

# PROPOSTA DE REDUÇÃO DE EMISSÕES VEICULARES: SIMULAÇÃO DA INSERÇÃO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

## 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é essencial para atividades econômicas, industriais, de transporte e telecomunicações, e sua ausência evidencia a importância de sistemas que assegurem o restabelecimento do fornecimento (Ehsani et al., 2021; Kucukoglu, Dewil & Cattrysse, 2021). Para mitigar o aquecimento global causado por gases de efeito estufa, governos têm incentivado energias sustentáveis e indústrias verdes, incluindo o estímulo à adoção de veículos elétricos (Chen et al., 2019; Lonan & Ardi, 2020).

Apesar da diversidade da matriz energética, os combustíveis fósseis ainda predominam, gerando elevados níveis de CO<sub>2</sub> e intensificando as mudanças climáticas (Goel & Rathore, 2021; Bhatti, Mohan & Singh, 2021). O setor de transportes, em particular, agrava a poluição do ar, impactando a saúde e a qualidade de vida, especialmente em regiões densamente povoadas (Guerra, 2019). A transição para veículos elétricos (VEs) poderia reduzir tais impactos e apoiar o abandono dos combustíveis fósseis, embora seus efeitos dependam da origem da eletricidade utilizada (Sanguesa et al., 2021; Albatayneh, Assaf & Jaradat, 2020).

A indústria automotiva, cada vez mais tecnológica, contribui tanto para a mobilidade e segurança quanto para a intensificação da poluição urbana (Sanguesa, 2020). Nesse cenário, os VEs ganham relevância, sobretudo em cidades inteligentes, integrados à mobilidade compartilhada e ao transporte público. No entanto, desafios como autonomia limitada e tempo de recarga exigem avanços em tecnologias de bateria, que definirão o futuro dessa solução (Zhang et al., 2022; Chen et al., 2023).

Diante disso, este estudo tem como objetivo modelar os efeitos da inserção parcial ou total de veículos elétricos em uma instituição de ensino público. A questão de pesquisa que o orienta é: quais os impactos potenciais dessa inserção sobre as emissões? Para responder, o trabalho estrutura-se em referencial teórico, metodologia, desenvolvimento do modelo, resultados, considerações finais e referências.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Sustentabilidade ambiental

A adoção de veículos elétricos é considerada estratégia crucial para a sustentabilidade ambiental, pois reduz emissões de gases de efeito estufa, diversifica a matriz energética e melhora a qualidade do ar urbano (Hirz & Nguyen, 2022). Contudo, tais benefícios só são efetivos quando a eletricidade utilizada provém de fontes renováveis ou de baixo carbono (Tanwir & Hamzah, 2020).

Koengkan et al. (2022) destacam que substituir combustíveis fósseis por eletricidade pode diminuir significativamente as emissões de CO<sub>2</sub> e fortalecer a segurança energética. Singh et al. (2021), por exemplo, projetaram estações de recarga solar na Índia, evidenciando o potencial das renováveis para ampliar a adoção de veículos elétricos e reduzir emissões. Evidências macroeconômicas da União Europeia também confirmam que VEs e híbridos plug-in contribuem para atingir metas climáticas e diversificar a matriz energética (Koengkan et al., 2022).

Apesar desses avanços, a produção e o descarte de baterias ainda representam desafios ambientais. Michaelides (2021) ressalta que a escolha de tecnologias e matérias-primas adequadas pode mitigar impactos, enquanto Kuo et al. (2021) demonstram que a reciclagem de baterias é estratégica para reduzir danos e recuperar recursos valiosos.

Estudos adicionais, como os de Kiviluoma e Meibom (2020), mostram que a eletrificação pode favorecer a integração de renováveis ao sistema elétrico, desde que acompanhada por medidas de flexibilidade e armazenamento.

Em síntese, a eletrificação veicular é essencial para a sustentabilidade, mas exige avaliação completa de impactos associados à produção, uso e descarte de baterias, além de análises de viabilidade econômica e ambiental (Tanwir & Hamzah, 2020; Singh et al., 2021). Para consolidar seus benefícios, são necessárias pesquisas em tecnologias limpas e políticas públicas que incentivem tanto a adoção de veículos elétricos quanto a produção sustentável de baterias.

## **2.2 Veículos elétricos**

A transição para veículos elétricos traz desafios e oportunidades na busca por mobilidade sustentável. Segundo Tanwir e Hamzah (2020), sua adoção generalizada pode reduzir emissões de gases de efeito estufa, diversificar a matriz energética e melhorar a qualidade do ar urbano, desde que alguns aspectos fundamentais sejam considerados.

Um deles é a integração dos veículos elétricos com fontes renováveis. Khasreen et al. (2020) destacam que o uso de energia limpa no carregamento reduz emissões, fortalece a segurança energética e torna o sistema mais resiliente. Outro fator é a gestão inteligente da demanda, por meio de estratégias de carregamento que considerem disponibilidade de energia, perfil de uso e demanda do sistema, evitando sobrecargas e maximizando benefícios (Wu et al., 2021).

A aceitação dos consumidores também é crítica. Conforme Anis et al. (2021), a falta de informação pode gerar barreiras, exigindo programas de conscientização que ressaltem vantagens ambientais e econômicas. A segurança dos veículos deve ser garantida por meio de padronização, design seguro e proteção contra falhas, aspectos ressaltados por Mahmoud et al. (2021).

Outro pilar é a colaboração entre governos, indústria, setor energético e instituições acadêmicas, condição essencial para políticas adequadas e troca de melhores práticas (Zhang et al., 2022). Desta forma, a mobilidade elétrica requer uma abordagem integrada que combine renováveis, gestão da demanda, aceitação social, segurança e cooperação institucional (Tanwir & Hamzah, 2020). Diante disso, este estudo apresenta a metodologia utilizada para compreender os efeitos da inserção de veículos elétricos.

## **3 MÉTODO DE PESQUISA**

Este estudo adota o método de Dinâmica de Sistemas para compreender as emissões veiculares em uma instituição de ensino superior. Essa abordagem auxilia o decisor a simular políticas e entender como o sistema funciona e evolui, incorporando também o conhecimento local dos envolvidos (Thompson; Howick; Belton, 2016; Scott; Cavana; Cameron, 2016). A verificação e validação do modelo são etapas críticas, pois garantem que o comportamento simulado corresponda ao real (Simonetto et al., 2016; Pidd, 1998). Embora nenhum modelo represente totalmente a realidade, é possível construir relações adequadas entre seus componentes (Alves, 2019; Sommerville, 2015).

O modelo foi elaborado com diagramas de estoque e fluxo, incluindo variáveis de nível (acumulações), de taxa (controlam fluxos), constantes, auxiliares (operações algébricas) e fluxos físicos (transferências conservativas). Algumas funções complementaram o processo, como RANDOM UNIFORM, Shadow Variable e Time.

A simulação foi implementada no software Vensim (Ventana Systems, 2022), que permite modelagens flexíveis e análises de alta qualidade. Os dados foram obtidos em planilhas institucionais e bases como IBGE (2023), INMETRO (2023), SEEG (2023) e EPE (2023). Três

cenários foram desenvolvidos: (i) Atual, sem inserção de VEs; (ii) Proposto, com 15% de adoção em 30 anos; e (iii) Proposto II, com 20% em 30 anos.

A hipótese dinâmica formulada considera cinco variáveis: uso de gasolina por veículo, emissão de CO<sub>2</sub>, inserção de VEs, uso de energia limpa e redução de emissões. O pressuposto central é que a diminuição de combustíveis fósseis e o aumento da energia limpa reduzem impactos ambientais e emissões de CO<sub>2</sub> (Silva, 2006).

#### 4 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

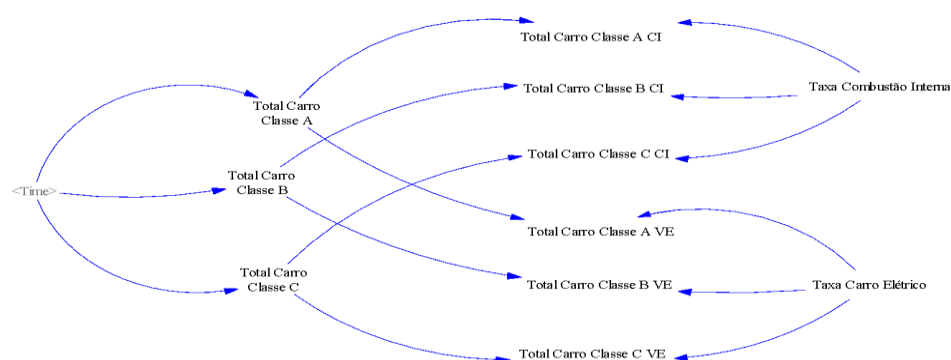
O interesse pelo transporte elétrico cresce tanto no setor privado quanto no público (Campatelli et al., 2014). No Brasil, cerca de 85% da população vive em áreas urbanas, o que pressiona as infraestruturas e exige transformações para garantir condições sustentáveis (Ipea, 2016; Ciciola et al., 2016). Nesse cenário, a evolução tecnológica tornou viável a produção de carros elétricos puros, valorizados por sua versatilidade e adaptação às vias existentes (Rogge; Wollny; Sauer, 2015). Além disso, observa-se expansão de fábricas especializadas, embora adaptações regionais ainda sejam necessárias (Sebastini, 2014).

Para as simulações, os veículos foram segmentados em três classes, de acordo com o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – PBEV (Inmetro):

- Classe A (subcompactos): menores e econômicos, ideais para curtas distâncias, como Volkswagen Up e Renault Kwid.
- Classe B (compactos): veículos médios, confortáveis para até quatro pessoas, como Peugeot 208 e Volkswagen Gol.
- Classe C (4x4): robustos, de maior porte e consumo, indicados para tarefas que exigem tração elevada.

Essa classificação foi aplicada tanto a veículos de combustão interna (CI) quanto a veículos elétricos (VE), compondo as bases para a modelagem dos cenários (figura 1).

**Figura 1.** Modelo para calcular totais de carros



Fonte: Autores (2023)

Com o crescimento econômico e a urbanização, o transporte tornou-se um dos principais responsáveis pelas emissões de CO<sub>2</sub> (Xiao et al., 2017). Em 2012, o setor representava 32,9% das emissões nos EUA, 17,7% no Japão e 8,6% na China (IEA, 2020). No Brasil, em 2019, foram emitidas cerca de 196 Mt de CO<sub>2</sub>, 1% a mais que no ano anterior (SEEG, 2020).

Essa realidade decorre da predominância de veículos a combustão na malha de transportes. No segmento de passageiros, em 2016, 29% das viagens foram feitas por transporte público, sendo 20% em ônibus municipais (ANTP, 2018). A emissão de CO<sub>2</sub> decorre da queima de combustíveis fósseis (Miskolczi et al., 2021). Para mitigar esse impacto no transporte urbano, diversas estratégias têm sido aplicadas em ônibus, como motores elétricos (Nemoto et al., 2021; Zhang et al., 2021; Juvvala & Sarmah, 2021; Hu et al., 2021).

O modelo de emissões soma os dados oriundos dos carros a combustão interna, em relação aos veículos elétricos foram utilizados na simulação dados do INMETRO (2023) que

informam a emissão de energia por km calculado pela proporção de uso e geração das baterias de lítio, são destacadas pelas equações 10, 11 e 12 do Quadro 1 a seguir.

Quadro 1: Modelo de Equações

(1)	Total Carro Classe A = time [((0,0)-(3000,60)),(2024,30),(2054,60) ]
(2)	Total Carro Classe B = time [((0,0)-(3000,80)),(2024,25),(2054,75) ]
(3)	Total Carro Classe C = time [((0,0)-(3000,20)),(2024,10),(2054,20) ]
(4)	Taxa Combustão Interna = [RANDOM UNIFORM( 0.7 , 0.93 , 0.82 )]*
(5)	Taxa Carro Elétrico = RANDOM UNIFORM( 0.3 , 0.07 , 0.22 )*
(6)	Total Carro Classe A CI = Total Carro Classe A+(Taxa Combustão Interna*Total Carro Classe A)**
(7)	Total Carro Classe A VE = Total Carro Classe A+(Total Carro Classe A*Taxa Carro Elétrico) **
(8)	Consumo Classe A CI = (Distancia Media*Total Carro Classe A CI)*Rendimento Consumo Classe A CI ***
(9)	Consumo Carro Classe A VE = (Distancia Media*Total Carro Classe A VE)*Rendimento Consumo Carro Classe A VE
(10)	Emissão CI = (GeraçãoCO2CA CI*Consumo Classe A CI)+(GeraçãoCO2CB CI*Consumo Carro Classe B CI)+(GeraçãoCO2CC CI*Consumo Carro Classe C CI)
(11)	Emissão VE = (Consumo Carro Classe A VE*GeraçãoCO2CA VE)+(Consumo Carro Classe B VE*GeraçãoCO2CB VE)+(Consumo Carro Classe C VE*GeraçãoCO2CC VE)
(12)	Emissão CO2 = Emissão CI+Emissão VE

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

As equações 1, 2 e 3 inserem no modelo as quantidades de carros por categoria, utilizando a variável *time* para representar o comportamento temporal e diferenciar os cenários. As equações 4 e 5 aplicam distribuições uniformes, enquanto as equações 6 e 7 armazenam os totais por classe, exemplificados na classe A e replicados para B e C. Por fim, as equações 7 e 8 representam o consumo dos carros da classe A, lógica também aplicada às demais classes.

## 5 RESULTADOS

Após a definição dos cenários, as simulações foram realizadas no software Vensim (Vensim, 2022), utilizando um computador com processador Pentium Core i7 e 16 GB de memória RAM. A execução ocorreu em milionésimos de segundos, considerando um horizonte de 30 anos, variável ajustável conforme os objetivos do projetista.

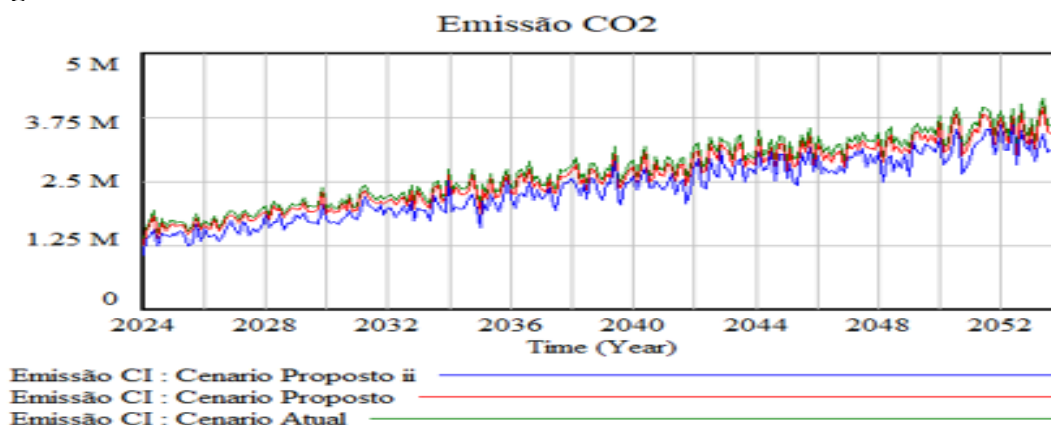
Os resultados permitem decisões sobre a inserção parcial ou total de veículos elétricos e a consequente redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, os modelos foram concebidos para facilitar a interação usuário-sistema, permitindo análises do tipo *what-if* de forma simplificada, úteis a gestores ambientais e organizacionais.

A alta eficiência e o potencial sustentável dos veículos elétricos reforçam sua importância no combate às emissões (Lin et al., 2018). A eletricidade, considerada combustível central na descarbonização do setor energético e de transportes (Cellura et al., 2017; Finocchiaro et al., 2016; Ortiz et al., 2014; Spencer et al., 2017), possibilita substituir combustíveis fósseis em motores de combustão interna por fontes renováveis, gerando reduções expressivas de CO<sub>2</sub>.

A Figura 2 evidencia o acúmulo anual de reduções de emissões. Embora os três cenários ultrapassem 1,25 milhão de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano, os cenários com inserção de veículos elétricos (Proposto e Proposto II) apresentaram menor acúmulo. Esses achados confirmam o apontado por Holmberg e Erdemir (2019), segundo os quais décadas de pesquisa em veículos elétricos alimentados por baterias pavimentam o caminho para um transporte mais limpo e sustentável.

A Figura 2 mostra que o cenário com maior participação de veículos elétricos apresenta emissões significativamente menores em relação ao cenário atual, reforçando a relevância do uso de energia limpa no transporte. O cenário Proposto II aponta redução de aproximadamente 23% das emissões em comparação ao atual e 17% em relação ao cenário Proposto. Já o cenário Proposto apresenta queda de cerca de 8% frente ao cenário atual.

**Figura 2.** Resultado de emissões CO<sub>2</sub>



Fonte: Autores (2023).

Tais resultados confirmam que a situação atual não atende às metas de proteção ambiental e corroboram Stokes e Breetz (2018), que defendem políticas públicas de incentivo à adoção de veículos elétricos como estratégia para reduzir CO<sub>2</sub> como apresentado na tabela 1.

**Tabela 1.** Resumo dos Resultados

	Acúmulo de emissões (em milhões de toneladas)
<b>Cenário Atual</b>	68.871
<b>Cenário Proposto</b>	61.727
<b>Cenário Proposto ii</b>	53.031

Fonte: Autores (2023)

Os resultados (tabela 1) da simulação evidenciam que a inserção de veículos elétricos é essencial para reduzir o aquecimento global, já que a maior parte das emissões de gases de efeito estufa e da poluição do ar provém da queima de combustíveis fósseis em veículos convencionais (Ercan; Onat; Tatari, 2016; Jiao et al., 2017; Goldemberg & Lucon, 2012; IEA, 2017).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor de transportes é um dos principais responsáveis pela poluição do ar e pelas mudanças climáticas, devido às emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente em áreas urbanas. Nesse contexto, a substituição de veículos a combustão por elétricos surge como passo promissor para a sustentabilidade urbana, sendo reconhecidos como tecnologia fundamental de redução de carbono (Ercan; Onat; Tatari, 2016; Jiao et al., 2017).

Um transporte sustentável deve atender às necessidades de mobilidade com custos viáveis, baixo impacto ambiental e compatibilidade com a saúde humana. Veículos elétricos e híbridos não são novidade — já disputaram espaço com os convencionais no início da indústria, mas perderam terreno por décadas. Hoje, retornam ao debate sobre mobilidade urbana, podendo trazer impactos positivos ou negativos à qualidade de vida nos centros urbanos.

A pesquisa contribui com modelos de simulação que testam diferentes cenários de inserção de veículos elétricos, permitindo debates públicos sobre seu impacto. Os resultados reforçam que a adoção de VEs é decisiva para mitigar o aquecimento global, já que a maior parte das emissões provém da queima de combustíveis fósseis. A simulação com o Vensim mostrou reduções significativas de GEE, confirmando o potencial dessa tecnologia para a sustentabilidade ambiental.

O estudo apresenta, contudo, limitações: restringiu-se a uma instituição pública e não abordou todo o ciclo de vida dos VEs, especialmente a produção e descarte das baterias. Como agenda futura, recomenda-se ampliar a análise para diferentes contextos, adotar modelos mais complexos e avaliar de forma detalhada os impactos ambientais das baterias, além de investigar a aceitação dos consumidores diante dessa transição tecnológica.

## Referências

- ALBATAYNEH, A.; ASSAF, M. N.; JARADAT, M. The role of electric vehicles in reducing emissions and fossil fuel consumption: evidence from empirical studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110–125, 2020.
- ALVES, J. F. Modelagem de sistemas complexos: uma introdução à dinâmica de sistemas. Belo Horizonte: UFMG, 2019.
- ANIS, A. et al. Consumer perception and acceptance of electric vehicles: a systematic review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 95, p. 102857, 2021.
- BHATTI, A.; MOHAN, A.; SINGH, G. Environmental impacts of fossil fuel consumption and the need for sustainable energy transition. **Energy Reports**, v. 7, p. 1234–1248, 2021.
- CAMPATELLI, G. et al. Electric mobility: drivers and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 475–484, 2014.
- CHEN, P. T. et al. Development of transmission systems for parallel hybrid electric vehicles. **Applied Sciences**, v. 9, p. 2199, 2019.
- CHEN, X. et al. Battery technology advances for electric vehicles. **Energies**, v. 16, n. 2, p. 887–899, 2023.
- CICIOLA, C. et al. Urbanization and transport infrastructure challenges. **Urban Studies**, v. 53, n. 7, p. 1451–1467, 2016.
- ERCAN, T.; ONAT, N.; TATARI, O. Investigating carbon footprint reduction potential of alternative fuel vehicles. **Applied Energy**, v. 184, p. 752–765, 2016.
- EHSANI, M. et al. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.
- FINOCCHIARO, P. et al. Renewable electricity and electric vehicles: synergies and trade-offs. **Renewable Energy**, v. 92, p. 20–30, 2016.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energy, environment and development. 2. ed. London: Earthscan, 2012.
- GOEL, A.; RATHORE, N. Energy mix trends and the dominance of fossil fuels. **Energy Reports**, v. 7, p. 165–172, 2021.
- GUERRA, A. Air pollution, transport and public health: evidence from developing countries. **Environmental Research Letters**, v. 14, n. 11, p. 115–124, 2019.
- HIRZ, M.; NGUYEN, T. T. Life-cycle CO<sub>2</sub>-equivalent emissions of cars driven by conventional and electric propulsion systems. **World Electric Vehicle Journal**, v. 13, p. 81–95, 2022.
- HOLMBERG, K.; ERDEMIR, A. Influence of tribology on global energy consumption. **Friction**, v. 7, p. 1–14, 2019.
- IEA – International Energy Agency. Transport sector emissions report 2020. Paris: IEA, 2020.
- INMETRO. Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV). Brasília: INMETRO, 2023.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Urbanização e mobilidade: desafios e oportunidades. Brasília: IPEA, 2016.
- JIAO, J. et al. Environmental impacts of vehicle emissions. **Journal of Transport Geography**, v. 62, p. 123–130, 2017.
- JUVVALA, R.; SARMAH, G. Electrification of buses: sustainability implications. **Energy Reports**, v. 7, p. 2114–2123, 2021.
- KIVILUOMA, J.; MEIBOM, P. Impact of electric vehicles on renewable integration in Denmark. **Energy Policy**, v. 137, p. 111–119, 2020.
- KOENGGAN, M. et al. The capacity of battery-electric and plug-in hybrid electric vehicles to mitigate CO<sub>2</sub> emissions. **World Electric Vehicle Journal**, v. 13, p. 55–70, 2022.
- KUCUKOGLU, M. T.; DEWIL, R.; CATTRYSSSE, D. The role of energy in economic and industrial strategies. **Journal of Industrial Ecology**, v. 25, p. 788–799, 2021.
- KUO, T. et al. Economic and environmental viability of lithium-ion battery recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, p. 105–117, 2021.
- LIN, B.; WU, Y.; ZHANG, Y. Electric vehicles as a sustainable solution. **Energy Policy**, v. 118, p. 145–152, 2018.