

FREIGHT TRANSPORT DECARBONIZATION

Felipe Borim Villen

Tiago Toledo Ferreira

Bernardo Furtado Nunes

Edson José Dalto

Marco Aurélio Cabral Pinto

*Paulo Marcelo Raposo Machado Costa**

Keywords: decarbonization; freight transport; logistics matrix; greenhouse gas.

* Respectively, superintendent of the BNDES's Infrastructure Division; head, economist and engineers of the Department of Transport and Logistics of the same Division.

Resumo

O transporte de cargas responde por parcela importante do total de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Em geral, as soluções propostas para a descarbonização dos transportes concentram-se na eletrificação da frota e em outros mecanismos de ganhos intrínsecos de eficiência de cada modo de transporte. Este artigo advoga que, para promover uma efetiva redução de emissões, há necessidade de priorização, no médio e longo prazos, do balanceamento da matriz logística, com transferência de cargas de longa distância do caminhão para outros modos de transporte mais eficientes. Tal necessidade se manifesta tanto no ganho marginal de transferência de cada tonelada por quilômetro útil (TKU) quanto no ganho potencial total, decorrente da implantação de um pipeline de projetos sugeridos na carteira do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) para o horizonte de vinte anos, evitando emissões de 5,5 milhões de toneladas de carbono equivalente por ano (CO₂e/ano), o equivalente a 7,1% de redução. Ressalta-se ainda que as soluções de ganhos intrínsecos de eficiência são também relevantes no esforço conjunto para a descarbonização dos transportes. O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), por sua vez, vem desempenhando papel fundamental no processo de descarbonização dos transportes, atuando na estruturação e financiamento de projetos, no desenvolvimento de novas soluções e na aquisição de máquinas e equipamentos que utilizam novas tecnologias.

Abstract

Freight transportation produces a significant portion of all greenhouse gas (GHG) emissions. Usually, the solutions that have been proposed to decarbonize transportation modes focus on fleet electrification and other mechanisms for intrinsic efficiency gains in each mode of transportation. This study advocates that, in order to promote an effective reduction in emissions, it is necessary, in the medium- and long-term, prioritize the balancing of the logistics matrix and the transferring the long-distance loads from the road to other more efficient modes of transport in order to effectively reduce emissions. Such advantage is shown in the marginal gain of transferring each ton/kilometer (TKM) and in the total potential gain resulting from implementing a pipeline of projects proposed by the government portfolio, over a 20-year horizon,

with avoided emissions of 5.5 million tons of CO₂e/year, or 7.1% reduction. It is emphasized that the solutions for intrinsic efficiency gains are also relevant in the joint effort to decarbonize transport modes. Brazilian Development Bank (BNDES) plays a fundamental role in the decarbonization process, supporting the structuring and financing of projects and promoting the development of new solutions and the acquisition of machines and equipment with these new embedded technologies.

Introdução

Não há como abordar a descarbonização da economia brasileira sem considerar o setor de transporte. O setor responde por 51% das emissões decorrentes dos diversos usos de energia, as quais correspondem a 23,2% das emissões totais de gases de efeito estufa do Brasil (MCTIC, 2022; EPE, 2024).¹ O modo rodoviário responde por grande parte das emissões provenientes do transporte de cargas do país devido à preponderância dos caminhões em nossa matriz de transportes e, conseqüentemente, ao consumo de uma quantidade elevada de *diesel* por tonelada de carga transportada comparativamente a outros modos mais eficientes, como o ferroviário, aquaviário e dutoviário.

O GHG Protocol² propõe que, para atingimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris em um nível empresarial, os esforços de mitigação de emissões devem se iniciar pelo mapeamento das atividades econômicas em que essas emissões acontecem. Para tanto, propõe-se a segmentação das atividades nos escopos 1, 2 e 3. O escopo 1 engloba as emissões provenientes diretamente do processo produtivo da empresa, com utilização de recursos do próprio negócio. Já o escopo 2 refere-se às emissões associadas ao consumo de energia adquirida pela companhia, enquanto o escopo 3 abrange as emissões indiretas, que acontecem ao longo da cadeia de valor, contemplando clientes e fornecedores da empresa, incluindo o transporte das mercadorias.

1 As demais fontes são: processos industriais e uso dos produtos (6,1%), agropecuária (28,5%), terra, mudança do uso da terra e florestas (38,0%) e resíduos (4,2%) (MCTIC, 2022).

2 GHG Protocol, ou Protocolo de Gases de Efeito Estufa, é um conjunto de padrões de caráter global para que empresas e organizações mensurem e gerenciem emissões de gases de efeito estufa.

As oportunidades de ganho no escopo 3 muitas vezes superam os esforços realizados nos dois primeiros escopos, principalmente no Brasil, onde a produção industrial se utiliza majoritariamente da energia elétrica gerada por fontes renováveis.

As soluções geralmente adotadas pelas organizações em relação ao transporte próprio ou de terceiros restringem-se à eficiência no uso do modo rodoviário, como ganhos de eficiência nos motores, substituição de combustíveis, gestão das frotas e tecnologia dos veículos.

No entanto, a alta dependência do modo rodoviário limita a descarbonização do transporte de carga. Iniciativas ambiciosas devem considerar a possibilidade de migração de cargas para modos de transporte mais eficientes, como o dutoviário, ferroviário ou aquaviário. Deficiências da infraestrutura de transporte muitas vezes inviabilizam a adoção dessas outras modalidades. O esforço pela mudança na matriz de transportes provém prioritariamente da iniciativa pública de planejamento, da capacidade de mobilização de recursos públicos e privados e do incentivo aos operadores do transporte de carga para que essa transformação aconteça.

A mudança estrutural da matriz brasileira de transporte de carga demanda elevado investimento em infraestrutura. Logo, as iniciativas de descarbonização devem considerar a manutenção da predominância do modo rodoviário na matriz brasileira no curto e médio prazos, com avanços incrementais dos modos ferroviário, hidroviário e de cabotagem.

Desse modo, a descarbonização do transporte de cargas depende de medidas que contribuam principalmente para a descarbonização do modo rodoviário. A eletrificação da frota é uma alternativa nos casos de mobilidade ou transporte de carga em centros urbanos. Contudo, sua implementação requer um ecossistema de suporte, incluindo infraestrutura de carregadores, equipamentos de reparo específicos e requalificação

das equipes de manutenção (Modolo, 2023), o que reforça a destinação dessa tecnologia a centros urbanos ou deslocamentos mais curtos. Em longas distâncias se pressupõe o uso de formas híbridas, e o Brasil pode aproveitar suas vantagens comparativas explorando biocombustíveis, como o etanol ou o biometano.

Contudo, no médio e longo prazos, o esforço pela descarbonização do transporte de carga deve objetivar a migração de cargas para sistemas de transporte mais eficientes, como são o ferroviário, dutoviário, hidroviário e cabotagem, resultando, como se verá ao longo do artigo, em ganhos mais significativos na redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Este artigo caracteriza inicialmente o setor de transportes e suas emissões de poluentes atmosféricos, bem como as metodologias para estimação de GEEs. Realiza então um exercício de avaliação de emissões e de consumo de combustível para os diferentes modos de transporte e perfis de carga e destaca os fatores que influenciam nas medições. Discute estratégias para redução de emissões para os diferentes modos de transporte de cargas e apresenta um exercício quantitativo da redução de GEEs como resultado de um esforço factível de migração de cargas da rodovia para modos de transporte mais eficientes. Por fim, sintetiza as oportunidades de descarbonização na logística brasileira e apresenta perspectivas e contribuições do BNDES nesse esforço.

Tipologia de emissões do setor de transportes e metodologias de avaliação

O setor de transporte é responsável por parcela significativa das emissões de poluentes, que variam dependendo de diversos fatores, como

modo de propulsão, tipo de combustível e tecnologias de controle de emissões empregadas. No geral, os poluentes emitidos pelo transporte são: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis não metânicos (COVNM), material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO_x), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). É possível representar todos os GEEs em uma única unidade de medida, que é o carbono equivalente.³ Para além desses poluentes, há a emissão de ruído, de sólidos e líquidos, que não serão objeto de análise deste estudo, apesar do seu impacto socioambiental.

O quadro a seguir apresenta sinteticamente as metodologias para aferição das medições.

Quadro 1 | Metodologias de aferição de emissões

Top-down	Bottom-up	Híbrido
Visão agregada, utilizando-se de um arcabouço macroeconômico e econométrico. Para o setor de transporte são utilizadas informações de consumo de combustíveis como base para estimar as emissões associadas. Utilizado pelo GHG Protocol e Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, na sigla em inglês).	Apoiada em aspectos técnicos e de engenharia, por meio da destinação ou consumo da energia. Para o setor de transporte, compreende indicadores da atividade, como quilometragem percorrida, peso transportado, número de viagens, eficiência e fatores de emissão. Utilizado pela SEEG (2023) e por EPL e lema (2021).	Incorpora a evolução temporal nas projeções por meio de sistemas dinâmicos, complexos e não lineares, com loops de causalidade e diferimento no tempo. Permite a análise de políticas públicas nos setores estudados.

Fonte: Elaboração própria.

³ Cada composto apresenta um valor potencial de aquecimento global, sendo o do CO₂ igual a 1, conforme tabela disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf.

Estimativa de emissão dos modos de transporte de carga e consumo relativo de combustível

Uma maneira muito direta de observar a eficiência relativa dos modos de transporte e nível de emissões consiste em comparar o consumo médio e o nível de emissão por tonelada quilômetro útil (TKU)⁴ de carga transportada, em consonância com a metodologia *bottom-up* proposta por EPL e Iema (2021). Para esse propósito, o conjunto de cargas pode ser subdividido em quatro grandes categorias: carga geral; granéis minerais; granéis agrícolas; e granéis líquidos. Na categoria de carga geral, de acordo com os critérios da FDC (2019), enquadram-se os alimentos e bebidas processadas, manufaturados e outros. Em granéis minerais estão o minério de ferro, outros minerais e cimento. Em granéis agrícolas estão compreendidos, principalmente, soja, milho em grãos e farelo de soja. Já a categoria de granéis líquidos engloba combustíveis líquidos, químicos e petroquímicos. A Tabela 1 resume essas informações para os diferentes modos de transporte e tipos de cargas.

Tabela 1 | Emissões de CO₂ e consumo de combustível por modo de transporte e tipo de carga

Modo de transporte	Emissões (kg CO ₂ /mil TKU)				Fator de emissão (g CO ₂ /l)	Consumo médio (l/mil TKU)			
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral		Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral
Rodoviário	59,2	37,3	57,2	54,4	2,37	25,0	15,7	24,1	23,0
Ferroviário	8,7	16,6	7,2	23,8	2,37	3,7	7,0	3,0	10,0
Cabotagem	4,4	4,4	4,8	9,1	2,95	1,5	1,5	1,6	3,1
Hidroviário	2,7	2,8	4,8	7,4	2,95	0,9	0,9	1,6	2,5

Fonte: Elaboração própria com base em dados de EPL e Iema (2021).

Nota: Consideraram-se, para os modos rodoviário e ferroviário, o uso exclusivo de diesel B10 e, para o aquaviário, a mistura de 67% de óleo combustível e 33% de diesel B0. Os fatores de emissão são 2,37 g de CO₂/l para o diesel B10 e 2,95 para a mistura considerada.

⁴ TKU representa o somatório da multiplicação de toneladas de carga efetivamente transportadas pela distância de viagem de cada frete.

A metodologia proposta por EPL e Iema (2021) estabelece faixas de valores para as emissões. A Tabela 1 reflete uma média simples do intervalo de valores das emissões para cada modo de transporte e tipo de carga transportada. O cálculo do consumo é resultado de uma relação entre as emissões e seu fator correspondente.

Os diferentes valores de emissão e consumo médio de combustível para cada tipo de carga são explicados principalmente pelo fato de o equipamento de transporte variar segundo o tipo de carga embarcada. Por exemplo, os caminhões se distinguem de acordo com a capacidade de carga (leves, pesados, extrapesados etc.), e cada um é mais utilizado para determinado tipo de carga, afetando o consumo e as emissões médias. O mesmo raciocínio vale para o tamanho de uma composição ferroviária ou para o número de balsas hidroviárias.

Observa-se na Tabela 1 que o modo rodoviário é o menos eficiente e maior emissor por TKU transportado, seguido pelo ferroviário, cabotagem e, em melhores condições, o hidroviário. Além disso, o modo rodoviário emite mais do que o dobro do ferroviário por TKU no transporte de carga geral e cerca de sete vezes mais no transporte mineral, para o qual a inserção da ferrovia é consideravelmente maior. Comparado à cabotagem e ao modo hidroviário, o transporte rodoviário emite de seis a 13 vezes e de sete a 22 vezes mais GEEs, respectivamente.

Pode-se concluir, a partir dessa comparação, como a migração de cargas da rodovia para modos mais eficientes e menos emissores poderia contribuir substancialmente para o esforço de descarbonização do transporte de cargas.

Para além dos benefícios dos modos mais eficientes, o predomínio do *diesel* no transporte de carga reforça a necessidade da adoção de

combustíveis alternativos ou eletrificação para a descarbonização, conforme Tabela 2.

Tabela 2 | Distribuição do consumo de combustíveis por tipo e por modo em 2022 (em mil tep)*

Tipo	Fator de emissão de carbono**	Rodovia	Hidrovia	Ferrovia	Aéreo	Total por tipo	
						Em mil tep	%
Óleo <i>diesel</i>	20,2	38.595	359	954	-	39.908	44,6%
Gasolina automotiva	18,9	24.192	-	-	-	24.192	27,1%
Álcool etílico	18,8	15.156	-	-	-	15.156	16,9%
Gás natural	15,3***	1.991	-	-	-	1.991	2,2%
Biodiesel	****	4.005	-	99	-	4.104	4,6%
Óleo combustível	21,1	-	743	-	-	743	0,8%
Eletricidade	-	-	-	170	-	170	0,2%
Querosene de aviação	19,5	-	-	-	3.127	3.127	3,5%
Gasolina de aviação	19,5	-	-	-	35	35	0,0%
Total por modo	-	83.939	1.102	1.223	3.162	89.426	-
% por modo	-	93,9%	1,2%	1,4%	3,5%	100,0%	-

Fonte: Elaboração própria com base em EPE (2024) e MCT (2010).

* Tep: tonelada equivalente de petróleo, que equivale a 0,04187 tJ.

** Refere-se à quantidade de carbono contida no combustível por unidade de energia.

*** Valor referente a gás natural seco.

**** A contribuição de emissões de CO₂ do biodiesel, quando sua concentração é de 100% de biomassa (B100), é considerada nula uma vez que o gás carbônico foi, na sua origem, retirado da atmosfera.

Fatores que interferem na avaliação das estimativas de medição de emissões

As estimativas de emissões de GEEs são sensíveis a variações de alguns parâmetros, como veículos utilizados, peso da carga, consumo médio de combustível, emissão específica do combustível, entre outros.

A seguir são apresentados alguns resultados encontrados na literatura que mostram essa sensibilidade a diferentes fatores:

- i) Tipo de combustível:
 - O aumento da mistura de biocombustíveis reduz as emissões. No caso do *diesel*, cerca de 4% das emissões são mitigadas quando o teor do biodiesel aumenta de 3% para 50%. Com o biodiesel puro (B100), o potencial de mitigação corresponde a cerca de 10% em relação ao S-500. A limitação da redução se deve, em grande parte, ao aumento do consumo de combustível resultante do progressivo aumento do biodiesel na mistura (Bartholomeu; Péra; Caixeta Filho, 2016; Simão; Scariot; Cezne, 2022).
- ii) Eficiência energética:
 - Um incremento de 10% na eficiência energética da frota rodoviária estudada, cujo consumo médio observado foi de 2,135 km/l, resulta em redução de 9,6% nas emissões de CO₂ (Bartholomeu; Péra; Caixeta Filho, 2016).
- iii) Condições da via:
 - O tipo de revestimento da via rodoviária pode alterar os níveis de emissão de NO_x (Oliveira, 2021).

- Com base no banco de dados da Administração Federal de Rodovias dos Estados Unidos (FHWA, na sigla em inglês), foi verificado aumento do consumo de combustível (cerca de 70.564 l/km) devido a condições não ideais das vias, como irregularidade longitudinal (IRI) acima de seis (Greene *et al.*, 2013, *apud* Oliveira, 2021, p. 36).
- Um aumento no IRI de 1 m/km resulta em um consumo adicional de combustível de 2% para o caso dos veículos de passageiros (Robbins e Tran, 2015, *apud* Oliveira, 2021, p. 36).
- Inclinação da via de mais de 5% pode elevar o consumo de combustível em até 6% (Laganier e Lucas, 1990, *apud* Oliveira, 2021, p. 36).

iv) Porte do caminhão:

- Caminhões de pequeno porte teriam emissão elevada na razão de 1,7 (Lipasto, 2011, *apud* Campos; Punhagui; John, 2011, p. 158) a 4,4 vezes (Nätverket, 2011, *apud* Campos; Punhagui; John, 2011, p. 158) em comparação com caminhões de grande capacidade de transporte de cargas, como, por exemplo, com reboque.
- De acordo com o estudo (ACEA, 2019, *apud* Branco *et al.*, 2023, p. 5), um projeto-piloto envolvendo a substituição dos caminhões típicos usados na Suécia, com capacidade de 100 m³, por caminhões extrapesados, com capacidade de 200 m³, permitiu reduzir o consumo de combustível em 28,5% e a emissão de CO₂ em 27,0%, por quantidade de carga transportada.

v) Percurso:

- O GHG Protocol (2011, *apud* Campos; Punhagui; John, 2011, p. 158) estabelece o fator de 185 g de CO₂/tkm para cargas de longa distância, e de 203 g de CO₂/tkm para as de curta distância.

- vi) Condições regionais:
- Reporta-se, no Japão, o valor médio de emissão para o transporte de carga de 371 g de CO₂ tkm, fato atribuído às características do país: percursos de curta distância, topografia acidentada e emprego de veículos de pequeno porte, que participam em 58% do transporte total no país (Kamakaté; Schipper, 2009, *apud* Campos; Punhagui; John, 2011, p. 158).
 - Na Finlândia, a taxa média estimada é de 34 g de CO₂/tkm, país com trajetos de topografia plana, manutenção constante na pavimentação, ausência de engarrafamentos, veículos com pouco tempo de uso etc. (Lipasto, 2011, *apud* Campos; Punhagui; John, 2011, p. 163).
- vii) Ocupação média da capacidade de carga:
- O aumento da ocupação da capacidade de carga reduz a emissão de CO₂ em relação não linear (Branco, Bonato; Alves Junior; Caixeta Filho, 2023).

Estratégias para redução das emissões no setor de transporte

As iniciativas adotadas mundialmente para a redução de emissão de CO₂ no transporte de carga podem ser agrupadas em:

- i) redução da demanda por transporte de carga;
- ii) deslocamento da carga para modos menos emissores;
- iii) mudança para energia de baixo carbono;
- iv) melhoria na utilização dos ativos; e

v) aumento da eficiência energética.

Essas iniciativas estão alinhadas com a abordagem de sustentabilidade adotada para o setor de transporte conhecida por ASI (*avoid-shift-improve*). São três pilares, com a seguinte hierarquia:

- i) *avoid*: evitar ou reduzir o uso do transporte e, por consequência, as emissões de poluentes. Isso exige uma melhoria da eficiência do setor de transporte como um todo, como planejamento urbano;
- ii) *shift*: mudar do modo mais intensivo em energia de fonte fóssil para um modo mais ambientalmente amigável. Isso implica alterar a composição da matriz de transporte; e
- iii) *improve*: melhorar a eficiência dos veículos e dos combustíveis, incluindo a otimização da operação de transporte.

A seguir são avaliadas as alternativas de redução das emissões de GEEs do setor de transporte.

Redução da demanda por transporte de carga

A variável que exerce influência significativa sobre a demanda de transporte de carga é o produto interno bruto (PIB). Um estudo realizado pelo Banco Mundial, analisando 33 países, revelou que o PIB é capaz de explicar aproximadamente 80% do volume movimentado em TKU (Bennathan *et al.*, 1992, *apud* Riet; Jong; Walker, 2004, p. 3). Ademais, constatou-se que a elasticidade entre o volume transportado e o PIB diminui à medida que ocorre o crescimento econômico, quando a economia se torna mais intensiva em serviços de maior valor agregado.

Outros fatores também exercem impacto sobre a demanda de transporte de carga, tais como a distribuição geográfica dos centros produtores e consumidores e a estrutura setorial da economia. Nesse contexto, economias com uma predominância do setor primário e da indústria

extrativista tendem a manifestar uma demanda mais elevada de transporte de toneladas por unidade de PIB. As políticas de planejamento e desenvolvimento territorial, então, tornam-se cruciais, porém seus impactos são percebidos no longo prazo.

A redução da demanda por transporte de mercadorias também requer estratégias voltadas à minimização da quantidade física de produtos a serem transportados. Nesse sentido, incluem-se aprimoramentos na eficiência dos materiais, que abrangem a durabilidade dos produtos, a reciclagem, a digitalização e a concepção de produtos com menor uso de materiais.

Para alcançar uma redução eficaz na procura por transporte, uma medida é a implementação de regulamentações, como a tributação do setor sobre combustíveis ou sobre o serviço de transporte, bem como a internalização de externalidades, tais como a taxação das emissões. Essa tributação, ao elevar os custos associados ao transporte, impacta a renda per capita, resultando em redução da aquisição de veículos, bem como do volume de mercadorias a ser transportado.

Deslocamento da carga para modos menos emissores

Essa iniciativa refere-se à mudança estrutural da composição da matriz logística, que, no caso brasileiro, é predominantemente apoiada no modo rodoviário. O deslocamento, ainda que parcial, dessa carga para os modos ferroviário ou aquaviário é capaz de reduzir as emissões de GEEs.

Novo (2016) comparou o efeito dessa mudança estrutural na matriz logística a iniciativas que reduzem a intensidade das emissões de cada modo de transporte individualmente, mostrando que o efeito estrutura (equilíbrio da matriz) se mostrou maior do que o efeito intensidade (ganhos intrínsecos a cada modo).

Conclusão similar é obtida com o estudo de Branco *et al.* (2023), que analisou o potencial de mitigação das emissões de CO₂ no transporte de cargas decorrente da implementação de seis ações, cujos ganhos, resumidos na Tabela 3, serão plenamente verificados em um horizonte de dez anos. Para esse conjunto de ações são estimadas a redução marginal, medida em % por TKU transportado, e a redução potencial, medida em milhões de toneladas, avaliadas para um conjunto restrito, mas factível, da frota considerada.

Tabela 3 | Alternativas para redução da emissão de CO₂ e potencial de mitigação

Ações	Redução estimada na emissão de CO ₂		Racional para redução
	Ganho marginal (%/TKU)	Ganho potencial (milhões de t)	
1) Ampliação do transporte intermodal de cargas	55% a 95%	22,0	Diminuição da quilometragem transportada pelo modo rodoviário e ampliação nos modos menos emissores
2) Estímulo ao uso de sistemas inteligentes de transporte para aumentar a ocupação da capacidade de carga dos veículos	8 a 9%	8,6	Ganhos de escala no transporte, reduzindo o total de veículos necessários
3) Aumento da frota de caminhões com tecnologias de baixo consumo de combustível	30%	7,5	Melhoria da performance energética dos caminhões, principalmente com tecnologia de motores e combustíveis
4) Aumento do transporte de cargas em veículos de maior capacidade	14%	7,5	Substituição de caminhões de menor para os de maior capacidade nas rotas inter-regionais
5) Aumento do uso de combustíveis alternativos com menor emissão de CO ₂	41%	6,4	Substituição do <i>diesel</i> pelo biometano em uma abordagem <i>well to wheel</i>

(*Continua*)

(Continuação)

Ações	Redução estimada na emissão de CO ₂		Racional para redução
	Ganho marginal (%/TKU)	Ganho potencial (milhões de t)	
6) Diversas medidas para redução da emissão de CO ₂ no transporte ferroviário	41%	0,1	Melhoria da performance do material rodante; implantação do treinamento e sistemas de <i>eco-driving</i> para os maquinistas; uso de sistemas para controle de tráfego e melhoria das operações de manobras dos trens

Fonte: Elaboração própria com base em Branco *et al.* (2023).

Nota: As ações de 2 a 5 consistem no aumento da ocupação média, melhora na performance energética, aumento do porte e substituição do *diesel* pelo biometano na frota de caminhão. Para a ação 5, considera-se a substituição do *diesel* pelo biometano até um limite de 30% da frota. Por sua vez, a última ação considera a melhoria no material rodante e na operação ferroviária.

Para a primeira ação, o ganho marginal é estimado a partir das informações da Tabela 1, ou seja, cada TKU de carga transferido da rodovia para modos mais eficientes representa uma redução entre 55% e 95% de emissões. O ganho potencial total decorre da análise da transferência de cargas entre os diversos modos de transporte e tomou como base os investimentos em um pipeline de projetos apresentados no Plano Nacional de Logística (PNL) 2025 (EPL, [s.d.]).

Pela análise da Tabela 3, conclui-se que tanto o ganho marginal quanto o potencial obtido pela transferência de carga da rodovia para modos eficientes proporcionam ganhos na redução de emissão de CO₂ substancialmente superiores a qualquer medida de mitigação intrínseca adotada individualmente nos sistemas de transporte.

Mudança para energia de baixo carbono

Conforme visto na Tabela 2, o óleo *diesel* é a principal fonte de energia e o maior emissor de GEEs. Nesse sentido, uma estratégia de curto e médio prazos para o setor de transportes é a substituição gradual do combustível utilizado, por meio do aumento do uso de veículos elétricos ou híbridos e a ampliação da participação dos biocombustíveis de baixa emissão líquida de carbono ou movidos a hidrogênio.

A respeito da eletrificação da frota, alguns países já incorporaram caminhões pesados elétricos a bateria em suas operações de transporte de cargas. No entanto, subsistem desafios prementes que necessitam ser superados para viabilizar a ampla adoção dessa tecnologia, dentre os quais se destacam: (i) a significativa carga adicional representada pelo peso das baterias de armazenamento de energia elétrica, o que resulta na redução da capacidade de carga dos veículos; (ii) a limitada autonomia dos veículos, demandando a instalação de uma infraestrutura robusta de pontos de recarga ao longo do percurso; (iii) os prolongados períodos de inatividade para recarga das baterias, acarretando uma diminuição da eficiência operacional dos veículos; e (iv) a eletrificação extensiva dos caminhões, que pode ocasionar picos de demanda de energia elétrica e sobrecarregar a rede de distribuição (Liimatainen; Van Vliet; Aplyn, 2019).

Em contraposição, no caso de caminhões leves e semipesados, particularmente aqueles que percorrem curtas distâncias, a eletrificação tem se mostrado mais técnica e economicamente viável (Ramos, 2019, *apud* Branco *et al.*, 2023, p. 5; Liimatainen; Van Vliet; Aplyn, 2019). Cabe salientar que a expansão da utilização de veículos elétricos implica a necessidade de estabelecer novas infraestruturas, sendo essa alternativa vantajosa em termos de emissões de GEEs somente se a fonte de energia empregada for ambientalmente limpa.

No contexto brasileiro, evidencia-se a adoção do biometano como combustível em caminhões de carga. O Brasil já possui tecnologia consolidada para a produção de veículos que podem ser alimentados por esse biocombustível. Adicionalmente, há iniciativas para a concepção de veículos com células de combustível abastecidas por etanol (Unicamp, 2019, *apud* Branco *et al.*, 2023, p. 6). Tal tecnologia se vale da elevada capacidade de produção do biocombustível no país, aliada a sua extensa e consolidada rede de distribuição (Liimatainen; Van Vliet; Aplyn, 2019; Ricardo Energy & Environment, 2017, *apud* Branco *et al.*, 2023, p. 6). Nesse paradigma, a célula de combustível gera a energia elétrica necessária para o motor dos veículos.

No relatório *How biofuels can speed up decarbonization* (Oliver Wyman, 2023), foram analisados três cenários distintos de descarbonização a partir do uso de biocombustíveis: atual, moderado e acelerado. A intensificação do emprego de biocombustíveis poderia resultar em uma redução de 30 bilhões de litros de *diesel* consumidos pelo Brasil até o ano de 2030.

No que tange aos portos, observa-se que alguns terminais europeus implementaram o uso de energia limpa, proveniente do próprio porto, para as embarcações que estão na área do terminal, evitando a manutenção de seus respectivos geradores internos (Godoy Júnior, Silva Filho, Lima, 2020, *apud* Bezerra; Souza; Holanda, 2023, p. 9.594). No Brasil, o Porto de São Francisco do Sul, em Santa Catarina, em virtude de sua licença de operação, monitora e controla os veículos utilizados. Nos Estados Unidos da América (EUA), há iniciativas para a implementação de Programas de Caminhões Limpos em portos, oferecendo incentivos para a substituição de veículos de transporte mais antigos (Park, 2022, *apud* Bezerra; Souza; Holanda, 2023, p. 9.595).

Melhoria na utilização dos ativos

A otimização da utilização de ativos permite aumentar a capacidade de atender a demanda por transporte de carga com a infraestrutura já existente. Isso pode ser alcançado com o aperfeiçoamento das atividades de carga e descarga, consolidação, compartilhamento de ativos, digitalização e melhoria gerencial dos centros logísticos, armazéns e infraestrutura de transporte. Para tanto, é necessária a previsibilidade da demanda.

Exemplos de melhoria na utilização de ativos, conforme Branco *et al.* (2023), são:

- i) desenvolvimento e disseminação de sistemas inteligentes de transporte para maximizar o uso da capacidade de carga dos veículos, por meio de uma melhor coordenação entre o tráfego e as cargas a serem transportadas;
- ii) disseminação de sistemas que permitem maior compartilhamento de informações entre usuários e fornecedores de serviços de transporte;
- iii) campanhas para disseminação de medidas comportamentais e tecnologias de assistência para estimular a condução de veículos de forma a minimizar o consumo de combustível (*eco-driving*);
- iv) maior uso de telemetria e equipamentos de navegação por GPS; e
- v) melhoria da performance da logística de entrega de cargas nos grandes centros urbanos (*last mile logistics*).

Aumento da eficiência energética

O aumento da eficiência energética dos modos de transporte passa pelo desenvolvimento tecnológico, gerenciamento e design dos equipamentos. Análise do desempenho mundial mostra que a eficiência tem se

mantido virtualmente estável desde 2010, apesar das pressões políticas e regulatórias (Blas *et al.*, 2020).

Para Lui e Golovitcher (2003, *apud* Abreu, 2013, p. 63), as principais iniciativas para economia de combustível na operação ferroviária estão relacionadas aos projetos de motores e locomotivas, à redução efetiva da resistência do trem em movimento e à manutenção efetiva dos materiais rodantes e vias.

Algumas iniciativas que o modo ferroviário pode adotar são: campanha para condução dos trens com economia de combustível (*eco-driving*); disseminação do uso de sistemas de assistência ao condutor em tempo real, de modo a conduzir as composições com o mínimo consumo de combustível; difusão do uso de sistemas inteligentes de gestão do tráfego de trens; melhorias na performance das operações de manobras dos trens,⁵ bem como outras soluções de eficiência energética como a frenagem regenerativa. Para trens de passageiros e plataformas, recomenda-se o uso máximo de iluminação e ventilação natural, além do emprego de telhados e infraestrutura verdes, com coleta e reutilização de águas pluviais, e do uso de iluminação e sinalização de LED.

Quanto ao modo rodoviário, a eficiência energética pode advir de inovações aplicadas ao motor ou ao veículo, bem como de tecnologias de informação e comunicação e sistemas de transporte inteligentes. Como exemplo de inovações em motores, tem-se aquelas que buscam reduzir as perdas de energia com aumento da eficiência térmica (o potencial de redução de CO₂ pode variar entre 3% e 6% em todos os sistemas) e redução da energia consumida pelo motor.

5 Um grande fator que colabora para o consumo desnecessário de combustível em locomotivas é manter o veículo parado com motor em funcionamento, o que pode ocorrer devido a necessidades de paradas durante o percurso, seja para a troca de maquinista ou cruzamento com outros trens. Para minimizar esse problema, existe atualmente dispositivo capaz de desligar e ligar a locomotiva automaticamente, dependendo da situação, sem prejuízos para o estado de operação.

Outra possibilidade para os veículos pesados é a substituição do motor *diesel* por um motor principal alternativo (*dual fuel*, pilhas combustíveis a hidrogênio e veículos elétricos). No que tange ao veículo, destacam-se: uso de materiais leves, aperfeiçoamento da aerodinâmica e características do pneu. Por fim, os sistemas e tecnologias da informação aplicadas ao modo rodoviário visam promover controle de velocidade preditivo; pelotões de veículos; indicador de zona verde; alternador inteligente, sensor de bateria e bateria *absorbent glass mat* (AGM); controle de aceleração; regulação de velocidade, com mudança progressiva; e função de roda livre (*eco-roll*).

O modo aquaviário também tem se lançado no caminho da eficiência energética, motivado pela redução das emissões de GEEs. Isso pode ser observado no movimento da CBI, que estruturou um documento denominado *The Shipping Criteria for the Climate Bonds Standard & Certification Scheme* (CBI, 2020), consolidando os critérios para a indústria naval de acordo com o *Climate Bonds Standard*, com objetivo de fornecer um conjunto de regras para determinar quando os projetos e ativos de transporte são compatíveis com uma economia de baixo carbono e resilientes ao clima.

A CBI (2020), visando a descarbonização do setor de navegação, listou um conjunto de iniciativas que podem ser consideradas para fins de emissão de *green bonds* ou *climate bonds*, conforme Quadro 2.

Quadro 2 | Conjunto de medidas visando a descarbonização de navios e infraestrutura de apoio

Ativos	Descrição
Navios com tecnologias que aumentam a eficiência energética e/ou reduzem as emissões de GEEs	<ul style="list-style-type: none"> • Melhorias no maquinário, como: redução da potência do motor, hibridização e recuperação do calor residual. • Melhorias no casco, como: casco aerado, revestimentos e arco bulboso. • Melhorias na propulsão, como: dutos, encapsulamento das hélices, hélice com passo controlado. • Melhorias na eficiência da maquinaria auxiliar, como: equipamento de manuseio de carga, iluminação, bombas e ventiladores. • Melhorias no armazenamento de combustível ou carga, para redução de emissões tanto de um quanto de outro.
Navios com tecnologias que permitem mudança no uso do combustível fóssil ou a captura de emissões de escapamento	<ul style="list-style-type: none"> • Máquinas e caldeiras para uso de combustíveis alternativos (não fósseis, de combustão interna ou células de combustível). • Armazenamento e manuseio de combustível não fóssil. • Eletrificação para uso conjunto com uma fonte de eletricidade de baixo carbono para propulsão, eletrificação auxiliar, adaptação de energia em terra, baterias. • Energia renovável a bordo, como de assistência eólica, solar ou regeneração do eixo. • Tecnologia para capturar e armazenar emissões de gases de escape a bordo.
Infraestrutura que permite o fornecimento de combustível ou energia não fóssil a um navio ou a transferência e transporte das emissões capturadas de um navio	<ul style="list-style-type: none"> • Fornecimento de combustível ou energia não fóssil no porto (por exemplo, armazenamento de bateria local, conexão à rede, tecnologias de produção de combustível, instalações de armazenamento de combustível), em conjunto com uma fonte de energia de baixo carbono. • Fornecimento de combustível ou energia não fóssil da costa para o navio (por exemplo, infraestrutura de conexão de energia em terra, infraestrutura de abastecimento incluindo barcaças), em conjunto com uma fonte de energia de baixo carbono. • Infraestrutura para transferir e transportar as emissões capturadas do navio para o sequestro posterior.
Programas que permitem reduções na intensidade equivalente ao carbono para um navio ou frota de navios	<ul style="list-style-type: none"> • Programas de <i>retrofit</i> que reduzem a intensidade de carbono equivalente de um navio ou da frota, seja por meio de melhoria significativa da eficiência, seja por permitir uma mudança do uso de combustível fóssil. • Programas para permitir uma mudança operacional ou de comportamento que possa aumentar a eficiência energética (por exemplo, iniciativas baseadas em frota ou porto, como gestão de velocidade, chegada <i>just in time</i>, otimização do uso de energia, atualização de contêineres refrigerados).

Fonte: CBI (2020).

Para promover o aumento da eficiência energética nos diversos modos de transporte, Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020) citam algumas iniciativas:

- i) criação de incentivos e subsídios baseados na eficiência e nas emissões de CO₂;
- ii) mensuração da emissão de CO₂ das operações de transporte e ampla divulgação por meio de *benchmarks* para estimular a migração para modos com menor impacto ambiental; e
- iii) fomento à pesquisa e inovação tecnológica voltadas para o desenvolvimento de sistemas logísticos e de transporte sustentáveis.

Análise do potencial e dos impactos de migração de cargas da rodovia para modos mais eficientes de transporte

Uma vez destacado o potencial da migração de cargas da rodovia para modos mais eficientes como principal vetor do esforço de descarbonização do transporte de cargas, esta seção apresenta algumas características da matriz logística brasileira, particularmente a predominância rodoviária vis-à-vis outros países comparáveis e a própria infraestrutura existente, além da análise de um cenário otimizado para 2035 e de seu respectivo potencial de redução de emissões.

Matriz de transporte nacional e cenário para 2035

A matriz de transportes brasileira, como é de amplo conhecimento, apresenta um desequilíbrio em favor do transporte rodoviário.

Tal constatação advém da comparação com outros países ou regiões de grande extensão territorial, bem como da análise da possibilidade de migração da rodovia para outros modos de transporte mais econômicos e menos agressivos ao ambiente.

A comparação da matriz logística brasileira com a de outras regiões de grande extensão territorial é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 | Matriz de transporte comparando países e regiões de grande extensão territorial

País	Modo de transporte*			
	Rodoviário	Ferrovário	Aquaviário	Dutoviário
Brasil**	57%	24%	17%	3%
Argentina	88%	4%	8%	0%
Índia	79%	21%	0%	0%
México	75%	25%	0%	0%
UE	65%	14%	18%	3%
Japão	51%	5%	44%	0%
EUA	42%	35%	10%	12%
China	35%	14%	48%	3%
Austrália	28%	58%	14%	0%
Canadá	27%	45%	6%	22%
Rússia	6%	61%	2%	31%

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos por OECD ([s.d.]), Eurostat ([s.d.]), FDC (2019) e ITF (2020).

Nota: A maior parte das informações é extraída da base de dados da OECD para o ano de 2018. São exceções todos os valores para Índia e aquaviário para Austrália, que são da mesma fonte, mas relativos ao ano de 2017; os dados do Canadá também são da mesma fonte, porém o dutoviário é de 2015, e o aquaviário, de 2013; os dados da UE são extraídos da EUROSTAT e referem-se a 2021, último ano que registra valores para todos os modos e primeiro ano estatístico pós-Brexit; o Brasil, cuja fonte é a FDC, e a Argentina, cuja fonte é ITF.

* Os valores percentuais são obtidos em função da carga transportada em toneladas, multiplicado pela distância de transporte dentro de cada modo.

** No caso brasileiro, além da Fundação Dom Cabral (FDC), há outras duas referências de matriz de transportes: o PNL 2035 (EPL, 2021) e o Instituto ILOS (Modolo, 2023). Para o PNL, a proporção do rodoviário é de 66%, e para o ILOS é de 62%, ambos superiores aos 57% proposto pela FDC.

Na distribuição percentual entre os diferentes modos de transporte para os países, a Rússia é, de longe, a que concentra seu transporte nos modos mais eficientes, dedicando apenas 6% para o rodoviário.

Também é o país que proporcionalmente aloca maior carga para as ferrovias (61%) e dutovias (31%), em função das longas distâncias e da elevada presença de *commodities* na matriz de cargas, como o carvão, petróleo e gás natural. Também merece destaque a Austrália, com uma extensão de trilhos um pouco maior do que a do Brasil (37 mil km) e forte presença de *commodities* transportadas em longas distâncias.

Para o caso brasileiro, avaliando-se a possibilidade de migração de carga para sistemas mais eficientes, cabe inicialmente analisar o perfil dos produtos movimentados internamente. A Tabela 5 revela, para cada tipo de produto, o volume total transportado em toneladas úteis (TU) e sua participação relativa, bem como o total em TKU, a participação relativa e a distância média de transporte.

Tabela 5 | Tipologia de produtos, TU e TKU transportados e distância média de transporte

	TU (bilhões de t)	% em TU	TKU (trilhões de t x km)	% em TKU	Distância média (km)
Carga geral	0,671	36,5%	0,747	45,2%	1.113,3
Granéis minerais	0,704	38,3%	0,488	29,6%	693,2
Granéis agrícolas	0,192	10,4%	0,196	11,9%	1.020,8
Granéis líquidos	0,272	14,8%	0,220	13,3%	808,8
Total	1,839	100,0%	1,651	100,0%	897,8

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos por FDC (2019).

Os granéis minerais, líquidos e agrícolas são predominantemente *commodities* voltadas à exportação, e a elevada participação desse grupo no conjunto de mercadorias transportadas internamente em longas extensões reflete a distância entre as áreas produtoras e o litoral do país. Tais cargas requerem fretes reduzidos para serem competitivas

no mercado global. Nesse sentido, nada mais natural do que migrarem para modos de menores custos unitários.

A Tabela 6 detalha a repartição modal dos tipos de carga mostrados na Tabela 5.

Tabela 6 | Divisão modal para cada tipo de carga

	Rodoviário (% TKU)	Ferroviário (% TKU)	Aquaviário (% TKU)	Dutoviário (% TKU)	Total TKU (bilhões)
Carga geral	82,4%	4,6%	13,0	0,0%	747,11
Granéis minerais	15,0%	62,6%	17,0	5,4%	488,12
Granéis agrícolas	65,0%	19,3%	15,7	0,0%	196,44
Granéis líquidos	54,0%	4,5%	33,7	7,8%	220,47
Total	56,6%	23,5%	17,3%	2,6%	1.652,14

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos por FDC (2019).

Como se observa na Tabela 6, mais de 80% da carga geral viaja pelas rodovias, com 13% no transporte aquaviário, sendo sua inserção na ferrovia muito incipiente. Já os granéis minerais concentram-se na ferrovia, mas seu transporte pelas vias rodoviária e aquaviária não é desprezível, havendo também alguma presença no transporte dutoviário (principalmente o minério de ferro). Granéis agrícolas são mais presentes na rodovia (65%), porém eles têm participação relevante em ferrovia (19%) e nos sistemas aquaviários (16%). Finalmente, os granéis líquidos viajam predominantemente por rodovia e modos aquaviários, tendo alguma inserção em dutos e uma ainda menor na ferrovia.

A análise comparada entre as Tabelas 5 e 6 leva à conclusão de que existe um potencial razoável de migração de cargas para sistemas de menores custos unitários, particularmente para as mercadorias que viajam longas

distâncias e para as commodities que podem ser consideradas cativas de modos mais eficientes. Também se deve considerar que muitas fontes de matérias-primas são inexploradas ou subexploradas em função da ausência de uma linha ferroviária mais próxima, como pode ser constatado pelas diversas solicitações de autorização de construção de linhas férreas acessando jazidas minerais pelo interior do país (ANTT, 2024), o que foi viabilizado pela promulgação do novo marco regulatório ferroviário (Lei 14.273, de 23 de dezembro de 2021). Também é esse o caso das jazidas da Bamin, na região de Caetité, na Bahia, que estão subexploradas em razão de ainda não ter sido concluída a obra da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) 1 e do Porto Sul em Ilhéus (BA) (Hirata, 2021).

A transferência da carga geral da rodovia para a ferrovia representa um ganho expressivo no esforço de descarbonização dos transportes, dado que esse segmento representa 37% do TKU brasileiro, havendo uma sobreposição razoável das rotas rodoviárias principais com a malha ferroviária existente no país. Para que isso aconteça, seria necessária a recapacitação da malha e a construção de novos trechos, além da proposição de um serviço ferroviário que oferecesse aumento da velocidade de transporte e confiabilidade nos prazos de entrega. A carga industrial exige maior previsibilidade e menores estoques ao longo da cadeia de suprimentos. Nesse sentido, deve haver uma programação de trens ágeis e menores, com agenda regular de paradas em estações e pátios de transbordo (BNDES, 2023).

Outra oportunidade expressiva encontra-se no incremento do transporte de cabotagem, que poderia absorver parte considerável da carga rodoviária de longa distância entre as cidades mais próximas da costa, sendo necessário melhorar o serviço com mais navios e maior frequência de escala nos portos, incluindo transporte porta a porta com perna rodoviária, além de fretes mais competitivos.

Acredita-se também que haja um potencial muito grande de migração da carga agrícola rodoviária (cerca de 8% do TKU total) para o modo ferroviário, por ser sua vocação natural (grandes volumes e longas distâncias), de modo que grande parcela dos investimentos em realização nas ferrovias visa capturar prioritariamente esse tipo de carga. Destacam-se, nesse sentido: a expansão de capacidade do conjunto Malha Paulista e Malha Norte da Rumo e desta última até Lucas do Rio Verde (MT); a construção da FIOI, especialmente em seu segundo trecho de Caetité (BA) até Barreiras (BA); a construção da Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO), entre Água Boa (MT) e Mara Rosa (GO), cujo primeiro trecho se conecta com a Ferrovia Norte Sul.

Considerando essas oportunidades de migração de cargas para modos de transportes eficientes, uma abordagem que pode ser empregada é aquela adotada pela FDC (2019). Ela projeta o crescimento de cada tipo de carga do cenário base de 2015 para 2035, adiciona os novos investimentos previstos na infraestrutura de transportes e faz a realocação das futuras cargas na infraestrutura disponível, de acordo com os novos custos unitários de deslocamento e restrições de capacidade da infraestrutura projetada.

O cenário projetado para 2035 para o setor ferroviário prevê a intervenção em 18,8 mil km de linhas, decorrente da modernização e adequação de capacidade e da construção de novos trechos, com destaque para: (i) implantação da Ferrogrão, da FICO até Lucas do Rio Verde (MT) e extensão da Malha Norte da Rumo, com a interconexão dessas três ferrovias; (ii) conclusão da FIOI até sua conexão à Norte-Sul e sua extensão até o oeste do Paraná, em conexão com a Ferroeste, que se entende de Curitiba (PR) até o sul do Mato Grosso do Sul, conectando-se com a hidrovia Paraná-Paraguai; e

(iii) construção da Transnordestina desde sua interseção com a Norte-Sul nas proximidades de Estreito (MA), chegando aos Portos de Suape (PE) e Pecém (CE).

Para hidrovias, o cenário de 2035 prevê a adição da navegabilidade do Rio Tocantins, entre o extremo norte de Tocantins e Belém (PA), e da hidrovia do São Francisco do norte de Minas Gerais ao norte da Bahia, na divisa com Pernambuco, além da melhoria de condições de navegação nos rios atualmente utilizados por meio de inéditos processos de concessão.

Em rodovias, o cenário 2035 prevê a necessidade de se fazer intervenções adicionais em quinhentos trechos, que somam cerca de 19,8 mil quilômetros, correspondentes a 16% da extensão total considerada para 2015 ou 57% do tráfego. Essa melhoria se traduz no aumento dos fluxos de tráfego, que passarão a operar nos níveis de serviço A, B e C, com o fluxo projetado para 2035.

Adiciona-se, para 2035, a construção do Porto Sul, em Iheus (BA), e a ampliação e arrendamento de vários terminais nos portos organizados, bem como a redução de gargalos nos acessos terrestres e marítimos, que tendem a viabilizar o aumento substancial da carga movimentada.

Assim, a nova infraestrutura reflete um cenário otimizado, que, de acordo com a FDC, “simula um portfólio ampliado com projetos selecionados para romper gargalos e inserir ligações faltantes na rede até 2035” (FDC, 2019). A realocação dos fluxos de carga na infraestrutura projetada para 2035 proporciona uma nova configuração para a matriz logística, conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 | Matriz logística projetada para 2035 segmentada por tipo de carga e modo de transporte

	Total TKU (bilhões tkm)	Divisão modal (%)															
		Rodoviário				Ferroviário				Aquaviário				Dutoviário			
		2015	2035	2015	2035	Δ%	2015	2035	2015	2035	Δ%	2015	2035	2015	2035	Δ%	
Carga geral	747,11	1.034,88	82,4%	79,7%	-2,7%	4,6%	8,6%	4,0%	13,0%	11,7%	-1,3%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%		
Granéis minerais	488,12	765,11	15,0%	9,7%	-5,3%	62,6%	71,5%	8,9%	17,0%	13,6%	-3,4%	5,4%	5,2%	-0,2%			
Granéis agrícolas	196,44	286,53	65,0%	40,3%	-24,7%	19,3%	50,8%	31,5%	15,7%	8,9%	-6,8%	0,0%	0,0%	0,0%			
Granéis líquidos	220,74	303,81	54,0%	41,4%	-12,6%	4,5%	31,5%	27,0%	33,7%	16,5%	-17,2%	7,8%	10,5%	2,7%			
Total	1.652,41	2.390,33	56,6%	47,7%	-8,9%	23,5%	36,7%	13,2%	17,3%	12,6%	-4,7%	2,6%	3,0%	0,4%			

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos por FDC (2019).

A nova matriz de transportes projeta uma participação agregada do modo rodoviário em 47,7%, do ferroviário em 36,7%, do aquaviário em 12,6% e do dutoviário em 3,0%. Isso representa uma redução de 8,9% de participação do transporte rodoviário (menos eficiente) em benefício dos demais modos (considerados mais eficientes). O que mais cresce em participação é o ferroviário, com aumento de 13,2%. O dutoviário ganha participação marginal, em 0,4%, porém o aquaviário perde 4,7% na nova configuração. A nova matriz pode ser considerada equilibrada, pois apresenta distribuição semelhante entre o TKU rodoviário (47,7%) e os demais modos (52,3%).

Analisando-se a segmentação por tipologia de cargas, as maiores alterações relativas são registradas em granéis agrícolas, que perdem participação nas rodovias em 24,7%, migrando principalmente para ferrovias, as quais ganham expressivos 31,5% de participação. Granéis líquidos perdem 12,6% de participação rodoviária e 17,2% do modo aquaviário, migrando fortemente para o ferroviário, que ganha 27,0% de inserção nesse tipo de carga. O dutoviário também ganha participação no granel líquido, porém sua inserção é baixa nesse modo de transporte. Carga geral e granéis minerais sofrem pouca alteração na transição intermodal, porém as migrações verificadas se dão principalmente para ferrovias. Para os granéis minerais, a migração segue uma lógica natural, já que a ferrovia é um modo cativo para tal tipo de carga. Quanto à carga geral, embora a transferência percentual seja tímida (redução de 2,7% na rodovia e acréscimo de 4% na ferrovia), o TKU da carga geral representa 43% da totalidade, o maior entre todos os tipos de carga. Além disso, poderia haver uma política pública de maior incentivo à migração desse tipo de carga da rodovia para a ferrovia, tendo em vista que já existe uma sobreposição razoável

entre as maiores rotas rodoviárias e as ferrovias existentes e projetadas, porém essa diretriz não é inserida no modelo de simulação.

Estimativa do potencial de redução com migração para modos mais verdes

Uma vez determinado o cenário para a demanda por transporte de carga em 2035, o cálculo das emissões evitadas pode ser feito mediante uma comparação com o ano base de 2015. Inicialmente, é necessário construir um cenário base de comparação, ou seja, o total do TKU projetado para o ano de 2035 com a reprodução da distribuição modal de 2015. Logo, o cenário base representa uma situação hipotética do aumento do TKU em decorrência do crescimento econômico, sem que haja alteração na matriz de transportes. A seguir, avalia-se o total de TKU para 2035 com a repartição modal estimada pela FDC (2019), denominado cenário projetado. A comparação entre os dois cenários reflete as diferenças na redistribuição das cargas pelos modos de transporte, apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 | Total de TKU para as repartições modais de 2015 e 2035

Total TKU (bilhões tkm)	Divisão modal													
	Rodoviário				Ferroviário				Aquaviário				Dutoviário	
	2015	2035	Δ	TKU com matriz de 2015	TKU com matriz de 2035	Δ	TKU com matriz de 2015	TKU com matriz de 2035	Δ	TKU com matriz de 2015	TKU com matriz de 2035	Δ	TKU com matriz de 2015	TKU com matriz de 2035
747,1	1.034,9	852,7	824,8	-27,9	47,6	89,0	41,4	134,5	121,1	-13,5	0,0	0,0	0,0	0,0
488,1	765,1	114,8	74,2	-40,6	479,0	547,1	68,1	130,1	104,1	-26,0	41,3	39,8	-1,5	-1,5
196,4	286,5	186,2	115,5	-70,8	55,3	145,6	90,3	45,0	25,5	-19,5	0,0	0,0	0,0	0,0
220,7	303,8	164,1	125,8	-38,3	13,7	95,7	82,0	102,4	50,1	-52,3	23,7	31,9	8,2	8,2
1.652,4	2.390,3	1.317,8	1.140,3	-177,5	595,5	877,3	281,8	412,0	300,8	-111,2	65,0	71,7	6,7	6,7

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos por FDC (2019).

O próximo passo consiste na determinação das emissões de CO₂ por modo de transporte e tipo de carga. Essa estimativa foi apresentada na Tabela 1, porém faltam algumas adaptações para que se possa traduzir diretamente a relação entre TKU e emissões. Inicialmente, a divisão modal trata agregadamente o transporte aquaviário, enquanto a Tabela 1 segmenta as emissões entre cabotagem e hidroviário. De forma simplificada, considerou-se que, dentre os modos aquaviários, as cargas minerais e agrícolas viajam predominantemente pelas hidrovias, os granéis líquidos pela cabotagem e a carga geral se distribui igualmente entre as duas. Nesse sentido, considera-se para as cargas minerais e agrícolas apenas a emissão hidroviária. Para líquidos, considera-se a emissão da cabotagem e, para a carga geral, a média simples entre as emissões aquaviária e cabotagem. A Tabela 1 também omite as emissões do modo dutoviário. Considerou-se, para tal modo, o mesmo valor de 3,9 kg de CO₂/mil TKU⁶ para todos os tipos de cargas (Branco; Bartholomeu; Vettorazzi, 2020).⁷

As emissões evitadas e acrescidas por modo de transporte e tipo de carga são obtidas pela simples multiplicação das emissões unitárias (Tabela 1, com os complementos citados) e a variação de TKU entre os cenários base e projetado (Tabela 8). O resultado é mostrado na Tabela 9, em que os números negativos representam emissões evitadas e os positivos revelam as acrescidas.

6 O artigo apresenta um valor de emissão de 3,9 g de CO₂/m³km. Considerou-se para todos os efeitos que 1 m³ corresponde a 1 t.

7 Cabe comentar que embora as simplificações adotadas para estimativa das emissões aquaviária e dutoviária mereçam críticas, elas representam pouco impacto no balanço das emissões.

Tabela 9 | Balanço de emissões por modo de transporte e tipologia de cargas

Modo de transporte	Balanço de emissões (mil t CO ₂)				
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral	Total (mil t CO ₂)
Rodoviário	-27%	-30%	-25%	-17%	-8.743
Ferroviário	16%	41%	16%	27%	3.662
Aquaviário	-14%	-11%	-52%	-23%	-485
Dutoviário	-23%	0%	123%	0%	26
Total (mil t CO₂)	-1.882	-1.192	-1.820	-645	-5.539

Fonte: Elaboração própria com base em dados fornecidos por FDC (2019), EPL e IEMA (2021) e Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020).

Nota: A leitura da tabela deve ser feita da seguinte maneira: a emissão do granel mineral pelo modo rodoviário é 27% (-8.742). O resultado é negativo, portanto, trata-se de emissão evitada na comparação entre os cenários base e projetado. No caso de valores positivos, as emissões são acrescidas.

Como resultado, constata-se que um leve rebalanceamento da matriz de transporte evitaria a emissão de 5,54 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera por ano, uma redução de 7,1% no total de emissões na comparação com o cenário base.

Em relação ao total de 78,1 milhões tCO₂ emitidos pelo transporte de cargas estimado para o cenário base (TKU de 2035 com matriz modal de 2015), o cenário projetado, com o reequilíbrio parcial da matriz, proporcionaria uma redução para 72,6 milhões tCO₂. A principal alteração ocorre na redução de 8,7 milhões tCO₂ da rodovia e acréscimo de 3,7 milhões tCO₂ da ferrovia.

Outro resultado que pode ser extraído é o ganho marginal em emissões na transferência de cargas da rodovia para modos eficientes, ou seja, o quanto cada TKU transferido do caminhão para outros modos de transporte significa em percentual de redução de emissões ou quantas vezes o setor rodoviário emite mais do que os demais modos por TKU transportado. Esse resultado pode ser observado nas tabelas 10A e 10B.

Tabela 10A | Ganho marginal na transferência de cada TKU da rodovia para os demais modos de transporte (em valores %)

Relação entre modos de transporte	Emissões (% kgCO ₂ /mil TKU)			
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral
Rodo/ferro	85,3%	55,4%	87,5%	56,3%
Rodo/hidro	95,4%	92,6%	91,7%	86,5%
Rodo/cabotagem	92,6%	88,2%	91,6%	83,3%
Rodo/duto	93,4%	-	93,2%	-

Tabela 10B | Quantas vezes cada TKU transportado pela rodovia representa em valor relativo de emissão comparado aos demais modos

Relação entre modos de transporte	Emissões (kgCO ₂ /mil TKU)			
	Granel mineral	Granel agrícola	Granel líquido	Carga geral
Rodo/ferro	6,8	2,2	8,0	2,3
Rodo/hidro	21,9	13,5	12,0	7,4
Rodo/cabotagem	13,4	8,5	11,9	6,0
Rodo/duto	15,2	-	14,7	-

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados fornecidos por FDC (2019), EPL e Iema (2021) e Branco, Bartholomeu e Vettorazzi (2020).

Nota: A leitura da Tabela 10A deve ser feita da seguinte maneira: a transferência de 1 TKU de granel mineral da rodovia para a ferrovia implica a redução de 85,3% de emissão de GEE, e assim sucessivamente. Já a Tabela 10B deve ser lida assim: o transporte de 1 TKU de granel mineral na rodovia emite 6,8 vezes mais do que se transportado pela ferrovia.

A informação transmitida por ambas as tabelas é exatamente a mesma, apenas a forma de leitura é diferente.

Observa-se, na Tabela 10A, que a transferência de 1 TKU representa no mínimo 56,3% em redução de emissões (transferência de carga geral de rodovia para ferrovia), podendo chegar a 95,4% (transferência de granel mineral da rodovia para a hidrovía). Dito de outro modo, cada TKU transferido emite entre 2,3 e 21,9 vezes menos CO₂.

Esses números reforçam o grande potencial de reduções na transferência entre modos de transporte, mostrando a relevância de uma discussão ampla de rebalanceamento da matriz de transportes de cargas para que sejam atingidas metas ambiciosas de descarbonização.

Oportunidades de descarbonização na logística brasileira

Neste artigo indicamos como uma mudança estrutural na matriz de transporte brasileira, traduzida pela transferência de carga de longas distâncias do setor rodoviário para os demais modos de transporte mais eficientes, é fundamental na transição para uma economia de baixo carbono. O potencial de transferência de cargas supera o proporcionado pelo pipeline de projetos do país se o comparamos a países como Rússia, Canadá, Austrália, China e EUA.

Ainda assim, a transferência de cargas entre modos de transporte não prescinde da busca por ganhos de eficiência intrínsecos a cada modo de transporte. Destacam-se os impactos relativos superiores de medidas alternativas aplicadas ao transporte rodoviário. Além disso, no âmbito das cidades, o uso de caminhões com zero ou pouca emissão é uma demanda imperativa em favor da saúde pública. Não se pode omitir, ademais, a adoção de soluções mais factíveis e menos custosas, ainda que tenham contribuição mais limitada, como, por exemplo, o uso do gás natural para os motores, que pode evoluir para o biometano; o uso intensivo de tecnologias de software e hardware para gerar mais eficiência; os aprimoramentos nos equipamentos de transporte que gerem menor arrasto, entre outras.

As alternativas de descarbonização não podem ser avaliadas dissociadas do custo de implantação, principalmente a transformação estrutural da matriz do transporte de cargas, que depende da constituição de ativos estruturantes, como vias ferroviárias e hidrovias, bem como da capacidade de manutenção de sua qualidade operacional. São investimentos elevados, de retorno a longo prazo, com muitos custos afundados e externalidades. O setor público é o principal agente nessa transformação, por meio dos esforços de planejamento e regulação, que devem equacionar o conjunto de benefícios diretos e indiretos vis-à-vis seus custos de implantação e obrigações, estruturando projetos, alocando riscos de forma eficiente, garantindo financiabilidade e assumindo gastos sem retorno financeiro privado. A regulação e o estabelecimento de incentivos também determinam a adoção de tecnologias descarbonizantes, como o aprimoramento de motores e a substituição de fontes de propulsão.

Várias ações geram ganhos financeiros, viabilizando a implantação privada. Outras estão associadas a externalidades positivas e dependem de apoio público, mesmo que parcial, como nas parcerias público-privadas (PPP). O desafio é de tal ordem que, além da mobilização de capitais públicos e privados nacionais, o país busca atrair recursos externos, tanto de investidores quanto de financiadores.

O Governo Federal tem empreendido esforços na promoção do investimento estruturante no país por meio do Novo PAC, que alavanca inversões privadas e públicas. Em seu eixo de transporte eficiente e sustentável, estão previstos investimentos de R\$ 380 bilhões, sendo R\$ 223 bilhões até 2026, divididos nos subeixos ferrovias, hidrovias, portos, aeroportos e rodovias. Muitos desses projetos representam transformação em cada setor, uma vez que promovem aumento de

capacidade em adição aos investimentos correntes que atendem à depreciação desses ativos.

Como proposições ao incentivo de uma logística que vise redução dos custos e melhoria dos serviços e, principalmente, que seja menos agressiva ao meio ambiente, sugere-se:

- i) Priorizar os investimentos em modos de transporte de menor emissão de GEEs, notadamente ferrovias, hidrovias e cabotagem. Como visto, o potencial da utilização de modais mais verdes é imensa: cada TKU migrado da rodovia para os demais modos de transporte representa redução entre 56% e 95% nas emissões de CO₂e.
- ii) Incentivar os projetos que visem a descarbonização intrínseca a cada modo de transporte, mediante a substituição de formas de propulsão nos veículos por combustíveis neutros ou de baixa emissão de GEEs; uso da tecnologia para melhoria no desempenho dos motores; maior emprego da telemetria, sistemas regenerativos e outras formas de automação para condução dos veículos com menor consumo de energia; uso de sistemas de gestão que otimizem as rotas e o uso da capacidade de transportes, especialmente de caminhões; desenvolvimento de equipamentos que reduzam o arrasto no trajeto, como o uso de defletores e pneus verdes; borbulhamento de casco e velas giratórias nos navios; sistema Positive Train Control (PCT) nas composições ferroviárias, entre outras tantas possibilidades.
- iii) Melhorar as condições do transporte rodoviário, considerando-se a ainda forte dependência dos caminhões para o transporte de cargas no país. Nesse sentido, sugere-se o incentivo à renovação da frota, especialmente a migração para o uso da tecnologia Proconve 8 e caminhões movidos a GNV; o concessionamento de estradas, viabilizando in-

vestimentos que propiciem aumento de capacidade e redução de acidentes; a garantia do investimento público nas estradas para as quais o concessão não se mostre viável, principalmente com recuperação de pavimento e tratamento de pontos críticos. Relatório da CNT (Paduá, 2014 *apud* CNT, 2022, p. 193) revela que caminhões pesados trafegando por vias de má qualidade apresentam emissões 11% superiores aos que trafegam por rodovias de boa qualidade.

Perspectivas e contribuições do BNDES

O BNDES vem desempenhando papel fundamental no processo de descarbonização dos transportes. O Banco atua na estruturação e financiamento de projetos, no desenvolvimento de novas soluções e na aquisição de máquinas e equipamentos portadores de novas tecnologias. O quadro a seguir apresenta essas possibilidades:

Quadro 3 | Contribuições do BNDES para a descarbonização dos transportes

Atuação	Descrição	Destaque
Estruturação de projetos	O Banco oferece apoio técnico aos entes federativos ou outros interessados a eles subordinados, podendo envolver fomento, coordenação, execução direta, apoio à realização de serviços técnicos especializados e outras iniciativas que propiciem a celebração de contratos de parceria com a iniciativa privada para a execução de empreendimentos de interesse público, bem como outras medidas de desestatizações ou soluções financeiras que viabilizem a participação de capital privado em investimentos públicos.	Para além das estruturas de projetos destinados primariamente à conservação e restauração florestal, o BNDES tem buscado incentivar o poder público a introduzir iniciativas socioambientais e climáticas nos seus projetos em estruturação, tais como realização de inventários de GEEs, adoção de padrões ISO, Sistema de Gestão Ambiental etc. No setor de transporte, em particular, o BNDES tem apoiado a estruturação de projetos de rodovias cujas condições respeitem parâmetros mínimos que contribuam para mitigações de emissões.
Financiamento	Bens de capital O BNDES dispõe do produto BNDES Máquinas e Equipamentos, voltado para aquisição, comercialização e produção de máquinas e equipamentos, materiais industrializados e serviços nacionais. Esses itens devem estar cadastrados no credenciamento da Finame (https://ws.bndes.gov.br/cfi_catalogo/).	Está previsto nesse produto a adoção de taxa de remuneração do BNDES menor para o caso de aquisição de comercialização de bens de baixo carbono e máquinas 4.0. Como exemplo, incluem-se nessa categoria caminhões com chassi, motor e cabina a gás e sistema de tração com motor elétrico.

(Continua)

(Continuação)

	Atuação	Descrição	Destaque
Financiamento	Projetos	O FINEM é o produto do BNDES para financiamento de projetos, abrangendo, assim, os empreendimentos voltados para a expansão e modernização da infraestrutura. Outra opção de financiamento a projetos de infraestrutura são as debêntures de infraestrutura.	Dentro do setor de transportes, os projetos de hidrovias e ferrovias apresentam condições mais favoráveis de custo e prazo. Cabe destaque também a subscrição, por parte do BNDES, de debêntures Sustainability Linked Bond, emitidas pela Rumo para investimentos na Malha Paulista.
	Inovação	O programa BNDES Mais Inovação visa apoiar a implantação de investimentos e projetos voltados para inovação e digitalização, tendo como subprogramas: investimentos em inovação, aquisição de bens inovadores e difusão tecnológica.	O BNDES apoiou os investimentos da Rumo S.A. em sistemas ferroviários que preveem automação da circulação dos trens trazendo eficiência operacional e aumento de segurança. Conhecido como Positive Train Control (PTC), trata-se de um sistema de controle de frenagem com objetivo de melhorar a gestão da operação ferroviária, tornando-a mais segura, integrada e eficiente. A partir da sua implantação, a companhia consegue economizar combustível e reduzir emissões, melhorando, assim, suas metas de eficiência energética.

(Continua)

(Continuação)

Atuação		Descrição	Destaque
Financiamento	Socioambiental e climático	Fundo Clima e Crédito BNDES ASG.*	O Fundo Clima possui uma modalidade específica para transporte, com o objetivo de apoiar a implantação, expansão, modernização e recuperação da infraestrutura de transportes de passageiros e carga, incluindo aquisição de equipamentos que promovam alternativas de transporte mais sustentáveis, com menor impacto ambiental, redução da emissão de gases de efeito estufa e foco na eficiência e qualidade de vida. Entre as atividades apoiáveis nessa modalidade, constam a eletrificação de frotas, a modernização e gestão do transporte ferroviário elétrico, aquaviário e hidroviário, bem como o apoio ao desenvolvimento tecnológico, aquisição e investimentos na capacidade produtiva para fabricação de caminhões elétricos, híbridos ou movidos a biocombustíveis para logística urbana. Exemplo de projeto usando o Fundo Clima é o da Transdourada Navegação para o transporte hidroviário de grãos no Pará.

Fonte: Elaboração própria com base em BNDES (2024).

* ASG é a sigla para ambiental, social e de governança, que encontra correspondência na sigla em inglês ESG (*environmental, social and governance*).

O BNDES tem ainda o potencial de apoiar o planejamento e influenciar nas decisões de políticas públicas e modernização da regulamentação, por meio do seu conhecimento setorial, de modo a incentivar o investimento em ativos estruturantes da infraestrutura logística e em projetos que propiciem ganhos de eficiência e redução de emissões intrínsecas dos modos de transporte. Também pode induzir as empresas à incorporação de melhores práticas favoráveis à descarbonização ao exigir sua adoção durante a elaboração da estruturação dos projetos.

Uma das principais contribuições do BNDES tradicionalmente ocorre por meio do financiamento, disponibilizando condições adequadas para apoiar projetos que exijam longo prazo para amortização da dívida, bem como atraindo, sempre que possível, outras fontes de financiamento. Além de viabilizar a constituição de ativos de infraestrutura que geram maior equilíbrio da matriz logística, o BNDES impõe condicionantes e dispõe de incentivos que promovem a descarbonização de cada modalidade de transporte, podendo estimular a descarbonização e o reequilíbrio da matriz de transportes.

Referências

ABREU, B. R. *Avaliação do impacto do envelhecimento de frota na eficiência energética de uma empresa do setor ferroviário*. 2013. Dissertação (mestrado profissional em sistemas de gestão) – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/1817>. Acesso em: 18 set. 2023.

ANTT – AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. Autorizações ferroviárias. ANTT, Brasília, D.F., 2024. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiOTQ2MGM4MDUtMmVIYi-00MGNmLWFiYjAtMDY0OTJkZWl4OTNiIiwidCI6Ijg3YmJlOWRRLWE4OTItNGNkZS1hNDY2LTg4Zjk4MmZiYzQ5MCI9>. Acesso em: 18 jan. 2024.

BARTHOLOMEU, D. B.; PÉRA, T. G.; CAIXETA FILHO, J. V. Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas. *Journal of Transport Literature*, Manaus, v. 10, n. 3, p. 15-19, 2016.

BEZERRA, A. P. X. G.; SOUZA, W. M.; HOLANDA, R. M. Poluição atmosférica: as fontes do setor portuário. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, Curitiba, v. 21, n. 8, p. 9584-9599, 2023. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/962>. Acesso em: 15 set. 2023.

BLAS, I.; MEDIAVILLA, M.; CAPELLÁN-PÉREZ, I.; DUCE, C. The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm. *Energy Strategy Reviews*, [s. l.], v. 32, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100543>. Acesso em: 7 out. 2024.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Shortlines*: o desafio de implantá-las no Brasil. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, v. 29, n. 57, p. 5-71, mar. 2023. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/23092/1/PRArt_BS%2057_Shortlines_215858.pdf. Acesso em: 23 jan. 2024.

BNDES – BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. *Soluções para o seu negócio*. Rio de Janeiro, [2024]. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento>. Acesso em: 23 out. 2024.

BRANCO, J. E. H.; BONATO, D. B. B.; ALVES JUNIOR, P. N.; CAIXETA FILHO, J. V. Ações e políticas para redução da emissão de CO₂ no transporte de cargas do Brasil. *Transportes*, [s. l.], v. 31, n. 2, p. e2415, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.58922/transportes.v31i2.2415>. Acesso em: 7 out. 2024.

BRANCO, J. E. H.; BARTHOLOMEU, D. B.; VETTORAZZI, A. C. Avaliação das emissões de CO₂ na etapa de transporte do etanol: aplicação de um modelo de otimização. *Transportes*, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 63-80, 2020. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/download/1856/797/10762>. Acesso em: 23 jan. 2024.

BRANCO, J. E. H.; BARTHOLOMEU, D. B.; ALVES JUNIOR, P. N.; CAIXETA FILHO, J. V. Evaluation of the economic and environmental impacts from the addition of new railways to the Brazilian's transportation network: an application of a network equilibrium model. *Transport Policy*, Amsterdam, v. 124, p. 61-69, 2022. Disponível em: <https://jpi-urbaneurope.eu/wp-content/uploads/2018/02/Brazil-team-2022-Evaluation-of-The-Economic-and-Environmental-Impacts-from-the-Addition-of-New-Railways-to-the-Brazilians-Transportation-Network.pdf>. Acesso em: 5 out. 2023.

CAMPOS, E. E.; PUNHAGUI, K. R. G.; JOHN, V. M. Emissão de CO₂ do transporte da madeira nativa da Amazônia. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 157-172, abr./jun. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/nmPkxFdQfBcsLfqdkKNKbWQ/?format=pdf>. Acesso em: 7 out. 2024.

CBI – CLIMATE BONDS INITIATIVE. *The Shipping Criteria for the Climate Bonds Standard & Certification Scheme*. London: CBI, 2020. Disponível em: <https://www.climatebonds.net/files/files/CBI%20Certification%20-%20Shipping%20Background%20Paper%281%29.pdf>. Acesso em: 19 set. 2023.

CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. *Pesquisa CNT de rodovias 2022*. Brasília, D.F.: CNT, 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/6b24f1b4-9081-485d-835d-c8aafac2b708>. Acesso em 25/09/2024.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Balço Energético Nacional: relatório síntese 2024 (ano base 2023)*. Brasília, D.F.: EPE, 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%3ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 16/09/2024.

EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA. Plano Nacional de Logística 2025. *Observatório Nacional de Transporte e Logística*, Brasília, D.F., [s.d.]. Disponível em: <https://ontl.infrasa.gov.br/planejamento/plano-nacional-de-logistica/plano-nacional-de-logistica-2025/>. Acesso em: 23 jan. 2024.

EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA; IEMA – INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. *Metodologia EPL-IEMA para emissões de GEE e poluentes locais: acordo de cooperação técnica – EPL e IEMA*. Brasília, D.F.: EPL; São Paulo: Iema, 2021. Disponível em: [https://energiiaeambiente.org.br/produto/metodologia-epl-iema-para-emissoes-de-gee-e-poluente-locais#:~:text=Metodologia%20EPL%20IEMA%20para%20emiss%C3%B5es%20de%20GEE%20e%20poluentes%20locais,-Veja%20dados%20da&text=Apresenta%20estimativas%20realizadas%20pelo%20IEMA,Log%C3%ADstica%202025%20\(PNL%202025\)](https://energiiaeambiente.org.br/produto/metodologia-epl-iema-para-emissoes-de-gee-e-poluente-locais#:~:text=Metodologia%20EPL%20IEMA%20para%20emiss%C3%B5es%20de%20GEE%20e%20poluentes%20locais,-Veja%20dados%20da&text=Apresenta%20estimativas%20realizadas%20pelo%20IEMA,Log%C3%ADstica%202025%20(PNL%202025)). Acesso em: 27 out. 2023.

EPL – EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA; MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. *PNL 2035 – Plano Nacional de Logística*. Brasília, D.F.: EPL; Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: https://ontl.infrasa.gov.br/planejamento/plano-nacional-de-logistica/plano-nacional-de-logistica-2035/relatorios/#flipbook-df_61901/1/. Acesso em: 9 out. 2024.

EUROSTAT. Database. *Eurostat*, Luxembourg, [s.d.]. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>. Acesso em: 23 jan. 2024.

FDC – FUNDAÇÃO DOM CABRAL. *Plataforma de Infraestrutura Logística de Transportes: diagnóstico e projeções para a infraestrutura de logística de transportes no Brasil*. Belo Horizonte: FDC, 2019. Disponível em: <https://nucleos.fdc.org.br/logistica/pilt/>. Acesso em: 23 jan. 2023.

HIRATA, T. Bamin vence leilão de ferrovia e plano é investir R\$ 14 bilhões. *Valor Econômico*, São Paulo, 9 abr. 2021. Disponível em: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2021/04/09/bamin-vence-leilao-de-ferrovia-e-plano-e-investir-r-14-bilhoes.ghtml>. Acesso em: 7 out. 2024.

ITF – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. Decarbonising Argentina's transport system: charting the way forward. *International Transport Forum Policy Papers*, Paris, n. 75, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1787/24108871>. Acesso em: 7 out. 2024.

LIIMATAINEN, H.; VAN VLIET, O.; APLYN, D. The potential of electric trucks: an international commodity-level analysis. *Applied Energy*, [S.l.], n. 236, p. 804-814, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.017>. Acesso em: 10 set. 2023.

MCT – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Emissões de dióxido de carbono por queima de combustíveis: abordagem top-down*. MCT, Brasília, D.F., 2010. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/brasil_mcti_topdown.pdf. Acesso em: 30 ago. 2023.

MCTIC – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. *Opções de mitigação de emissões de GEE em setores-chave*. MCTIC, Brasília, D.F., [s. d.]. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/opcoes_mitigacao/Opcoes_de_Mitigacao_de_Emissoes_de_Gases_de_Efeito_Estufa_GEE_em_SetoresChave_do_Brasil.html. Acesso em: 7 out. 2024.

MCTIC – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. 6. ed. Brasília, D.F.: MCTIC, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em: 7 out. 2024.

MODOLO, L. O. *Panorama das emissões de gases do efeito estufa no transporte de cargas*. ILOS, Rio de Janeiro, 30 ago. 2023. Insights. Disponível em: <https://ilos.com.br/panorama-das-emissoes-de-gases-do-efeito-estufa-no-transporte-de-cargas/>. Acesso em: 5 mar. 2024.

NOVO, Ana Luiza Andrade. *Perspectivas para o consumo de combustível no transporte de carga no Brasil: uma comparação entre os efeitos estrutura e intensidade no uso final de energia do setor*. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Programa de Planejamento Energético, 2016.

OECD – Organization for Economic Co-operation and Development. OECD Data Explorer. OECD, Paris, [s.d.]. Disponível em: <https://stats.oecd.org/>. Acesso em: 23 jan. 2024.

OLIVER WYMAN. *How biofuels can speed up decarbonization: scaling biofuels in Brazil could dramatically replace fossil fuels*, [S.l.], c2023. Disponível em: <https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2023/aug/how-biofuels-can-speed-up-decarbonization.pdf>. Acesso em: 10 set. 2023.

OLIVEIRA, V. C. *Avaliação da relação entre as características da superfície de pavimentos e os níveis de emissões de poluentes atmosféricos*. 2021. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/63587>. Acesso em: 8 set. 2023.

RIET, O.; JONG, G.; WALKER, Warren. Drivers of freight transport demand worldwide. *Significance qualitative research*, [S.l.], 2004. Disponível em: <https://significance.nl/wp-content/uploads/2019/03/2004-GDJ-Drivers-of-freight-transport-demand-worldwide.pdf>. Acesso em: 28 set. 2023.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMAÇÃO DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. *Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2021*. [S. l.]: Observatório do Clima, 2023. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/02/SEEG11-RELATORIO-ANALITICO.pdf>. Acesso em: 7 out. 2024.

SIMÃO, L.E.; SCARIOT, G.L.; CEZNE, M.A. Transporte rodoviário de cargas: como selecionar um método para cálculo de emissão de CO₂ da sua frota?. *Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios*, Florianópolis, v. 15, edição especial, p. 97-122, 2022. Disponível em: <https://portaldeperiodicos.animaeducacao.com.br/index.php/EeN/article/download/18095/11898>. Acesso em: 7 ago. 2023.