

# Simulação de estratégias para descarbonização do transporte de cargas



Veronica Ghisolfi

TNO Logistics Scientist. Roterdã, Países Baixos.  
ORCID: 0000-0002-8846-6440

Gisele de Lorena Diniz Chaves

Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção PPGEP/UFSC. Florianópolis, Brasil.  
ORCID: 0000-0001-6359-9063

Glaydston Mattos Ribeiro

Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes – PET/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil  
ORCID: 0000-0001-8452-057X

*Recibido: 08.03.2024. Aceptado: 25.04.2025.*

## Resumo

O transporte de cargas é uma fonte de emissões de gases de efeito estufa. Sua descarbonização é desafiadora devido à alta dependência de combustíveis fósseis e crescente demanda. Este artigo analisa a dinâmica das políticas de descarbonização do transporte de cargas. A Dinâmica de Sistemas se destaca para investigar o impacto das políticas ao longo do tempo. Um modelo de simulação foi desenvolvido e aplicado ao sistema brasileiro de transporte de cargas para analisar o tempo de implementação e o impacto de políticas voltadas para meios alternativos de transporte, como modos e combustíveis. A redução significativa das emissões é possível combinando uma mudança modal significativa, além de zerar o uso de diesel. Os limites de emissão para o setor para limitar o aquecimento global a 1,5°C ou 2°C seriam alcançados nos próximos anos, o que corrobora a urgência de ações mais contundentes para promover a descarbonização do transporte de cargas.

**PALAVRAS-CHAVE:** EMISSÕES. GASES DE EFEITO ESTUFA. DINÂMICA DE SISTEMAS. TRANSPORTE DE CARGAS.

## Simulation of strategies for decarbonizing freight transport

### Abstract

Freight transport is a source of greenhouse gas emissions. Its decarbonization is challenging due to the high dependence on fossil fuels and increasing demand. This paper analyzes the dynamics of the freight decarbonization policies. System Dynamics stands out for its suitability to investigate the impact of policies over time. A simulation model was developed and applied to the Brazilian freight system to analyze the implementation

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

time and impact of policies toward alternative means of transportation, such as modes and fuels. Significant emissions reduction is possible by combining a noteworthy shift from roadways to alternative modes, in addition to zeroing out the use of diesel. The emission budgets for the Brazilian freight sector to limit global warming to 1.5°C or 2°C would be reached in the next years, which corroborate the urgency for more forceful actions to promote freight decarbonization.

**KEYWORDS:** EMISSIONS. GREENHOUSE GASES. SYSTEM DYNAMICS. FREIGHT TRANSPORT.

## Introdução

O elevado volume de transporte de cargas é o reflexo de uma economia forte. No entanto, o *International Transport Forum* (ITF, 2015) estima que o transporte internacional de mercadorias é responsável por cerca de 30% de todas as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com o transporte e mais de 7% das emissões globais. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2022), alcançar uma meta de zero emissões líquidas até 2050 exige que as emissões do setor de transporte caiam cerca de 20% até 2030. Essa queda, no entanto, depende de um amplo conjunto de políticas, como a rápida eletrificação de veículos rodoviários, medidas de eficiência energética operacional e técnica, comercialização e expansão de combustíveis de baixo carbono, assim como políticas para incentivar uma mudança modal para opções de viagens com baixo teor de carbono.

Independentemente da estratégia de descarbonização adotada, os tomadores de decisão devem estar cientes de que suas políticas, decisões e ações podem ter efeitos secundários indesejáveis, levando à necessidade de uma perspectiva sistêmica (Ghisolfi *et al.*, 2022b). Além disso, a dinâmica do sistema também é determinada pela velocidade da mudança, ou seja, o tempo que cada decisão ou ação leva para ser implementada e fazer efeito. Nesse sentido, este estudo tem como objetivo investigar o tempo de implementação e os impactos de políticas voltadas para: (i) modos alternativos de transporte; (ii) combustíveis alternativos; (iii) aumento do percentual de biodiesel na mistura ao diesel; (iv) aceleração do processo de renovação da frota na descarbonização do transporte de cargas no Brasil. Para tanto, foi adotada uma abordagem sistêmica que enfoca a dinâmica e as interdependências entre políticas e decisões tomadas em diferentes momentos. A modelagem de Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics* - SD) destaca-se por ser adequada para investigar o impacto de políticas e estratégias ao longo do tempo, considerando a complexidade dinâmica de sistemas estruturados por *feedback* (Abbas e Bell, 1994; Shepherd, 2014). Este estudo propõe um modelo para analisar o impacto das políticas de descarbonização realizadas em diferentes momentos sobre a redução das emissões do transporte de carga. O modelo SD proposto ajuda a começar a preencher as lacunas da literatura (Ghisolfi *et al.*, 2022a) sobre uma perspectiva sistêmica e aprofundar o conhecimento sobre os fatores temporais relacionados a descarbonização do sistema de transporte de cargas.

## Revisão de literatura

A dinâmica é definida geralmente como as forças ou propriedades que estimulam o crescimento, o desenvolvimento ou a mudança dentro de um sistema ou processo. A necessidade de entender a dinâmica dos sistemas de transporte de carga cresceu em

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

importância, uma vez que as políticas precisam ser adaptadas a objetivos definidos no tempo, como a descarbonização, (Tavasszy, 2020). Para abordar e modelar a dinâmica de um sistema, pode-se adotar diferentes abordagens, como modelos de séries temporais, *Agent-Based Modeling* (ABM) e dinâmica de sistemas (SD). Em relação a utilidade de séries temporais e ABM para representar a dinâmica dos sistemas de transporte de carga, diferentes aspectos foram abordados pelos modelos na literatura, como a escolha do veículo comercial (Lepitzki e Axsen, 2018) e a escolha do modo ferroviário ou rodoviário para diferentes *commodities* (Holguín-Veras *et al.*, 2021). Outros exemplos incluem modelos dinâmicos para planejamento de entrega de cargas (Schröder e Liedtke, 2017), modelo econômico para centro de distribuição urbano e estratégias de preços dinâmicos (Reis, 2018), divisão dinâmica de modos em um sistema de transporte de carga multimodal (Ferrari, 2014) e o processo de entrega de última milha ideal (Gatta *et al.*, 2020).

Em relação aos modelos SD, as primeiras pesquisas de Abbas e Bell (1994) discutiram e avaliaram seus pontos fortes e fracos em termos de adequação para modelagem de sistemas de transporte. Como os problemas de transporte exigem formas de integrar o conhecimento, bem como incluir compensações de longo/curto prazo, a modelagem SD é adequada para abordar estudos estratégicos com políticas, análises e tomada de decisões, conforme apontado por Shepherd (2014). Ghisolfi *et al.* (2022a) revisaram modelos SD de descarbonização de carga e concluíram que os modelos possuem limites restritos para representar o sistema. Ghisolfi *et al.* (2022b) apresentou um modelo qualitativo amplo, mostrando a importância de os formuladores de políticas abordarem a descarbonização de forma colaborativa e sistêmica, evitando que suas ações sejam compensadas devido a efeitos rebote dentro do sistema. Outra lacuna da literatura é a falta de transparência em relação à dimensão temporal dos modelos SD (Ghisolfi *et al.*, 2022a). Isso é crítico, pois o tempo é crucial para avaliar o potencial e o sucesso das políticas para atingir as metas de descarbonização dentro dos prazos definidos.

## Metodologia

O sistema de transporte de carga brasileiro foi escolhido como estudo de caso para testar a aplicabilidade do modelo proposto. A abordagem utilizada para modelar a dinâmica das políticas de descarbonização do transporte de carga é baseada no modelo conceitual SD proposto por Ghisolfi *et al.* (2022b). Esse modelo conceitual é composto por cinco submodelos, cada um representando a dinâmica de uma estratégia específica de descarbonização. O atual modelo SD quantitativo, no entanto, apresenta três dessas estratégias de descarbonização: a utilização da frota, a escolha dos modos de transporte e a eficiência energética dos veículos. Por outro lado, as estratégias de mudança do transporte de carga para modos de baixa intensidade de carbono e incentivo a novas fontes de energia como combustíveis são modeladas como alavancas de política, ou seja, têm o potencial de mudar a dinâmica do sistema em direção à descarbonização. Assim, o modelo de simulação é organizado em três submodelos, cada um com seu diagrama de estoque e fluxo e suas principais equações. O modelo foi desenvolvido em Vensim® Pro (Ventana Systems, 2022), e o período de simulação varia de 2020 a 2050.

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

## Utilização da frota

O primeiro submodelo visa simular o tamanho da frota brasileira com base na atividade atribuída a cada modo de transporte. A simulação começa com a atividade de transporte de carga anual, medida em tonelada-quilômetro (tkm), que depende da atividade de transporte de carga do ano inicial da simulação, além de um percentual médio da variação futura baseado na série histórica (EPE, 2022). Em seguida, a divisão entre os modos simula o percentual de carga que será transportado por rodovias, ferrovias e hidrovias, com base no Plano Nacional de Logística – PNL 2035 (Ministério da Infraestrutura e Empresa de Planejamento e Logística – EPL, 2021). O PNL 2035 é modelado por uma função *ramp*, que altera suavemente o valor da variável na forma de uma curva e seu uso é comum em situações em que é necessário simular uma relação crescente ou decrescente linearmente que não é constante ao longo do tempo. Assim, esta função permite simular o período de adaptação de novas políticas (Coyle, 1996). Durante o período de simulação, a implementação do PNL 2035 começa em 2020 e aumenta linearmente até atingir 100% até 2035. Cada projeção do PNL considera um conjunto de investimentos em infraestrutura logística, ou seja, em corredores ferroviários estratégicos, hidrovias, portos, integração multimodal, dentre outros, que têm o potencial de alterar a participação de cada modo no sistema de transporte de carga. A dependência entre a implementação do PNL e o compartilhamento entre os modos é modelada por meio de uma curva em forma de S, frequentemente utilizada como representativa de curvas de aprendizagem, conforme ilustrado na Figura 1.

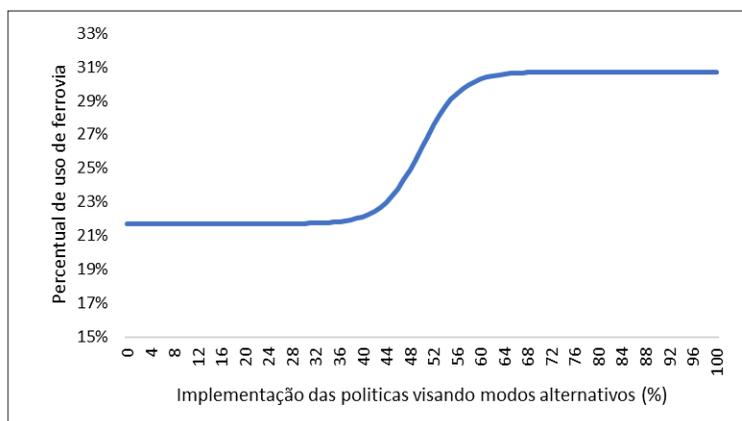


Figura 1. Relação entre participação ferroviária e políticas voltadas para modos alternativos.  
Fonte: elaborado pelos autores.

Dada a previsão da atividade de transporte de carga e a porcentagem de carga transportada por cada modo, o próximo passo é simular o tamanho da frota de caminhões, trens e barcas. Assume-se que os veículos realizarão o mesmo nível de atividade de transporte no futuro que realizavam no passado. Foi utilizada a série histórica da atividade de transporte (tkm) por modo fornecida pela EPE (2022), a série histórica da frota rodoviária fornecida pelo SINDIPEÇAS e ABIPEÇAS (2022) e a série histórica da frota do transporte ferroviário e aquaviário obtidas no Anuário de Transportes CNT (CNT, 2021). As frotas foram utilizadas no submodelo de escolha do veículo para a dinâmica do processo de renovação da frota.

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

## Escolha dos modos de transporte

O segundo submodelo visa simular a participação de mercado de diferentes tecnologias de veículos movidos a combustível que irão integrar a frota de cada modo de transporte. A frota total é composta por veículos já existentes no mercado no início da simulação (2020), movidos a diesel/biodiesel, e veículos vendidos a partir de 2020, movidos a diesel/biodiesel, eletricidade, hidrogênio e GNV/biometano. A distribuição etária da frota ativa de caminhões, locomotivas e barcaças no primeiro ano da simulação é dada por SINDIPEÇAS e ABIPEÇAS (2022), BNDES (2014) e CNT (2021), respectivamente. Duas variáveis relacionadas à política: ‘aceleração do controle da política de renovação da frota’ e ‘políticas de aceleração da renovação da frota’ foram consideradas. A primeira assume zero ou um, conforme o cenário em que essas políticas estão ativas ou não. A segunda supõe que a política será aplicada em um determinado intervalo de tempo para acelerar o processo de sucateamento. Caso as políticas anteriores não sejam aplicadas, incidirá uma taxa normal de substituição, conforme função de sucateamento definida pelo Ministério do Meio Ambiente – MMA (2014). Dada a escassez de dados brasileiros, a função definida por Green *et al.* (2004) sobre a frota de locomotivas americanas para a taxa de sucateamento de locomotivas, e a função de sucateamento da frota de navios definida por Held *et al.* (2021) foram utilizadas. O sucateamento da frota leva à necessidade de substituição dos veículos ao longo do tempo. Este processo de renovação da frota pressupõe que o ritmo a que as empresas substituem as suas frotas depende fortemente da idade de seus veículos.

A compra de veículos novos depende da frota total e da frota necessária para atender a demanda. A etapa seguinte envolve a simulação da participação da tecnologia de propulsão de cada veículo. A partir de 2020, a frota de veículos é composta por diferentes sistemas de propulsão, de acordo com políticas específicas para combustíveis alternativos. Em relação aos caminhões, isso se baseia em um estudo técnico desenvolvido pelo *Boston Consulting Group* – BCG e pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores – ANFAVEA (BCG e ANFAVEA, 2021), que prevê a introdução de combustíveis alternativos em diferentes percentuais. Eles também projetam porcentagens crescentes de biodiesel adicionados ao diesel. No modelo, essas projeções são incorporadas por uma curva em forma de S que representa a relação entre a participação do combustível e o nível de implementação da política simulando um aprendizado ao longo do tempo. Para trens e barcaças, foram consideradas iniciativas independentes anunciadas por algumas concessionárias para simular um cenário em que todos os modos estão mudando para uma proposta mais sustentável. Com a frota total e o compartilhamento de tecnologia da frota, o próximo submodelo simula o consumo de energia e as emissões do setor de transporte de cargas.

## Consumo energético e emissões

O último submodelo simula o consumo de cada tipo de combustível/energia e emissões, utilizando os resultados dos submodelos referentes à atividade de transporte de carga por modo e o percentual da tecnologia de cada veículo na frota. Assumiu-se que a quantidade de atividade de transporte realizada por cada tecnologia de veículo será proporcional à participação de mercado de sua frota. O consumo de energia é dado pela atividade de transporte realizada com cada tipo de combustível e sua eficiência.

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

As emissões são dadas pelo consumo de combustível/energia e o respectivo fator de emissão de CO<sub>2</sub>. Os dados relativos à eficiência e fatores de emissão para cada tipo de veículo e energia de propulsão estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Eficiência e emissão de CO<sub>2</sub>

	Energia de propulsão	Eficiência Energética	Fonte	Emissões de CO <sub>2</sub>	Fonte
Caminhões	Diesel	0.0577 l/tkm	MME <i>et al.</i> (2020)	2.697 kg/l	GHG Protocol (2021)
	Biodiesel	0.0577 l/tkm	MME <i>et al.</i> (2020)	2.431 kg/l	MMA (2014)
	GNV	0.0629 m <sup>3</sup> /tkm	MME <i>et al.</i> (2020)	2.101 kg/m <sup>3</sup>	Ferreira (2022)
	Biometano	0.0629 m <sup>3</sup> /tkm	MME <i>et al.</i> (2020)	0.24 kg/m <sup>3</sup>	Ferreira (2022)
	Eletricidade	1.35 kWh/tkm	Mercedes-Benz (2022); Volvo (2022)	0	-
	Hidrogenio	0.10 kg/tkm	Hyzon (2022)	0	-
Trens	Diesel	0.0047 l/tkm	EPL and IEMA (2021)	2.697 kg/l	GHG Protocol (2021)
	Eletricidade	53.1 Wh/tkm	Ćwil <i>et al.</i> (2021)	0	-
Embarcações	Diesel	0.0038 l/tkm	EPL and IEMA (2021);	2.697 kg/l	GHG Protocol (2021)
	Eletricidade	28 Wh/tkm	Bazaluk <i>et al.</i> (2021)	0	-

As emissões totais do transporte de carga simuladas foram comparadas com os limites estimados para o setor. Dada a ausência de uma meta oficial para reduzir as emissões do setor de transporte de carga brasileiro, foi estimada uma cota com base na porcentagem de emissões do transporte de cargas brasileiro nas emissões globais de CO<sub>2</sub> e os limites de emissão de CO<sub>2</sub> para conter o aquecimento global a 1,5°C ou 2°C até 2050. Os dados estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes de desempenho veicular

Variável	Dado	Fonte
Emissões globais de CO <sub>2</sub> em 2020	34,81 x 10 <sup>9</sup> t	Statista (2022)
Emissões do transporte de carga brasileiro 2020	79,7 x 10 <sup>6</sup> t	EPE (2022); EPL e IEMA (2021)
Limite de CO <sub>2</sub> 1,5°C	400 x 10 <sup>9</sup> t	IPCC (2021)
Limite de CO <sub>2</sub> 2°C	1150 x 10 <sup>9</sup> t	IPCC (2021)

## Teste do modelo e análise de sensibilidade

Os testes mais apropriados para modelos quantitativos SD, a saber: adequação de fronteiras do sistema, avaliação de estrutura, consistência dimensional, erro de integração, condições extremas e reprodução de comportamento; foram realizados de acordo com Sterman (2000). Após alguns ajustes, o modelo teve o desempenho esperado e foi considerado adequado para simulação. Uma análise de sensibilidade considerando

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

parâmetros incertos também foi realizada para avaliar o nível de confiança em relação à representação da realidade pelo modelo. A variação anual da atividade de transporte de carga, a quantidade de serviço de transporte e a variação de todos os fatores de eficiência energética, consideraram os valores mínimos e máximos da literatura. Para os fatores de emissão de CO<sub>2</sub>, o valor médio variando em torno de  $\pm 10\%$  foi utilizado como intervalo de incerteza. O teste de sensibilidade foi realizado com o método *Latin Hypercube Sampling* com 200 simulações e as incertezas nos parâmetros são descritas como uniformemente distribuídas (Kwakkel e Pruyt, 2013). Os limites inferior e superior da incerteza das emissões totais de carga variaram de 2,47 bilhões a 27,33 bilhões de toneladas em 2050. Essas significativas variações podem ser explicadas pela incidência de múltiplos parâmetros incertos. A incerteza é baixa na primeira década e tende a aumentar nas duas últimas décadas, como consequência do acúmulo de estoques no longo prazo. Apesar da incerteza numérica, o padrão de comportamento é mantido ao longo do tempo.

## Cenários propostos e resultado da simulação

Os cenários são baseados nas políticas voltadas para (i) modos alternativos; (ii) combustíveis alternativos; (iii) aumento do percentual de biodiesel na mistura ao diesel; e (iv) agilizar a renovação da frota. Cada política tem uma configuração definida quanto aos seus objetivos e prazos de implementação. Com relação às políticas voltadas para modos alternativos, foram considerados três configurações diferentes de compartilhamento entre os modos em 2035, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Divisão modal inicial e projeções para 2035 (%)

Modos	2020	Setup 1	Setup 2	Setup 3
Rodoviário	63.3	55	40	32
Ferroviário	21.7	31	43	47
Aquaviário	14.9	13	16	19

Fonte: EPE (2022); Ministério da Infraestrutura e EPL (2021).

Com relação às políticas de combustíveis alternativos, na Tabela 4 mostra-se dois conjuntos de configuração (Setups 1 e 2) sobre o percentual de uso de cada fonte de energia por caminhões em 2035. Para ferrovias e hidrovias, foram consideradas iniciativas independentes anunciadas por algumas concessionárias a serem atendidas em 2050. Embora existam estudos de uso de outros combustíveis para esses modos, os mesmos não foram considerados.

Para todos os modos, a Configuração 3 foi adicionada para avaliar o impacto de uma política mais restrita no longo prazo (2050). Para as políticas de aumento do percentual de biodiesel na mistura de diesel, na Tabela 5, apresenta-se duas configurações para 2035. Por fim, a política de aceleração da renovação da frota foi proposta para avaliar o impacto da aceleração do índice de sucateamento da frota de caminhões antigos. Neste caso, a única decisão é a aplicação de tal política, quando e com qual duração.

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

Tabela 4 - Participação combustíveis 2035 (rodoviário) e 2050 (ferroviário e hidroviário) (%)

Modos	Combustível	2020	Setup 1	Setup 2	Setup 3
Rodoviário	Diesel/biodiesel	100	86	68	0
	Gás Natural/biometano	0	7	10	50
	Eletricidade	0	7	15	40
	Hidrogênio	0	0	7	10
Ferroviário e Aquaviário	Diesel	100	100	50	0
	Eletricidade	0	0	50	100

Fonte: baseado em BCG e ANFAVEA (2021); VLI (2022); Rumo (2022); Vale (2022).

Tabela 5 - Percentual de biodiesel adicionado ao diesel e projeções para 2035

Combustível	2020	Setup 1	Setup 2
Diesel	88	82	70
Biodiesel	12	18	30

Fonte: baseado em BCG e ANFAVEA (2021).

A partir de um cenário considerado *Business-as-Usual* (BAU), os cenários ‘Políticas individuais’, compostos pelos Cenários 1 a 8, visam avaliar o impacto de cada configuração de políticas para modos alternativos, combustíveis alternativos e aumento do percentual de biodiesel nas misturas de diesel. Os cenários ‘Modos e combustíveis’, compostos pelos Cenários 9 a 17, visam avaliar o impacto de todas as combinações possíveis entre as políticas voltadas para modos alternativos e combustíveis alternativos. Os cenários ‘Renovação da Frota’, compostos pelos Cenários 18 a 26, consideraram três dos cenários anteriores (Cenários 9, 13 e 17). Para cada uma delas, variou-se o prazo da política de aceleração da renovação da frota em que a meta deve ser cumprida: 2025, 2030 ou 2035. Finalmente, dada a incerteza do prazo em que as políticas serão implantadas, nos cenários ‘Prazos flexíveis’, compostos pelos Cenários 27 a 32, também foram simulados dois limites de tempo diferentes (2025 e 2050) para políticas voltadas para modos alternativos e combustíveis alternativos.

## Cenário BAU

No cenário BAU, a frota total de caminhões passaria de quase 2 milhões em 2020 para mais de 5,5 milhões em 2050. As vendas de caminhões oscilarão entre 250 e 570 mil unidades por ano para repor os veículos sucateados e atender a demanda crescente. Porém, neste cenário, o diesel é o único combustível utilizado para todos os modos de transporte de cargas (considerando 12% de biodiesel na mistura). O consumo de diesel quase triplicaria em 20 anos, sendo que o transporte rodoviário seria responsável por 95% desse consumo. Isso reflete nas emissões de CO<sub>2</sub> de cada modo, conforme mostra-se na Figura 3. A maior parte das emissões viria dos caminhões, atingindo um acúmulo de aproximadamente 9 bilhões de toneladas em 2050.

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

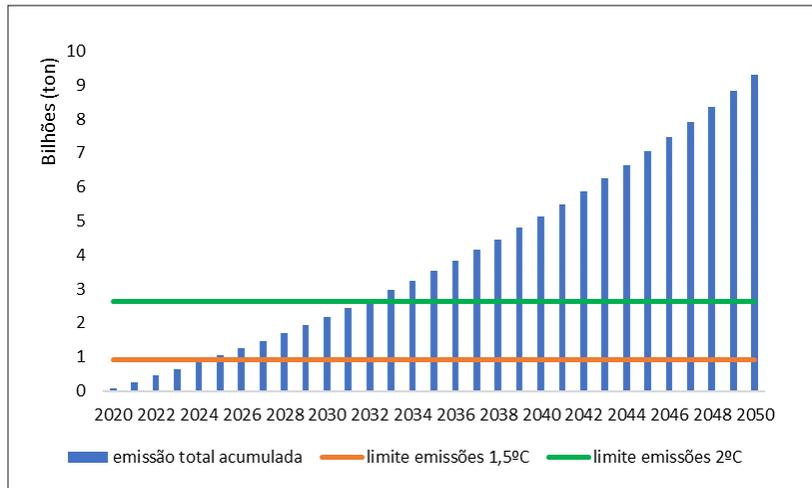


Figura 3. Emissões totais de CO<sub>2</sub> e limites do transporte de cargas no cenário BAU.

## Políticas individuais

Primeiramente, foi avaliado o impacto individual de cada uma das diferentes configurações de políticas sobre as emissões pelo transporte de cargas, no que diz respeito ao uso de modos de transporte alternativos, ao uso de combustíveis alternativos e ao aumento do percentual de biodiesel na mistura de diesel. Na Figura 4 apresenta-se os resultados dos seis primeiros cenários em comparação com o cenário BAU. As políticas para diminuir a participação do modo rodoviário têm um impacto maior do que as políticas relativas aos combustíveis alternativos. A longo prazo, no entanto, o Cenário 6 seria o melhor em termos de redução das emissões de CO<sub>2</sub>, pois pretende banir as vendas de veículos a diesel a partir de 2050. Em relação às políticas para aumentar a porcentagem de biodiesel na mistura de diesel, os resultados mostram que essas políticas não têm um impacto significativo nas emissões rodoviárias em comparação com o cenário BAU.

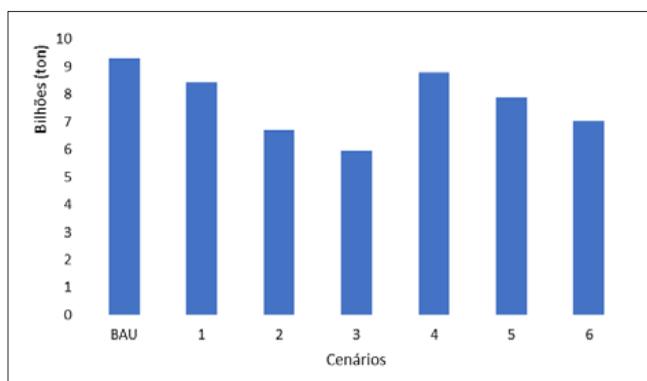


Figura 4. Acúmulo das emissões de CO<sub>2</sub> em 2050 (Cenários 1 a 6).

## Modos e combustíveis

No segundo conjunto de cenários, as políticas para modos alternativos e combustíveis alternativos foram combinadas. Na Figura 5 mostra-se os resultados das emissões totais do transporte de cargas em comparação com o cenário BAU. Os cenários que

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

visam banir a venda de veículos movidos a diesel até 2050 (Cenários 11, 14 e 17) apresentam melhores resultados no longo prazo em comparação com os demais cenários. As emissões totais podem diminuir em até 50% no melhor caso (Cenário 17), em que as políticas visam uma redução drástica no uso do transporte rodoviário, além de zerar as vendas de veículos movidos a diesel até 2050.

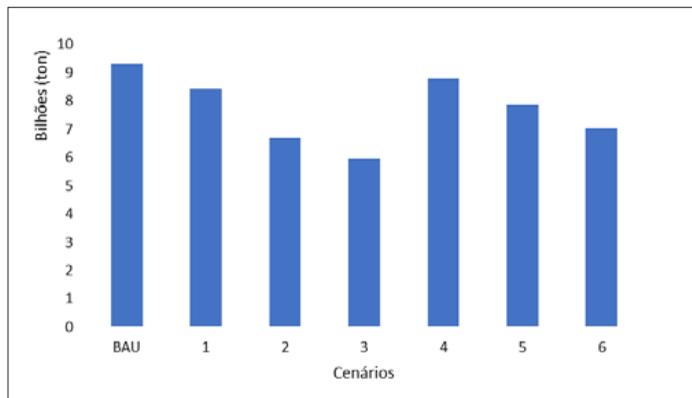


Figura 5. Acúmulo das emissões de CO<sub>2</sub> em 2050 (Cenários 9 a 17).

## Renovação da frota

Considerando os resultados anteriores, escolheu-se três cenários diversos para analisar: Cenários 9; 13; e 17, pois apresentam diferenças significativas na divisão entre rodovias e no percentual de vendas de caminhões movidos a diesel. Para cada um dos três cenários, adicionou-se as políticas para acelerar a renovação da frota com três diferentes prazos em que a meta deve ser cumprida: 2025, 2030 ou 2035, resultando em nove cenários (Cenários 18-26). Os resultados sugeriram que não há diferença significativa na redução das emissões de CO<sub>2</sub> dentre os cenários com prazos diferentes para implementação dessa política específica. Na Figura 6 mostra-se as emissões de CO<sub>2</sub> dos Cenários 20, 23 e 26, nos quais o sucateamento da frota é acionado por políticas, em comparação aos Cenários 9, 13 e 17, nos quais não há esse incentivo para acelerar a renovação da frota. Os cenários em que há aceleração do sucateamento de caminhões apresentam uma leve redução nas emissões.

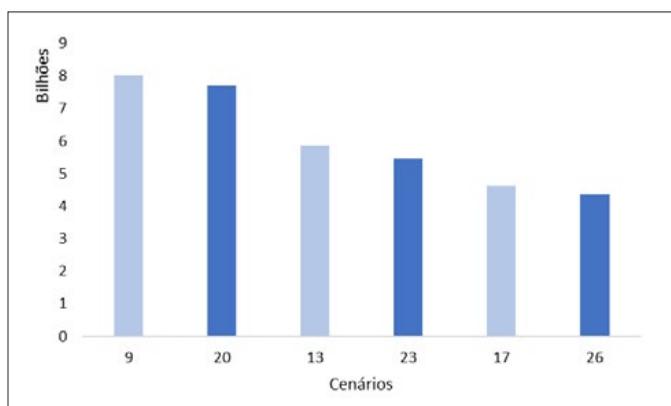


Figura 6. Emissões acumuladas de CO<sub>2</sub> em 2050 com ou sem políticas para acelerar o processo de renovação da frota.

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

## Prazos flexíveis para implantação das políticas

No último conjunto de cenários, os Cenários 9, 13 e 17 foram simulados com diferentes prazos para implementação de políticas relacionadas a modos e combustíveis alternativos. Os prazos simulados para que as metas das políticas sejam atingidas são 2025, 2035 e 2050. Na Figura 7 apresenta-se o percentual de abatimento das emissões em cada caso individualmente. Ao combinar políticas para modos alternativos e combustíveis no Cenário 9 (barras azuis claras), a queda acumulada de emissões variaria entre 10% e 18%, dependendo do prazo das políticas. No Cenário 13 (barras azuis médias), essa variação está entre 27% e 46%, e no Cenário 17 (barras azuis escuras) está entre 38% e 71%. Tais resultados mostram a magnitude do desafio, pois mesmo com a implementação de metas ambiciosas relacionadas à mudança no uso dos modos de transporte e combustíveis no curtíssimo prazo, estas ações isoladamente não se mostram suficientes para manter as emissões do transporte de cargas dentro dos limites até 2050.

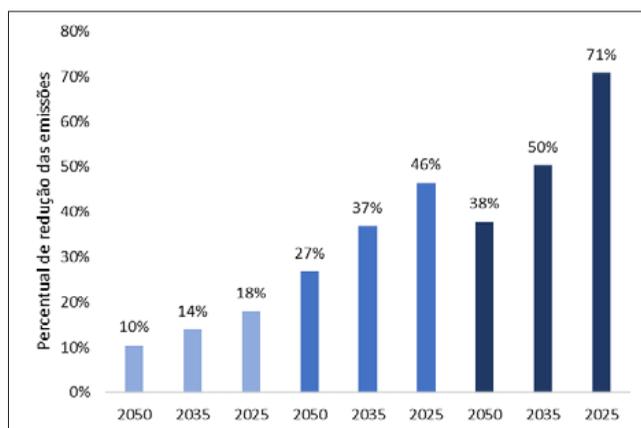


Figura 7. Percentual de redução de emissões variando o prazo de implementação de políticas sobre modos e combustíveis alternativos.

## Discussão

Com base nos resultados dos Cenários ‘Políticas individuais’, fica evidente que são necessários incentivos políticos no país para obter um maior resultado de descarbonização. Quando comparadas com o cenário BAU, todas as políticas acabam tendo uma taxa menor de emissões totais geradas no sistema de transporte de cargas. Todos os cenários apresentam pouca diferença entre si no curto e médio prazo e só começam a apresentar diferenças maiores a partir de 2030. Em outras palavras, a formulação de políticas míopes pode prejudicar os benefícios das políticas a longo prazo se houver atrasos na implementação. Nos Cenários ‘Modos e combustíveis’, dependendo da combinação de políticas, os resultados sugeriram menores emissões do sistema de transporte de cargas do que quando as políticas foram implementadas separadamente. O melhor cenário (Cenário 17) alcançou uma redução de 50% nas emissões em comparação com o cenário BAU. Em seguida, os Cenários ‘Renovação da Frota’ mostraram que a aceleração do sucateamento de caminhões modifica a participação de mercado entre os veículos movidos por diferentes fontes de energia e reduz levemente as emissões. Em

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

todos os casos, quanto mais rápidas as políticas forem implementadas, mais significativas serão as melhorias em termos de queda de emissões. Naturalmente, isso significa um esforço consideravelmente audacioso para implementar e alcançar metas no curto prazo, incluindo mudanças radicais nos sistemas de energia, tecnologia e infraestrutura.

A implementação conjunta das políticas traz maiores benefícios em menor tempo e torna-se importante para equilibrar o efeito do aumento da demanda por transporte de carga nos próximos anos. O esforço individual não é suficiente nem capaz de alcançar os objetivos necessários. É necessária a colaboração de diversos setores para que a mudança no sistema ocorra em larga escala e, conseqüentemente, os resultados da descarbonização possam ser potencializados e alcançados nos prazos desejados.

Dada a ausência de uma meta de redução de emissões do setor de transporte de cargas brasileiro, este estudo estimou um limite com base no percentual de emissões de cargas brasileiras e nos orçamentos de emissões de CO<sub>2</sub> para limitar o aquecimento global a 1,5°C ou 2°C até 2050. O percentual de emissões de cargas brasileiras é calculado com base nos dados de emissões do setor em 2020 em relação às emissões globais de CO<sub>2</sub> no mesmo ano. Esta estimativa foi uma forma encontrada para avaliar os resultados das políticas implantadas devido à ausência de metas oficiais para o setor. Entretanto, esta proposta é muito superficial e deve ser analisada com cautela. Primeiro, a estimativa é baseada na porcentagem de emissões do setor em 2020 em comparação com as emissões globais, o que deve mudar nos próximos anos. Em segundo lugar, essa porcentagem de emissões não deve necessariamente garantir ou impor a mesma porcentagem do orçamento global para futuras emissões de frete. É preciso considerar um equilíbrio mais justo entre os países que historicamente se desenvolveram e poluíram mais e os países que ainda estão em desenvolvimento e que tendem a sofrer mais com as conseqüências do aquecimento global. Entretanto, a proposta de uma meta específica para redução das emissões setoriais do transporte de cargas brasileiro foge ao escopo deste trabalho, sendo sugerida como tema para pesquisas futuras. Apesar dessa limitação para analisar os orçamentos de emissões do setor de cargas brasileiro, que não devem ser tão restritos quanto os de países desenvolvidos, os resultados corroboram a urgência de ações mais contundentes para promover a descarbonização.

Em todos os cenários, o orçamento do setor para limitar o aquecimento global a 1,5°C seria atingido em 2025, enquanto o orçamento para limitar o aquecimento global a 2°C seria atingido em 2032. Tais resultados indicam que limitar o aquecimento global a 1,5°C ou 2°C até 2100, conforme definido no Acordo de Paris, está fora de alcance. Apesar de ser uma análise unissetorial limitada, os resultados mostram o quão próximos estamos de atingir os limites definidos para o aquecimento global. De fato, os resultados demonstram que não temos mais tempo para protelar as ações necessárias e poupar esforços para enfrentar um desafio tão grande com o engajamento sério e colaborativo das partes interessadas.

A partir dos resultados apresentados, fica claro que as medidas consideradas não serão suficientes para manter as emissões de carga dentro dos orçamentos de emissões atribuídos ao setor. Isso aponta para a urgência de cooperação coordenada e ampla participação do governo e de outras partes interessadas, capazes de sustentar, incentivar e viabilizar políticas inovadoras que tragam resultados convincentes para a descarbonização do transporte de cargas no Brasil. Todas as políticas apresentadas

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

são importantes em maior ou menor grau no caminho para a descarbonização. Os formuladores de políticas precisam estar cientes das relações aqui apontadas para tomar decisões alinhadas com suas metas e prazos de emissões específicos. A implementação conjunta de políticas traz maiores benefícios em menor tempo e se torna importante devido aos esforços conjuntos para equilibrar o efeito do aumento da demanda por transporte de cargas nos próximos anos. Entretanto, elas precisam ser rapidamente e eficientemente implantadas para trazer o benefício de realmente contribuir para a mitigação do impacto no aumento da temperatura global.

Vale destacar também que o limite estimado para as emissões do setor deve ser analisado com cautela. É preciso considerar um equilíbrio mais justo entre países e setores. Apesar dessa limitação, os resultados corroboram a urgência de ações mais contundentes para promover a descarbonização do transporte de cargas. Neste sentido, este estudo posiciona o país no atual cenário global de esforços de mitigação do aquecimento global, indicando como as políticas hoje em vigor e incluídas na simulação, podem contribuir e qual o seu impacto. Importante destacar que outras medidas de eletrificação da frota adotadas em outros países não tem a mesma força e resultados no Brasil, o que torna interessante a análise regionalizada de distintas iniciativas. Este estudo, entretanto, carece de atualizações constantes para reavaliação do impacto de novas medidas governamentais e internacionais adotadas, dada a velocidade de mudanças que estão surgindo com intuito de combater o aumento das emissões pelo setor.

## Considerações finais

A simulação realizada evidenciou que a queda mais acentuada nas emissões do transporte de cargas vem de cenários que simulam uma redução significativa no uso de rodovias, além de zerar o uso de diesel nos três modos de transporte. Mais importante, os resultados mostram que o limite do setor para conter o aquecimento global a 1,5°C seria alcançado em 2025, independentemente do cenário, pois o sistema não tem tempo suficiente para a implementação de políticas que atendam à urgência desta situação por meio das ações consideradas. Por outro lado, o limite para conter o aquecimento global a 2°C seria alcançado em 2032, 2035 ou 2049, dependendo do conjunto de políticas e seus prazos de implementação. Tais resultados indicam que limitar o aquecimento global a 1,5°C ou 2°C até 2100, conforme definido no Acordo de Paris, não é possível por meio somente das ações avaliadas neste artigo.

Os resultados da simulação mostraram que nenhuma medida isolada pode trazer uma redução significativa nas emissões do transporte de mercadorias. Em vez disso, é necessário um conjunto de políticas para alcançar um resultado convincente de descarbonização. Além disso, quanto mais cedo as políticas forem aplicadas, melhor será a redução das emissões a longo prazo. Os atrasos na implementação das políticas pode prejudicar os seus benefícios a longo prazo.

Este estudo evidencia a necessidade de cooperação coordenada e ampla participação do governo e demais stakeholders capazes de sustentar, incentivar e viabilizar cenários inovadores que tragam resultados convincentes para a descarbonização do transporte de cargas no Brasil. Todas as políticas apresentadas são importantes, em maior ou menor grau, no caminho da descarbonização. Naturalmente, algumas políticas são mais

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

fáceis e rápidas de implementar do que outras (aumentar a percentagem de biodiesel na mistura de diesel e acelerar o processo de renovação da frota exige menos esforço e investimentos do que alterar as tecnologias da frota e a divisão modal).

Certamente, diversas condições económicas, sociais e tecnológicas são desconhecidas no longo prazo e, portanto, este exercício de simulação deve ser encarado com cautela. Em vez de oferecer uma previsão precisa da redução de emissões, a sua essência é oferecer uma perspectiva da necessidade de reforçar as políticas nos próximos anos e décadas se quisermos descarbonizar o sistema de transporte de mercadorias. Vale ressaltar também que o limite estimado para as emissões do setor, sugerido neste trabalho devido à ausência de metas oficiais, deve ser analisado com cautela. A estimativa baseiou-se na percentagem de emissões do setor em 2020 em comparação com as emissões globais, que deverá mudar ao longo dos próximos anos. Além disso, esta percentagem de emissões não deve necessariamente garantir ou impor a mesma percentagem do orçamento global para futuras emissões de mercadorias. É necessário considerar um equilíbrio mais justo entre os países que historicamente se desenvolveram e poluíram mais e os países que ainda estão em desenvolvimento e que tendem a sofrer mais com as consequências do aquecimento global. Sugere-se que pesquisas futuras aprofundem esta discussão, considerando as constantes negociações e acordos entre países. Apesar dessa ressalva, os resultados mostram o quão perto estamos de atingir os limites definidos para o aquecimento global. Na verdade, os resultados mostram que não há mais tempo para protelar as ações necessárias e poupar esforços para enfrentar tão grande desafio com o engajamento sério e colaborativo dos envolvidos.

Academicamente, o modelo contribui ao fornecer um modelo de simulação com múltiplas medidas de política de descarbonização do frete em uma perspectiva sistêmica e aprofundar o conhecimento sobre os fatores temporais que governam a dinâmica das respostas do sistema à implementação de políticas, até mesmo por destacando os dados reais ou as suposições inevitáveis em um modelo claro e reproduzível. Do ponto de vista do governo, a simulação do modelo evidencia o potencial de resultados de mitigação de emissões considerando o efeito combinado de múltiplas políticas de descarbonização. Deve ser dada prioridade a políticas de promoção de combustíveis alternativos, uma vez que são o único caminho para a descarbonização profunda do transporte de cargas. Outras medidas, porém, também são importantes para mitigar as emissões nesse ínterim, visto que a substituição total da frota leva um tempo considerável para ser implementada.

## Agradecimentos

*Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (bolsa 001 e e processo 312382/2021-9) e Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ (bolsa E-26/201.225/2021).*

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

## Referências bibliográficas

- » Abbas, K. A., & Bell, M. G. (1994). System dynamics applicability to transportation modeling. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 28(5), 373-390.
- » Bazaluk, O., Havrysh, V., & Nitsenko, V. (2021). Energy Efficiency of Inland Waterways Transport for Agriculture: The Ukraine Case Study. *Applied Sciences*, 11(19), 8937.
- » BCG e ANFAVEA (2021). *O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil*.
- » BNDES (2014). Transporte sobre trilhos no Brasil: uma perspectiva do material rodante. *BNDES Setorial* (235-282), v. 40.
- » CNT (2021). *Anuário CNT do Transporte: estatísticas consolidadas*.
- » Coyle, R. G. (1997). System dynamics modelling: a practical approach. *Journal of the Operational Research Society*, 48(5), 544-544.
- » Ćwil, M., Bartnik, W., & Jarzębowski, S. (2021). Railway vehicle energy efficiency as a key factor in creating sustainable transportation systems. *Energies*, 14(16), 5211.
- » EPL e IEMA (2021). Metodologia EPL-IEMA para emissões de GEE e poluentes locais. *Acordo de Cooperação Técnica – EPL e IEMA*.
- » EPE (2022). *Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2031 - Demanda Energética do Setor de Transportes*.
- » Ferrari, P. (2014). The dynamics of modal split for freight transport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 70, 163-176.
- » Ferreira, C. (2022) Pioneirismo no uso de GNV e biogás como boa prática de sustentabilidade em logística. In: D'Agosto, M. A. e L. G. Marujo (Ed.), *Guia de excelência em sustentabilidade: boas práticas para logística e transporte de carga*. 2. ed. Rio de Janeiro: IBTS.
- » Gatta, V., Marcucci, E., Le Pira, M., Inturri, G., Ignaccolo, M., & Pluchino, A. (2020). E-groceries and urban freight: Investigating purchasing habits, peer influence and behaviour change via a discrete choice/agent-based modelling approach. *Transportation Research Procedia*, 46, 133-140.
- » Ghisolfi, V., Tavasszy, L. A., Correia, G. H. D. A., Chaves, G. D. L. D., & Ribeiro, G. M. (2022a). Freight transport decarbonization: A systematic literature review of system dynamics models. *Sustainability*, 14(6), 3625.
- » Ghisolfi, V., Tavasszy, L. A., Rodriguez Correia, G. H. D. A., Diniz Chaves, G. D. L., & Ribeiro, G. M. (2022b). Dynamics of freight transport decarbonisation: a conceptual model. *Journal of Simulation*, 1-19.
- » Greenhouse Gas Protocol. (2021). *The GHG emissions calculation tool*. <https://ghgprotocol.org/ghg-emissions-calculation-tool>
- » Green, K., Chien, D., & Yahoodik, J. (2004). *Stock modeling for railroad locomotives and marine vessels* (No. DOT-VNTSC-RSPA-04-10). United States. Dept. of Transportation. Research and Special Programs Administration.

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

- » Held, M., Stolz, B., Hoffmann, J., Georges, G., Bolla, M., & Boulouchos, K. (2021, April). Scrapping Probabilities and Committed CO2 Emissions of the International Ship Fleet. In *SNAME International Symposium on Ship Operations, Management and Economics* (p. D021S003R001). SNAME.
- » Holguín-Veras, J., Kalahasthi, L., Campbell, S., Gonzalez-Calderon, C. A., & Wang, X. C. (2021). Freight mode choice: Results from a nationwide qualitative and quantitative research effort. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 143, 78-120.
- » Hyzon. (s.d.). *Hydrogen-powered fuel cell electric vehicles – on the road today*. <https://www.hyzonmotors.com/vehicles>
- » IEA – International Energy Agency. (2022). *Improving the sustainability of passenger and freight transport*. IEA. <https://www.iea.org/reports/improving-the-sustainability-of-passenger-and-freight-transport>
- » ITF (2015). *The Carbon Footprint of Global Trade - Tackling Emissions from International Freight Transport*. OECD/ITF.
- » Kwakkel, J. H., & Pruyt, E. (2015). Using system dynamics for grand challenges: the ESDMA approach. *Systems Research and Behavioral Science*, 32(3), 358-375.
- » Lepitzki, J., & Axsen, J. (2018). The role of a low carbon fuel standard in achieving long-term GHG reduction targets. *Energy Policy*, 119, 423-440.
- » Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Zhou, B. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1>
- » Mercedes-Benz. The EACTROS and its services. [https://www.mercedes-benz-trucks.com/en\\_GB/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html](https://www.mercedes-benz-trucks.com/en_GB/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html)
- » Ministério da Infraestrutura e EPL (2021). *Plano Nacional de Logística – PNL 2035*.
- » MMA (2014). Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. 2013 ano base 2012. *MMA: Relatório final*, 115.
- » MME; EPE e IEA (2020). *Transporte Rodoviário Cargas Brasil 2021 Benchmarking Internacional*.
- » Reis, V. (2019). A disaggregated freight transport market model based on agents and fuzzy logic. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*.
- » Rumo (2022). *Sustentabilidade*. <https://rumolog.com/sustentabilidade/>
- » Schröder, S., & Liedtke, G. T. (2017). Towards an integrated multi-agent urban transport model of passenger and freight. *Research in Transportation Economics*, 64, 3-12.
- » Shepherd, S. P. (2014). A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 2(2), 83-105.
- » SINDIPEÇAS e ABIPEÇAS (2022). *Relatório da frota circulante. Sistema Sindipeças*, 14.
- » Statista. Annual CO2 emissions worldwide from 1940 to 2020. <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>
- » Sterman, J (2000). *Business dynamics: System thinking and modelling for a complex world*. New York: McGraw-Hill.
- » Tavasszy, L. A. (2020). Predicting the effects of logistics innovations on freight

Simulação de estratégias para descarbonização do transporte...  
V. GHISOLFI, G. DE LORENA DINIZ CHAVES Y G. MATTOS RIBEIRO

systems: Directions for research. *Transport Policy*, 86, A1-A6.

- » Vale Sustentabilidade. <http://www.vale.com/brasil/PT/sustainability/Paginas/carb-ono-neutro.aspx>
- » VLI Ambiental: Compromissos e Programas ambientais. <https://www.vli-logistica.com.br/esg/ambiental/>
- » Volvo. The Volvo VNR Electric. <https://www.volvotrucks.us/trucks/vnr-electric/>

**Veronica Ghisolfi / veronicaghisolfi@gmail.com**

Doutora em Engenharia de Transportes pela COPPE/UFRJ (bolsista CNPq) com doutorado-sanduíche (seis meses) pelo Programa Institucional de Internacionalização (PRINT) financiada pela CAPES na Universidade Técnica de Delft (Holanda). Graduada em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Espírito Santo (2016), foi bolsista do Programa Ciência sem Fronteiras do CNPq (um ano) na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal. Possui Mestrado em Engenharia de Transportes pela COPPE/UFRJ (2018). Possui interesse pelos temas logística e transporte de cargas, simulação e dinâmica de sistemas.

**Gisele de Lorena Diniz Chaves / gisele.chaves@ufsc.br**

Professora Associada do Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas - DEPS da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Pesquisadora do CNPq nível 2 desde 2016. Realizou seu pós-doutorado no Department of Environment and Civil Engineering da University of Central Flórida com financiamento FULBRIGHT. Possui doutorado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de São Carlos, com estágio sanduíche (um ano) no CRET-LOG, Grupo de Pesquisa em Logística da Université de la Méditerranée (Aix-Marseille II) na França, ambos com apoio CAPES. Membro permanente do corpo docente do curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFSC desde 2022. Membro permanente do corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental desde 2022. Membro permanente do corpo docente do curso de Pós-graduação em Energia da UFES de 2011 a 2022. Atuou como docente na UFES por mais de 12 anos. Experiência nos seguintes temas: logística reversa, transportes, logística e gerenciamento de resíduos sólidos.

**Glaidston Mattos Ribeiro / glaidston@pet.coppe.ufrj.br**

Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo (1999), Mestrado em Engenharia de Transportes pelo Instituto Militar de Engenharia (2002) e Doutorado em Computação Aplicada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2007). Possui Pós-Doutorado pela HEC-Montréal/Universidade de Montréal (2011) e atualmente é professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ com experiência nas áreas de Transportes, Logística e Pesquisa Operacional (ênfase em Otimização Combinatória).