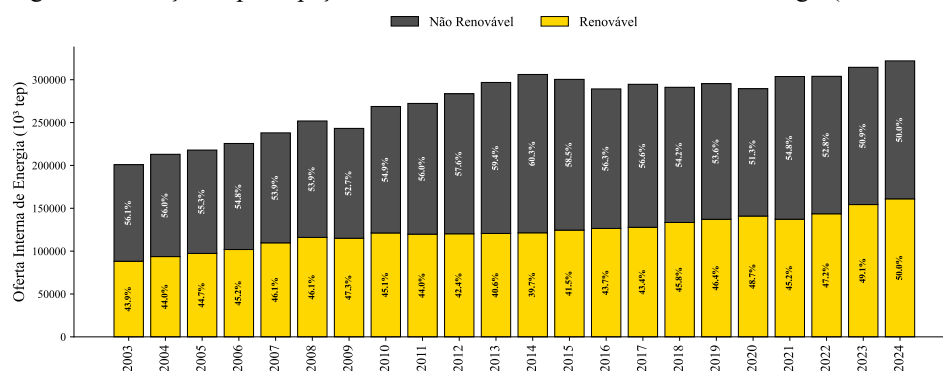
Um outro estudo desenvolvido por Silva (2009) analisou as emissões de CO₂ no Brasil entre 2006 e 2015 a partir de um modelo integrado de equilíbrio macroeconômico e insumo- produto. O

trabalho identificou o setor de transportes como o principal responsável pelas emissões nacionais, evidenciando sua elevada sensibilidade a variações na oferta de trabalho e na composição da matriz energética. Os resultados indicam que mudanças na participação de fontes renováveis e não renováveis afetam significativamente o volume de emissões, reforçando a necessidade de políticas específicas para a descarbonização do setor e sua articulação com o planejamento energético nacional.

Por fim, o Caderno de Transição Energética no Setor de Transportes da FGV Energia (2022) aprofunda o tema ao destacar a urgência de políticas integradas para descarbonizar mobilidade urbana e frete. O documento enfatiza a transformação necessária na governança do setor, sugerindo a combinação de incentivos à eletromobilidade, expansão do transporte coletivo e logística de baixo carbono como instrumentos essenciais para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, ao mesmo tempo em que ajustam a infraestrutura energética e urbana para viabilizar a transição. Dessa forma, essas diretrizes reforçam a necessidade de ação coordenada entre políticas de transporte, energia e planejamento territorial, corroborando a hipótese de que os impactos econômicos da transição serão heterogêneos e exigem abordagens setoriais específicas FGV (2022).

Os estudos ressaltam a relevância da transição energética no setor de transportes, com ênfase na descarbonização por meio de tecnologias limpas, como a eletrificação e os biocombustíveis. Para ilustrar esse processo, a Figura 5 mostra a crescente participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia do Brasil, evidenciando os avanços na redução da dependência dos combustíveis fósseis e na consolidação de uma matriz energética mais sustentável.

Figura 5 - Evolução da participação de fontes renováveis na oferta interna de energia (2013–2024)



Fonte: Elaboração própria a partir de EPE (2025)

3. Referencial Analítico

3.1 Matriz Insumo-Produto para Análise do Setor de Energia

A análise proposta no presente trabalho fundamenta-se na utilização da matriz insumo-produto (MIP) como instrumento analítico. A MIP permite representar, de forma sistematizada, as interdependências existentes entre os diferentes setores da economia, evidenciando os fluxos de bens e serviços intermediários e finais (LEONTIEF, 1941). Além disso, é utilizada como ferramenta analítica em estudos de política econômica, especialmente para mensurar os impactos diretos e indiretos de alterações na estrutura produtiva. Sua capacidade de representar as interações entre setores permite simular cenários e avaliar os efeitos de mudanças na demanda ou na oferta sobre variáveis macroeconômicas, como produção, emprego e valor adicionado (HILGEMBERG; GUILHOTO, 2006).

A matriz insumo-produto foi escolhida por sua relevância em análises de política energética, especialmente na avaliação de impactos econômicos da transição energética. Estudos da EPE e FIPE (2023) desenvolveram uma MIP com desagregação de nove setores energéticos, integrando dados físicos e monetários por meio de metodologia híbrida. Com isso, essa estrutura permitiu identificar os setores-chave e simular impactos de políticas energéticas sobre o PIB, emprego e consumo de energia, evidenciando a utilidade da abordagem para análises setoriais e de planejamento.

Por meio da técnica de inversão da matriz de Leontief, é possível simular variações na demanda final por determinados produtos e avaliar como essas mudanças afetam o restante da estrutura produtiva (IPEA, 2021). No caso específico da transição energética, alterações na demanda por combustíveis fósseis ou pela introdução de fontes renováveis implicam na reorganização da estrutura produtiva, com efeitos assimétricos entre os setores econômicos (JANNUZZI, 2024).

3.1.1 Estrutura do Modelo MIP

Conforme apresentado por Miller e Blair (2009), o Modelo Insumo-Produto representa uma economia composta por n setores produtivos, nos quais cada setor adquire bens e serviços dos demais como insumos para sua própria produção. A produção resultante pode ser direcionada ao atendimento da demanda intermediária, isto é, utilizada como insumo por outros setores, e ao atendimento da demanda final, que inclui o consumo das famílias, os gastos do governo, os investimentos e as exportações.

Seja x_i o valor total da produção do setor i , z_{ij} o montante da produção do setor i utilizado como insumo intermediário pelo setor j , e f_i a parte da produção do setor i destinada diretamente à demanda final. Dessa forma, o volume total produzido pelo setor i pode ser expresso como a soma das quantidades vendidas aos demais setores e à demanda final:

$$x_i = \sum_{j=1}^n z_{ij} + f_i \quad (1)$$

Ao se considerar simultaneamente os n setores da economia, as equações correspondentes à equação (1) podem ser reorganizadas em forma matricial da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ou, de maneira mais concisa:

$$x = Zi + f \quad (3)$$

Desta forma, x representa o vetor coluna $n \times 1$ das quantidades produzidas por cada setor; Z corresponde à matriz $n \times n$ de fluxos intersetoriais, cujos elementos indicam as vendas de bens do setor i para o setor j ; f representa o vetor coluna $n \times 1$ da demanda final por bens de cada setor; e i denota o “vetor soma”, ou seja, um vetor coluna $n \times 1$ cujos elementos são todos iguais a 1.

Um pressuposto central do Modelo Insumo-Produto é a existência de proporções fixas na produção, ou seja, a quantidade de insumo i necessária para produzir uma unidade do setor j permanece constante e é expressa pelos coeficientes técnicos a_{ij} :

$$a_{ij} = \frac{z_{ij}}{x_j} \quad (4)$$

Dessa forma, a equação (1) pode ser reescrita como:

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + f_i \quad (5)$$

E as equações (2) e (3), respectivamente, da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x = Ax + f \quad (7)$$

Onde A representa a matriz dos coeficientes técnicos. Considerando I como uma matriz identidade $n \times n$, podemos rearranjar a equação (7) para:

$$(I - A)x = f \quad (8)$$

Conforme exposto por Miller e Blair (2009), quando $(I - A)$ é uma matriz quadrada e não singular, é possível calcular sua inversa e, com isso, determinar uma solução única para o sistema, expressa por:

$$x = (I - A)^{-1}f = Lf \quad (8)$$

Nesta formulação, $(I - A)^{-1} = L$ é a matriz $n \times n$ conhecida como "inversa de Leontief". Essa matriz mensura os requisitos totais, incluindo os efeitos diretos e indiretos, de bens e serviços necessários para atender a uma dada demanda final f . A equação (8) representa o Modelo Insumo-Produto tradicional, permitindo calcular o incremento na produção total de uma economia para satisfazer um aumento na demanda final por produtos de um ou mais setores, levando em conta as múltiplas rodadas de efeitos desencadeadas pela variação inicial na demanda.

3.1.2 Extensões para Energia, Emprego e Emissões

Ainda que a formulação original da Matriz Insumo-Produto tenha contemplado fluxos em unidades físicas, a representação em valores monetários tornou-se mais comum devido a complexidades metodológicas. Contudo, para investigações focadas no setor energético, é vantajoso incorporar abordagens que permitam combinar as informações de fluxos físicos de energia, disponíveis em fontes como o Balanço Energético Nacional (BEN), com os dados de fluxos não energéticos em termos monetários, obtidos da Matriz Insumo-Produto convencional. Esse método, designado como de unidades híbridas, exige uma considerável dedicação à compatibilização de dados para assegurar a coerência interna do modelo e a integridade entre as diversas fontes de informação (EPE; FIPE, 2023).

A formulação matemática adotada nesta modelagem segue os princípios do modelo clássico de Leontief, com base na identidade contábil fundamental que relaciona a produção setorial total com seus destinos intermediários e finais, representada por $Z + f = x$. Para expandir essa lógica à análise energética em unidades físicas, propõe-se uma estrutura análoga: $E + q = g$, em que E é a matriz que descreve os fluxos físicos de energia dos setores produtores para os setores consumidores, q representa o vetor de energia destinada diretamente à demanda final, e g corresponde ao vetor do consumo total de energia por tipo ou fonte.

Considerando uma economia com n setores totais, sendo m deles pertencentes ao segmento energético, a matriz intersetorial Z apresenta dimensão $n \times n$, enquanto a matriz energética E assume a forma $m \times n$, refletindo a origem energética (setores produtores) e os destinos setoriais (consumidores). Analogamente, os vetores f e x possuem dimensão $n \times 1$, ao passo que q e g são definidos em $m \times 1$.

Essa abordagem tem como objetivo viabilizar a construção de uma matriz em unidades físicas, de dimensão $m \times n$, que funcione como um operador de requerimentos totais de energia, análogo à matriz inversa de Leontief $(I - A)^{-1}$. Com isso, torna-se possível estimar o consumo energético total necessário para atender a uma dada estrutura de demanda final, por meio da relação $g = \alpha f$, onde α expressa os coeficientes de intensidade energética por setor.

3.2 Simulação de Cenários de Transição Energética

Para este estudo, será construído um cenário-base (baseline) representando a estrutura atual da matriz energética do setor de transportes no Brasil. Esse referencial servirá como ponto de comparação para a análise dos impactos econômicos simulados nos cenários alternativos de transição energética, mantendo constante a disponibilidade total de energia no setor.

Em consonância com a literatura, a consideração da demanda final como exógena é utilizada em modelos insumo-produto aplicados à simulação de cenários e à análise de choques estruturais, especialmente em estudos de energia e meio ambiente (LEONTIEF, 1986; MILLER; BLAIR, 2009;

IVANOVA et al., 2020). Essa abordagem permite isolar os efeitos diretos e indiretos das mudanças analisadas sobre a estrutura produtiva, sendo compatível com os objetivos deste estudo.

Para a análise, serão explorados os seguintes cenários:

- Cenário Base: Estrutura atual da matriz energética do transporte;
- Cenário Bio+El: Substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis;
- Cenário El: Eletrificação da frota de veículos leves dos derivados de petróleo;
- Cenário Bio: Ampliação do uso de biocombustíveis.

3.3 Base de Dados

Os dados empregados na elaboração da análise de insumo-produto serão constituídos, principalmente, pelas seguintes fontes:

- Matriz Insumo-Produto ampliada no segmento energético: será empregada a versão mais recente, referente ao ano de 2018, que foi estimada pelo Núcleo de Economia Regional e Urbana (Nereus/USP) com base em informações das Contas Nacionais fornecidas pelo IBGE, e detalhada pela EPE (2023). Esta matriz já inclui a subdivisão dos 9 setores energéticos, como detalhado na seção 4.1.
- BEN: publicado anualmente pela EPE (2025). Os dados do BEN serão usados para a caracterização dos fluxos físicos energéticos e da utilização de combustíveis, complementando as informações da MIP.

O processamento e a simulação dos cenários foram realizados com o auxílio da linguagem de programação Python, por meio das bibliotecas NumPy, Pandas e Matplotlib, que permitiram a manipulação matricial dos dados, o cálculo da inversa de Leontief, a extração dos indicadores setoriais de produção, emprego e valor adicionado, e a elaboração dos gráficos e figuras apresentados neste estudo. A seção seguinte apresenta os resultados obtidos a partir dessas simulações.

4. Resultados e Discussões

Nesta seção, serão apresentados os resultados da análise dos impactos econômicos da transição energética no setor de transportes, com base nas simulações previamente definidas. O objetivo é avaliar como diferentes alternativas de substituição energética afetam a produção, o emprego e a estrutura setorial da economia brasileira. A seguir, discute-se o desempenho de cada cenário e comparam-se seus impactos, destacando as mudanças na matriz energética e seus efeitos econômicos.

4.1 Cenário Base: Estrutura Atual da Matriz Energética do Transporte

O Cenário Base reflete a estratégia energética vigente, onde o setor de transportes no Brasil continua a ser, predominantemente, alimentado por combustíveis fósseis, especialmente gasolina e diesel. Esse cenário serve como referência para a comparação com os impactos de outros cenários, representando o ponto de partida para a análise da transição energética. A Tabela 1 apresenta os 10 setores com os maiores multiplicadores de produção, indicando os efeitos totais sobre a produção da economia a cada R\$ 1 milhão de demanda final setorial.

Tabela 1 – Setores com os Maiores Multiplicadores de Produção

ID	Setor	Multiplicador de Produção
21	Coquerias	3,53
8	Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca	2,48
9	Fabricação e refino de açúcar	2,38
22	Fabricação de biocombustíveis	2,32
19	Derivados de petróleo	2,30
10	Outros produtos alimentares	2,30
20	Biodiesel	2,29
35	Fabricação de automóveis, caminhões e ônibus, exceto peças	2,27

25	Fabricação de produtos de limpeza, cosméticos/perfumaria e higiene pessoal	2,14
12	Fabricação de produtos do fumo	2,14

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025).

Nota-se que os maiores multiplicadores de produção concentram-se em Coquerias (3,53), Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca (2,48) e Fabricação e refino de açúcar (2,38). Isso indica que uma expansão da demanda final nesses três setores gera os efeitos mais intensos sobre a produção agregada. O elevado multiplicador de Coquerias reflete sua posição como setor de transformação intensivo em insumos intermediários, com encadeamentos para trás longos e diversificados. Já os setores agroindustriais de abate e refino de açúcar evidenciam a relevância da cadeia alimentar como vetor de difusão produtiva na estrutura brasileira.

A Tabela 2 apresenta os 10 setores com maior multiplicador de emprego, medido como o número total de empregos gerados (diretos e indiretos) para cada R\$ 1 milhão de aumento na demanda final, a preços correntes.

Tabela 2 – Setores com os Maiores Multiplicadores de Emprego

ID	Setor	Multiplicador (empregos / R\$1)
73	Serviços domésticos	88,16
2	Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	38,77
14	Confecção de artefatos do vestuário e acessórios	25,24
72	Organizações associativas e outros serviços pessoais	26,19
71	Atividades artísticas, criativas e de espetáculos	27,82
53	Alimentação	20,30
8	Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca	2,62
68	Educação privada	20,07
52	Alojamento	15,78

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025).

Como pode ser observado na Tabela 2, os maiores multiplicadores de emprego concentram-se em atividades intensivas em mão de obra e, em muitos casos, de baixa produtividade relativa. Destacam-se Serviços domésticos (88,16), Pecuária (45,94) e Confecção de artefatos do vestuário e acessórios (33,52), o que evidencia o elevado potencial desses segmentos para criação de postos de trabalho por unidade adicional de demanda final.

Nos setores energéticos, os multiplicadores de emprego permanecem, em geral, reduzidos quando comparados aos setores mais intensivos em trabalho, o que reflete o uso intensivo de capital e maior grau de automação. A principal exceção é a Fabricação de biocombustíveis (14,48), que apresenta um multiplicador bem superior aos demais ramos energéticos, em linha com sua forte vinculação à agroindústria e a segmentos produtivos mais intensivos em mão de obra. Vale destacar também o contraste de Coquerias (5,47), apesar de registrar o maior multiplicador de produção de toda a economia (3,53), seu coeficiente de emprego próprio é ínfimo (0,08), o que evidencia que seu elevado encadeamento produtivo não se traduz em geração expressiva de postos de trabalho.

Já Derivados de petróleo (4,63) e Biodiesel (4,43) exibem efeitos semelhantes e relativamente modestos, enquanto a Geração de eletricidade, centralizada (3,89) e Geração de eletricidade, distribuída (3,96) apresentam impactos próximos e intermediários. O Gás Natural (2,81) registra o menor efeito entre os setores energéticos. Assim, esses resultados sugerem que, embora estratégicos para o crescimento e a transição energética, os ramos energéticos (com exceção parcial da cadeia de biocombustíveis) possuem capacidade limitada de geração direta de empregos.

A Tabela 3 apresenta os setores com os maiores multiplicadores de renda, mensurando quanto de massa salarial é gerada na economia para cada R\$1,00 milhão de acréscimo na demanda final setorial. Nesse contexto, Coef. Renda representa o coeficiente de renda ($w_j = \text{Rem } i/x_j$), isto é, a parcela da

produção setorial que se converte em remunerações do trabalho. Já Mult. Renda corresponde ao multiplicador de renda, indicando quanto de massa salarial é criado na economia, direta e indiretamente (via encadeamentos da matriz de Leontief), quando a demanda final daquele setor se eleva em uma unidade monetária.

Tabela 3 - Setores com os Maiores Multiplicadores de PIB

ID	Sector	Coef. Renda (wi)	Mult. Renda (R\$ / R\$)
73	Serviços domésticos	1,00	1,00
67	Educação pública	0,80	0,86
65	Atividades de vigilância, segurança e investigação	0,72	0,78
69	Saúde pública	0,63	0,75
68	Educação privada	0,63	0,72
66	Administração pública, defesa e seguridade social	0,62	0,72
64	Outras atividades administrativas e serviços complementares	0,45	0,56
54	Edição e edição integrada à impressão	0,38	0,55
52	Alojamento	0,41	0,54
55	Atividades de televisão, rádio, cinema e gravação/edição de som	0,27	0,48

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025)

A Tabela 3 evidencia que os maiores multiplicadores de renda concentram-se em serviços intensivos em trabalho e atividades de baixa densidade de insumos intermediários. Serviços domésticos apresenta o maior multiplicador (1,00), caso-limite em que toda a receita do setor se converte diretamente em remunerações, sem encadeamentos intermediários relevantes. Em seguida, destacam-se Atividades imobiliárias (0,98) e Educação pública (0,95), setores nos quais a estrutura de custos é dominada por remunerações, com baixa participação de insumos físicos.

Nos setores energéticos, os multiplicadores de renda são sensivelmente inferiores aos líderes gerais, refletindo a elevada participação de insumos intermediários no custo de produção desses ramos. O Gás Natural registra o maior multiplicador entre os energéticos (0,83), seguido pela Fabricação de biocombustíveis (0,78) e pelos setores de geração elétrica centralizada e distribuída e transmissão, com valores próximos entre si (0,75–0,76). Na base do grupo situam-se Biodiesel (0,55) e Derivados de petróleo (0,55), cujos coeficientes de renda próprios são também os menores do grupo (0,09–0,10), indicando estruturas de custo dominadas por insumos intermediários e, portanto, menor capacidade de retenção de massa salarial por unidade produzida. Merece destaque novamente Coquearias (0,65), a despeito de seu elevado multiplicador de produção (3,53), seu coeficiente de renda próprio é praticamente nulo (0,03), evidenciando que o expressivo encadeamento produtivo desse setor não se traduz em geração proporcional de remunerações ao longo da cadeia.

Portanto, esses resultados sugerem que políticas de estímulo à demanda final nos segmentos energéticos tendem a gerar impactos mais modestos sobre a massa salarial do que em setores de serviços, dado o perfil capital-intensivo e a maior dependência de insumos intermediários. Contudo, a avaliação dos impactos da transição energética exige a comparação entre cenários que representem mudanças na composição da matriz energética. Assim, a simulação de cenários torna-se eficaz para analisar como diferentes configurações de transição se refletem sobre a produção, o emprego e a renda ao longo da cadeia produtiva, tema da seção seguinte.

4.2 Cenário Bio+El: Substituição de Combustíveis Fósseis por Fontes Renováveis

O cenário Bio+El representa a substituição integral dos combustíveis fósseis utilizados no transporte por fontes renováveis, com redistribuição da demanda entre biodiesel, etanol e eletricidade. Os resultados apontam um efeito macroeconômico expansionista, com aumento agregado da produção em aproximadamente R\$ 6.194,23 milhões e crescimento do valor adicionado em cerca de R\$ 10.027,22 milhões. Isso indica que a recomposição da matriz energética em direção às fontes renováveis

ativa cadeias produtivas com maior capacidade de encadeamento e maior geração de renda, especialmente nos segmentos associados à bioenergia e à eletricidade.

Tabela 4 - Cenário Bio+El: Top 10 maiores ganhos de produção (preços correntes)

ID	Sector	ΔX (R\$ milhões)	ΔVA (R\$ milhões)
20	Biodiesel	88.817,27	9.000,07
22	Fabricação de biocombustíveis	49.789,32	10.501,53
1	Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	20.721,79	10.907,14
23	Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros	3.316,49	493,23
10	Outros produtos alimentares	2.658,33	540,17
48	Transporte terrestre	2.082,03	862,52
40	Geração centralizada de energia elétrica	1.982,23	661,24
24	Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos	1.561,29	269,66
58	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	1.222,64	796,23
47	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	834,58	510,30

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025)

Os maiores ganhos de produção concentram-se claramente nos setores ligados à cadeia bioenergética. O setor de Biodiesel lidera com R\$ 88.817,27 milhões, seguido por Fabricação de biocombustíveis, com R\$ 49.789,32 milhões, e Agricultura, com R\$ 20.721,79 milhões. Em seguida aparecem Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos (R\$ 3.316,49 milhões), Outros produtos alimentares (R\$ 2.658,33 milhões) e Transporte terrestre (R\$ 2.082,03 milhões). Esses resultados evidenciam que a substituição dos fósseis fortalece diretamente o agronegócio energético brasileiro e ativa uma cadeia produtiva mais longa e mais integrada.

Por outro lado, as maiores perdas de produção concentram-se nos setores diretamente ligados à cadeia fóssil. O setor de Derivados de petróleo apresenta a maior retração, com aproximadamente R\$ 143.660,62 milhões em redução de demanda, seguido por Extração de petróleo e gás natural e Gás natural, que também sofrem quedas expressivas. Isso mostra que o avanço das renováveis não apenas reduz a demanda final por combustíveis fósseis, mas também enfraquece toda a estrutura produtiva vinculada ao refino, extração e distribuição desses insumos. Em termos econômicos, o cenário representa uma realocação estrutural da produção, com deslocamento do centro dinâmico da economia energética da cadeia fóssil para a cadeia agroenergética e elétrica.

Tabela 5 - Cenário Bio+El: Top 10 maiores ganhos de emprego (preços correntes)

ID	Sector	Δemp (empregos)	Coefficiente (empregos/R\$1)
1	Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	348.156,18	16,80
22	Fabricação de biocombustíveis	89.537,30	1,80
20	Biodiesel	22.383,18	0,25
48	Transporte terrestre	21.282,29	10,22
2	Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	18.809,76	38,77
47	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	12.135,14	14,54
10	Outros produtos alimentares	10.513,57	3,95
64	Outras atividades administrativas e serviços complementares	8.141,79	15,97
39	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	3.199,52	6,66
51	Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	3.159,64	5,82

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025)

No emprego, o cenário Bio+El também apresenta resultados fortemente positivos. A Agricultura lidera com geração estimada de 258.847,00 ocupações, seguida por Fabricação de biocombustíveis, com 133.420,72 empregos, e Biodiesel, com 39.242,93 empregos. Também se destacam Outros produtos alimentares (25.648,64), Transporte terrestre (20.427,94) e Comércio por atacado e varejo (17.198,77). Isso mostra que a transição energética apoiada em bioenergia é

particularmente relevante para a geração de ocupações, uma vez que mobiliza cadeias mais intensivas em trabalho.

Já as maiores perdas de emprego aparecem, novamente, nos setores fósseis, sobretudo Derivados de petróleo, Extração de petróleo e gás e Gás natural, que concentram a maior parte da destruição ocupacional associada à retirada dos combustíveis fósseis da matriz. Assim, embora o saldo líquido do cenário seja positivo, os resultados indicam a necessidade de políticas de transição justa, voltadas à requalificação e realocação da mão de obra atualmente empregada nas cadeias fósseis.

4.3 Cenário El: Eletrificação da Frota de Veículos Leves

O cenário El simula a substituição parcial de combustíveis fósseis pela eletricidade, com foco na eletrificação da frota leve. Diferentemente do cenário anterior, seus resultados são mais ambíguos do ponto de vista econômico. Embora a eletrificação impulse a infraestrutura elétrica e alguns serviços especializados, o efeito agregado é menos favorável sobre a estrutura produtiva, especialmente porque não ativa com a mesma intensidade a cadeia agroindustrial dos biocombustíveis. Isso gera um padrão mais concentrado de ganhos e perdas, com menor capacidade de espalhamento setorial.

Tabela 6 - Cenário El: Top 10 maiores ganhos de produção (preços correntes)

ID	Setor	ΔX (R\$ milhões)	ΔVA (R\$ milhões)
40	Geração centralizada de energia elétrica	62.871,32	20.972,82
42	Transmissão	4.515,66	2.420,25
41	Geração distribuída de energia elétrica	4.062,49	1.408,11
33	Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos	1.286,43	322,38
58	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	1.133,57	738,23
62	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	765,28	283,38
64	Outras atividades administrativas e serviços complementares	726,25	490,22
31	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	554,30	181,28
28	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	452,87	133,65
57	Desenvolvimento de sistemas e outros serviços de informação	445,56	294,23

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025)

Os maiores ganhos de produção no cenário de eletrificação concentram-se em setores associados à infraestrutura elétrica. O principal destaque é a Geração centralizada de energia elétrica, com expansão de R\$ 63.378,44 milhões, muito acima dos demais setores. Em seguida aparecem Transmissão (R\$ 4.540,62 milhões), Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos (R\$ 1.285,52 milhões) e Intermediação financeira, seguros e previdência complementar (R\$ 1.132,58 milhões). Também se observam ganhos em Outras atividades profissionais, científicas e técnicas (R\$ 765,05 milhões) e Outras atividades administrativas e serviços complementares (R\$ 726,06 milhões), indicando que a eletrificação demanda uma base de apoio técnico, financeiro e operacional mais especializada.

Em contrapartida, as maiores perdas de produção recaem sobre Derivados de petróleo, com retração de R\$ 53.990,89 milhões, Extração de petróleo e gás, com R\$ 13.645,83 milhões, e Gás natural, com R\$ 7.990,21 milhões. Além disso, há perdas relevantes em Fabricação de biocombustíveis (R\$ 1.942,90 milhões) e Agricultura (R\$ 1.497,74 milhões), evidenciando que a eletrificação isolada enfraquece não apenas a cadeia fóssil, mas também parte da cadeia agroenergética nacional. Esse é um ponto central do cenário El: ele moderniza a matriz, mas não necessariamente amplia os setores nos quais o Brasil possui maior vantagem estrutural.

Tabela 7 - Cenário El: Top 10 maiores ganhos de emprego (preços correntes)

ID	Setor	Δemp	Coefficiente
----	-------	--------------	--------------

		(empregos)	(empregos/R\$1)
40	Geração centralizada de energia elétrica	27.807,66	0,44
64	Outras atividades administrativas e serviços complementares	11.595,70	15,97
62	Outras atividades profissionais, científicas e técnicas	4.475,53	5,85
61	Serviços de arquitetura, engenharia, testes/análises técnicas e PeD	3.927,10	10,03
31	Fabricação de produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos	3.639,84	6,57
42	Transmissão	3.360,39	0,74
33	Fabricação de máquinas e equipamentos elétricos	3.191,44	2,48
28	Fabricação de produtos de minerais não-metálicos	3.042,29	6,72
72	Organizações associativas e outros serviços pessoais	2.354,59	26,19
58	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	2.167,80	1,91

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025)

Em termos de emprego, os ganhos concentram-se em atividades ligadas à expansão da infraestrutura elétrica e dos serviços de apoio. A Geração centralizada de energia elétrica lidera com 27.807,66 empregos, seguida por Outras atividades administrativas e serviços complementares, com 11.595,70 empregos, e Outras atividades profissionais, científicas e técnicas, com 4.475,53 empregos. Também se destacam Serviços de arquitetura, engenharia, testes e P&D (3.927,10), Fabricação de produtos de metal (3.639,84) e Transmissão (3.360,39), o que mostra que a eletrificação cria empregos mais vinculados à infraestrutura, suporte técnico e serviços especializados.

Por outro lado, as maiores perdas de emprego se concentram nos setores fósseis e em alguns segmentos ligados à bioenergia. Em particular, Derivados de petróleo, Extração de petróleo e gás e Gás natural lideram as retrações ocupacionais, enquanto Agricultura e Fabricação de biocombustíveis também apresentam perdas relevantes. Isso torna o saldo ocupacional do cenário El relativamente mais frágil, reforçando a conclusão de que a eletrificação isolada, embora tecnologicamente importante, não é a rota mais favorável para geração líquida de empregos no contexto brasileiro.

4.4 Cenário Bio: Ampliação do Uso de Biocombustíveis

O cenário Bio simula a ampliação do uso de biocombustíveis no transporte, mantendo uma participação residual dos combustíveis fósseis. Os resultados indicam que essa é uma rota de transição com forte aderência às vantagens comparativas do Brasil, especialmente por sua conexão com a agricultura, a agroindústria e os encadeamentos produtivos associados. Em termos estruturais, trata-se de um cenário intermediário entre o Bio+El e o El, mas com perfil claramente mais expansionista sobre produção e emprego.

Tabela 8 - Cenário Bio: Top 10 maiores ganhos de produção (preços correntes)

ID	Setor	ΔX (R\$ milhões)	ΔVA (R\$ milhões)
22	Fabricação de biocombustíveis	52.298,16	11.030,69
20	Biodiesel	36.299,09	3.678,28
1	Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	22.288,04	11.731,55
23	Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos, resinas e elastômeros	3.535,22	525,76
10	Outros produtos alimentares	3.027,96	615,28
48	Transporte terrestre	2.204,05	913,07
24	Fabricação de defensivos, desinfestantes, tintas e químicos diversos	1.672,12	288,80
58	Intermediação financeira, seguros e previdência complementar	1.222,59	796,20
47	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	825,11	504,51
8	Abate e produtos de carne, inclusive os produtos do laticínio e da pesca	799,22	125,27

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025)

Os maiores ganhos de produção no cenário Bio concentram-se, novamente, em Biodiesel, com R\$ 52.599,93 milhões, Fabricação de biocombustíveis, com R\$ 32.645,61 milhões, e Agricultura, com R\$ 13.590,56 milhões. Também aparecem ganhos em Fabricação de químicos orgânicos e inorgânicos (R\$ 2.222,33 milhões), Outros produtos alimentares (R\$ 1.833,48 milhões) e Transporte terrestre (R\$ 1.511,84 milhões). Esses resultados confirmam que a ampliação dos biocombustíveis fortalece setores nos quais o Brasil já possui base produtiva consolidada e vantagem competitiva.

Quanto às maiores perdas de produção, estas se concentram nos setores fósseis, principalmente Derivados de petróleo, Extração de petróleo e gás e Gás natural. Contudo, como o cenário mantém uma participação residual dessas fontes, a retração tende a ser menos intensa do que no cenário Bio+El. Assim, o cenário Bio representa uma alternativa de transição menos disruptiva e, ao mesmo tempo, mais compatível com a estrutura produtiva já consolidada do país, permitindo avanço na descarbonização sem ruptura abrupta da base energética existente.

Tabela 9 - Cenário Bio: Top 10 maiores ganhos de emprego (preços correntes)

ID	Setor	Δemp (empregos)	Coeficiente (empregos/R\$1)
1	Agricultura, inclusive o apoio à agricultura e a pós-colheita	374.471,42	16,80
22	Fabricação de biocombustíveis	94.049,01	1,80
48	Transporte terrestre	22.529,60	10,22
2	Pecuária, inclusive o apoio à pecuária	20.054,42	38,77
47	Comércio por atacado e a varejo, exceto veículos automotores	11.997,44	14,54
10	Outros produtos alimentares	11.975,42	3,95
20	Biodiesel	9.147,87	0,25
64	Outras atividades administrativas e serviços complementares	7.959,91	15,97
51	Armazenamento, atividades auxiliares dos transportes e correio	3.357,42	5,82
39	Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos	3.207,55	6,66

Fonte: Dados da pesquisa a partir de EPE (2025)

No emprego, o cenário Bio mostra um padrão bastante favorável, liderado por Agricultura, com 169.857,56 empregos, Fabricação de biocombustíveis, com 87.515,94 empregos, e Biodiesel, com 23.242,71 empregos. Também se destacam Outros produtos alimentares (17.637,85), Transporte terrestre (14.830,12) e Comércio por atacado e varejo (12.251,18). Isso reforça que a ampliação dos biocombustíveis tende a gerar ocupações em setores mais intensivos em trabalho, sobretudo na base agroindustrial.

As maiores perdas de emprego concentram-se, como esperado, nos segmentos fósseis, principalmente em Derivados de petróleo, Extração de petróleo e gás e Gás natural. Ainda assim, o saldo líquido do cenário permanece mais positivo do que no caso da eletrificação isolada. Em síntese, o cenário Bio sugere que uma estratégia de transição apoiada nos biocombustíveis pode combinar descarbonização, dinamismo produtivo e geração de empregos, sendo especialmente aderente às características estruturais da economia brasileira.

5. Considerações Finais

A análise realizada ao longo deste estudo permitiu compreender, sob a ótica da matriz insumo-produto, como a transição energética no setor de transportes brasileiro pode redefinir as interações entre os diferentes segmentos da economia. O setor de transportes permaneceu como um dos principais emissores de gases de efeito estufa, dada a sua elevada dependência de combustíveis fósseis, contrastando com a matriz elétrica majoritariamente renovável do país. Nesse contexto, os resultados confirmaram a relevância da substituição de fontes fósseis por alternativas limpas como vetor de reorganização produtiva, com potenciais ganhos econômicos e tecnológicos.

No Cenário Bio+El, que simulou a substituição integral dos combustíveis fósseis por biocombustíveis e eletricidade renovável, os resultados apontaram forte expansão dos setores

agroenergéticos, em especial biodiesel, etanol e agricultura, com aumento do valor da produção da economia. Ao mesmo tempo, observaram-se retrações expressivas nas cadeias fósseis, sobretudo em derivados de petróleo e extração de petróleo e gás, evidenciando uma realocação estrutural em direção a atividades de menor intensidade de carbono. Em termos agregados, o cenário revela uma expansão do valor da produção e do valor adicionado, sugerindo que os setores bioenergéticos são estruturalmente mais eficientes na geração de renda do que as cadeias fósseis substituídas.

No Cenário EI, voltado à eletrificação parcial da frota de veículos leves, verificou-se expansão significativa da geração e transmissão de energia elétrica, acompanhada pela dinamização de ramos industriais ligados a equipamentos elétricos e serviços tecnológicos. Contudo, a substituição de parte da gasolina e a eliminação do gás natural resultou em retrações acentuadas nas cadeias de petróleo, gás e em segmentos agroenergéticos associados. Em termos macroeconômicos, esse cenário combina retração do valor da produção com expansão do valor adicionado, revelando que a cadeia elétrica, embora demande menor volume de insumos intermediários, apresenta maior conteúdo de valor adicionado por unidade produzida.

O Cenário Bio, que ampliou de forma intensa o uso de biocombustíveis mantendo o nível de eletricidade, apresentou resultados próximos aos do primeiro cenário, porém com maior dinamismo na agricultura e na fabricação de biocombustíveis, reforçando a centralidade do agronegócio na transição energética brasileira. Os efeitos multiplicadores positivos sobre o PIB e o emprego indicam que a bioeconomia pode atuar como ponte entre crescimento econômico e sustentabilidade, desde que apoiada por políticas de eficiência, inovação e coordenação produtiva. As perdas concentradas em atividades fósseis e intensivas em capital, por sua vez, sinalizam a necessidade de políticas de reconversão produtiva e de transição justa para os setores e territórios mais expostos à descarbonização.

De modo geral, as simulações evidenciam que a transição energética do transporte no Brasil tende a gerar impactos heterogêneos entre os setores econômicos, promovendo ganhos expressivos em ramos renováveis e tecnológicos, mas exigindo ajustes estruturais nas cadeias fósseis. A matriz insumo-produto mostrou-se uma ferramenta adequada para captar essas interdependências e quantificar os efeitos diretos e indiretos da substituição energética sobre produção, PIB e emprego. Assim, os resultados reforçam a importância de políticas coordenadas que conciliem eficiência econômica, sustentabilidade ambiental e equidade territorial.

Em termos teóricos, os resultados dialogam com três vertentes centrais que orientam o trabalho. Primeiramente, sob a perspectiva da economia ambiental, a realocação da produção e do emprego das cadeias fósseis para atividades renováveis reforça a relevância de políticas públicas voltadas à internalização das externalidades climáticas associadas ao transporte. Além disso, esses resultados evidenciam a necessidade de garantir a provisão de um clima estável, entendido como um bem público global (HUBBARD; O'BRIEN, 2019; LINDSEY; SANTOS, 2020). Por sua vez, sob a ótica schumpeteriana, os cenários simulados via MIP ilustram um processo de mudança estrutural caracterizado pela chamada “destruição criadora”. Nesse contexto, setores vinculados à bioenergia e à eletricidade emergem como vencedores, enquanto a cadeia de petróleo e gás perde centralidade econômica (SCHUMPETER, 1934; MARKARD; ROSENBLOOM, 2022).

Já os modelos de crescimento verde com tecnologias limpas ajudam a interpretar os diferentes cenários (baseados em biocombustíveis, eletrificação ou combinações entre ambos). Contudo, sua viabilidade econômica depende da existência de políticas capazes de redirecionar o progresso técnico e o investimento de longo prazo em direção a tecnologias de baixo carbono (ACEMOGLU et al., 2012; ACEMOGLU et al., 2014). Dessa forma, a análise baseada na matriz insumo-produto oferece elementos compatíveis com a literatura de crescimento verde, ao explicitar os trade-offs associados a distintas estratégias de descarbonização do transporte no Brasil.

Conclui-se que o Brasil dispõe de vantagens comparativas relevantes (ampla base bioenergética, matriz elétrica limpa e experiência institucional) que o posicionam de forma privilegiada na transição para uma economia de baixo carbono. Todavia, a efetividade dessa transição dependerá da integração entre políticas energéticas, industriais e de transporte, do fortalecimento da inovação

tecnológica e do apoio à reconversão de setores vulneráveis. O avanço rumo a uma mobilidade sustentável, portanto, representa uma oportunidade estratégica para impulsionar o desenvolvimento econômico inclusivo e a modernização produtiva nacional.

Como todo estudo, esta pesquisa apresenta algumas limitações que devem ser consideradas na interpretação de seus resultados. Em primeiro lugar, a análise baseia-se na matriz insumo- produto referente ao ano-base de 2018, o que implica que transformações mais recentes associadas à aceleração da transição energética no Brasil não estão plenamente incorporadas. Essas transformações incluem avanços tecnológicos, mudanças regulatórias e a expansão recente de fontes alternativas de energia.

Em segundo lugar, a abordagem insumo-produto adotada pressupõe coeficientes técnicos fixos, o que implica ausência de substituição entre insumos e tecnologia considerada invariável no horizonte analisado. Dessa forma, o modelo não captura ajustes endógenos de preços, mudanças comportamentais ou ganhos de eficiência tecnológica ao longo do tempo, sendo mais adequado à análise estrutural dos encadeamentos produtivos do que à representação de dinâmicas de longo prazo. Além disso, embora o uso de uma matriz insumo-produto híbrida permita integrar fluxos físicos de energia e fluxos monetários, persistem limitações associadas à agregação setorial e à disponibilidade de dados energéticos compatíveis, o que pode ocultar heterogeneidades tecnológicas intra-setoriais relevantes, especialmente no setor de transportes.

Diante dessas limitações, pesquisas futuras podem avançar por meio da atualização da análise com matrizes insumo-produto mais recentes e com maior desagregação energética, de modo a incorporar avanços recentes da transição energética. Ademais, a adoção de extensões da matriz insumo-produto que incorporem ajustes temporais ou sua integração com modelos de equilíbrio geral computável pode permitir a incorporação de mecanismos de substituição entre insumos, ajustes de preços relativos e respostas comportamentais da demanda. Por fim, análises regionais com matrizes insumo-produto subnacionais e estudos mais desagregados de tecnologias específicas podem aprofundar a compreensão dos impactos econômicos, energéticos e ambientais da transição energética no setor de transportes.

Referências

ACEMOGLU, D. et al. The environment and directed technical change. *American Economic Review*, v. 102, n. 1, p. 131–166, fev. 2012. ISSN 0002-8282. <<https://pubs.aeaweb.org/doi/10.1257/aer.102.1.131>>.

ACEMOGLU, D. et al. Transition to Clean Technology. [S.l.], 2014. <<https://www.nber.org/papers/w20743>>.

EPE. Metodologia Para Construção de Uma Matriz Insumo-Produto Com Detalhamento Dos Setores Energéticos. Rio de Janeiro, RJ, 2023. <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/metodologia-para-construcao-de-uma-matriz-insumo-produto-com-detalhamento-dos-setores-energeticos>>.

EPE. Balanço Energético Nacional 2025: Ano Base 2024. Rio de Janeiro, RJ, 2025. <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>>.

EPL. Plano Nacional de Logística 2035. [S.l.], 2021. <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2021/10/imagens/resumoExecutivo_PNL2035_ed_105112021.pdf>.

FALCONE, P. M. Sustainable energy policies in developing countries: A review of challenges and opportunities. *Energies*, v. 16, n. 18, p. 6682, set. 2023. ISSN 1996-1073.

<<https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6682>>.

FGV. Caderno de Transição Energética No Setor de Transportes. [S.l.], 2022. <<https://fgvenergia.fgv.br/publicacao/caderno-de-transicao-energetica-no-setor-de-transportes>>.

GONÇALVES, D. N. S.; GOES, G. V.; D'AGOSTO, M. A. Transição Energética No Brasil: Um Cenário Compatível Com o Acordo de Paris Para o Setor de Transportes Até 2050. Rio de Janeiro, RJ, 2020. <<http://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/10/brazil-transport-policy-paper-pt.pdf>>.

HILGEMBERG, E. M.; GUILHOTO, J. J. M. Uso de combustíveis e emissões de co2 no brasil: um modelo inter-regional de insumo-produto. Nova Economia, v. 16, n. 1, p. 49–99, abr. 2006. ISSN 0103-6351. <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-63512006000100002&lng=pt&tlng=pt>.

HUBBARD, R. G.; O'BRIEN, A. P. Externalities, Environmental Policy, and Public Goods. Seventh. Boston: [s.n.], 2019. <<https://site.unibo.it/climate-econ-101/en/climate-material-by-textbook/microeconomics-textbooks/us-7-m>>.

IBGE. Sistema de Contas Nacionais: Brasil - Contas Nacionais Anuais 2023. Rio de Janeiro, RJ, 2023. <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais.html>>.

IEA. World Energy Outlook 2020. Paris, 2020. <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>>.

IEA. CO2 Emissions in 2022. Paris, 2023. <<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>>. IEA. Global EV Outlook 2023: Catching up with Climate Ambitions. Paris, 2023. <https://www.oecd.org/en/publications/global-ev-outlook-2023_cbe724e8-en.html>.

IEA. Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028 – Biofuels. Paris, 2023. <<https://www.iea.org/reports/renewables-2023/biofuels>>.

IVANOVA, D. et al. Quantifying the potential for climate change mitigation of consumption options. Environmental Research Letters, v. 15, n. 9, p. 093001, set. 2020. ISSN 1748-9326. <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab8589>>.

JACOBSON, M. Z. et al. Low-cost solutions to global warming, air pollution, and energy insecurity for 145 countries. Energy & Environmental Science, v. 15, n. 8, p. 3343–3359, 2022. ISSN 1754-5692, 1754-5706. <<https://xlink.rsc.org/?DOI=D2EE00722C>>.

JANNUZZI, G. D. M. Transição energética no brasil. Ciência e Cultura, v. 76, n. 3, p. 1–13, 2024. ISSN 00096725. <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252024000300004&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>.

LEONTIEF, W. The Structure of American Economy, 1919-1929 : An Empirical Application of Equilibrium Analysis / by Wassily W. Leontief. [S.l.]: Harvard University Press, 1941.

LEONTIEF, W. Input-Output Economics. 2nd ed. ed. New York: Oxford University Press, 1986. <<https://books.google.com/books?id=hBDEXblq6HsC>>. ISBN 978-0-19-503525-4/978-0-19-503527-8.

LINDSEY, R.; SANTOS, G. Addressing transportation and environmental externalities with economics: Are policy makers listening? *Research in Transportation Economics*, v. 82, p. 100872, out. 2020. ISSN 07398859. <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0739885920300706>>.

MARKARD, J.; ROSENBLOOM, D. Phases of the net-zero energy transition and strategies to achieve it. In: *Routledge Handbook of Energy Transitions*. New York: Araújo, K., 2022. <<https://arxiv.org/abs/2311.09472>>.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. *Foundations and Extensions*. Cambridge: [s.n.], 2009. v. 2. ISBN 978-1-108-67621-2.

NETO, A. M. Transição energética: de que falamos afinal? contribuições ao debate sobre implementação de políticas públicas. IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), dez. 2024. <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/15999>>.

RIMPAS, D. et al. Decarbonizing the transportation sector: A review on the role of electric vehicles towards the european green deal for the new emission standards. *Air*, v. 3, n. 2, p. 10, abr. 2025. ISSN 2813-4168. <<https://www.mdpi.com/2813-4168/3/2/10>>.

SACHS, J. *The Age of Sustainable Development*. New York: Columbia University Press, 2015. <<https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.7312/sach17314/html>>. ISBN 978-0-231-17314-8 978-0-231-17315-5.

SANTOS, L. D. O.; MIGUEZ, T. D. H. L. Modelo insumo-produto aplicado ao bndes : resultados para emprego, massa salarial e valor adicionado no período 2014- 2021. *Boletim Mercado de Trabalho*, n. 74, p. 61–78, nov. 2022. ISSN 1676-0883. <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11653/1/BMT74_modelo_insumo.pdf>.

SANTOS, M. R. dos et al. *Transição Energética: Geopolítica, Corpo- rações, Finanças e Trabalho*. Rio de Janeiro, RJ: Editora Telha, 2023. <<https://ineep.org.br/transicao-energetica-geopolitica-corporacoes-financas-e-trabalho/>>. ISBN 978-65-5412-498-0.

SCHUMPETER, J. A. *The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle*. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1934.

SILVA, M. E. R. A. D.; SOARES, M. L. Q. Gênese do setor elétrico brasileiro: estudo sobre a dependência da matriz hidroelétrica no contexto do desenvolvimento sustentável. *Direito Ambiental e Sociedade*, v. 11, n. 2, p. 179–206, set. 2021. ISSN 22370021. <<http://www.ucs.br/etc/revistas/index.php/direitoambiental/article/view/10365>>.

SILVA, M. P. N. *Projeção de emissão de co2 no brasil, para o período 2006 a 2015: uma análise com base na integração de modelos macroeconômico e insumo-produto*. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, 2009. <<https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/4002>>.

STERN, N. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. <<https://www.aeaweb.org/articles?id=10.1257/aer.98.2.1>>. ISSN 1944-7981.

TOSUN, J.; RINSCHIED, A. The clean energy ministerial: Motivation for and policy consequences of membership. *International Political Science Review*, v. 42, n. 1, p. 114–129, nov. 2021. ISSN 0192-5121, 1460-373X.