



INTEGRAÇÃO DE INSUMO-PRODUTO E AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA PARA MENSURAR A TRANSIÇÃO TECNOLÓGICA DA FROTA DE ÔNIBUS URBANOS NO BRASIL

INPUT-OUTPUT INTEGRATION AND LIFE CYCLE ASSESSMENT TO MEASURE THE TECHNOLOGICAL TRANSITION OF URBAN BUS FLEETS IN BRAZIL

Autores: Robson Ferreira da Cruz¹, Marcelo Pereira da Cunha², Joaquim Eugênio Abel Seabra³

¹UNICAMP – r075524@dac.unicamp.br; ²UNICAMP – mpcunha@unicamp.br; ³UNICAMP – jseabra@fem.unicamp.br

RESUMO

A substituição de ônibus urbanos a Diesel por tecnologias de menor intensidade de carbono, como veículos a gás natural veicular (GNV) e ônibus elétricos a bateria (BEV), é uma estratégia central para a descarbonização do transporte público no Brasil. Este estudo adota uma abordagem híbrida de Insumo-Produto acoplada à Avaliação de Ciclo de Vida (IO-LCA), utilizando matrizes econômicas de 40×40 setores e vetores satélite de energia e emissões representativos da economia brasileira em 2015. O objetivo é quantificar os impactos sistêmicos de um cenário prospectivo até 2030, no qual 5% da frota de ônibus a Diesel é convertida para GNV e 12% para BEV. O choque monetário (ΔY) é calculado a partir de volumes físicos do inventário nacional de frota e preços unitários de 2015, permitindo estimar variações no consumo energético, emissões de gases de efeito estufa (GEE) e fluxos econômicos intersetoriais. Os resultados indicam redução acumulada de 2,5 Mtoe no consumo energético, sendo 0,055 Mtoe diretamente atribuídos ao setor de Transporte Rodoviário de Passageiros. Em emissões, observa-se queda total de 3,95 MtCO₂eq, com 0,2 MtCO₂eq de reduções diretas nesse setor. A análise intersetorial evidencia que parte expressiva dos benefícios ambientais resulta de mudanças a montante (efeitos indiretos), envolvendo setores como indústria de equipamentos, energia e insumos, não captados por abordagens tanque-a-roda (TTW). Conclui-se que a IO-LCA amplia a compreensão dos impactos da transição tecnológica, sendo ferramenta útil para orientar políticas públicas voltadas à mobilidade urbana sustentável.

Palavras-chave: IO-LCA; transporte público; ônibus elétrico; GNV; descarbonização.

ABSTRACT

The replacement of Diesel-powered urban buses with lower-carbon technologies, such as compressed natural gas (CNG) and battery electric vehicles (BEVs), is a central strategy for decarbonizing public transportation in Brazil. This study applies a hybrid Input-Output integrated with Life Cycle Assessment (IO-LCA) approach, using 40×40 sector economic matrices and satellite accounts for energy and emissions representative of Brazil's 2015 economy. The objective is to quantify the systemic impacts of a prospective scenario to 2030, in which 5% of the Diesel bus fleet is converted to CNG and 12% to BEVs. Monetary shock (ΔY) is calculated from physical volumes derived from the national fleet inventory and 2015 unit prices, enabling estimates of variations in energy consumption, greenhouse gas (GHG) emissions, and intersectoral economic flows. The results indicate a cumulative reduction of 2.5 Mtoe in energy consumption, with 0.055 Mtoe directly attributable to the Road Passenger Transport sector. Regarding emissions, a total decrease of 3.95 MtCO₂eq is observed, of which 0.2 MtCO₂eq correspond to direct reductions in this sector. The intersectoral analysis reveals that a significant share of environmental benefits arises from upstream changes



(indirect effects), involving sectors such as equipment manufacturing, energy production, and material supply, which are not captured by conventional tank-to-wheel (TTW) analyses. The study concludes that IO-LCA provides a broader understanding of the impacts of technological transition, supporting the design of public policies aimed at sustainable urban mobility.

Keywords: IO-LCA; public transportation; electric buses; CNG; decarbonization.

1 INTRODUÇÃO

O setor de transporte é responsável por cerca de 47% do consumo final de energia no Brasil e por 21% das emissões diretas de CO₂ (EPE, 2023). Nesse contexto, os ônibus urbanos movidos a Diesel desempenham papel essencial na mobilidade das regiões metropolitanas e respondem por parcela significativa das emissões nacionais. Em 2015, essas emissões totalizaram 28,6 MtCO₂eq, sendo 24,7 MtCO₂eq diretamente atribuídas à combustão do Diesel utilizado na frota, concentrada majoritariamente nos grandes centros urbanos (MCTI, 2016; matriz IECO2_40.xlsx). Considerando a urgência climática e as diretrizes para a transição energética, políticas públicas recentes, como a Lei nº 14.594/2024 (*Combustível do Futuro*) e a Medida Provisória nº 1.205/2023 (*Programa MOVER*), têm incentivado a diversificação tecnológica do transporte coletivo urbano. Entre as alternativas em destaque, destacam-se o Gás Natural Veicular (GNV) — em suas formas fóssil e não fóssil — e a tração elétrica por baterias (BEV), ambas consideradas estratégicas para a mitigação de emissões e modernização da frota (Tabela 1).

Tabela 1 - Arquiteturas veiculares e vetores energéticos associados

		
Diesel EURO 6	GNV	BEV (Elétrico)
20,6 MJ/km	20,9 MJ/km	4,1 MJ/km
~ 700 mil R\$	~ 810 mil R\$	~ 2.500 mil R\$
NO _x →	NO _x ↓	NO _x Ø
MP →	MP ↘	MP Ø
CO ₂ →	CO ₂ →	CO ₂ Ø

Fonte: autoria própria

Apesar desses avanços regulatórios e do crescente consenso acerca do potencial de mitigação dessas tecnologias (CEPAL, 2021; PNME, 2022), a maior parte dos estudos desenvolvidos no contexto brasileiro ainda se concentra na abordagem tanque-a-roda (TTW). Essa perspectiva, embora útil para análises operacionais, não captura os impactos indiretos associados às etapas a montante da cadeia, como refino de combustíveis, geração de eletricidade, metalurgia, fabricação de equipamentos e prestação de serviços correlatos (Bae & Kim, 2021; E-Bus Radar, 2025). A ausência dessa visão sistêmica pode levar à subestimação ou superestimação dos reais benefícios ambientais e econômicos da transição tecnológica. Para abordar esses efeitos de forma abrangente, a literatura tem recorrido à metodologia de Insumo-Produto (IP), proposta originalmente por Leontief e formalizada por Stone (1961). Essa ferramenta permite modelar os encadeamentos intersetoriais de maneira consistente, representando fluxos

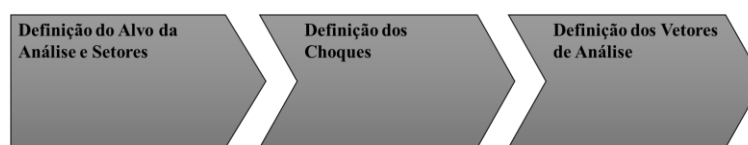


monetários entre setores econômicos. Quando combinada a vetores satélite de energia e emissões, a metodologia resulta na Avaliação de Ciclo de Vida via Insumo-Produto (IO-LCA), possibilitando o cálculo de intensidades energéticas (toe/mil R\$) e intensidades de carbono (kg CO₂eq/mil R\$) compatíveis com a estrutura econômica nacional (Miller & Blair, 2009). Embora amplamente aplicada em países membros da OCDE para a avaliação de políticas climáticas e energéticas (Göransson et al., 2020), a IO-LCA ainda é pouco explorada no Brasil, sobretudo para o setor de transporte público urbano. Este estudo busca preencher essa lacuna por meio da integração de quatro matrizes fundamentais: i) matriz monetária de 40×40 setores; ii) matriz de quantidades físicas (energia e deslocamento); iii) matriz de emissões de gases de efeito estufa; e iv) matriz de preços unitários, todas ancoradas em dados econômicos do ano de 2015. Essa abordagem híbrida, denominada modelo híbrido de insumo-produto, oferece uma estrutura robusta para a avaliação dos impactos diretos e indiretos associados à transição tecnológica do transporte público. A questão central que orienta este estudo é: *qual configuração tecnológica da frota de ônibus urbanos proporciona o melhor equilíbrio entre impactos ambientais e econômicos, considerando os efeitos intersetoriais captados pela abordagem IO-LCA?*

2 METODOLOGIA

O procedimento metodológico foi estruturado em três etapas sequenciais, conforme apresentado no framework da Figura 1, com o objetivo de integrar dados físicos, monetários e ambientais em um modelo híbrido de Insumo-Produto, acoplado à Avaliação de Ciclo de Vida (IO-LCA).

Figura 1 - Estrutura metodológica em três etapas



Fonte: autoria própria

Etapa 1: Definição do Alvo da Análise e Setores

As seguintes avaliações tiveram foco na análise: (1) Impactos nos Setores (diretos e indiretos), (2) Emissões de GEE (diretas e indiretas), (3) Energia (Consumo Energético), (4) Deslocamentos (pass.km), (5) Rendimentos no Trabalho (Remunerações) e (6) Importações.

Conjunto de Dados

O modelo foi desenvolvido com base em 4 (quatro) matrizes intersetoriais, cada uma composta por 40 setores econômicos (40×40), conforme proposta de Grotera (2021).



Tabela 2 - Conjunto de dados utilizado e suas características

Matriz	Conteúdo	Unidade	Fonte
IOM_40.xlsx	Matriz de valores inter-setoriais a preços básicos	mil R\$ (2015)	https://data.mendeley.com/datasets/hpkscg6b6/1
Qtities_40.xlsx	Matriz de quantidades energéticas (ktoe) e pseudo-unidades	ktoe, m ³ , kWh (2015)	
IECO2_40.xlsx	Emissões diretas setoriais de CO ₂ eq	MtCO ₂ eq(2015)	
Price_40.xlsx	Preços unitários por vetor energético	R\$/ktoe, R\$/m ³ , R\$/kWh (2015)	

Fonte: autoria própria

As matrizes foram adaptadas e customizadas para este estudo, contemplando fluxos monetários, físicos e ambientais da economia brasileira em 2015. Logo, essas matrizes permitiram a integração de dados econômicos, energéticos e ambientais, formando a base para a modelagem híbrida de insumo-produto.

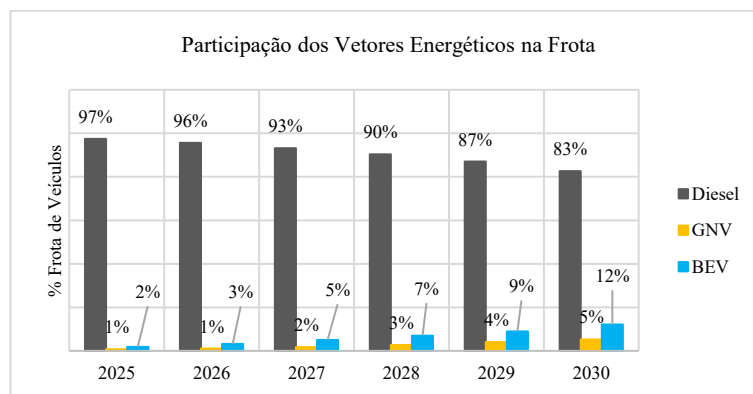
Etapa 2: Definição dos Choques

Nesta etapa, foram determinadas as demandas anuais dos vetores energéticos Diesel, GNV e Eletricidade para o período de 2025 a 2030, considerando os seguintes elementos:

- Inventário da frota veicular, com base em RENAVAM (2022), ANTP (2017) e E-Bus Radar (2025);
- Rodagem média anual, adotada como 65.000 km/ano (ANTP, 2017);
- Consumos por arquitetura veicular (litros/100 km, m³/100 km, kWh/100 km).

As participações percentuais de cada vetor energético na frota e os respectivos inventários por tipo de arquitetura foram representados graficamente nas Figuras 2 e 3.

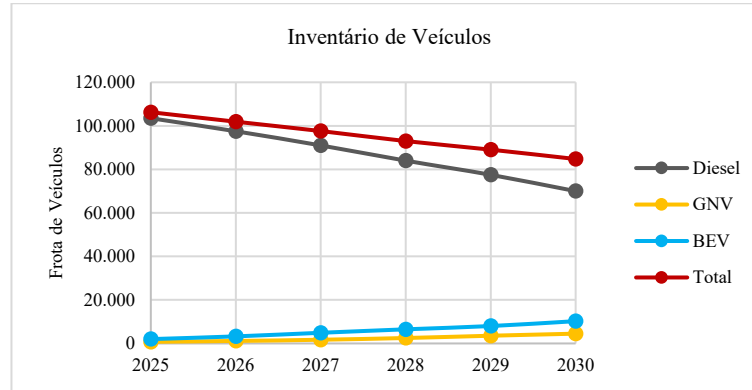
Figura 2 - Participação do Diesel, GNV e BEV (Ônibus Elétrico) na frota (2025 a 2030)



Fonte: autoria própria, baseado em RENAVAM (2022), ANTP (2017) e E-Bus Radar (2025)



Figura 3 - Inventário de veículos por arquitetura veicular (2025 a 2030)



Fonte: autoria própria, baseado em RENAVAL (2022), ANTP (2017) e E-Bus Radar (2025)

A Tabela 3 apresenta os consumos para cada arquitetura veicular. Os preços unitários os vetores energéticos foram extraídos da matriz Price_40.xlsx (2015): para o Diesel com, $P_{\text{Diesel}} = 1,99$ [R\$/l], para o GNV, $P_{\text{GNV}} = 0,38$ [R\$/Nm³] e para a Eletricidade, $P_{\text{Elec}} = 0,16$ [R\$/kWh].

Tabela 3 - Consumos para cada arquitetura veicular

Ano	Diesel [l/100km]	GNV [m ³ /100km]	BEV [kWh/100km]
2025	57,5	55	115
2026			110
2027			106
2028			102,5
2029			99
2030			95

1[ktoe] = 41.868 [MJ]; $\rho_{\text{Diesel}} = 0,832$ [kg/l]; $PCI_{\text{Diesel}} = 43$ [MJ/kg]; $PCI_{\text{GNV}} = 38$ [MJ/Nm³]
Fonte: ANTP (2017)

Cálculo dos Choques Monetários

O impacto monetário na demanda final (ΔY) foi estimado com base na variação dos volumes físicos consumidos, conforme as equações (1) a (6):

$$\Delta Y_{\text{Diesel}} = -\frac{L_{\text{Diesel}} P_{\text{Diesel}}}{10^3} \quad (1)$$

$$\Delta Y_{\text{GNV}} = +\frac{V_{\text{GNV}} P_{\text{GNV}}}{10^3} \quad (2)$$

$$\Delta Y_{\text{Elec}} = +\frac{E_{\text{BEV}} P_{\text{Elec}}}{10^3} \quad (3)$$

Onde:

$$L_{\text{Diesel}} = \#Veículos_{\text{Diesel}} * Consumo_{\text{Diesel}} \left[\frac{l}{km} \right] * Rodagem \text{ média } [km] \quad (4)$$

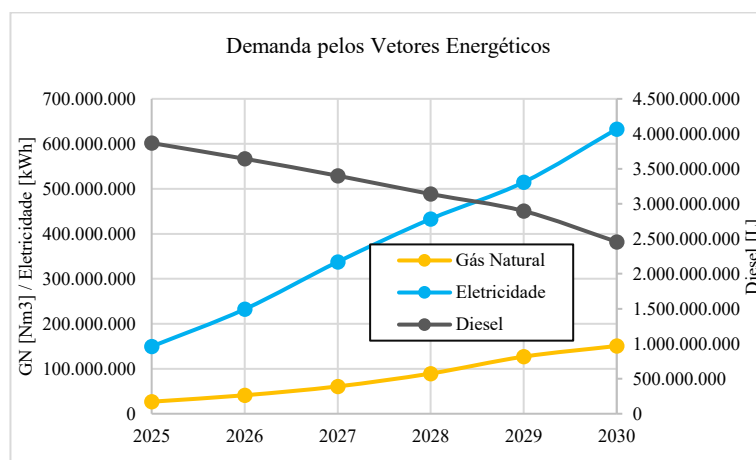


$$V_{GNV} = \#Veículos_{GNV} * Consumo_{GNV} \left[\frac{m^3}{km} \right] * Rodagem\ média\ [km] \quad (5)$$

$$E_{BEV} = \#Veículos_{BEV} * Consumo_{BEV} \left[\frac{kWh}{km} \right] * Rodagem\ média\ [km] \quad (6)$$

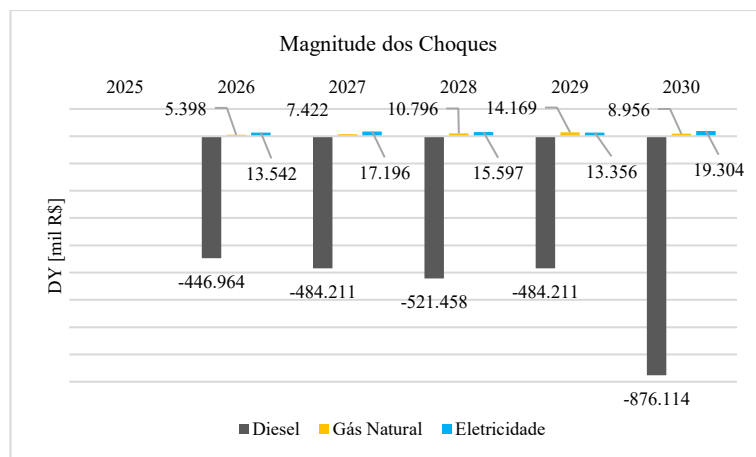
Esses cálculos permitiram quantificar as variações na demanda final (em L, Nm³ ou KWh), representadas na Figura 4 (volumes físicos, conforme (1), (2) e (3)) e Figura 5 (choques monetários, conforme (4), (5) e (6)).

Figura 4 - Demandas dos energéticos: Diesel (litros), GNV (Nm³) e Eletricidade (kWh), 2025-2030



Fonte: autoria própria

Figura 5 - Magnitude dos choques monetários [mil R\$] na demanda final ΔY dos setores do Diesel, Gás Natural e Eletricidade (BEV)



Fonte: autoria própria



Etapla 3: Definição dos Vetores de Análise

Na última etapa, os vetores satélite foram aplicados ao modelo para quantificar os impactos nos Energético, Ambiental e Econômico. Na definição dos vetores, lançou-se mão das seguintes premissas:

- Vetores de Energia e Emissões com foco para os Setores Energético-Intensivos (ex. O Setor de Educação e Saúde tem contribuição = zero!);
- Vetor de Deslocamento voltados aos modais de transporte, mas teve-se foco no Setor de Transporte Rodoviário de Passageiros;
- Vetor de Rendimentos do Trabalho e Importações contemplou todos os Setores da economia;

Por definição das matrizes, os vetores seguiram as seguintes unidades físicas:

- Energia ($\text{toe} \cdot \text{mil R\$}^{-1}$) e Deslocamento ($\text{pass} \cdot \text{km} \cdot \text{mil R\$}^{-1}$), obtidos da razão $Q_{\text{tities_40}}/\text{Produção}$;
- Emissões ($\text{kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{mil R\$}^{-1}$), obtido da razão $\text{IECO}_2\text{_40}/\text{Produção}$.

Os cálculos foram realizados conforme as Equações (7) a (11):

$$\Delta \text{Energia} = \text{Vetor Energia} \left[\frac{\text{toe}}{\text{mil R\$}} \right] * \Delta x [\text{mil R\$}] \quad (7)$$

$$\Delta \text{Emissões} = \text{Vetor Energia} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{mil R\$}} \right] * \Delta x [\text{mil R\$}] \quad (8)$$

$$\Delta \text{Deslocamento} = \text{Vetor Deslocamento} \left[\frac{\text{pass.km}}{\text{mil R\$}} \right] * \Delta x [\text{mil R\$}] \quad (9)$$

$$\Delta \text{Rendimentos} = a\text{Rendimentos}^T * \Delta x [\text{mil R\$}] \quad (10)$$

$$\Delta \text{Importação} = a\text{Importação}^T * \Delta x [\text{mil R\$}] \quad (11)$$

Onde Δx representa a variação na produção setorial induzida pelos choques monetários calculados na Etapa 2. Essa abordagem possibilitou avaliar de forma integrada e intersetorial os efeitos diretos e indiretos da transição tecnológica da frota de ônibus urbanos, capturando não apenas os impactos operacionais do transporte, mas também os efeitos a montante nas cadeias produtivas de energia, equipamentos e serviços.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Impactos na Produção dos Setores

A Figura 3 mostra que, até 2030, a frota total deverá reduzir-se em aproximadamente 20%. Com a penetração de 5% de veículos a GNV e 12% de veículos elétricos (BEV), projeta-se uma queda de 36% no consumo de Diesel pelo Setor de Transporte Rodoviário de Passageiros. O efeitos dos choques apresentados na Figura 5 em todos os Setores da economia podem ser explicitados pelas Figuras 6 e 7. A Figura 6 demonstra que o Setor diretamente afetado é o Diesel, tendo efeitos também nos Setores de Petróleo Bruto e Outros Bens e Serviços. Na Figura 7, considerando o critério de Índices de Ligação à Frente e à Trás >1 , os Setores Diesel e de Transporte Rodoviário de Cargas atendem a este requisito, sendo considerados Setores-chave para a



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

economia neste contexto. Logo, sobre esta perspectiva, o Setor Diesel é o que mais afeta e é o mais afetado aos choques na economia. Os impactos na produção (ΔX) de todos os Setores, considerando os choques (ΔY) da Figura 5 estão apresentados na Figura 8.

Figura 6 - Impacto dos choques na demanda final (ΔY) na produção (ΔX) dos setores da economia (dados de 2015)

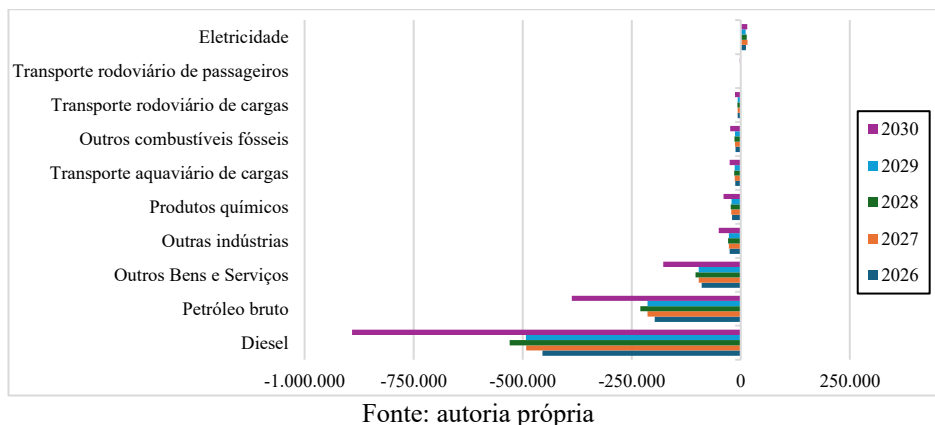


Figura 7 - Índices de Ligação à Frente (Azul) e para Trás (Laranja) para todos os setores da economia

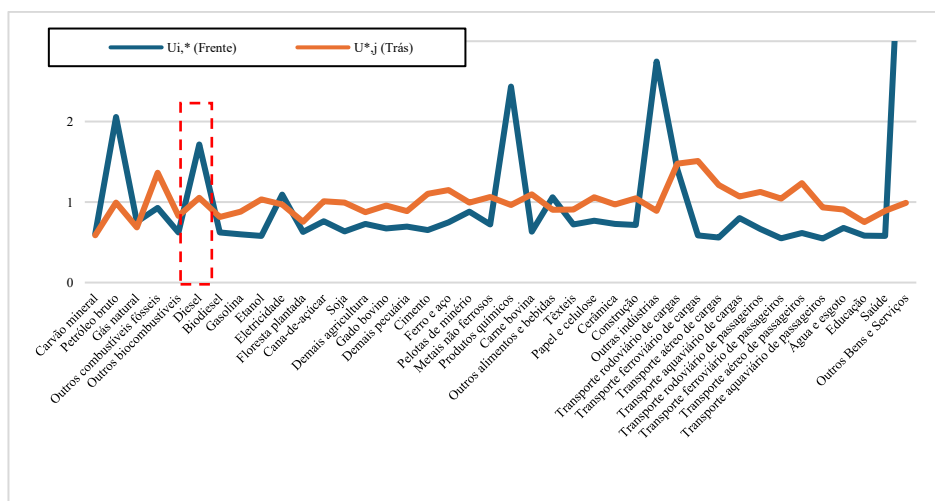
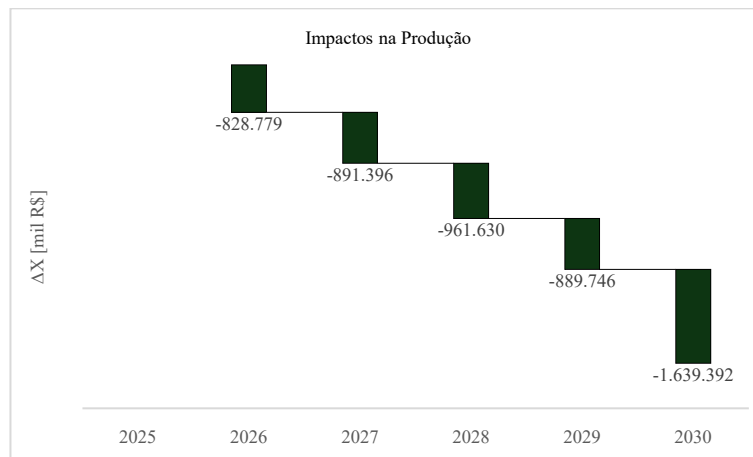




Figura 8 - Impactos na Produção (ΔX) dos setores devidos aos choques (ΔY) na Demanda Final (Figura 5)

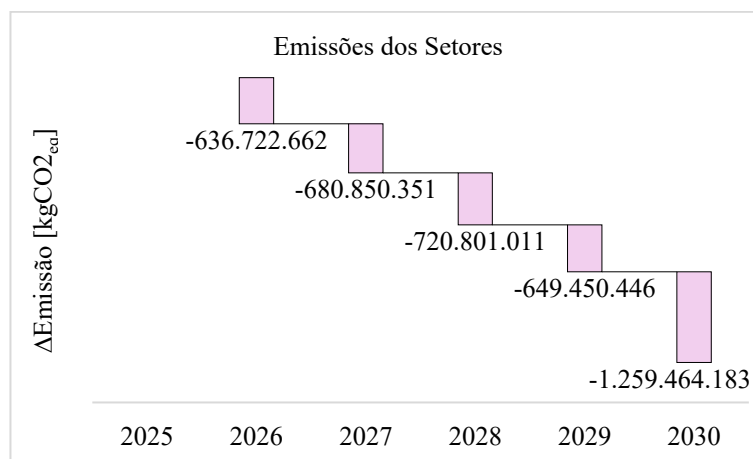


Fonte: autoria própria

Emissões nos Setores

As Figuras 9 e 10 apresentam as emissões dos Setores e no Setor do Transporte Rodoviário de Passageiros, respectivamente. Nota-se que o Setor de Transporte Rodoviário de Passageiros representa 5,2% das emissões de todos os Setores, sendo que neste Setor, o Setor do Diesel representa 69% das emissões e do Gás Natural 9% das emissões. Para o ano de 2015, não há registro do Setor de Eletricidade no Setor Rodoviário de Transporte de Passageiros. O restante das emissões (22%) é representado pelos Setores de Gasolina, Etanol, BioDiesel e Outros Combustíveis Fósseis.

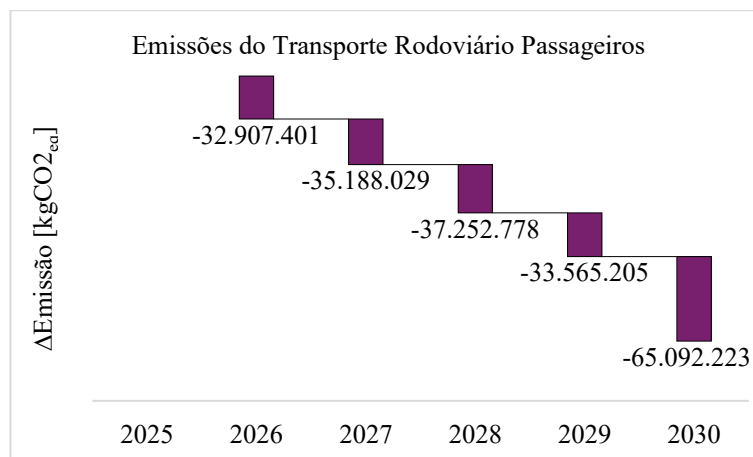
Figura 9 - Variação das emissões [kgCO_2eq] de todos os setores, conforme choques (ΔY) na Demanda Final (Figura 5)



Fonte: autoria própria



Figura 10 - Variação das Emissões [kgCO₂eq] do setor de Transporte Rodoviário de Passageiros, conforme choques (ΔY) na Demanda Final (Figura 5)



Fonte: autoria própria

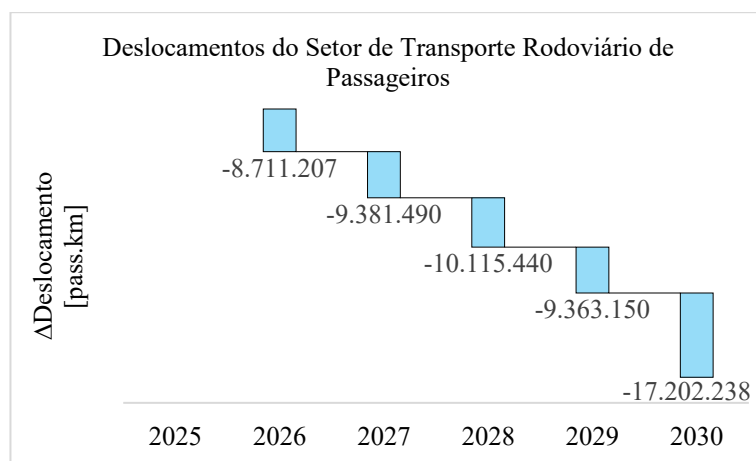
A inversa de Leontief permite capturar emissões diretas e indiretas, equivalentes à abordagem WTW (Well-to-Wheel, Poço-a-Roda) adotada na ACV (Avaliação do Ciclo de Vida). No escopo TTW (Tank-to-Wheel, Tanque-a-Roda), somente as emissões do escapamento são consideradas; já o trecho WTT (Well-to-Tank, Poço-ao-Tanque) — produção e distribuição de energia — é integrado aos demais setores energéticos na matriz IO-LCA. No presente estudo, a ausência de um setor específico de Eletricidade dedicado ao transporte impede quantificar plenamente o WTT da tração elétrica, mas o método continua válido para Diesel e GNV. Destaca-se que a redução das emissões é direcionada pela queda do consumo do Diesel, com menor contribuição do Gás Natural (9%). Neste cenário, o GNV sendo fóssil, retarda a queda quando desloca o uso do Diesel nas frotas enquanto o BEV amplifica a queda pela redução de emissões TTW (Tank-to-Wheel, do Tanque-a-Roda).

Deslocamento no Setor de Transporte Rodoviário de Passageiros

A redução de 20% da frota até 2030 indicada pela Figura 3 provoca a redução de deslocamentos (pass.km) no Setor de Transporte Rodoviário de Passageiros, vide Figura 11. Apesar de fazer a predição dos efeitos dos choques no horizonte temporal entre 2026-2030, o modelo não foi capaz de apontar para qual modal de transporte se dá migração dos passageiros dos ônibus em virtude da queda de 20%. Para o ano de 2015, a competição do transporte público por ônibus urbanos com formas alternativas, como o transporte por aplicativo, não era tão relevante. Outro fato a ser realçado é a reconfiguração do transporte público por ônibus após a pandemia, em que vários sistemas de transporte municipais foram impactados de forma profunda pela falta de arrecadação da tarifa pública (valor da passagem), com falência de várias empresas e, aquelas existentes, enfrentam desafios para a renovação da frota e consequente melhor oferta de qualidade do serviço. Isto se dá num cenário de restrição de subsídio público ao transporte (pagamento da tarifa técnica) e a postergação de novas licitações.



Figura 11 - Variação dos Deslocamentos [pass.km] do setor de Transporte Rodoviário de Passageiros, conforme choques (ΔY) na Demanda Final (Figura 5)

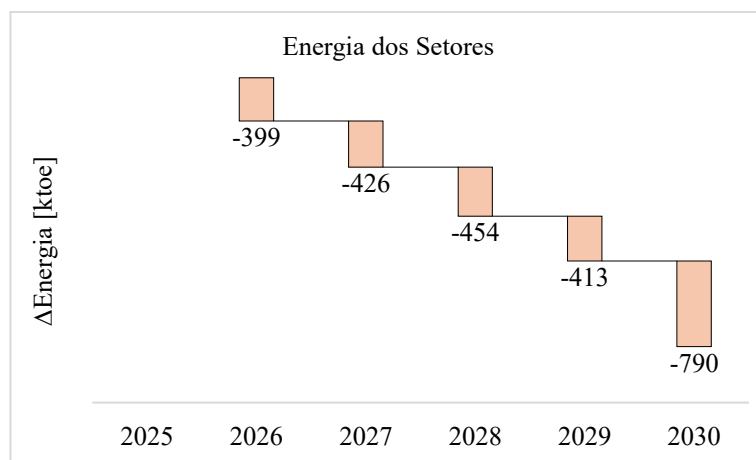


Fonte: autoria própria

Energia nos Setores

As Figuras 12 e 13 apresentam a energia dos Setores e no Setor do Transporte Rodoviário de Passageiros, respectivamente. Nota-se que o Setor de Transporte Rodoviário de Passageiros representa 2,3% da energia de todos os Setores, sendo que neste Setor, o Setor do Diesel representa 55% da energia e do Gás Natural 10% da energia. Para o ano de 2015, não há registro do Setor de Eletricidade no Setor Rodoviário de Transporte de Passageiros. O restante da energia (35%) é representado pelos Setores de Gasolina, Etanol, BioDiesel e Outros Combustíveis Fósseis.

Figura 12 - Variação da Energia [ktoe] de todos os setores, conforme choques (ΔY) na Demanda Final (Figura 5)



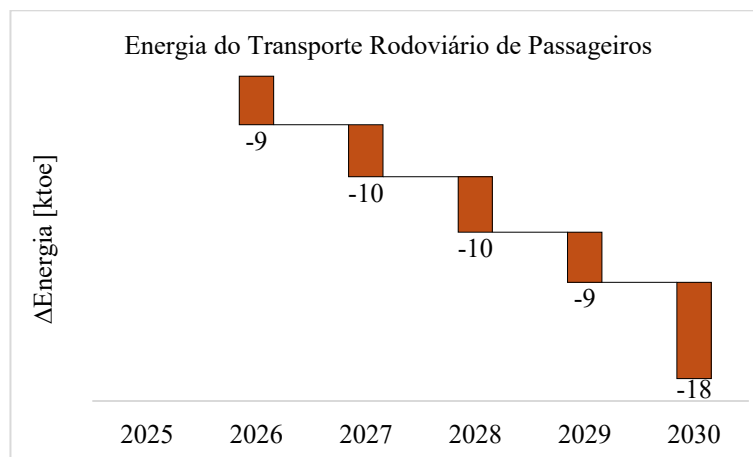
Fonte: autoria própria

Ainda, pondera-se que a contribuição relevante na queda de energia de todos os setores e no próprio Setor de Transporte Rodoviário de Passageiros (55%) é puxado pelo Diesel, que revela a grande dependência energética da economia por este vetor



energético. Desta forma, o deslocamento do Diesel pelo GNV não traz consigo melhor eficiência energética e emissões no escopo TTW, vide o desempenho similar em [MJ/km] e CO₂, entre os dois vetores (vide Tabela 1).

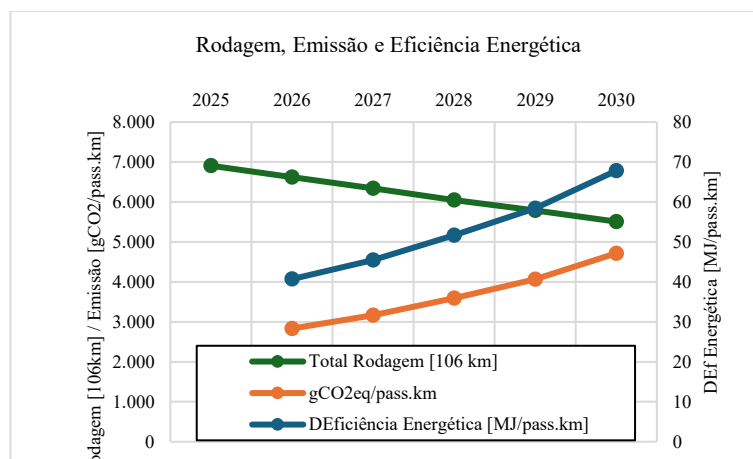
Figura 13 - Variação da Energia [ktoe] do setor de Transporte Rodoviário de Passageiros, conforme choques (ΔY) na Demanda Final (Figura 5)



Fonte: autoria própria

Este efeito pode ser visto na Figura 14, que apresenta o resultado consolidado da Energia/Rodagem [MJ/pass.km] e Emissões/Rodagem [gCO₂/pass.km].

Figura 14 - Variação do Consumo Energético [MJ/pass.km], Emissões [gCO₂/pass.km] e do total de Rodagem [10^6 km]



Fonte: autoria própria

Embora o consumo total de energia e as emissões absolutas diminuam em função da menor participação do Diesel, a redução de 20% na frota acarreta uma menor oferta de deslocamentos. Assim, quando normalizados por passageiro-quilômetro, tanto o consumo energético [MJ/pass.km] quanto as emissões [gCO₂eq/pass.km] tendem a aumentar, caso a eletrificação permaneça

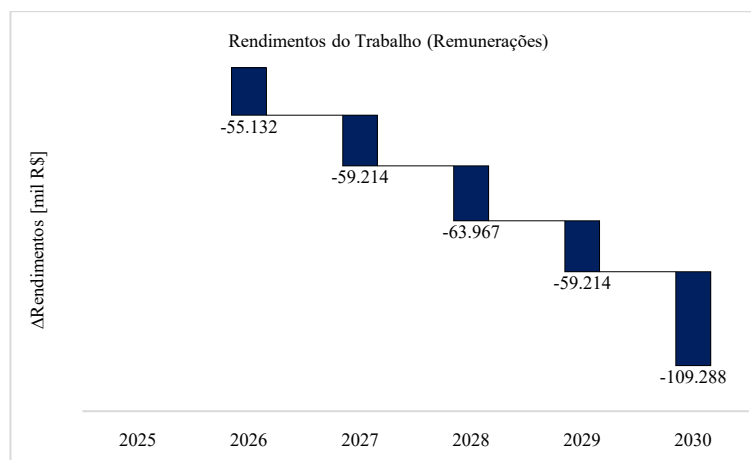


limitada aos 12% projetados para 2030. A Figura 14 sintetiza três efeitos principais: (i) redução de 20% da frota, resultando na diminuição da rodagem total (linha verde); (ii) aumento relativo do consumo energético e das emissões por passageiro-quilômetro (linhas azul e laranja) quando a participação de BEVs se mantém em 12%; e (iii) forte dependência desses indicadores em relação à oferta de viagens, e não apenas à eficiência veicular.

Rendimentos do Trabalho e Importações dos Setores

As Figuras 15 e 16 apresentam os Rendimentos do trabalho e as Importações dos Setores, respectivamente. A redução no consumo de Diesel provoca as cinco maiores quedas nos rendimentos do trabalho nos seguintes setores: (1) Outros Bens e Serviços, (2) Petróleo Bruto, (3) Diesel, (4) Outras Indústrias e (5) Transporte Aquaviário de Cargas. No caso das importações, os setores mais impactados são: (1) Diesel, (2) Petróleo Bruto, (3) Produtos Químicos, (4) Outros Bens e Serviços e (5) Outras Indústrias. Tendo uma economia energeticamente apoiada no Diesel, setores não óbvios são afetados, como o Transporte Aquaviário de Cargas, no caso dos Rendimentos do trabalho, por exemplo. Para as Importações, há efeito majoritário no próprio setor do Diesel e do Petróleo Bruto, resultado previsto em face a dependência da economia na importação de petróleo “leve”, que possui menor densidade e teor de enxofre e é o elemento de refino para o Diesel de baixo enxofre aplicado nas novas tecnologias de motores.

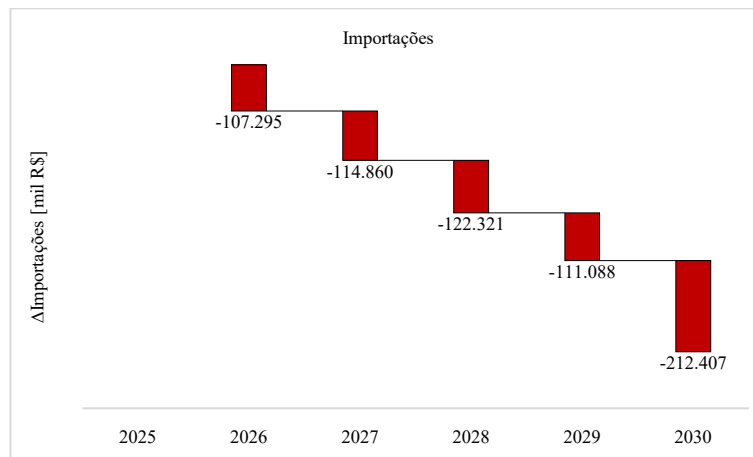
Figura 15 - Variação do Rendimento do Trabalho [mil R\$] de todos os setores, conforme choques (ΔY) na Demanda Final (Figura 5)



Fonte: autoria própria



Figura 16 - Variação das Importações [mil R\$] de todos os setores, conforme choques (ΔY) na Demanda Final (Figura 5)



Fonte: autoria própria

4 CONCLUSÕES

A modelagem híbrida IO-LCA evidencia que o transporte urbano por ônibus permanece altamente dependente do Diesel. Em 2015, esse combustível representou 69% das emissões e 55% do consumo energético do Setor de Transporte Rodoviário de Passageiros. No cenário 2025-2030, que combina redução de frota (-20 %), penetração de 5% de GNV e 12% de BEV, obtém-se economia acumulada de 2,5 Mtoe e corte de 3,95 MtCO₂eq na economia, dos quais 0,055 Mtoe e 0,2 Mt CO₂eq pertencem diretamente ao Transporte Rodoviário de Passageiros. Os ganhos climáticos resultam, principalmente, da substituição do Diesel. O GNV proporciona uma redução modesta (cerca de 9%) sem promover ganhos de eficiência energética, enquanto o BEV elimina as emissões no escapamento, porém com impacto ainda restrito devido à sua baixa participação na frota. A contração da frota diminui a demanda de energia absoluta, porém eleva a energia [MJ] e a emissão [gCO₂eq] por passageiro*quilômetro, caso a eletrificação não avance além de 12% até 2030. Conclui-se que a redução da dependência do Diesel e a aceleração da adoção de BEVs constituem estratégias essenciais para conciliar metas energéticas e climáticas até 2030. Para isso, são necessárias políticas que integrem simultaneamente a expansão da infraestrutura de recarga, mecanismos de financiamento da frota e a requalificação dos setores econômicos mais afetados.

Contribuições/Limitações/Trabalhos Futuros

Este estudo apresenta a concepção metodológica da Avaliação do Ciclo de Vida aplicada ao transporte rodoviário urbano, integrando a abordagem híbrida Input-Output LCA (IO-LCA) a um conjunto de matrizes monetárias e físicas de 40×40 setores, em conjunto com vetores de consumo energético e emissões. Essa integração permite quantificar não apenas os impactos Tank-to-Wheel (TTW), tradicionalmente reportados na literatura, mas também os efeitos Well-to-Wheel (WTW) decorrentes das cadeias a montante de energia, materiais e serviços, evidenciando externalidades que os inventários diretos ignoram. Além disso, o modelo incorpora variáveis econômicas—remuneração dos fatores de produção e variações nas importações—permitindo aferir concomitantemente as repercussões ambientais e macroeconômicas da transição tecnológica da frota. Apesar dessas contribuições, a análise baseia-se em dados de 2015, o que restringe a representação de ganhos de eficiência provenientes da



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

adoção de motores Euro VI e da descarbonização gradual da matriz elétrica prevista para 2030. A modelagem não contempla cenários relacionados à introdução de misturas de bioDiesel B15–B20 ou ao crescimento do uso de biometano. Custos de capital de veículos e de infraestrutura—por exemplo, postos de abastecimento de gás natural e estações de recarga—não foram internalizados nos choques de demanda final, de modo que as estimativas econômicas devem ser interpretadas como valores de primeira ordem. Ademais, o tratamento de BEV como tecnologia “zero TTW” desconsidera emissões provenientes de desgaste de pneus, manutenção de baterias e outros fluxos residuais, impondo viés otimista às estimativas de redução de carbono. Em futuras investigações, recomenda-se (i) atualizar os datasets energéticos para incluir misturas de bioDiesel B15 e fluxos de biometano, refletindo as diretrizes mais recentes da política nacional de biocombustíveis; (ii) desagregar o setor de transporte em segmentos urbanos, intermunicipais e fretados, a fim de captar diferenças operacionais relevantes; e (iii) estender o inventário de impacto para poluentes locais, notadamente NO_x e material particulado (MP), construindo vetores de emissão específicos que permitam avaliar simultaneamente efeitos climáticos e de qualidade do ar. Esses aprimoramentos aumentarão a robustez analítica do IO-LCA, consolidando-o como uma ferramenta eficaz para subsidiar decisões de planejamento e formulação de políticas públicas voltadas à mobilidade sustentável.

REFERÊNCIAS

1. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO (ABVE).** *Anuário Brasileiro de Mobilidade Elétrica 2024*. São Paulo, 2024.
2. **ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP).** *Relatório Mobilidade Urbana 2016*. São Paulo, 2017.
3. **BAE, J.; KIM, K.** *Life-cycle emissions of electric buses: comparison with Diesel*. *Journal of Cleaner Production*, v. 312, 2021.
4. **CEPAL.** *Transporte e mudança climática na América Latina (S210096_pt)*. Santiago, 2021.
5. **E-BUS RADAR.** *Dashboard 2025*. Disponível em: <https://ebusradar.simapese.com.br/>. Acesso em: mar. 2025.
6. **EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE).** *Balanço Energético Nacional 2023*. Brasília: EPE/MME, 2023.
7. **GÖRANSSON, L. et al.** *Input-output analysis of urban bus electrification*. *Energy Policy*, v. 147, 2020.
8. **GROTERA, C.; NAPOLINI, G. F.; LE TREUT, G.; WILLS, W.; LAURENT, M.** *Hybrid input-output tables for Brazil at year 2015*. *Mendeley Data*, v. 1, 2021. DOI: 10.17632/hpkstgb6b.
9. **INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA).** *The role of gas in today's energy transitions*. Paris: IEA, 2022.
10. **INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC).** *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2 - Energy*. Geneva: IPCC, 2006.
11. **INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC).** *Sixth Assessment Report: Mitigation of Climate Change*. Geneva: IPCC, 2021.
12. **MILLER, R. E.; BLAIR, P. D.** *Input-output analysis: foundations and extensions*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

13. **MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI).** *Fator médio de emissão de CO₂ da rede elétrica interligada 2015*. Brasília, 2016.
14. **PLANO NACIONAL DE MOBILIDADE ELÉTRICA (PNME).** *Plano Nacional de Mobilidade Elétrica (S240106_pt)*. Brasília, 2022.
15. **STONE, R.** *Input-output and national accounts*. Paris: OECD, 1961.
16. **ZHOU, C. et al.** *Carbon performance of Chinese electric bus fleets. Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 108, 2022.