

## UMA FERRAMENTA PARA PLANEJAMENTO DA DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE CARGAS BRASILEIRO

**Verônica Ghisolfi**

**Glaydston Mattos Ribeiro**

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

**Gisele de Lorena Diniz Chaves**

Departamento de Engenharias e Tecnologia – DETEC  
Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

### RESUMO

A descarbonização do setor de transportes é fundamental frente aos desafios sobre a mudança do clima. Muitos estudos têm focado em estratégias, políticas e tecnologias para o transporte urbano e poucos abordam o transporte de cargas. Nesse sentido, o objetivo desse trabalho é estruturar um modelo do conjunto de infraestrutura logística nacional, para determinar a melhor combinação de estratégias de descarbonização do transporte de cargas brasileiro. O método utilizado será a Dinâmica de Sistemas, incluindo a elaboração de diagramas de causa e efeito e diagramas de estoque e fluxo, a partir do qual será realizado o equacionamento para posterior simulação computacional e avaliação de cenários. Como resultado, o modelo será relevante para auxiliar na tomada de decisões estratégicas sobre a descarbonização logística no país, tendo em vista a promoção do bem-estar econômico, social e ambiental para um futuro mais sustentável da nação.

### 1. INTRODUÇÃO

A mudança climática é um dos principais desafios a serem enfrentados pela comunidade internacional. Assim, os países estabeleceram o regime de mudança do clima, que tem como principais fundamentos a Convenção-Quadro das Nações Unidas, o Protocolo de Quioto e, mais recentemente, o Acordo de Paris (Ministério do Meio Ambiente, 2016).

No Brasil, foi aprovada a Contribuição Nacionalmente Determinada, na qual o país se compromete a reduzir as emissões de gases de efeito estufa - GEE, aumentar a participação de bioenergia sustentável e energias renováveis na sua matriz energética, entre outras medidas (Brasil, 2016). Por outro lado, o país continua dependente de fontes não-renováveis de energia, principalmente petróleo e seus derivados, sendo o setor de transportes responsável pelo consumo de cerca de 70% em 2017 (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2018).

Dessa forma, evidencia-se a importância de políticas mitigatórias de emissões no setor de transportes. Entretanto, algumas propostas de transferência modal, por exemplo, são fortemente distorcidas para o transporte de passageiros (Huizenga *et al.*, 2017). De fato, ainda há poucos estudos sistemáticos de opções de descarbonização do transporte de carga (IPCC, 2014) e pouco esforço político para mitigar as emissões de GEE desse setor (Creutzig *et al.*, 2015). Por exemplo, apenas quatro países, os Estados Unidos da América (EUA), Canadá, China e Japão, regulam a economia de combustível dos veículos pesados (Kaack *et al.*, 2018).

A profunda descarbonização do setor só pode ser alcançada combinando transferência modal com outras estratégias (Kaack *et al.*, 2018). Para o transporte rodoviário, Mckinnon (2016) apresentou cinco estratégias de descarbonização: (1) reduzir a demanda por transporte; (2) otimizar o carregamento do veículo; (3) aumentar a eficiência dos veículos; (4) redução do teor de carbono do combustível; e (5) mudança para modos de baixa intensidade de carbono.

No Brasil, o Plano Nacional de Logística e Transporte (PNLT) visa à recomposição da matriz de transportes, com a remodelagem de ferrovias e hidrovias, cuja consequência seria o

abatimento de 65,56 mt CO<sub>2</sub> (Ministério dos Transportes, 2011). A mudança do sistema de transporte de carga brasileiro, que atualmente utiliza majoritariamente o modo rodoviário, para o uso de uma combinação adequada de diferentes estratégias de descarbonização logística, poderia causar impactos significativos sobre a redução do consumo energético e emissões de GEE, bem como sobre a redução de custos operacionais, entre outros.

Portanto, tem-se o seguinte problema de pesquisa: qual a melhor combinação de estratégias para a descarbonização do transporte de cargas nacional? A dimensão continental do país impõe desafios na execução de um projeto de infraestrutura logística integrada entre modos de transporte ambientalmente eficientes, além da complexidade e acentuada concorrência do mercado globalizado e a constante evolução tecnológica, o que imprime a necessidade de um ritmo dinâmico a toda a cadeia logística e seus processos de tomada de decisões, sendo necessário que os gestores envolvidos tenham uma visão sistêmica do empreendimento.

Sendo assim, este trabalho busca estruturar um modelo de simulação em Dinâmica de Sistemas (DS), abordando o conjunto de infraestrutura logística nacional, o qual está inserido em um meio dinâmico, sobre o qual interfere e do qual sofre impactos significativos. O objetivo do modelo é determinar a melhor combinação de estratégias de descarbonização do transporte de cargas brasileiro, de modo a reduzir as emissões de GEE pelo setor.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Existem diferentes abordagens metodológicas para avaliar o desempenho energético e ambiental dos setores de transporte e energia. O modelo TREMOVE (Transport and Mobility Leuven, 2007) estuda os efeitos dos instrumentos de política de transporte e meio ambiente nas emissões do setor de transportes. Outras abordagens seguem um critério de custo-eficácia e capacidade existente e são, geralmente, modelos de otimização, onde o objetivo é minimizar os custos totais do sistema global no longo prazo, mas que não consideram questões de comportamento de demanda estocástica. Alguns exemplos de tais abordagens são: MARKAL (Loulou *et al.*, 2004), TIMES\_PT (E.VALUE e CENSE, 2010) e GAINS (IIASA, 2018).

Outra abordagem metodológica para avaliar impactos ambientais no setor de transportes é a DS, por meio dos diagramas de causa e efeito e diagramas de estoque e fluxo (Serman, 2000). A DS tem sido aplicada a uma variedade de problemas da engenharia de transportes (Shepherd, 2014), inclusive na relação do setor com o consumo energético e emissões de poluentes, conforme revisão bibliográfica sistemática realizada (Ghisolfi *et al.*, 2016).

Sobre o consumo energético, diversos autores utilizaram a DS para simulação dos benefícios econômicos, sociais e ambientais de tecnologias alternativas, como veículos movidos a hidrogênio (Veziroğlu e Macário, 2014), biocombustíveis (Shafiei *et al.*, 2016), elétricos (Silva e Moura, 2016) ou a baterias de lítio (Miedema e Moll, 2013), avaliando aceitação pelo mercado consumidor, disponibilidade de infraestrutura, subsídios do governo, políticas de preços do combustível e impostos sobre emissões (BenDor 2012; Menon e Mahanty, 2015).

Outros modelos em DS avaliaram políticas de mitigação das emissões de poluentes atmosféricos no transporte urbano em cidades da Índia (Manohar *et al.*, 2014), EUA (Egilmez e Tatari, 2012), China (Liu *et al.*, 2015) e Japão (Hiasa *et al.*, 2016), como uso de transporte público e modos menos poluentes, evidenciando-se a grande quantidade de estudos com simulação de políticas ambientais voltadas para o transporte urbano de passageiros.

O modelo MARS – *Metropolitan Activity Relocation Simulator* (Pfaffenbichler *et al.*, 2010) utiliza a DS e integra uso do solo e transportes por meio de conceitos e teorias do tradicional modelo de 4 etapas, possuindo um módulo para simulação das emissões relacionadas ao setor. O MARS foi desenvolvido para aplicação em meio urbano e, apesar de necessitar de uma reformulação para o transporte regional de cargas, este foi pré-selecionado como referência para o sistema abordado nesse estudo.

### 3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Considerando que o objetivo deste trabalho é determinar a melhor combinação de estratégias de descarbonização do transporte de cargas brasileiro, de modo a reduzir as emissões de GEE pelo setor, por meio do método Dinâmica de Sistemas, apresenta-se seis etapas metodológicas a serem realizadas para o alcance do objetivo pretendido.

Na Atividade 1, será realizada a pesquisa bibliográfica para obtenção dos elementos do sistema de transporte de cargas inter-regional. A Atividade 2 envolve a elaboração do modelo conceitual com as variáveis do sistema. Na Atividade 3 será construído o diagrama de estoque e fluxo, incluindo o equacionamento e validação. A Atividade 4 envolve a aplicação do modelo ao estudo de caso referente ao sistema de transporte inter-regional de cargas. Para tanto, será realizado um levantamento dos grupos de cargas mais relevantes, disponibilidade de cada modo de transporte nas zonas de tráfego e a possibilidade de uso de cada modo para cada tipo de carga. A Atividade 5 envolve a análise dinâmica por meio da simulação dos diferentes cenários propostos. Por fim estão previstas etapas de desenvolvimento de artigos científicos para submissão em periódicos e congressos (Atividade 6).

### 4. RESULTADOS ESPERADOS

O produto principal será o modelo capaz de simular a melhor combinação de estratégias de descarbonização do transporte de cargas brasileiro, de modo a reduzir as emissões de poluentes pelo setor de acordo com as metas pré-estabelecidas. O modelo deverá ser divulgado por meio da elaboração e publicação de artigos científicos em periódicos e congressos relacionados ao tema da pesquisa, tal como em Ghisolfi *et al.* (2019). Acredita-se que o modelo será relevante para auxiliar na tomada de decisões estratégicas sobre a descarbonização logística no país, tendo em vista a promoção do bem-estar econômico, social e ambiental para um futuro mais sustentável da nação.

#### Agradecimentos

Essa pesquisa é apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processo 141376/2018-0). Esse suporte é gratamente reconhecido.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BenDor, T. K. (2012) The System Dynamics of U.S. Automobile Fuel Economy, *Sustainability*, v. 4, p. 1013–1042.
- Brasil (2016) *Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima*. Disponível em: <[http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf)>. Acesso em: 29 jun. 2019.
- Creutzig, F.; P. Jochem; O. Y. Edelenbosch; L. Mattauch; D. P. van Vuuren; D. McCollum e J. Minx (2015) Transport: a roadblock to climate change mitigation? *Science*, p. 350–911.
- Egilmez, G. e O. Tatari (2012) A dynamic modeling approach to highway sustainability: Strategies to reduce overall impact, *Transportation Research Part A*, v. 46, p. 1086–1096.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2018) *Balanço Energético Nacional 2018: Ano base 2017*. 292 p. Rio de Janeiro: EPE.
- E.VALUE e CENSE – Center for Environmental and Sustainability Research (2010) *Roadmap Portugal 2050*:

- Análise das Novas Tecnologias Energéticas Nacionais e Cenarização do Seu Impacto no Sistema Energético Nacional*. D3: Análise da Competitividade das Novas Tecnologias Energéticas. Disponível em: <[http://climate.cense.fct.unl.pt/docs/DL3\\_Report\\_6DEZ.pdf](http://climate.cense.fct.unl.pt/docs/DL3_Report_6DEZ.pdf)>. Acesso em: 28 jun. 2019.
- Ghisolfi, V.; G. M. Ribeiro; G. L. D. Chaves e W. C. Balista (2016) Dinâmica de Sistemas aplicada à Engenharia de Transportes. *Anais do XIV Congresso Rio de Transportes*, Rio de Janeiro, v. 1, p. 270–283.
- Ghisolfi, V.; G. M. Ribeiro; G. L. D. Chaves; R. D. Orrico Filho; I. C. S. Hoffmann e L. R. Perim (2019) Evaluating Impacts of Overweight in Road Freight Transportation: A Case Study in Brazil with System Dynamics, *Sustainability*, v. 11, p. 1–35.
- Hiasa, S.; M. Noori; C. Kelly e O. Tatari (2016) Dynamic techno-ecological modeling of highway systems: a case study of the Shin-Meishin Expressway in Japan, *Journal of Cleaner Production*, v. 115, p. 101-121.
- Huizenga, C.; S. General e K. Peet (2017) *Transport and climate change: how nationally determined contributions can accelerate transport decarbonization* (NDC Partnership).
- IIASA – International Institute for Applied Systems Analysis (2018) *The GAINS Model: A scientific tool to combat air pollution and climate change simultaneously*. Disponível em: <<http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/researchPrograms/air/GAINS.html>>. Acesso em: 28 jun. 2019.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Kaack, L. H.; P. Vaishnav; M. G. Morgan; I. L. Azevedo e S. Rai (2018) Decarbonizing intraregional freight systems with a focus on modal shift. *Environmental Research Letter*, v. 13.
- Liu, X.; S. Ma; J. Tian; N. Jia e G. Li (2015) A system dynamics approach to scenario analysis for urban passenger transport energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing, *Energy Policy*, v. 85, p. 253–270.
- Loulou, R.; G. Goldstein e K. Noble (2004) Documentation for the MARKAL Family of Models. Disponível em: <<http://www.iea-etsap.org/web/MrklDoc-I StdMARKAL.pdf>>. Acesso em: 28 jun. 2019.
- Manohar, G.; S. P. Devi e K. S. Rao (2014) Evaluation of policies to reduce transportation pollution using system dynamics, *Environment Protection Engineering*, v. 40, n. 4, p. 143-153.
- McKinnon, A. (2016) Freight transport in a low-carbon world: Assessing opportunities for cutting emissions. *TR News*, v. 306, p. 8–15.
- Menon, B. G. e B. Mahanty (2015) Assessing the Effectiveness of Alternative Policies in Conjunction with Energy Efficiency Improvement Policy in India, *Environmental Modeling & Assessment*, v. 20, n. 6, p. 609–624.
- Miedema, J. H. e H. C. Moll (2013) Lithium availability in the EU27 for battery-driven vehicles: The impact of recycling and substitution on the confrontation between supply and demand until 2050, *Resources Policy*, v. 38, p. 204–211.
- Ministério do Meio Ambiente (2016) *Acordo de Paris*. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 15 fev. 2019.
- Ministério dos Transportes (2011) *Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLT. Projeto de reavaliação de estimativas e metas do PNLT*. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNLT/2011.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2019.
- Pfaffenbichler, P.; G. Emberger e S. Shepherd (2010) A system dynamics approach to land use transport interaction modelling: the strategic model MARS and its application. *System Dynamics Review*, v. 26, n. 3, p. 262–282.
- Shafiei, E.; B. Davidsdottir; J. Leaver; H. Stefansson; E. I. Asgeirsson e D. R. Keith (2016) Analysis of supply-push strategies governing the transition to biofuel vehicles in a market-oriented renewable energy system, *Energy*, v. 94, p. 409–421.
- Shepherd, S. P. (2014) A review of system dynamics models applied in transportation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, v. 2, n. 2, p. 83–105.
- Silva, M. B. e F. Moura (2016) Electric vehicle diffusion in the Portuguese automobile market, *International Journal of Sustainable Transportation*, v. 10, n. 2, p. 49–64.
- Sterman, J. (2000) *Business Dynamics: System Thinking and Modelling for a Complex World*. New York, NY, USA: McGraw-Hill.
- Transport and Mobility Leuven (2007) *TREMOVE Economic Transport and Emissions Model*. Disponível em: <<http://www.tremove.org/documentation/index.htm>>. Acesso em: 28 jun. 2019.
- Veziroğlu, A. e R. Macário (2014) A System Dynamics Model for the Reduction of Health Expenditures through Transition to Hydrogen Vehicles (Srth): Case Studies in the USA, China, and India, *International Journal of Green Energy*, v. 11, n.7, p. 695–726.