



IMPULSIONANDO A TRANSIÇÃO DO BRASIL PARA UM TRANSPORTE RODOVIÁRIO COM EMISSÃO ZERO

Melhorando a
qualidade do ar
a saúde pública
e a economia por
meio de esforços
coordenados do setor

SUMÁRIO

A eletrificação do setor de transporte rodoviário de carga pesada no Brasil representa uma oportunidade importante para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), melhorar a qualidade do ar e fortalecer a saúde pública. Embora a longa dependência do país em biocombustíveis tenha aproveitado recursos e infraestrutura domésticos, essa estratégia deve ser entendida como uma medida transitória, que pode não atender plenamente aos objetivos climáticos e econômicos de longo prazo do Brasil.

A eletrificação oferece um caminho estratégico para descarbonizar o transporte rodoviário de carga, com base na experiência internacional de jurisdições como a União Europeia e os Estados Unidos. Esta transição está alinhada com os compromissos nacionais de sustentabilidade do Brasil e pode gerar benefícios significativos para o meio ambiente, a saúde pública e a resiliência econômica.

Concretizar essa transição exigirá ação coordenada entre governo, setor produtivo e sociedade civil. A liderança do setor público — por meio de marcos regulatórios robustos, incentivos direcionados e investimentos em infraestrutura — será essencial. Fornecedores de energia, operadores logísticos, municípios e fabricantes de veículos desempenham papéis complementares no desenvolvimento de um ecossistema favorável ao transporte de carga com emissão zero.

Os fabricantes continuam sendo atores-chave, ao contribuírem com inovação e adaptação da oferta de veículos ao contexto brasileiro. No entanto, o sucesso desta transição depende de uma colaboração setorial abrangente, guiada por políticas coerentes e sustentada por investimentos públicos e privados.

Este relatório apresenta estudos de caso internacionais, quantifica impactos ambientais e econômicos, e propõe recomendações acionáveis para embasar a tomada de decisão. Seu objetivo é apoiar formuladores de políticas, lideranças do setor e demais partes interessadas na aceleração da eletrificação da frota brasileira de veículos pesados, em consonância com as metas nacionais de redução de emissões e melhoria da saúde pública.



ESTUDO DE CASO: CENÁRIOS DE EMISSÕES EM SÃO PAULO

O estudo modelou diferentes cenários de substituição da frota de caminhões a diesel por tecnologias mais limpas em São Paulo, estimando reduções de emissões de poluentes até 2030 e 2050.

Os cenários considerados foram: elétrico a bateria (BEV), célula de combustível hidrogênio (FCEV),

híbrido diesel, gás natural liquefeito (LNG), gás natural comprimido (CNG) e biodiesel puro (B100).

Biodiesel apresentou pior desempenho ambiental do que o diesel.

Veículos elétricos oferecem maior redução de GEE e poluentes até 2050.

RESULTADOS DA PESQUISA EM NÚMEROS

ELÉTRICOS A BATERIA

- **46%** de redução nas emissões de GEE até 2050.
- **R\$ 5 bilhões** em custos evitados com meio ambiente e saúde.

CÉLULA DE COMBUSTÍVEL (HIDROGÊNIO)

- **27%** de redução nas emissões até 2050.
- **R\$ 2.9 bilhões** em custos evitados.

HÍBRIDOS A DIESEL

- **8%** de redução nas emissões até 2050.
- **R\$ 298 milhões** em custos evitados.

GÁS NATURAL E BIODIESEL

Aumentam as emissões líquidas e os custos econômicos ao longo do tempo.

ANÁLISE GERAL E CONCLUSÕES

Entre 2013 e 2023 foram gastos R\$ 24,5 bilhões em hospitalizações causadas por doenças relacionadas à poluição do ar.

Biodiesel: O Brasil adota atualmente até 14% de mistura obrigatória (B14), sendo a maior parte proveniente da soja. A utilização integral de biodiesel (B100) até 2050 demandaria cerca de 215 milhões de hectares de terras agrícolas – o equivalente a aproximadamente 25% do território nacional.

Eletificação: Caminhões elétricos a bateria oferecem as maiores reduções de emissões no longo prazo e os melhores benefícios econômicos.

Hidrogênio: Promissor, mas enfrenta altos custos e barreiras de infraestrutura.

Gás Natural (GNL/GNC): Benefícios limitados no curto prazo e risco de aumento das emissões e custos no longo prazo.

Os dados do estudo de São Paulo revelam que a eletrificação da frota de caminhões é a estratégia que oferece reduções mais robustas e sustentadas das emissões de gases poluentes e de efeito estufa.

Esta estratégia não apenas beneficia o meio ambiente, mas gera retornos econômicos e à saúde pública ao evitar os danos sociais associados à poluição.

Em contraste, opções como biodiesel de soja e gás natural comprimido – embora promovidas como alternativas “mais limpas” – demonstram efeitos colaterais ambientais e sanitários consideráveis, além de representar um retrocesso econômico do ponto de vista dos custos evitáveis.

RECOMENDAÇÕES FINAIS

- Acelerar a implementação de **regulamentações de economia de combustível** para caminhões.
- Apoiar **renovação da frota** com políticas eficazes.
- Eliminar gradualmente os **subsídios ao diesel**, implementar precificação de carbono e alinhar políticas com justiça climática. Estabelecer metas

obrigatórias de fabricação de Veículos com Emissão Zero até 2040.

- Criar infraestrutura de **recarga elétrica e hidrogênio**.
- Implementar **mecanismos financeiros concretos**, tais como créditos, subsídios, taxações.

**1.
O SETOR DE
TRANSPORTE
DE CARGAS DO
BRASIL – UM
PESADELO FARDO
SOBRE AS ESTRADAS**



Todos os dias, milhões de toneladas de mercadorias atravessam o vasto território brasileiro, mantendo a economia em funcionamento. No entanto, por trás desse fluxo comercial essencial, existe um sistema frágil, extremamente dependente das rodovias. Com mais de 65% da tonelagem total de carga transportada por caminhões, o Brasil se destaca como uma das economias de transporte de carga mais dependentes do modal rodoviário no mundo (ICCT, 2021). Essa dependência não é apenas resultado da geografia, mas um legado de políticas que moldaram uma rede de transportes dominada pelo modal rodoviário, muitas vezes em detrimento da eficiência, da sustentabilidade e da resiliência.

Historicamente, o domínio rodoviário no Brasil surgiu das estratégias industriais postas em prática em meados do século XX, projetadas para fomentar a produção automotiva nacional. Ao longo das décadas de 1950 e 1960, o governo introduziu incentivos fiscais, restrições à importação e subsídios para atrair fabricantes globais de veículos, incorporando o transporte rodoviário ao tecido econômico do país (IEA-EPE, 2021). Como parte dessa industrialização centrada no setor automotivo, investimentos públicos maciços priorizaram rodovias nacionais como a BR-101 e a BR-116, transformando-as na espinha dorsal da logística de carga. Embora essas políticas tenham impulsionado a expansão econômica, elas também marginalizaram o desenvolvimento ferroviário e hidroviário, deixando o Brasil com um sistema de transporte de carga desequilibrado e ineficiente.

Ao longo dos anos, a demanda por transporte de carga disparou, impulsionada pelo crescimento econômico e pelo aumento dos volumes comerciais. Entre 2005 e 2018, a frota de caminhões do Brasil cresceu a uma taxa média anual de 3,5%, levando a um aumento no consumo de diesel de 20 para 30 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) no mesmo período (IEA-EPE, 2021). Em 2019, a frota total de caminhões de carga era estimada em 2 milhões de veículos, respondendo por 76% de todo o diesel fóssil consumido no Brasil e 40% de todas as emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes. Em 2020, os caminhões pesados representavam 60% do consumo total de energia no transporte de carga, superando amplamente os caminhões médios e leves (ICCT, 2021).

Os desafios do setor de transporte de carga no Brasil vão além do consumo de combustível. As más condições das estradas agravam ainda mais os custos e as emissões. Classificado em 103º lugar entre 137 países em termos de qualidade das estradas, o Brasil enfrenta deficiências persistentes de infraestrutura que aumentam o consumo de combustível, os custos de manutenção dos veículos e o tempo de viagem (Fórum Econômico Mundial (WEF), 2017). Estudos mostram que uma economia anual significativa de diesel, na ordem de 4,52 bilhões de litros, ou 16% de eficiência de combustível, poderia ser alcançada com a melhora das condições das estradas no país, com retorno positivo do investimento até o ano de 2037 (Santos et al., 2024).

Os desafios estruturais no setor de transporte rodoviário de carga limitam ainda mais a eficiência. O Brasil permite alguns dos caminhões mais pesados do mundo, com pesos brutos combinados, legais, de até 74 toneladas, e autorizações especiais que chegam a 91 toneladas, em comparação com 40 toneladas nos EUA e 49 toneladas na China. Caminhões mais pesados consomem mais combustível por quilômetro e causam uma deterioração mais rápida das estradas, agravando a degradação da infraestrutura. Enquanto isso, a frota de caminhões do Brasil é significativamente mais antiga do que em outras grandes economias, com 6,1% dos caminhões com mais de 30 anos de idade, operando com padrões de eficiência ultrapassados. **Nas últimas duas décadas, as melhorias na eficiência de combustível em caminhões pesados tiveram uma média de apenas 0,6% ao ano,** ficando significativamente atrás de economias como a UE e o Japão, onde os ganhos de eficiência ultrapassam 1% ao ano devido a regulamentações mais rigorosas de economia de combustível (IEA-EPE, 2021).

Apesar desses desafios, o Brasil tem dado os primeiros passos rumo a melhorias de eficiência. O governo está, atualmente, coletando dados de consumo de combustível para estabelecer metas formais de eficiência para caminhões pesados até 2032, com previsão de introdução para 2027 (Brasil, 2018). Até lá, o progresso dependerá da adoção voluntária de tecnologias e da modernização da frota. Sem uma mudança em direção a regulamentações de economia de combustível, investimentos em infraestrutura moderna e renovação da frota, e um sistema multimodal de transporte de carga mais equilibrado, a dependência do Brasil do transporte rodoviário continuará a elevar custos, acarretando ineficiência e preocupações ambientais cada vez maiores.

Eficiência de combustível e lacunas regulatórias o transporte de carga no Brasil

Embora o setor de transporte de carga do Brasil tenha se expandido significativamente nas últimas décadas, as melhorias na eficiência de combustível dos veículos pesados não acompanharam esse ritmo. Esse atraso se deve, em grande parte, à ausência de regulamentações obrigatórias de economia de combustível voltadas especificamente para caminhões pesados. Vários programas tentaram abordar diferentes aspectos da eficiência do transporte — como tecnologia veicular, modernização da infraestrutura e controle de emissões —, mas nenhum impôs metas diretas de eficiência de combustível para caminhões pesados. Consequentemente, o setor continua dependente de esforços voluntários da indústria e de intervenções políticas fragmentadas.

Por exemplo, o programa Rota 2030 incentivou avanços tecnológicos e melhorias na eficiência de combustível, estimulando as montadoras a investir em pesquisa e desenvolvimento (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços do Brasil, 2020).

No entanto, ao contrário das metas progressivas de economia de combustível impostas nos Estados Unidos e na União Europeia, os esforços do Brasil no âmbito da Rota 2030 têm se concentrado principalmente em veículos de passageiros. Embora se espere que os dados coletados por meio da Rota 2030 apoiem a formulação dos primeiros padrões de eficiência para veículos pesados do país, não se prevê que essas regulamentações sejam implementadas antes de 2032, adiando melhorias críticas no consumo de combustível e na redução de emissões.

De forma similar, o Inov@BR (Ministério da Infraestrutura do Brasil, 2021) foi introduzido com o objetivo de melhorar a manutenção das rodovias, a coordenação logística e o rastreamento de cargas. No entanto, ele carece de requisitos de economia de combustível aplicáveis ao setor de transporte rodoviário de carga, deixando o sistema de transporte de carga do país fortemente dependente do transporte rodoviário, contribuindo, assim, para níveis persistentemente elevados de consumo de combustível.

No que diz respeito às emissões, o Brasil tem obtido avanços mensuráveis. Estima-se que a implementação do Proconve P8 – que alinhará as normas brasileiras de emissões com a regulamentação Euro VI – reduza significativamente as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e de partículas (MP) dos caminhões a diesel (Ministério do Meio Ambiente do Brasil, 2018). No entanto, como a Proconve P8 não aborda a eficiência de combustível, podem permanecer elevados o consumo geral de combustível e as emissões de gases de efeito estufa, a menos que sejam adotadas medidas adicionais. Em contrapartida, muitas das principais economias da Europa e da América do Norte integraram o controle de emissões com melhorias obrigatórias na economia de combustível. Essas regiões não apenas alcançam emissões mais baixas de poluentes, como também reduzem o consumo de combustível por quilômetro percorrido (Conselho Internacional de Transporte Limpo, 2019).

A ausência de normas vinculativas de eficiência de combustível para veículos pesados coloca o Brasil em clara desvantagem em relação às melhores práticas globais. Em mercados-chave como os Estados Unidos, a China, o Canadá, o Japão e a União Europeia, os marcos regulatórios impulsionam melhorias contínuas na eficiência dos caminhões, o que, por sua vez, reduz os custos operacionais e minimiza os impactos ambientais (IEA-EPE, 2021). As Normas de Eficiência para Veículos Pesados Fase 2 dos EUA, por exemplo, exigem uma redução de 16% no consumo de combustível para caminhões de grande porte e uma redução de 24% para veículos especiais entre 2017 e 2027 (Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2016b). Da mesma forma, a União Europeia determina uma redução de 45% nas emissões de CO₂ dos caminhões até 2030 (Comissão Europeia, 2021). Essas políticas estabelecem uma trajetória clara para ganhos de eficiência, catalisando a inovação tecnológica e promovendo o uso econômico de combustível no setor de frete.

No Brasil, as metas de eficiência de combustível para caminhões ainda estão em fase preliminar. Espera-se que as regulamentações atuais sejam

formuladas até 2027 e implementadas até 2032 (Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços do Brasil, 2020). Sem medidas imediatas e decisões para acelerar a modernização da frota e aumentar a eficiência de combustível, o Brasil corre o risco de ficar ainda mais para trás em relação aos seus pares globais. Esse atraso pode levar a uma maior dependência de combustível, custos operacionais mais elevados e pressões ambientais crescentes. Na ausência de metas de eficiência obrigatórias, o progresso continuará a depender de iniciativas voluntárias do setor e de investimentos fragmentados em infraestrutura, deixando lacunas significativas no caminho do Brasil rumo a um sistema de transporte de carga mais eficiente.



Análise comparativa do setor de veículos pesados do Brasil: lacunas de eficiência e comparações globais

O setor de frete pesado do Brasil opera sob condições regulatórias e de infraestrutura únicas que o diferenciam de outras grandes economias. Embora o país se beneficie de altos limites de capacidade de caminhões que aumentam a eficiência do transporte, essas permissões também representam desafios significativos, incluindo desgaste acelerado das estradas, maior consumo de com-

combustível e preocupações com a segurança. Uma análise comparativa das regulamentações e dos mecanismos de fiscalização de caminhões do Brasil em relação aos padrões globais fornece insights valiosos sobre as lacunas de eficiência do setor e as áreas que precisam de melhorias.

A regulamentação brasileira permite pesos brutos combinados de veículos (PBCV) de 74 toneladas para comboios rodoviários padrão e de até 91 toneladas com autorizações especiais, tornando o país uma das nações com os limites de peso de caminhões mais elevados do mundo. Em comparação, a Argentina permite que os caminhões operem com um peso máximo de 75 toneladas, enquanto a Austrália tem o limite mais alto, de 122,5 toneladas, mas apenas em rotas específicas sob sistemas de autorização controlada. Outros países impõem limites mais restritivos: o Canadá limita o peso dos caminhões a 62,5 toneladas, a China a 49 toneladas, a Índia a 55 toneladas, o México a 47,5 toneladas, a Rússia a 44 toneladas e os Estados Unidos limitam os veículos a 40 toneladas em rodovias interestaduais. Essas variações refletem diferentes abordagens regulatórias para equilibrar a eficiência do transporte, a durabilidade da infraestrutura rodoviária e as preocupações com a segurança. Os altos limites de peso do Brasil permitem maior capacidade de transporte de carga por viagem, mas também contribuem para a deterioração acelerada das estradas, custos de manutenção mais elevados e aumento do consumo de combustível. Ao contrário da América do Norte e da Europa, onde a fiscalização rigorosa do peso por eixo e as regulamentações do sistema de freios mitigam esses riscos, os mecanismos de fiscalização do Brasil permanecem relativamente fracos, permitindo sobrecarga e desgaste excessivo das estradas (IEA-EPE, 2021).

Além da regulamentação de limite de peso de caminhões, a infraestrutura rodoviária continua sendo um desafio crítico para o setor de frete do país, contribuindo para um alto consumo de combustível, maior desgaste dos veículos e ineficiências logísticas. De acordo com o Relatório de Competitividade Global 2017–2018 do Fórum Econômico Mundial, o Brasil ficou em 80º lugar entre 137 países em termos de qualidade geral da infraestrutura, refletindo o estado de deterioração de muitas rodovias essenciais para o transporte de carga (Fórum Econômico Mundial (WEF), 2017). Estradas mal conservadas levam a maior resistência ao rolamento e uso ineficiente de combustível, aumentando os custos operacionais para as empresas de logística. Pesquisas do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) sugerem que melhorar a rigidez das estradas poderia levar a reduções significativas no consumo de combustível para veículos pesados, já que menos energia se perde com a deformação da pista. Embora a redução exata na eficiência de combustível em estradas degradadas varie, estudos indicam que pavimentos mais lisos e rígidos contribuem para custos de combustível mais baixos e emissões reduzidas no transporte de carga (MIT, 2020). Esses achados reforçam a urgência de investir em infraestrutura no Brasil para melhorar as condições das estradas, aumentar a eficiência do transporte rodoviário e reduzir os impactos ambientais.

Para agravar essa questão, a geografia do Brasil exige extensas rotas de transporte de longa distância para suas principais exportações, particularmente soja e minério de ferro. Por exemplo, a soja produzida no Mato Grosso, o principal estado produtor de soja do país, costuma percorrer aproximadamente 2.200 quilômetros para chegar ao Porto de Paranaguá, no Paraná, aumentando significativamente os custos de transporte e as ineficiências logísticas (Fliehr, 2013). Da mesma forma, o minério de ferro extraído em Carajás, uma importante região mineradora no Pará, precisa percorrer aproximadamente 800 quilômetros por ferrovia para chegar ao Porto de São Luís, destacando a dependência do transporte de carga de longa distância para commodities a granel (Rodrigues, 2024). Essas vastas distâncias não apenas contribuem para altos custos operacionais, mas também aumentam o consumo de combustível e as emissões de gases de efeito estufa, agravando as preocupações ambientais.

Em contrapartida, países como os Estados Unidos, a China e a Rússia desenvolveram redes de transporte de carga mais diversificadas. Os Estados Unidos transportam aproximadamente 39,9% de suas ton-miles de carga por ferrovia, beneficiando-se de uma extensa infraestrutura ferroviária que reduz a dependência do transporte rodoviário de longa distância. Da mesma forma, a China e a Rússia dependem fortemente das ferrovias e das vias navegáveis interiores para o transporte de carga a granel, aproveitando esses modais para aumentar a eficiência, reduzir os custos de transporte e mitigar as emissões (Rodrigues, 2024).

O envelhecimento da frota de caminhões no Brasil continua sendo uma barreira significativa para melhorar a eficiência e reduzir as emissões. **Dados mostram que 6,1% dos caminhões pesados do Brasil têm mais de 30 anos, o que significa que uma parte substancial da frota carece de tecnologias modernas de economia de combustível e continua operando com baixa eficiência** (IEA-EPE, 2021). Em comparação, a renovação da frota na América do Norte e na Europa é muito

mais rápida, com caminhões comerciais geralmente sendo aposentados antes de atingirem 15 a 20 anos de idade (International Council of Clean Transportation (ICCT), 2015). Esse ciclo de substituição mais rápido garante que as frotas de caminhões nessas regiões se beneficiem dos mais recentes avanços em tecnologias de eficiência de combustível e redução de emissões.

Os esforços do Brasil para modernizar sua frota de veículos têm enfrentado desafios, particularmente na implementação de programas eficazes de sucateamento. Ao contrário de países como Chile, México e China, onde monitoramento rigoroso e incentivos financeiros garantem a retirada definitiva de veículos obsoletos, programas anteriores no Brasil tiveram dificuldade em alcançar sucesso semelhante. No Chile, o governo ofereceu incentivos para a substituição de caminhões com mais de 25 anos, condicionados à comprovação da destruição do veículo. Essa abordagem garantiu que veículos mais antigos e menos eficientes fossem definitivamente retirados de operação. O programa de renovação de caminhões do México, em vigor entre 2004 e 2010, substituiu com sucesso aproximadamente 21.000 caminhões com mais de 10 anos. Os incentivos eram oferecidos em dinheiro no momento do desmanche do veículo ou como redução no preço de compra de um veículo novo equipado com tecnologia avançada de controle de emissões. A China implementou vários programas do tipo “dinheiro por sucata” para incentivar o desmanche de veículos mais antigos (Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2016a).

Em contrapartida, as tentativas anteriores de renovação de veículos no Brasil, como o programa Procaminhoneiro (Banco Nacional de Desenvolvimento do Brasil, 2007), foram menos eficazes. Com frequência, esses programas não conseguiram garantir a retirada definitiva de veículos antigos, resultando em impacto mínimo na modernização da frota. Sem mecanismos de fiscalização mais rigorosos e incentivos financeiros, veículos mais antigos continuam a contribuir para o alto consumo de combustível, emissões e custos operacionais crescentes. Para enfrentar esses desafios, o Brasil iniciou recentemente novos esforços para corrigir distorções em seu programa de incentivos para caminhões. **Em junho de 2023, o governo lançou incentivos fiscais para a venda de caminhões e ônibus com descontos. No entanto, a adesão tem sido baixa, com apenas 14% dos fundos alocados utilizados até o momento.** Uma nova portaria visa corrigir essas distorções, permitindo que proprietários de veículos sucateados recebam benefícios sem a obrigação de comprar um novo, reconhecendo que muitos caminhoneiros autônomos podem não ter capacidade financeira para fazer tal transição (Valor Econômico, 2023).

Para resolver essas questões, é necessária uma abordagem multifacetada, que inclua uma fiscalização mais rigorosa do peso por eixo, investimentos em infraestrutura rodoviária e ferroviária e políticas que acelerem a modernização da frota. Aprender com as melhores práticas internacionais – como programas eficientes de baixa de veículos, padrões de economia de combustível e melhor integração do transporte intermodal – poderia ajudar o Brasil a reduzir custos, melhorar a eficiência logística e diminuir as emissões. Ao alinhar suas políticas de transporte pesado com os líderes globais em sustentabilidade de cargas, o Brasil pode aumentar a competitividade e, ao mesmo tempo, mitigar os encargos ambientais e econômicos de seu sistema atual.



2. O PANORAMA ATUAL DAS EMISSÕES DE CAMINHÕES NO BRASIL E SEUS IMPACTOS NA SAÚDE

Os caminhões pesados são uma fonte significativa de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no setor de transportes do Brasil. Em 2020, esses veículos consumiram aproximadamente 45,1 bilhões de litros de diesel, resultando na emissão de 185,3 milhões de toneladas de CO₂, o que representou 49,9% das emissões de CO₂ do setor de transportes (De Castro et al., 2023). Isso ressalta a necessidade urgente de maior eficiência dos veículos, tecnologias alternativas e políticas de transporte sustentáveis.

Os motores a diesel, fonte de energia predominante para caminhões pesados, também são grandes emissores de óxidos de nitrogênio (NOx), que contribuem para a formação de ozônio troposférico (smog) e chuva ácida. Apesar de representarem uma pequena porcentagem da frota de veículos, caminhões pesados e ônibus são responsáveis por uma parcela desproporcional das emissões de NOx. Em São Paulo, esses veículos representam menos de 4% da frota, mas produzem mais de 80% das emissões de NOx (Andrade et al., 2012). Da mesma forma, na Região Metropolitana de Salvador, os veículos pesados representam cerca de 7% da frota, mas contribuem com aproximadamente 84% das emissões de NOx (Da Silva Marques et al., 2021). Altas concentrações de NOx em áreas urbanas agravam doenças respiratórias, afetando a saúde pública e aumentando os custos com assistência médica.

Outra preocupação ambiental e de saúde significativa associada aos caminhões pesados é a emissão de partículas finas (MP_{2,5}). Os gases de escape do diesel produzem essas partículas microscópicas, que podem penetrar profundamente nos pulmões e entrar na corrente sanguínea, levando a doenças cardiovasculares e respiratórias. O impacto das emissões de MP é particularmente grave em cidades densamente povoadas, onde os corredores de transporte de carga frequentemente se cruzam com zonas residenciais e comerciais (De Miranda et al., 2012).

As emissões de caminhões pesados têm impactos bem documentados na saúde, especialmente em áreas urbanas e ao longo dos principais corredores de transporte de carga. A exposição a partículas finas (MP_{2,5}) e óxidos de nitrogênio (NOx) provenientes de caminhões a diesel está fortemente associada a doenças respiratórias crônicas, como asma, bronquite e comprometimento da função pulmonar. Crianças e idosos são particularmente vulneráveis a esses efeitos devido à sua

24.5 bilhões reais

foram gastos,
conforme
nossa análise
em intenções
relacionadas
a essas
doenças entre
2013 e 2023

maior suscetibilidade à poluição do ar. Um estudo realizado em seis cidades brasileiras identificou as emissões de veículos como um dos principais contribuintes para as concentrações urbanas de $MP_{2.5}$, correlacionando-se com o aumento de doenças respiratórias. Foram gastos 24,5 bilhões de reais em hospitalizações relacionadas a essas doenças entre 2013 e 2023, de acordo com nossa análise. Além das doenças respiratórias, a exposição prolongada aos gases de escape de diesel tem sido associada a um risco maior de doenças cardiovasculares, incluindo hipertensão, acidente vascular cerebral e ataques cardíacos. O $MP_{2.5}$ desempenha um papel fundamental no desencadeamento de inflamação sistêmica e disfunção vascular, agravando os riscos à saúde cardiovascular. Pesquisas indicam que indivíduos que vivem próximos a rodovias, zonas industriais e centros de logística enfrentam uma exposição desproporcionalmente maior a esses poluentes, aumentando a probabilidade de desenvolverem complicações graves de saúde (Andrade et al., 2012).

O Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT) estimou que as emissões dos veículos a diesel, incluindo caminhões pesados, são responsáveis por milhares de mortes prematuras anualmente no Brasil. Estima-se que um atraso de um ano na adoção das normas de emissão P-8 resulte em 6.000 mortes prematuras adicionais entre 2023 e 2050. Espera-se que os atrasos na implementação de tecnologias de diesel mais limpas aumentem os gastos com saúde em quase US\$ 11,5 bilhões até 2040 (Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2022).

O estudo do Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT) destaca o grande custo econômico que as emissões de caminhões a diesel impõem ao sistema de saúde do Brasil. O tratamento de doenças respiratórias e cardiovasculares custa bilhões de reais anualmente, desviando recursos essenciais de outras prioridades da saúde pública.

Para quantificar esses impactos financeiros, realizamos uma avaliação atualizada das despesas com hospitalizações no Sistema Único de Saúde (SUS) para condições com associações bem documentadas à poluição do ar. Nossa análise estima que, entre 2013 e 2023, aproximadamente 24,5 bilhões de reais foram gastos em hospitalizações relacionadas a essas doenças. As condições examinadas neste estudo incluem neoplasias malignas da traqueia, brônquios e pulmões; diabetes mellitus; infarto agudo do miocárdio; outras doenças cardíacas isquêmicas agudas; hemorragia intracerebral; infarto cerebral; acidentes vasculares cerebrais não especificados; gripe; pneumonia; doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), incluindo bronquite enfisematosa; e asma. Para refinar a avaliação, a análise foi estratificada por faixas etárias: doenças cardiovasculares e oncológicas foram analisadas em indivíduos com mais de 40 anos, gripe e pneumonia em pessoas com mais de 60 anos, pneumonia em crianças menores de cinco anos e asma em indivíduos com menos de 15 anos.

Esses achados ressaltam as graves consequências econômicas e de saúde pública das doenças relacionadas à poluição do ar, reforçando a necessidade de políticas rigorosas de qualidade do ar e medidas de controle de emissões. Sem uma intervenção eficaz, as emissões de caminhões a diesel continuarão sobrecarregando o sistema de saúde do Brasil, levando ao aumento dos custos e à piora dos resultados de saúde para populações vulneráveis.

Desigualdades sociais, raciais e ambientais na exposição à poluição

O impacto da poluição atmosférica causada por caminhões pesados no Brasil afeta desproporcionalmente as comunidades localizadas próximas a grandes corredores de transporte, incluindo rodovias, centros logísticos e cidades portuárias. Essas áreas, frequentemente habitadas por populações de baixa renda, enfrentam não apenas uma exposição elevada a poluentes nocivos, mas também vulnerabilidades socioeconômicas que agravam os riscos à saúde. Pesquisas indicam que aproximadamente 72% da população pobre do Brasil reside em áreas urbanas, muitas vezes em bairros com infraestrutura inadequada, transporte público limitado e acesso restrito a serviços de saúde (UN-Habitat, 2006). Em cidades como o Rio de Janeiro, populações marginalizadas, particularmente residentes negros e de baixa renda, são mais propensas a viver nas proximidades de grandes vias e zonas industriais, o que leva a uma exposição significativamente maior às emissões de diesel provenientes do transporte de carga (Barata, 2024).

Da mesma forma, os bairros de baixa renda de São Paulo apresentam concentrações muito mais altas de óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas finas (MP_{2,5}), devido à sua proximidade com os principais corredores de transporte de



carga, onde se concentra o tráfego de caminhões a diesel (Pérez-Martínez et al., 2017). Cidades portuárias como Santos exemplificam a ligação direta entre as emissões do transporte de carga e as doenças respiratórias; pesquisas identificaram uma correlação significativa entre as concentrações de NOx relacionadas ao transporte e o aumento de casos de bronquite e enfisema entre os residentes próximos ao porto (Bauer, Barbosa De Oliveira-Sales, et al., 2024; Bauer, Oliveira-Sales, et al., 2024).

Um estudo conduzido por da Motta Singer et al. (2023) destaca as disparidades socioeconômicas na exposição à poluição do ar urbano em São Paulo, Brasil. A pesquisa examinou o acúmulo de carbono negro nos pulmões de 604 indivíduos falecidos como um indicador da exposição a MP₁₀, revelando que indivíduos de áreas de baixa renda enfrentavam consistentemente maior exposição à poluição. O estudo constatou que os sistemas tradicionais de monitoramento da qualidade do ar tendem a subestimar a exposição das populações marginalizadas, com o erro de classificação aumentando em 0,028 unidades para cada queda de 0,1 no status socioeconômico. Essa subestimação é particularmente preocupante, pois indivíduos de origens de baixa renda frequentemente enfrentam deslocamentos diários mais longos, expondo-os a períodos prolongados de altos níveis de poluição. Os resultados enfatizam o fardo ambiental desproporcional suportado por comunidades socioeconomicamente desfavorecidas, ao mesmo tempo em que levantam preocupações sobre a precisão e a equidade do monitoramento oficial da qualidade do ar. Ao não capturar a extensão total da exposição entre populações

20 – 30% mais baixos que o habitual

Durante a greve dos caminhoneiros de 2018, observaram-se níveis de NO₂ especialmente em áreas com alta densidade de tráfego, de acordo com um estudo que analisou as concentrações de dióxido de nitrogênio (NO₂) – um dos principais poluentes emitidos pelos motores a diesel

vulneráveis, essas lacunas de monitoramento podem impedir o desenvolvimento de políticas e intervenções direcionadas com o objetivo de reduzir os riscos à saúde associados à poluição do ar (Da Motta Singer et al., 2023).

As desigualdades raciais e econômicas também amplificam significativamente a exposição desproporcional à poluição do ar no Brasil. Um crescente conjunto de pesquisas destaca a relação entre a variabilidade climática, o desenho urbano e as disparidades socioeconômicas na qualidade do ar. A combinação de condições climáticas desfavoráveis, planejamento urbano deficiente e segregação econômica deixa as populações de baixa renda com maior exposição aos poluentes.

Estudo de caso: Impacto da greve dos caminhoneiros de 2018 na qualidade do ar no Brasil

Em maio de 2018, o Brasil passou por uma greve nacional dos caminhoneiros que durou de 21 a 31 de maio, levando a uma redução sem precedentes na atividade dos caminhões. Com a interrupção abrupta do transporte de cargas, os níveis de poluição do ar caíram significativamente, oferecendo uma oportunidade única para avaliar o impacto ambiental dos caminhões pesados a diesel. Esse período tornou-se um experimento natural, permitindo que pesquisadores avaliassem como a redução das emissões dos caminhões poderia melhorar a qualidade do ar e a saúde pública. Ao analisar as concentrações de poluentes antes, durante e após a greve, vários estudos confirmaram a contribuição substancial dos caminhões pesados para a poluição do ar urbano e suas implicações mais amplas para as políticas públicas e a saúde pública.

Melhorias na qualidade do ar em São Paulo

São Paulo, a maior área metropolitana do Brasil, apresentou melhorias marcantes na qualidade do ar durante a greve. Um estudo que analisou as concentrações de dióxido de nitrogênio (NO₂) – um dos principais poluentes emitidos por motores a diesel – constatou que os níveis de NO₂ estavam 20–30% mais baixos do que o normal, particularmente em áreas com alta densidade de tráfego (Debone et al., 2020). Essa queda ressalta o papel significativo das emissões do transporte de carga a diesel na degradação da qualidade do ar urbano. Além disso, os níveis de partículas finas (MP_{2.5}) também caíram, levando a uma melhoria geral na qualidade do ar e a uma redução nos riscos respiratórios para populações vulneráveis. A recuperação imediata dos níveis de poluição após a retomada da circulação de caminhões demonstrou ainda mais a contribuição dominante do transporte de carga a diesel para a poluição urbana em São Paulo (Chiquetto et al., 2021).

Reduções de MP10 em Limeira e Campinas

Resultados semelhantes foram observados em Limeira e Campinas, duas cidades do sudeste do Brasil com tráfego de carga significativo. Um estudo focado nas concentrações de MP₁₀ constatou que os níveis de poluição foram 20%

menores durante a greve, particularmente nos horários de pico do tráfego. A redução temporária da atividade de transporte de carga durante a greve melhorou imediatamente a qualidade do ar, mas, assim que a circulação normal de caminhões foi retomada, os níveis de poluição se recuperaram rapidamente, destacando o impacto sustentado dos caminhões a diesel na poluição do ar em regiões industrializadas e com intensa atividade logística (Nogarotto et al., 2022).

Benefícios para a saúde e a economia

Além das melhorias imediatas na qualidade do ar, os pesquisadores também examinaram as implicações para a saúde e a economia decorrentes da redução das emissões dos caminhões. Um estudo de impacto na saúde estimou que os níveis mais baixos de MP_{10} durante a greve poderiam ter evitado até 81 casos de doenças relacionadas à poluição, incluindo infecções respiratórias e doenças cardiovasculares. Além disso, a redução dos poluentes atmosféricos foi associada a taxas mais baixas de hospitalização, especialmente entre crianças e idosos, os dois grupos mais vulneráveis à exposição à poluição do ar. Os benefícios econômicos da melhoria na qualidade do ar durante a greve também foram substanciais. Em termos monetários, a redução temporária nas emissões dos caminhões se traduziu em milhões de dólares em economias potenciais para a saúde pública. Essas descobertas destacam os custos frequentemente ignorados associados à poluição causada por caminhões a diesel, desde despesas médicas até a perda de produtividade devido a doenças relacionadas à poluição (Debone et al., 2020).

As melhorias significativas na qualidade do ar durante a greve reforçam a urgência de repensar a dependência do Brasil em relação ao transporte de carga movido a diesel. À medida que o país analisa políticas para cumprir metas de sustentabilidade e de saúde pública, as lições dessa experiência natural devem orientar as futuras estratégias de transporte. As evidências sugerem que um sistema de transporte de carga mais limpo e eficiente não é apenas necessário do ponto de vista ambiental, mas também benéfico economicamente.

E se os benefícios à saúde observados em São Paulo fossem aplicados a outras regiões brasileiras?

A partir dessas constatações, exploramos como os benefícios à saúde observados em São Paulo poderiam se estender a outras cidades brasileiras. Utilizando a metodologia proposta por (Debone et al., 2020), estimamos o número de mortes evitáveis em várias cidades, utilizando as taxas de mortalidade por todas as causas da Base de Dados do Sistema Único de Saúde (DATASUS).

Para extrapolar as mortes evitáveis para outras regiões, aplicamos as reduções percentuais de mortes observadas no estudo original. Essa proporção quantifica a parcela da mortalidade total atribuível à poluição do ar e, por extensão, a fração de mortes que poderiam ser evitadas com a redução das emissões de caminhões pesados. Isso gerou um indicador do impacto das emissões de caminhões sobre a mortalidade.

Em seguida, essa razão foi aplicada aos dados de mortalidade de outras cidades brasileiras para estimar os potenciais benefícios à saúde decorrentes da redução da poluição, sob a suposição de que a relação entre a exposição à poluição do ar e a mortalidade segue uma tendência semelhante nas áreas urbanas.

Dado que as emissões de caminhões pesados são um dos principais contribuintes para a poluição do ar, áreas próximas a rodovias, portos e centros logísticos foram priorizadas na extrapolação, conforme mostrado na Tabela 1. Notavelmente, São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte apresentaram as maiores estimativas de mortes evitáveis, refletindo suas grandes populações, alta densidade de tráfego e atividade industrial. Além disso, cidades portuárias como Santos, Belém e Paranaguá, bem como centros logísticos como Campinas, Fortaleza e Curitiba, também apresentaram impactos significativos. Cidades localizadas ao longo dos principais corredores de transporte de carga, como Feira de Santana, Rondonópolis e Vitória da Conquista, destacam ainda mais a forte ligação entre a poluição do ar e a mortalidade em regiões fortemente influenciadas pelas emissões do transporte.

Os resultados revelaram um impacto nacional potencial significativo, particularmente em regiões com alta exposição às emissões de caminhões pesados. A análise estimou 4.196 mortes potencialmente evitáveis em 2017, distribuídas pelas cidades selecionadas que abrigam importantes centros de transporte e industriais. São Paulo registrou o maior número de mortes evitáveis (905), seguido pelo Rio de Janeiro (621) e Recife (219), refletindo a influência das grandes áreas metropolitanas com intenso tráfego veicular e atividades industriais. Cidades portuárias como Santos (66), Belém (124) e Paranaguá (11) também apresentaram impactos potenciais consideráveis, reforçando o papel dos corredores logísticos na mortalidade relacionada à poluição. Cidades situadas ao longo de rodovias importantes, como Feira de Santana (33) e Rondonópolis (15), também demonstraram benefícios potenciais substanciais para a saúde. Os resultados estão resumidos na Tabela 1.

Este estudo apresenta uma avaliação baseada em evidências dos potenciais benefícios para a saúde nacional decorrentes da redução da poluição do ar, extrapolando os resultados de São Paulo para outras cidades brasileiras. Embora a metodologia atual não quantifique diretamente esses efeitos localizados, os resultados servem como um indicador dos impactos na saúde que poderiam ter sido observados nessas regiões.

TABELA 1 – MORTES POTENCIALMENTE EVITÁVEIS ASSOCIADAS ÀS EMISSÕES DE CAMINHÕES DE GRANDE PORTE EM PRINCIPAIS POLOS DE TRANSPORTE BRASILEIRO

Regiões	Mortes (2017)	Mortes Evitáveis	Informações sobre Rodovias
North (Norte)			
AMAZONAS			
Manaus	4119	82	(BR-174) – Polo industrial e logístico
PARÁ			
Belém	6201	124	(BR-316, BR-010) – Cidade portuária
Marabá	505	10	(BR-222) – Polo de transporte mineral
Santarém	860	17	(BR-163) – Corredor de exportação de soja
RONDÔNIA			
Porto Velho	1257	25	(BR-364) – Polo de agronegócio e transporte
Northeast (Nordeste)			
BAHIA			
Salvador	7676	154	(BR-324) – Principal cidade portuária
Feira de Santana	1636	33	(BR-116, BR-101) Ponto de parada estratégico para caminhões
Vitória da Conquista	1271	25	(BR-116) – Principal polo logístico do interior
CEARÁ			
Fortaleza	9841	197	(BR-116) – Principal centro industrial e logístico
MARANHÃO			
São Luís	3958	79	(BR-135) Principal porto para exportação de agronegócios
PERNAMBUCO			
Recife	10972	219	(BR-101, BR-232) – Polo logístico e industrial
Caruaru	1978	40	(BR-232) – Principal centro de distribuição.

Central-West (Centro-oeste)

DISTRITO FEDERAL

Brasília	6647	133	(BR-040, BR-060) Ponto de convergência nacional de transporte
----------	------	-----	--

GOIÁS

Goiânia	5917	118	(BR-153) – Polo logístico no Centro-Oeste
Anápolis	1555	31	(BR-153) – Principal centro de distribuição
Rio Verde	605	12	(BR-060) – Forte setor de agronegócio

MATO GROSSO

Cuiabá	2269	45	(BR-364, BR-163) Polo de transporte para agricultura
Rondonópolis	725	15	(BR-163) – Principal centro logístico de grãos
Sinop	298	6	(BR-163) – Centro de agronegócio
Sorriso	209	4	(BR-163) – Maior produtor de soja do Brasil

MATO GROSSO DO SUL

Campo Grande	3407	68	(BR-262, BR-163) – Polo central de transporte
Dourados	988	20	(BR-163) – Importante cidade de agronegócio

Southeast (Sudeste)

ESPÍRITO SANTO

Vitória	1799	36	(BR-101) – Área portuária e industrial
Cariacica	650	13	(BR-262) – Principal zona logística

MINAS GERAIS

Belo Horizonte	9081	182	(BR-381, BR-040) – Polo logístico
Uberlândia	864	17	(BR-050) – Centro de distribuição de agronegócio
Contagem	1258	25	(BR-381) – Zona industrial
Betim	2491	50	(BR-381) – Principal polo automotivo e logístico
Juiz de Fora	2088	42	(BR-040) Ligação estratégica de transporte entre Sudeste e Nordeste

RIO DE JANEIRO

Rio de Janeiro	31044	621	(BR-101, BR-116, BR-040) Polo logístico e portuário
Volta Redonda	1218	24	(BR-393) – Centro siderúrgico

SÃO PAULO

São Paulo	45248	905	(BR-116, BR-381, SP-330, SP-348, Rodoanel)
Campinas	4692	94	(SP-330, SP-348) – Principal polo logístico
São José dos Campos	2071	41	(BR-116, SP-070) – Área aeroespacial e industrial
Sorocaba	2508	50	(SP-280, BR-374) – Zona industrial
Ribeirão Preto	3224	64	(SP-330) – Polo de agronegócio
Santos	3300	66	(SP-150) Principal cidade portuária, destino de tráfego de caminhões.

South (Sul)

PARANÁ

Curitiba	6096	122	(BR-116, BR-376) Principal polo logístico e industrial
Londrina	2646	53	(BR-369) – Polo de transporte agrícola
Maringá	1678	34	(BR-376) – Corredor de produção de grãos
Paranaguá	543	11	(BR-277) Principal cidade portuária para exportação

RIO GRANDE DO SUL

Porto Alegre	7390	148	(BR-290, BR-116) – Polo logístico regional
Caxias do Sul	1537	31	(BR-116) – Polo industrial e de transporte
Pelotas	1918	38	(BR-116) – Ligação - chave para transporte no sul

SANTA CATARINA

Blumenau	1106	22	(BR-470) – Zona industrial
Joinville	1642	33	(BR-101) – Polo industrial e logístico
Itajaí	798	16	(BR-101) – Principal porto para transporte de contêineres

Total	209784	4196
--------------	---------------	-------------



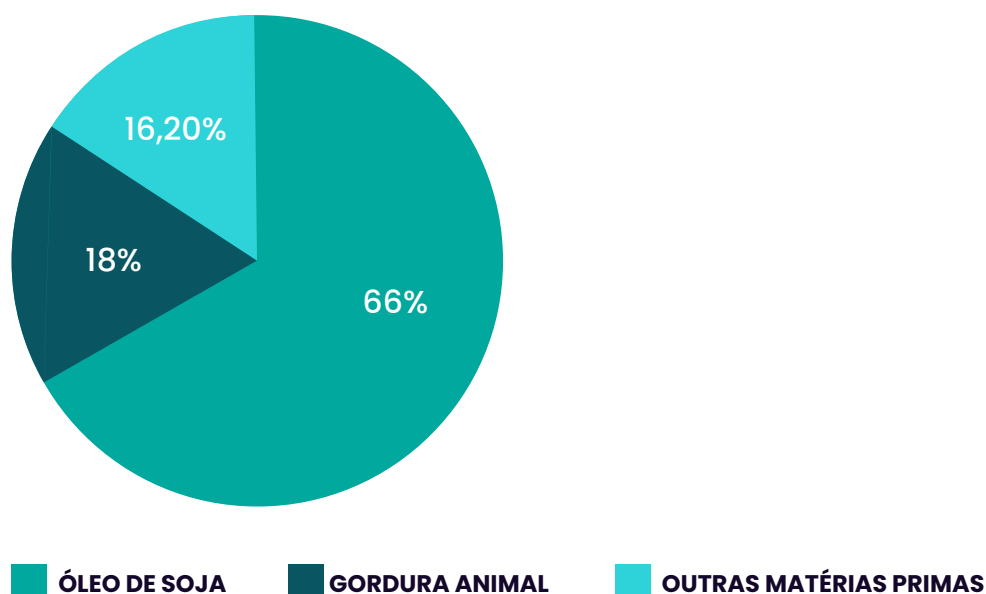
3. BIODIESEL E COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS: O PAPEL E AS LIMITAÇÕES DOS BIOCOMBUSTÍVEIS NO SETOR DE TRANSPORTES DO BRASIL

À medida que o Brasil busca aumentar a eficiência e reduzir as emissões no setor de transporte de carga, os combustíveis alternativos tornaram-se parte integrante da estratégia nacional. Com uma das maiores indústrias de biocombustíveis do mundo, o Brasil promove há muito tempo o biodiesel, o biometano e o etanol para diversificar sua matriz energética e diminuir sua dependência dos combustíveis fósseis (IEA Bioenergy, 2023). Os vastos recursos agrícolas do país, aliados a políticas governamentais robustas, historicamente posicionaram os biocombustíveis na vanguarda dos esforços para alcançar a diversificação de combustíveis e reduzir as emissões. No entanto, apesar de programas ambiciosos como o RenovaBio e o Programa Combustíveis do Futuro, persistem incertezas quanto à sustentabilidade e eficácia dos biocombustíveis a longo prazo. Questões críticas — como uso da terra, desmatamento, segurança alimentar e contabilização das emissões em todo o ciclo de vida — continuam a fomentar debates sobre se os biocombustíveis podem servir como uma alternativa viável a longo prazo aos combustíveis fósseis. Ao mesmo tempo, enquanto o Brasil continua investindo fortemente em biocombustíveis, outras economias globais estão priorizando cada vez mais a eletrificação de veículos e melhorias de eficiência, desafiando assim a ênfase do Brasil na expansão dos biocombustíveis como o principal caminho para a descarbonização (Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2018).

O biodiesel, em particular, tem sido amplamente adotado no Brasil por meio de políticas de mistura obrigatória. Em 2021, a meta de mistura de biodiesel havia atingido 13% (B13), com planos iniciais do governo de aumentar para 15% (B15) (Ministério de Minas e Energia, 2021). A meta atual de mistura é de 14% em 2025. O Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) do Brasil, criado em 2004, impulsionou significativamente a indústria de biodiesel, levando à redução das importações de petróleo e fortalecendo a agricultura nacional. Ao longo de duas décadas, o programa facilitou a produção de 77 bilhões de litros de biodiesel, evitando a emissão de 240 milhões de toneladas de CO₂ e economizando aproximadamente US\$ 38 bilhões em importações de diesel. No entanto, persistem desafios relacionados à dependência de matérias-primas e aos impactos ambientais, exigindo avaliação e adaptação contínuas do programa (Governo do Brasil,

2025). Por exemplo, de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o óleo de soja constituiu aproximadamente 65,8% da produção de biodiesel do Brasil em 2022, seguido por gorduras animais (16,2%) e outras matérias-primas (18%) (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022), conforme mostrado na Figura 1.

FIGURA 1. COMPOSIÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA DO BIODIESEL NO BRASIL EM 2022.



A predominância do biodiesel de soja suscita preocupações quanto à expansão do uso da terra, ao desmatamento e à competição com a produção de alimentos, especialmente à medida que a demanda global por soja aumenta. Lapola et al. (2010) utilizaram um modelo de simulação espacialmente explícito para demonstrar que as mudanças indiretas no uso da terra associadas à produção de biocombustíveis poderiam anular as economias de carbono, com o biodiesel de soja contribuindo para 59% do desmatamento indireto projetado no Brasil (Lapola et al., 2010). Há esforços para diversificar as matérias-primas por meio de biodiesel à base de resíduos, óleo de cozinha usado e biocombustíveis derivados de algas, mas ainda não atingiram a escala necessária para substituir o biodiesel de primeira geração. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) analisou as condições de mercado e as políticas públicas relacionadas aos combustíveis sustentáveis para aviação, indicando iniciativas em andamento para promover biocombustíveis alternativos; no entanto, essas alternativas ainda não alcançaram a escala necessária para substituir o biodiesel de primeira geração (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2024).

Para abordar as preocupações com as emissões dos biocombustíveis, o Brasil introduziu o RenovaBio em 2017 (Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2017), uma política destinada a promover a eficiência de carbono no setor de transportes. Esse programa estabeleceu um sistema de comércio de créditos de carbono para biocombustíveis, exigindo que os distribuidores de combustível

adquirissem Créditos de Descarbonização (CBIOS) com base na intensidade de carbono dos biocombustíveis que distribuem (Tiburcio et al., 2023). Apesar dessas intenções, a eficácia do RenovaBio permanece incerta. O programa enfrentou vários desafios, incluindo flutuações nos preços dos CBIOS, dificuldades na fiscalização e inconsistências na medição da intensidade de carbono entre diferentes rotas de produção de biocombustíveis (Grangeia et al., 2022). Essas questões levantaram preocupações sobre se o sistema pode fornecer os incentivos de longo prazo necessários para a descarbonização sustentável no setor de transportes do Brasil. Além disso, embora os biocombustíveis geralmente produzam menos emissões de escape do que os combustíveis fósseis, persistem dúvidas sobre suas emissões ao longo de todo o ciclo de vida, particularmente os efeitos indiretos das mudanças no uso da terra. A expansão da produção de biodiesel à base de soja, por exemplo, tem sido associada ao desmatamento e à degradação do ecossistema, anulando alguns dos benefícios climáticos que os biocombustíveis deveriam proporcionar. Como resultado, alguns especialistas argumentam que os biocombustíveis por si só podem não ser uma solução de longo prazo suficiente para a descarbonização do transporte, e que uma transição mais ampla para tecnologias de emissão zero, como a eletrificação, pode ser necessária (Agência Internacional de Energia (AIE), 2021).

Além do biodiesel tradicional, o Brasil também lançou o Programa Combustível do Futuro para promover biocombustíveis de última geração, incluindo células de combustível movidas a etanol, e incentivar uma transição gra-



dual para a mobilidade elétrica. Esse programa visa ajudar o Brasil a manter sua vantagem competitiva no setor de biocombustíveis, ao mesmo tempo em que integra a eletrificação ao seu mix de transportes, sempre que viável (Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2024a). Uma área-chave de foco é o desenvolvimento de células de combustível movidas a etanol – uma tecnologia avançada em colaboração com instituições de pesquisa brasileiras e montadoras internacionais – que oferece a possibilidade de gerar eletricidade a partir do etanol. Os defensores argumentam

que essa tecnologia poderia servir como alternativa aos veículos elétricos a bateria, particularmente em regiões onde a infraestrutura de recarga é limitada (União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), s.d.). No entanto, as rápidas melhorias na eficiência das baterias e a queda nos custos da energia renovável globalmente levantam dúvidas sobre se as células de combustível a etanol poderão, em última instância, competir com a eletrificação direta.

Dados de 2023 indicam que a produção de biodiesel do Brasil ultrapassou 7,5 bilhões de litros – um aumento de 20,9% em relação ao ano anterior –, com projeções para 2024 estimando que a produção subirá para 8,9 bilhões de litros, representando um aumento de 18% (Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2023). Além disso, uma nova legislação – comumente chamada de projeto de lei do “Combustível do Futuro”, assinada em outubro de 2024 – determina um aumen-

to gradual na mistura de biodiesel, com meta de 25% até 2035, ante os atuais 14% (Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2024a). No que diz respeito aos investimentos, os principais participantes do setor também estão impulsionando a transição; por exemplo, o Grupo Potencial anunciou recentemente um investimento de aproximadamente 600 milhões de reais (cerca de US\$ 108,9 milhões) para expandir sua usina de biodiesel no estado do Paraná, aumentando a capacidade de produção anual de 900 milhões de litros para 1,62 bilhão de litros e posicionando-a como a maior instalação de biodiesel à base de óleo de soja do mundo (Reuters, 2024a). Além disso, a Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) prevê investimentos totais de cerca de 52,5 bilhões de reais até 2030, com planos de construir pelo menos 10 novas usinas de biodiesel e expandir as instalações existentes (ABIOVE, s.d.). Esses desenvolvimentos ressaltam o papel tanto das políticas governamentais quanto dos investimentos do setor na promoção da transição, ao mesmo tempo em que destacam desafios como a competição por matérias-primas e a sustentabilidade ambiental.

Embora o Brasil dependa historicamente de biocombustíveis, o potencial para descarbonizar totalmente o setor de transporte pesado do país exigirá, provavelmente, uma mudança além dos biocombustíveis, rumo a tecnologias de emissão zero. Embora os biocombustíveis possam reduzir certas emissões em comparação com o diesel, eles ainda produzem poluentes de escape — incluindo partículas e óxidos de nitrogênio — que representam riscos à saúde pública. Além disso, a natureza intensiva em recursos da produção de biocombustíveis, que exige insumos agrícolas significativos, pode levar a uma competição insustentável com a produção de alimentos e contribuir para o desmatamento. À medida que os avanços tecnológicos em caminhões elétricos, armazenamento de baterias e células de combustível de hidrogênio continuam a se acelerar, o Brasil enfrenta uma encruzilhada estratégica: continuar enfatizando os biocombustíveis como o principal caminho para a descarbonização do transporte ou diversificar sua abordagem para se alinhar às tendências globais que favorecem a eletrificação de baixo carbono.

As Implicações Ambientais e Socioeconômicas do Biodiesel à Base de Soja no Brasil

O setor de biocombustíveis do Brasil há muito é aclamado como um pilar da estratégia nacional para diversificar sua matriz energética e reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Em particular, o biodiesel tem sido amplamente promovido devido aos extensos recursos agrícolas do Brasil e aos sistemas de produção bem estabelecidos. No entanto, a predominância do biodiesel à base de soja agora levanta preocupações significativas sobre a expansão do uso da terra, o desmatamento e a potencial competição com a produção de alimentos, especialmente à medida que a demanda global por soja continua a aumentar.

O cultivo de soja no Brasil não é impulsionado apenas por políticas energéticas domésticas, mas também pelas forças do mercado internacional. Como maior produtor e exportador mundial de soja, o Brasil viu sua área plantada com soja se expandir rapidamente para atender à crescente demanda por ra-

ção animal e produção de biocombustíveis. Essa expansão tem sido associada ao desmatamento direto e indireto – particularmente em biomas como a Amazônia e o Cerrado. A expansão planejada das plantações de soja para biocombustível pode levar a um desmatamento indireto significativo, com longos períodos de retorno para a redução de emissões de carbono. Dados recentes sobre a transparência da cadeia de suprimentos indicam que, embora o desmatamento direto ligado à soja



na Amazônia tenha sido reduzido – em parte graças a medidas voluntárias como a Moratória da Soja –, o Cerrado continua altamente vulnerável à conversão de terras (Reuters, 2024b; Stockholm Environment Institute, 2022). Os impactos ambientais do biodiesel à base de soja são ainda mais exacerbados pelas pressões do mercado global. O aumento da demanda internacional – particularmente de grandes importadores como a China e a União Europeia – levou ao aumento da especulação e da conversão de terras (Comissão Europeia,

2025). À medida que os preços da soja sobem, os produtores são incentivados a desmatar mais terras, muitas vezes invadindo áreas que antes eram preservadas para a produção de alimentos ou ecossistemas naturais. Essa tendência não apenas aumenta o risco de desmatamento, mas também intensifica a competição entre a produção de biocombustíveis e a segurança alimentar.

As políticas governamentais do Brasil têm sido cruciais na definição do panorama dos biocombustíveis. As metas de mistura impulsionaram significativamente a produção de biodiesel, mas também reforçaram a dependência do óleo de soja. Embora o biodiesel de soja ofereça uma alternativa renovável ao diesel fóssil e contribua para a independência energética, seu impacto ambiental não é insignificante. A forte dependência de matérias-primas à base de soja está agora sob escrutínio devido à sua associação com mudanças indiretas no uso da terra, o que pode anular alguns dos benefícios dos biocombustíveis em termos de gases de efeito estufa.

Em resumo, embora o biodiesel à base de soja continue sendo um componente-chave do portfólio de energia renovável do Brasil, suas implicações ambientais e socioeconômicas são complexas. À medida que a demanda global por soja continua a crescer, há uma necessidade urgente de intervenções políticas robustas e mecanismos baseados no mercado que não apenas aumentem a transparência da cadeia de suprimentos, mas também protejam a vegetação nativa e garantam que a produção de biocombustíveis não ocorra às custas da segurança alimentar e da integridade do ecossistema. Enfrentar esses desafios exigirá esforços coordenados entre formuladores de políticas, partes interessadas do setor e parceiros internacionais para promover práticas agrícolas sustentáveis, fazer cumprir salvaguardas contra o desmatamento e diversificar as soluções energéticas em direção a alternativas verdadeiramente de baixo carbono.

25.3%

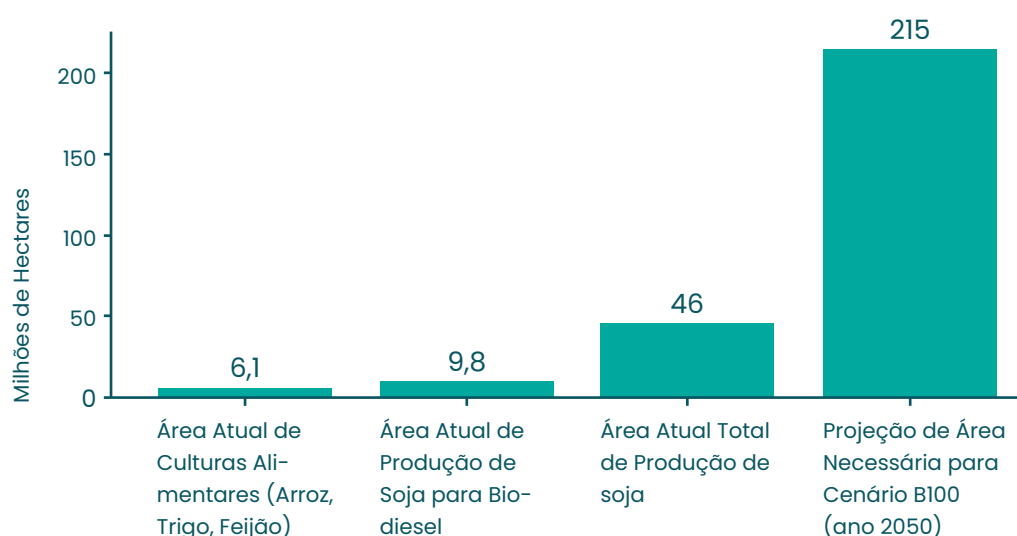
da área territorial total do Brasil seria necessária para uma transição completa para o biodiesel B100 usando matérias-primas de soja, o que representa um desafio escalar massivo.

Estimativa das necessidades de terra para a produção de biodiesel à base de soja no Brasil: uso atual, projeções futuras e comparações com culturas alimentares

O Brasil consome atualmente cerca de 40 bilhões de litros de diesel por ano (Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2024b). De acordo com a atual exigência de mistura de 14% de biodiesel, isso se traduz em cerca de 5,6 bilhões de litros de biodiesel produzidos a cada ano. No entanto, como apenas cerca de 70% do biodiesel do Brasil é derivado do óleo de soja, o volume real de biodiesel à base de soja é de aproximadamente 3,92 bilhões de litros por ano. Com um rendimento médio de 400 litros de biodiesel por hectare a partir de matérias-primas à base de soja, esse nível de produção requer cerca de 9,8 milhões de hectares de soja. Essa área representa cerca de 26,5% da área total de cultivo de soja do Brasil, estimada em 46 milhões de hectares (EMBRAPA, 2024). Para contextualizar, culturas alimentares básicas como arroz, trigo e feijão são cultivadas em uma área combinada de cerca de 6,1 milhões de hectares, o que significa que a terra utilizada para a produção de biodiesel à base de soja é quase 7,5 vezes maior do que a utilizada para essas culturas alimentares essenciais.

Olhando para um cenário futuro em que o Brasil faça a transição total para o biodiesel B100 até 2050, presume-se que o consumo de diesel crescerá a uma taxa anual de 3,9% (Machado et al., 2020) de 2030 a 2050. Com essa taxa de crescimento, projeta-se que o consumo anual de diesel aumente de 40 bilhões de litros para aproximadamente 86 bilhões de litros até 2050. Em um cenário de transição total para o B100, todos esses 86 bilhões de litros de diesel seriam substituídos por biodiesel. Com o mesmo rendimento de 400 litros por hectare, a produção de 86 bilhões de litros de biodiesel exigiria cerca de 215 milhões de hectares de terra. Isso representa um aumento de aproximadamente 215 milhões de hectares em comparação com a produção atual de biodiesel à base de soja. Para contextualizar, 215 milhões de hectares equivalem a cerca de 4,7 vezes a área total atual de cultivo de soja, de 46 milhões de hectares, e constituem aproximadamente 25,3% da área total do Brasil, de 850 milhões de hectares. O gráfico de barras na Figura 2 ilustra essas disparidades.

FIGURA 2. COMPARAÇÃO DO USO DA TERRA: CENÁRIO ATUAL VS B100 PROJEÇÃO PARA 2050



Esses números revelam o enorme desafio escalar que uma transição completa para o biodiesel B100 utilizando matérias-primas à base de soja acarretaria. O aumento dramático nas necessidades de terra ressalta a necessidade crítica de intensificação sustentável, melhorias significativas no rendimento e o uso estratégico de terras anteriormente desmatadas ou degradadas. Tais medidas são essenciais para mitigar impactos ambientais adversos e garantir que a segurança alimentar não seja comprometida.

Estudo de Caso: Análise econômica da implementação de novas tecnologias no Estado de São Paulo

Pesquisadores do Imperial College London e da Universidade de São Paulo (Machado et al., 2020) realizaram uma avaliação abrangente das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e poluentes no setor de transporte rodoviário de carga de São Paulo sob diferentes cenários. O estudo utilizou o modelo Low Emissions Analysis Platform (LEAP) (Stockholm Environment Institute, 2025) para estimar as emissões decorrentes da combustão de combustível em veículos (emissões do lado da demanda), da produção e processamento de combustível (emissões de transformação) e das emissões de combustível importado, particularmente para cenários dependentes de fontes externas de combustível. O modelo integra múltiplas variáveis, incluindo a composição da frota e transições entre cenários, fatores de emissão para cada tipo de veículo e o mix de fontes de energia para alternativas baseadas em eletricidade. Além disso, ele leva em conta as taxas de sobrevivência dos veículos e fatores de degradação ao longo do tempo para garantir uma representação precisa das emissões no mundo real.

A análise compara um cenário de referência, no qual os caminhões a diesel continuam dominantes até 2050 sem investimentos significativos

em infraestrutura para combustíveis alternativos, com cenários de tecnologias alternativas, nos quais tecnologias mais limpas substituem progressivamente os veículos a diesel a partir de 2030. Essas alternativas incluem Gás Natural Liquefeito (GNL), Gás Natural Comprimido (GNC), biodiesel, diesel híbrido, caminhões elétricos com célula de combustível de hidrogênio e caminhões elétricos a bateria, assumindo a expansão da infraestrutura para dar suporte ao abastecimento de combustível.

O estudo modela a evolução da frota de caminhões do Brasil e das emissões, incorporando projeções para a evolução do sistema energético e o crescimento econômico. O crescimento da frota acompanha as tendências do PIB, enquanto a matriz elétrica de São Paulo permanece predominantemente renovável (~60% de energia hidrelétrica). O estudo pressupõe que a capacidade de refino de petróleo bruto permanecerá inalterada até 2050. Além disso, inclui um aumento anual de 3,9% na capacidade de produção de biodiesel e uma expansão constante da geração de eletricidade renovável a partir de fontes hidrelétricas, eólicas e solares.

Suposições específicas dos cenários

O cenário de referência pressupõe uma frota dominada pelo diesel até 2050, enquanto os caminhos alternativos introduzem veículos elétricos a bateria (BEV), veículos com célula de combustível a hidrogênio (FCEV), híbridos diesel-elétricos, gás natural liquefeito (GNL), gás natural comprimido (GNC) e biodiesel como substitutos. Cada cenário leva em conta a expansão da infraestrutura de combustíveis, mudanças na produção de energia e reduções na demanda por refino de petróleo bruto, conforme mostrado na Tabela 2.

Essa estrutura fornece uma base estratégica para avaliar as reduções de emissões, as necessidades de infraestrutura e as intervenções políticas necessárias para a descarbonização do transporte de carga em São Paulo.

A transição para tecnologias de caminhões de baixa emissão no setor de transporte de carga de São Paulo pode ter implicações significativas para a qualidade do ar e a mitigação das mudanças climáticas. As Tabelas 3 e 4 resumem as reduções esperadas de poluentes para diferentes opções de combustível e motorização em comparação com uma linha de base a diesel, fornecendo insights sobre os efeitos tanto de curto prazo (2030) quanto de longo prazo (2050). Os poluentes considerados no estudo são GEE, NO_x, MP_{2.5}, CO e HC.

TABELA 2 – RESUMO DAS PRINCIPAIS PREMISSAS POR CENÁRIO

Cenário	Venda de frotas	Refino de petróleo bruto	Participação do petróleo bruto	Geração de eletricidade	Infraestrutura de gás natural
Linha de Base Diesel	100% diesel até 2050	Sem aumento	Gradual B20 até 2050 (+3,9% ao ano)	Sem mudança	Sem mudança
Elétrico a Bateria (BEV)	100% elétrico até 2030	Grande redução	Sem mudança	A demanda de eletricidade aumenta significativamente, exigindo expansão da rede e investimento em infraestrutura de recarga	Sem mudança
Célula de Combustível a Hidrogênio (FCEV)	100% célula de combustível a hidrogênio até 2030	Grande redução	Sem mudança	Pequeno aumento para produção de hidrogênio	Infraestrutura de Gás Natural: Usinas de hidrogênio adicionadas em São Paulo a partir de 2030
Híbrido Diesel-Elétrico	50% híbrido, 50% diesel até 2030	Redução	B30 até 2050 (+3,9% ao ano)	Sem mudança	Sem mudança
Gás Natural Liquefeito (LNG)	100% GNL até 2030	Redução moderada	Sem mudança	Sem mudança	Usinas de GNL construídas a partir de 2030
Gás Natural Comprimido (GNC)	100% CNG até 2030	Redução moderada	Sem mudança	Sem mudança	Processamento de GNC expande até 2040 (+10 milhões de m ³ /dia)
Biodiesel	100% biodiesel (B100 até 2050)	Sem redução	B100 até 2050 (+3.9% ao ano)	Sem mudança	Sem mudança

TABELA 3 – REDUÇÃO PERCENTUAL DE POLUENTES EM 2030 E 2050 POR CENÁRIO. VALORES NEGATIVOS REPRESENTAM REDUÇÕES NAS EMISSÕES, ENQUANTO VALORES POSITIVOS REPRESENTAM AUMENTOS

Cenário	Ano	GEE (%)	NO _x (%)	MP _{2.5} (%)	CO (%)	HCs (%)
Elétrico a Bateria	2030	-30%	-15%	-30%	-11%	-70%
	2050	-46%	-30%	-43%	-21%	-89%
Célula de Combustível (Hidrogênio)	2030	-15%	-5%	-15%	-10%	-65%
	2050	-27%	-10%	-26%	-19%	-80%
Híbrido Diesel	2030	-4%	-12%	-20%	-9%	-15%
	2050	-8%	-23%	-30%	-18%	-30%
GNL	2030	-1%	5%	-20%	15%	10%
	2050	-1%	10%	-30%	30%	20%
GNC	2030	20%	2%	-8%	38%	5%
	2050	35%	5%	-15%	76%	10%
Biodiesel	2030	1%	5%	10%	500%	25%
	2050	2%	10%	20%	1000%	50%

TABELA 4 – MUDANÇAS ABSOLUTAS EM 2030 E 2050 (EM TONELADAS). VALORES NEGATIVOS REPRESENTAM REDUÇÕES NAS EMISSÕES, ENQUANTO VALORES POSITIVOS REPRESENTAM AUMENTOS

Cenário	Ano	GEE (ton)	NO _x (ton)	MP _{2.5} (ton)	CO (ton)	HCs (ton)
Elétrico a Bateria	2030	-3,584,400.0	-1,647.6	-29.1	-122.5	-67.9
	2050	-5,496,080.0	-3,295.2	-41.7	-245.0	-86.4
Célula de Combustível (Hidrogênio)	2030	-1,792,200.0	-549.2	-14.6	-116.7	-63.1
	2050	-3,224,000.0	-1,098.4	-25.2	-221.6	-77.7
Híbrido Diesel	2030	-477,920.0	-1,318.1	-19.4	-105.0	-14.6
	2050	-955,840.0	-2,525.3	-29.1	-210.0	-29.1
GNL	2030	-59,740.0	549.2	-19.4	175.0	9.7
	2050	-119,480.0	1,098.4	-29.1	350.0	19.4
GNC	2030	2,389,600.0	219.7	-7.8	443.3	4.9
	2050	4,181,800.0	549.2	-14.6	886.0	9.7
Biodiesel	2030	119,480.0	549.2	9.7	5,832.6	24.3
	2050	238,960.0	1,098.4	19.4	11,665.2	48.5

Análise econômica de cenários alternativos

O investimento em larga escala em infraestrutura de recarga e na capacidade da rede elétrica continua sendo um desafio fundamental para sua implantação. Com base na avaliação de emissões de tecnologias alternativas para caminhões proposta por Machado (et al., 2020), esta seção realiza uma análise econômica para avaliar os impactos e benefícios econômicos, ambientais e para a saúde decorrentes da transição do setor de transporte rodoviário de carga de São Paulo para tecnologias mais limpas. Ao quantificar tanto os benefícios financeiros quanto as mudanças nas emissões, esta análise fornece uma estrutura para apoiar a tomada de decisões. O estudo emprega funções de dano para estimar os ganhos sociais decorrentes da melhoria da qualidade do ar e da redução dos impactos climáticos, relacionando a redução das emissões à prevenção de riscos à saúde, perdas de produtividade e degradação ambiental.

Esta análise quantifica os benefícios econômicos da redução de emissões em São Paulo, adaptando funções de dano internacionalmente reconhecidas para refletir as condições locais. Esses ajustes levam em conta fatores econômicos específicos do Brasil, impactos na saúde pública, exposição da população e diferenças de infraestrutura, levando a uma estimativa mais precisa dos benefícios. Utilizando uma estrutura de análise de impacto, o estudo traduz as mudanças nas emissões — nomeadamente gases de efeito estufa (GEE), óxidos de nitrogênio (NOx), partículas finas (MP_{2.5}), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HCs) — em custos relacionados à saúde, perdas de produtividade e degradação ambiental. Essa abordagem oferece uma avaliação abrangente dos impactos financeiros de longo prazo decorrentes de tecnologias alternativas de transporte de carga.

Custos de danos

O impacto econômico das reduções de emissões foi estimado com funções de dano reconhecidas internacionalmente — ajustadas para o Brasil — e expresso em valores em R\$ de 2024. As estimativas originais dos custos dos danos foram derivadas de fontes como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2023), o Banco Mundial (Banco Mundial, 2022) e a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2012). Como não há estimativas de custo de danos diretos para o monóxido de carbono (CO) e os hidrocarbonetos (HCs), foi aplicada uma abordagem de escalonamento utilizando poluentes com impactos semelhantes à saúde e ao meio ambiente. Por exemplo, o custo de danos do CO foi estimado em 15% do custo do NOx com base em estudos que sugerem que o CO tem aproximadamente 10–20% do impacto do NOx na saúde — afetando principalmente doenças respiratórias. Da mesma forma, o custo dos danos causados pelos HC foi estimado em 15% do custo das partículas finas (MP_{2.5}), pois certos hidrocarbonetos, como o benzeno, contribuem para a formação de partículas e estão associados a riscos de câncer a longo prazo, em vez de problemas respiratórios agudos (OMS, 2004). Esses fatores de escala foram escolhidos com base em avaliações comparativas de risco para estimar os custos dos danos.

Esses valores foram ajustados para o Brasil utilizando elasticidade de renda, exposição à poluição urbana, índices de custos com saúde e dados epidemiológicos.

Metodologia para a monetização dos custos de danos no Brasil

Para estimar com precisão os benefícios econômicos da redução de emissões no setor de transporte rodoviário de carga de São Paulo, este estudo adapta funções de custo de danos reconhecidas internacionalmente para refletir as condições econômicas, ambientais e de saúde pública do Brasil. A análise incorpora a elasticidade da renda, a exposição urbana, os custos com saúde, a conversão cambial e as projeções de crescimento econômico para garantir avaliações confiáveis para os anos de 2024, 2030 e 2050.

A disposição a pagar (DAP) pela redução da poluição está ligada ao PIB per capita. Como o PIB per capita do Brasil é inferior à média da OCDE, é necessário fazer um ajuste. Em 2023, o PIB per capita do Brasil foi estimado em US\$ 9.032 (Banco Mundial, 2024a), enquanto a média do PIB per capita da OCDE foi de US\$ 30.490 (Banco Mundial, 2024b). A diferença nos níveis de renda requer um fator de correção para alinhar as estimativas de custo dos danos à realidade econômica do Brasil.

As premissas de elasticidade da renda para a avaliação ambiental foram derivadas da literatura existente. O fator de elasticidade da renda varia de acordo com o poluente, sendo atribuído ao dióxido de carbono (CO₂) um fator de 1,50, aos óxidos de nitrogênio (NO_x) de 1,10, às partículas em suspensão (MP_{2.5}) de 1,30, ao monóxido de carbono (CO) de 1,20 e aos hidrocarbonetos (HCs) de 1,10. Esses fatores garantem que as estimativas dos custos dos danos sejam dimensionadas adequadamente com base nas diferenças de renda entre o Brasil e os países de renda mais alta, onde as funções originais de custo dos danos foram desenvolvidas.

Como as condições econômicas, a disposição a pagar e os custos com saúde evoluem ao longo do tempo, os valores foram ajustados adicionalmente para levar em conta as tendências econômicas e inflacionárias projetadas. Espera-se que o PIB do Brasil cresça a uma taxa anual de 2,3% entre 2024 e 2050, refletindo a expansão econômica. Simultaneamente, a inflação está projetada em 3,8% ao ano no mesmo período, exigindo ajustes para manter o valor real dos custos estimados nos anos futuros.

A fórmula de ajuste:

$$\text{Custo de Dano}_{\text{BR}} = \text{Custo de Dano}_{\text{OCDE}} \times \left(\frac{\text{GDP}_{\text{pc, BR}}}{\text{GDP}_{\text{pc, OECD}}} \right)^{\text{Elasticidade de renda}} \times [(1 + \text{Crescimento do PIB}) (1 + \text{Inflação})]^{tt}$$

Onde

■ tt = anos a partir de 2024 (6 anos para 2030, 26 anos para 2050)

■ $\text{Crescimento do PIB} = 2.3\%$

■ $\text{Inflação} = 3.8\%$

TABELA 5 – FUNÇÕES DE DANO CALCULADAS PARA O BRASIL EM 2030 E 2050, EXPRESSAS EM VALOR R\$ DE 2024

Poluente	Custo Original (USD/ton)	Custo Ajustado (BRL/ton, 2030)	Custo Ajustado (BRL/ton, 2050)	Fonte
CO ₂	190	R\$266.36	R\$884.96	(EPA, 2023)
CH ₄	2,800	R\$3,925.24	R\$13,041.46	(EPA, 2023)
N ₂ O	55,000	R\$77,102.98	R\$256,258.46	(EPA, 2023)
NO _x	7,000	R\$11,887.58	R\$37,878.97	(Dang & Mourougane, 2014)
MP _{2.5}	30,000	R\$43,512.69	R\$146,509.09	(Banco Mundial, 2022)
CO (escalado a partir do NO _x)	1,050	R\$6,456.32	R\$20,569.98	Escalado a partir do NO _x
HCs (escalados a partir do MP _{2.5})	4,500	R\$6,188.30	R\$19,723.63	Escalado a partir do MP _{2.5}

Aplicando esses fatores, obtemos os custos dos danos em 2030 e 2050, conforme mostrado na Tabela 5.

Como os dados de emissões disponíveis apresentam apenas o total de emissões de gases de efeito estufa (GEE), sem desagregar os gases individualmente, calculamos um custo médio ponderado dos danos para refletir a composição de CO₂, CH₄ e N₂O em veículos movidos a diesel. Com base nos fatores de emissão de (Machado et al., 2020), o CO₂ é responsável por aproximadamente 99,99% do total das emissões de GEE, com o CH₄ e o N₂O contribuindo com apenas 0,005% e 0,002%, respectivamente. Essas participações foram utilizadas para ponderar os valores individuais do custo social de cada gás (expressos em reais 2024), conforme mostrado na Tabela 6. Esse valor garante que os impactos monetizados das emissões de GEE sejam devidamente contabilizados mesmo quando não há dados desagregados disponíveis, e foi projetado para 2030 e 2050 utilizando premissas de crescimento e inflação ajustadas pela renda, consistentes com a metodologia aplicada a outros poluentes.

Os impactos econômicos das mudanças nas emissões são avaliados pela aplicação de funções de custo de dano às diferenças quantificadas nas emissões de poluentes – sejam elas reduções ou aumentos. Para cada cenário, a diferença nas emissões entre a linha de base (diesel) e a tecnologia alternativa é multiplicada pela função de dano relevante para cada poluente. Esse método produz uma estimativa monetária dos danos evitados (como menores despesas com saúde, redução da degradação ambiental e minimização das perdas de produtividade) ou dos custos adicionais incorridos devido a emissões mais elevadas. Todos os resultados são expressos em termos de valor presente para levar em conta o valor temporal do dinheiro. Os valores podem ser resumidos nas Tabelas 7 e 8 a seguir:

TABELA 6 – CUSTOS DE DANO COM FUNÇÃO DE GEE PONDERADA, EXPRESSOS EM VALOR R\$ DE 2024

Poluente	Custo Original (USD/ton)	Custo Ajustado (BRL/ton, 2030)	Custo Ajustado (BRL/ton, 2050)	Fonte
GHG (CO ₂ + CH ₄ + N ₂ O)	Composite	R\$267.86	R\$889.36	(EPA, 2023) e participações nas emissões de (Machado et al., 2020))
NO _x	7,000	R\$11,887.58	R\$37,878.97	(Dang & Mourougane, 2014)
MP _{2.5}	30,000	R\$43,512.69	R\$146,509.09	(Banco Mundial, 2022)
CO	1,050	R\$6,456.32	R\$20,569.98	Escalado a partir do NO _x
HCs	4,500	R\$6,188.30	R\$19,723.63	Escalado a partir do MP _{2.5}

TABELA 7 – CUSTO ECONÔMICO EVITADO OU ADICIONADO POR POLUENTE EM 2030 E 2050 (EM MILHÕES, EXPRESSO EM VALOR R\$ DE 2024)

Cenário	Ano	GEE	NO _x	MP _{2.5}	CO	HCs	Total
Elétrico a Bateria	2030	-960.9	-19.60	-1.30	-0.8	-0.4	-982.9
	2050	-4895.1	-124.8	-6.1	-5	-1.7	-5032.8
Célula de Combustível (Hidrogênio)	2030	-480.4	-6.5	-0.6	-0.8	-0.4	-488.7
	2050	-2871.5	-41.6	-3.7	-4.6	-1.5	-2922.8
Hybrid Diesel	2030	-128.1	-15.7	-0.8	-0.7	-0.1	-145.4
	2050	-256.3	-38.7	-1.3	-1.4	-0.3	-298
GNL	2030	-16	6.5	-0.8	1.1	0.1	-9.1
	2050	-106.4	41.6	-1.3	7.2	0.4	-58.5
GNC	2030	640.9	2.6	-0.3	2.9	0	646.1
	2050	3726.2	20.8	-2.1	18.2	0.2	3763.2
Biodiesel	2030	32	6.5	0.4	37.6	0.2	76.7
	2050	213.2	41.6	2.8	239.9	1	498.5

TABELA 8 – CUSTO ECONÔMICO EVITADO OU ADICIONADO POR POLUENTE EM 2030 E 2050 EXPRESSO EM VALOR R\$ DE 2024, EXCLUINDO GEE

Cenário	Ano	Impacto total (mi R\$)	Total de Emissões de Poluentes Evitadas (ton)	Impacto por Ton-elada (mi de R\$/ton)
Elétrico a Bateria	2030	-22.06	1,867.10	-11.82
	2050	-137.67	3,668.30	-37.53
Célula de Combustível (Hidrogênio)	2030	-8.31	743.6	-11.17
	2050	-51.39	1,422.90	-36.12
Híbrido Diesel	2030	-17.28	1,457.10	-11.86
	2050	-103.23	2,793.50	-36.96
GNL	2030	8.27	714.5	11.57
	2050	49.87	1,438.70	34.67
GNC	2030	5.19	660.1	7.86
	2050	37.04	1,430.30	25.91
Biodiesel	2030	44.72	6,415.80	6.97
	2050	285.32	12,831.50	22.23

Tecnologias elétricas: benefícios significativos a longo prazo

A transição para sistemas de transporte de carga movidos a baterias elétricas e células de combustível de hidrogênio oferece benefícios econômicos e ambientais significativos a longo prazo. Conforme observado na análise do cenário de veículos elétricos a bateria, os benefícios econômicos decorrentes dos custos evitados (ou seja, as reduções nos danos à saúde pública e ao meio ambiente) aumentam substancialmente ao longo do tempo. Especificamente, o custo evitado por tonelada melhora de $-11,82 \times 10^3$ R\$/tonelada em 2030 para $-37,53 \times 10^3$ R\$/tonelada em 2050. Da mesma forma, a tecnologia de célula de combustível elétrica apresenta uma tendência comparável, com seu custo evitado por tonelada aumentando de $-11,17 \times 10^3$ R\$/tonelada em 2030 para $-36,12 \times 10^3$ R\$/tonelada em 2050. Essas descobertas sugerem que, à medida que com o amadurecimento e expansão dessas tecnologias, a redução acumulada nas emissões de NOx, MP_{2.5}, CO e HCs se traduz em maiores economias ao longo do tempo. A análise indica que **o benefício de longo prazo por tonelada de emissões evitadas para as tecnologias elétricas melhora a uma taxa mais elevada em comparação com outras alternativas de veículos.** A redução desses poluentes gera não apenas benefícios ambientais, mas também economias na saúde pública na forma de menos doenças relacionadas à qualidade do ar, contribuindo ainda mais para a redução geral dos custos econômicos associados às emissões do transporte rodoviário de carga.

No entanto, o documento de política conjunta “Décarboner le transport routier de marchandises”, publicado em março de 2025 pelo Conseil d'Analyse Économique (CAE) da França e pelo Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung (GCEE) da Alemanha, apresenta uma posição clara sobre o futuro da descarbonização do transporte de carga na Europa. O relatório recomenda priorizar caminhões elétricos a bateria (BETs) como a principal solução tecnológica, citando sua atual relação custo-benefício, prontidão operacional e alinhamento com a estrutura em evolução da logística de frete. Ele enfatiza que os BETs já alcançaram a paridade do custo total de propriedade com caminhões a diesel na França e na Alemanha, e que o investimento público deve se concentrar na rápida implantação de infraestrutura de recarga em escala de megawatts ao longo dos principais corredores. Em contrapartida, os caminhões com célula de combustível a hidrogênio recebem um apoio notavelmente menor no relatório, não porque não tenham potencial, mas porque sua implantação enfrenta obstáculos significativos relacionados a custo, eficiência energética e viabilidade da infraestrutura.

A postura cautelosa do documento em relação ao hidrogênio reflete uma mudança mais ampla na política europeia e nas expectativas do mercado. Embora o hidrogênio já tenha sido considerado uma alternativa promissora para o transporte de carga de longa distância, avaliações recentes — incluindo as de nossa própria análise — mostram que os benefícios reais de redução de emissões e o desempenho econômico estão cada vez mais favorecendo os sistemas de propulsão elétricos. Em particular, nossos dados demonstram que as tecnologias de baterias elétricas e de célula de combustível apresentaram inicialmente desempenho semelhante em termos de custo por tonelada de emissões evitadas, mas essas conclusões

se baseiam em premissas que já estão evoluindo. Os custos de infraestrutura, os requisitos de consumo de energia e a disponibilidade limitada de hidrogênio verde estão alterando o panorama comparativo. A recomendação da CAE-GCEE reflete esse contexto dinâmico: não se trata de uma rejeição ao hidrogênio, mas de uma priorização baseada em evidências do caminho mais viável a seguir nas condições atuais e previsíveis. Isso reforça a necessidade de reavaliar continuamente as análises baseadas em cenários à medida que as tecnologias amadurecem e os ambientes políticos mudam (CAE & GCEE, 2025).

Do ponto de vista das políticas públicas, esses resultados indicam claramente a alocação estratégica de recursos e incentivos para a eletrificação do transporte de carga. Ao fazer a transição para tecnologias de veículos elétricos a bateria e de célula de combustível de hidrogênio, os governos podem não apenas melhorar os resultados ambientais, mas também promover a resiliência econômica de longo prazo, mitigando os custos associados às emissões de poluentes.

Híbrido a diesel: benefício econômico limitado

O cenário do diesel híbrido apresenta um quadro econômico misto. Os resultados mostram que o custo evitado por tonelada em 2030 é de $-11,86 \times 10^3$ R\$/tonelada, o que é comparável às alternativas elétricas no curto prazo. No entanto, até 2050, esse benefício diminui significativamente, com o custo evitado por tonelada caindo para $-36,96 \times 10^3$ R\$/tonelada. Isso representa um benefício muito menor em comparação com as soluções totalmente elétricas, sugerindo que a tecnologia híbrida, embora inicialmente promissora, não oferece as mesmas vantagens de longo prazo que a eletrificação.

Apesar de sua capacidade de reduzir as emissões em relação ao diesel convencional, o diesel híbrido não captura totalmente os amplos benefícios de longo prazo alcançados pelos sistemas elétricos. A melhoria relativamente modesta ao longo do tempo indica que, embora as soluções híbridas possam servir como uma tecnologia de transição, elas não chegam a oferecer uma solução sustentável e descarbonizada para o transporte de carga. Consequentemente, os formuladores de políticas devem considerar as tecnologias híbridas como um passo intermediário, e não como uma solução abrangente para alcançar a descarbonização de longo prazo.

Alternativas baseadas em combustíveis fósseis: aumento dos custos econômicos

Em contraste com o desempenho mais favorável das tecnologias elétricas, alternativas baseadas em combustíveis fósseis, como GNL, GNC e combustíveis parcialmente renováveis, como o biodiesel, estão associadas a custos econômicos mais elevados relacionados às emissões de poluentes. Por exemplo, o cenário de GNL mostra um impacto de $34,30 \times 10^3$ R\$/tonelada em 2030, aumentando para $108,70 \times 10^3$ R\$/tonelada até 2050. Da mesma forma, os cenários de GNV e biodiesel apresentam custos positivos por tonelada, sugerindo que esses combus-

tíveis geram danos ambientais e à saúde pública mais elevados quando comparados à linha de base do diesel. Esses resultados são impulsionados principalmente pelas emissões contínuas de poluentes como NO_x, MP_{2.5}, CO e hidrocarbonetos, que são mitigados de forma menos eficaz nas tecnologias baseadas em combustão.

Embora esses combustíveis possam oferecer melhorias incrementais em contextos operacionais específicos, os dados sugerem que eles são menos eficazes na redução de encargos econômicos e ambientais de longo prazo. Se tais alternativas continuarem a fazer parte do mix de transporte de carga, seu uso pode exigir a aplicação de medidas de controle complementares para gerenciar a exposição a poluentes e os impactos na saúde. Ao mesmo tempo, a transição mais ampla para soluções de frete de baixa emissão envolve a superação de várias barreiras — incluindo alto investimento inicial, prontidão da infraestrutura e disponibilidade de tecnologia. Nesse contexto, as tecnologias elétricas parecem proporcionar reduções mais consistentes nos custos relacionados aos poluentes, particularmente no longo prazo. Essas tendências podem ser úteis para orientar o planejamento futuro e as decisões de investimento relacionadas à descarbonização do transporte de carga.

Argumentos a favor da eletrificação: o setor de transporte pesado do Brasil

A transição global para veículos com emissão zero (ZEVs) está se acelerando, impulsionada pela urgência ambiental, pelas oportunidades econômicas e pelos benefícios sociais. No entanto, a integração de veículos pesados com emissão zero (HDVs) no sistema de transporte de carga do Brasil ainda se encontra em um estágio inicial. De acordo com o ICCT (Conselho Internacional de Transporte Limpo, 2025), em 2021, os veículos com emissão zero representavam apenas 0,1% das vendas de caminhões de médio porte novos e apenas 0,2% das vendas de caminhões pesados novos no Brasil. Em comparação, a China atingiu 1,9% para caminhões de médio porte e 0,8% para caminhões pesados, enquanto a União Europeia alcançou 3,3% para caminhões de médio porte e 0,2% para caminhões pesados. Até mesmo os Estados Unidos, um mercado fortemente dependente do diesel, igualaram o modesto nível de eletrificação de caminhões pesados do Brasil. Essas estatísticas destacam a lacuna substancial entre o Brasil e os principais mercados globais, ressaltando a necessidade de intervenções políticas aceleradas e investimentos direcionados para impulsionar as taxas de adoção.

Olhando para o futuro, o ICCT traça três cenários distintos para a adoção de caminhões com emissão zero no Brasil até 2050. Seguindo a trajetória política atual, apenas 18% das vendas de caminhões novos no Brasil seriam de veículos com emissão zero até meados do século. No entanto, com maior impulso político e propostas de políticas mais robustas, os caminhões ZEV poderiam representar aproximadamente 37% das vendas. No cenário mais ambicioso — assumindo total comprometimento político e apoio regulatório robusto — o Brasil poderia atingir uma participação de 100% nas vendas de caminhões novos com emissão zero até 2050. Essas projeções ilustram claramente que, sem

mudanças políticas significativas, a adoção da tecnologia ZEV pelo Brasil permanecerá muito abaixo dos limites necessários para alcançar uma descarbonização substancial do setor de transportes.

Várias barreiras importantes inibem atualmente uma eletrificação mais rápida dos caminhões pesados no Brasil. Uma das barreiras mais significativas são os altos custos iniciais associados aos caminhões elétricos, que podem ser de 50% a 70% mais elevados do que os caminhões tradicionais movidos a diesel. Além disso, a infraestrutura de recarga subdesenvolvida do Brasil restringe severamente a viabilidade da adoção de caminhões de emissão zero para operações de longa distância. A falta de um marco normativo nacional robusto ou de mandatos juridicamente vinculativos para a eliminação gradual dos caminhões a diesel contribui ainda mais para a incerteza do mercado, dissuadindo fabricantes e operadores de frotas de investir em tecnologias de emissão zero. Por fim, a dependência contínua do Brasil do diesel — uma commodity frequentemente subsidiada e com preço competitivo — reduz ainda mais os incentivos para que os operadores de frotas façam a transição para caminhões elétricos, reforçando o status quo.

A superação das principais barreiras à adoção de tecnologias de frete com emissão zero no Brasil pode envolver uma combinação de medidas regulatórias, de infraestrutura e financeiras. Uma abordagem possível envolve a introdução de metas de vendas de veículos com emissão zero (ZEV), como observado em regiões como a Califórnia, a União Europeia e o Canadá. Estabelecer um cronograma para a eliminação gradual das vendas de caminhões a diesel novos — possivelmente até 2040 — poderia ajudar a proporcionar clareza ao mercado e apoiar o planejamento de investimentos de longo prazo. O desenvolvimento de infraestrutura é outro elemento importante. Parcerias público-privadas poderiam facilitar a implantação de corredores de recarga em rodovias e redes de reabastecimento de hidrogênio para garantir cobertura adequada para operadores de frete de longa distância.

Paralelamente, mecanismos financeiros como subsídios, incentivos fiscais ou financiamento preferencial poderiam ajudar a reduzir a barreira do custo inicial associada à conversão da frota. Exemplos internacionais, incluindo os da China, sugerem que tais instrumentos podem desempenhar um papel na aceleração da adoção de veículos elétricos de carga. Além disso, ajustes nos marcos tributários existentes sobre combustíveis, incluindo a precificação do carbono ou a realocação de subsídios ao diesel para infraestrutura de baixa emissão, podem influenciar a competitividade econômica relativa das opções de emissão zero.

Além de superar essas barreiras, a eletrificação do setor de transporte pesado oferece amplos benefícios ambientais, econômicos e sociais para o Brasil. Do ponto de vista ambiental, caminhões de emissão zero não produzem poluentes locais, melhorando a qualidade do ar urbano e reduzindo doenças respiratórias relacionadas. Além disso, considerando a rede elétrica brasileira, fortemente baseada em energias renováveis — com aproximadamente 80% do fornecimento proveniente de hidrelétricas, eólica e solar (IEA, 2023) —, as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida dos caminhões elétricos são significativamente menores do que as alternativas a diesel, proporcionando um benefício ainda

maior de mitigação climática à medida que a rede continua a se descarbonizar. Estudos demonstraram que um caminhão elétrico de carga pesada operando no Brasil pode reduzir as emissões de GEE em mais de 75% em comparação com um caminhão a diesel, quando se leva em conta o uso de energia e as emissões ao longo do ciclo de vida (IEA-EPE, 2021). Além disso, a natureza silenciosa dos sistemas de transmissão elétricos ajuda a reduzir a poluição sonora em áreas urbanas, beneficiando tanto os motoristas quanto os residentes locais.

A eletrificação também oferece vantagens econômicas substanciais. Os sistemas de transmissão elétricos convertem 70–90% da energia da bateria em movimento, em comparação com apenas 30–40% dos motores de combustão interna (International Council of Clean Transportation (ICCT), 2021b). Essa eficiência superior, combinada com custos de manutenção e operação mais baixos, resulta em um custo total de propriedade (TCO) menor ao longo da vida útil do veículo, conforme demonstrado por diversos estudos na Europa (Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2023a), nos Estados Unidos (Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2023b) e na China (Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2021a). Além disso, a estabilidade dos preços da eletricidade e a menor dependência do diesel importado contribuem ainda mais para a resiliência econômica.

As operadoras de frotas também podem obter economias substanciais ao implementar estratégias de recarga inteligente, que otimizam o uso de eletricidade e reduzem custos. O ICCT relata que as operadoras de frotas que utilizam sistemas de recarga inteligente podem economizar até € 15.000 por ano, ou aproximadamente 10% a 15% dos custos totais de energia para uma frota de dez caminhões elétricos (Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2021b). Essas economias são particularmente relevantes no Brasil, onde a estabilidade dos preços da energia é uma preocupação fundamental para os operadores de logística. Ao contrário do diesel e dos biocombustíveis, que estão sujeitos a flutuações globais de preços e dependências de importação, a eletricidade no Brasil é gerada em grande parte internamente a partir de fontes renováveis, garantindo um fornecimento de energia estável e previsível.

Além disso, o crescimento das indústrias nacionais na produção de baterias e na fabricação de veículos elétricos apresenta oportunidades significativas para a criação de empregos e a liderança tecnológica no Brasil. Esses benefícios estão alinhados às tendências globais em transporte sustentável e posicionam o Brasil para ser competitivo em mercados internacionais cada vez mais focados em cadeias de suprimentos de baixo carbono.

A transição para veículos de carga elétricos não apenas promove economia direta de custos, mas também abre oportunidades econômicas mais amplas.

O Brasil, rico em lítio e níquel, está pronto para se tornar líder na produção de baterias e componentes para veículos elétricos (SupplyChain, 2025). Ao investir na fabricação nacional de baterias e na produção de caminhões elétricos, o país pode reduzir sua dependência de importações e, ao mesmo tempo, criar novos empregos nas indústrias de tecnologia limpa. A expansão da infraestrutura de recarga elétrica – como estações de recarga em rodovias e atualizações

da rede inteligente – estimulará investimentos no setor de energia e impulsionará o emprego no desenvolvimento de infraestrutura.

Portanto, do ponto de vista social, a transição para veículos de carga elétricos também apoia a criação de empregos em setores emergentes, exigindo programas de treinamento abrangentes para técnicos, mecânicos e profissionais de logística para desenvolver expertise em sistemas de transmissão elétrica, sistemas de baterias e infraestrutura de recarga. O desenvolvimento da força de trabalho é essencial para garantir uma transição suave e proporcionar empregos estáveis e de alta qualidade na economia verde.

Alinhar o setor de frete do Brasil às tendências globais de eletrificação fortalecerá sua competitividade internacional, à medida que grandes mercados como a União Europeia e os Estados Unidos adotam rapidamente veículos com emissão zero. A adoção antecipada posicionará os fabricantes e operadores de frotas brasileiras para atender aos padrões globais de sustentabilidade. Para liberar todo o potencial da eletrificação, são necessários forte apoio político, investimentos estratégicos e colaboração entre órgãos governamentais, líderes do setor e fornecedores de energia, incluindo metas para veículos de emissão zero, expansão da infraestrutura de recarga e incentivos financeiros.

Abastecimento responsável e reciclagem de minerais para baterias no Brasil: mineração, demanda e sustentabilidade

À medida que a transição global para veículos elétricos (VEs) se acelera, a demanda por minerais essenciais para baterias – como lítio, níquel, cobalto e manganês – disparou. No Brasil, um país com reservas minerais substanciais e uma longa tradição de mineração, a necessidade de ampliar a produção e, ao mesmo tempo, garantir a sustentabilidade ambiental e social tornou-se cada vez mais urgente.

Várias iniciativas e estudos destacam a importância do abastecimento responsável e de estratégias robustas de reciclagem para atender a essa demanda.

De acordo com a Lead The Charge (Lead the Charge, 2023), as empresas devem aderir a rigorosos padrões ambientais, de direitos humanos e de governança, bem como investir em tecnologias que aumentem o potencial de reciclagem e recuperação. Essa estrutura fornece um valioso roteiro para o setor de mineração do Brasil, que busca responder à demanda global ao mesmo tempo em que protege seus ricos ecossistemas e comunidades vulneráveis.

Paralelamente, o Conselho Internacional de Transporte Limpo publicou uma análise sobre os materiais para baterias de veículos elétricos (ICCT, 2024), destacando que a demanda atual e futura por esses minerais desafiará as cadeias de abastecimento. O relatório ressalta que o crescimento sustentável da produção de veículos elétricos depende não só da extração primária, mas também da mitigação dos riscos via práticas de mineração melhores, cadeias transparentes e cooperação internacional.

Complementando essas ideias, o Rocky Mountain Institute (RMI, 2024) apresentou o conceito de “Ciclo de Minerais para Baterias”, que

promove uma economia circular na produção de baterias. O RMI argumenta que aumentar a reciclagem e recuperar minerais de baterias usadas pode reduzir a pressão sobre a mineração primária.

No Brasil, onde a mineração tem histórico de desafios ambientais e sociais, essas iniciativas são cruciais. Reguladores e setores estão mais conscientes de que o aumento da produção de minerais para baterias deve vir com salvaguardas ambientais e compromisso com o abastecimento responsável (Krenak, 2023).

Em resumo, para suprir a demanda crescente por baterias para veículos elétricos e preservar o meio ambiente, o Brasil precisa adotar estratégias responsáveis e reciclagem. Isso inclui melhorar a mineração, aumentar a transparência e promover a economia circular. Com políticas coordenadas, indústria ativa e cooperação internacional, o Brasil pode ser protagonista na transição energética, minimizando impactos negativos da mineração.

Tendências globais e casos de sucesso na eletrificação de caminhões pesados

Os avanços globais na eletrificação de caminhões fornecem um forte argumento para a transição de veículos a diesel para veículos elétricos, oferecendo benefícios ambientais, econômicos e sociais significativos. Esses avanços foram documentados em várias regiões e oferecem lições valiosas para o setor de transporte pesado do Brasil, que busca acelerar sua transição para veículos de emissão zero (ZEV).

Na Alemanha, por exemplo, a iniciativa “Power to the Road” está em andamento para construir uma rede nacional de recarga rápida para veículos elétricos pesados. Esse projeto ambicioso visa estabelecer 350 pontos de recarga rápida ao longo de aproximadamente 95% das rodovias federais do país, com o objetivo de descarbonizar o transporte até 2045 (Riham Alkousaa, 2024). A estratégia da Alemanha também inclui a meta de abastecer um terço de seu transporte rodoviário com combustíveis elétricos ou sintéticos até 2030. Essa abordagem abrangente não apenas demonstra a viabilidade tecnológica da eletrificação de veículos pesados, mas também ressalta o papel fundamental das parcerias público-privadas coordenadas na construção da infraestrutura necessária.

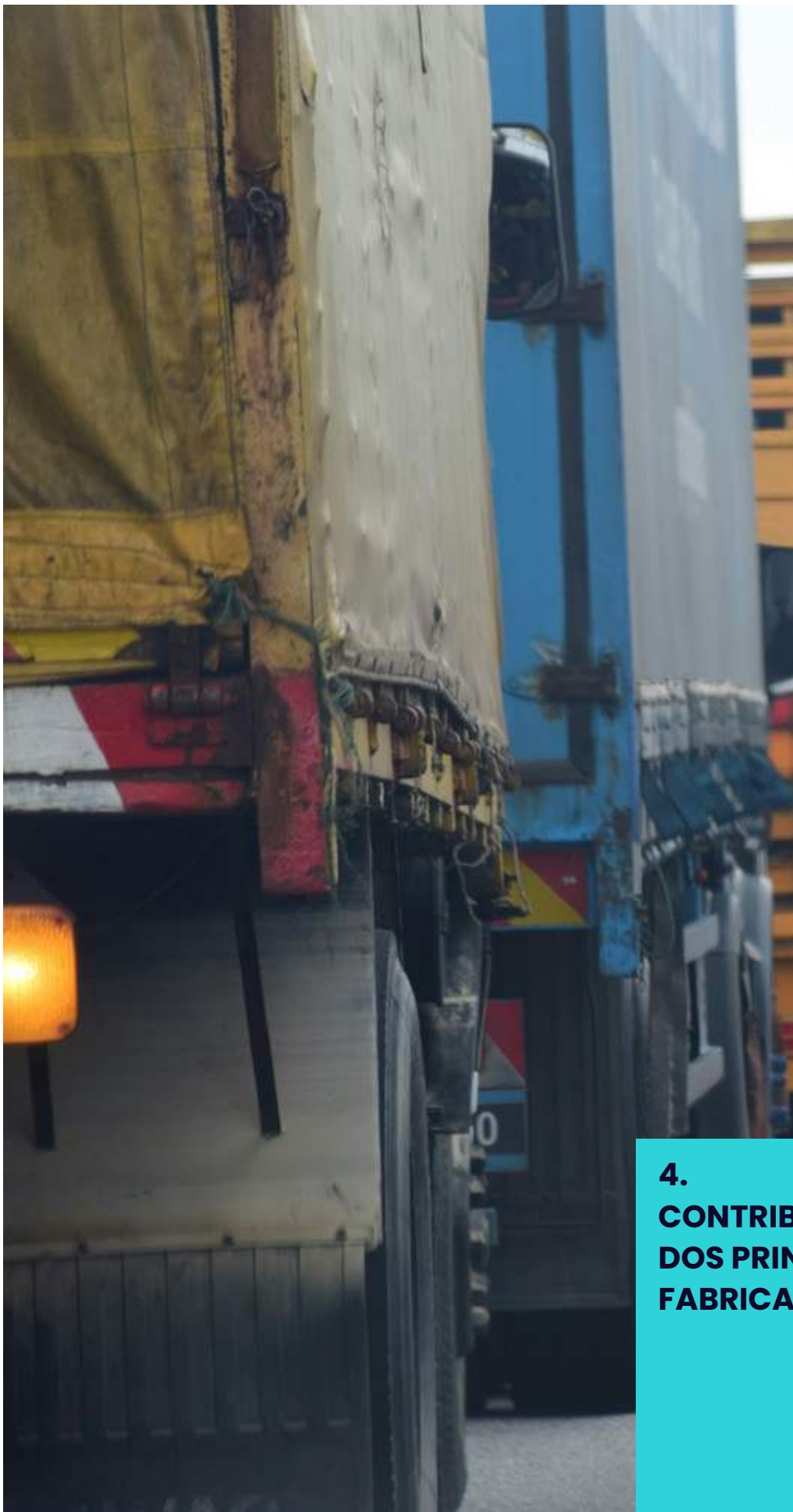
A Suécia oferece outro exemplo convincente. A Volvo Trucks está se preparando para lançar uma nova versão de longo alcance de seu caminhão FH Electric no segundo semestre de 2025. Estima-se que esse novo modelo possa percorrer até 600 quilômetros (373 milhas) com uma única carga – o que representa o dobro da autonomia dos modelos atuais de caminhões elétricos (Volvo Trucks, 2024a). O alcance ampliado resolve um dos principais desafios do setor de veículos pesados, tornando os caminhões elétricos mais adequados para o transporte inter-regional e de longa distância e sinalizando um avanço significativo na tecnologia de caminhões elétricos.

No Reino Unido, os esforços para acelerar a eletrificação assumiram uma forma comercial proeminente. A Amazon, por exemplo, fez um pe-

dido de mais de 150 veículos pesados elétricos, incluindo mais de 140 caminhões Mercedes-Benz eActros 600 e oito caminhões Volvo FM Electric. Com cada veículo capaz de percorrer aproximadamente 500 quilômetros (310 milhas) com uma única carga e recarregar em cerca de uma hora, essa iniciativa representa a maior frota de caminhões com emissão zero já estabelecida no Reino Unido. Essa medida ousada está alinhada com o compromisso mais amplo da Amazon de atingir emissões líquidas zero até 2040 e demonstra como o investimento do setor privado pode impulsionar o progresso na adoção de veículos de emissão zero (ZEV) (Chris Roe, 2024).

Enquanto isso, nos Estados Unidos, medidas políticas também estão catalisando a eletrificação de veículos pesados. O Conselho de Recursos Atmosféricos da Califórnia implementou a Regulamentação de Caminhões Limpos Avançados, que determina a transição para caminhões com emissão zero e estabelece a meta de 100% de vendas de ZEVs até 2035. Da mesma forma, o Estado de Nova York está investindo fortemente em incentivos e infraestrutura de recarga para promover a adoção de caminhões elétricos nos segmentos de médio e grande porte. Essas medidas regulatórias e financeiras têm como objetivo superar os altos custos iniciais e as lacunas de infraestrutura, além de reduzir a dependência do diesel – um componente crítico na transição para um transporte de carga mais sustentável (Estado de Nova York, 2023).

Esses exemplos globais, em conjunto, ilustram que a eletrificação de caminhões não é apenas tecnologicamente viável, mas também cada vez mais competitiva economicamente. Eles enfatizam a importância de uma infraestrutura robusta, políticas de apoio e parcerias público-privadas. Além disso, essas iniciativas ajudam a dissipar equívocos de que os veículos elétricos são tão “poluentes” quanto a rede elétrica que os carrega. Em regiões com uma alta participação de energia renovável – como o Brasil, onde aproximadamente 80% da eletricidade é derivada de fontes renováveis – os benefícios ambientais da eletrificação são ainda mais pronunciados. Caminhões elétricos não emitem poluição de escapamento, reduzindo significativamente poluentes atmosféricos locais como óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas em suspensão (MP), que são os principais contribuintes para a poluição atmosférica urbana e resultados adversos à saúde pública (Kunak, 2023).



4. CONTRIBUIÇÕES DOS PRINCIPAIS FABRICANTES

Os fabricantes globais podem desempenhar um papel importante no avanço da eletrificação de caminhões, e suas iniciativas internacionais oferecem uma série de lições e desafios relevantes para o setor de transporte pesado do Brasil. No entanto, embora esses desenvolvimentos ilustrem o progresso em determinados mercados, as experiências de fabricantes como Volvo Trucks, Daimler Truck, Tesla e Scania também revelam uma série de incertezas e obstáculos que precisam ser cuidadosamente considerados.

A Volvo Trucks, por exemplo, desenvolveu uma gama de modelos de caminhões elétricos destinados a aplicações de transporte de carga urbana, regional e de longa distância. A empresa pretende que 50% de suas vendas globais de



caminhões sejam elétricas até 2030 (Volvo Trucks, 2024c). Esse compromisso reflete tanto o potencial de avanço tecnológico quanto as pressões do mercado por soluções de baixa emissão. No entanto, é importante observar que essas metas ambiciosas dependem da superação de barreiras significativas, como altos custos iniciais e limitações de infraestrutura. Embora os planos da Volvo indiquem progresso, seu sucesso em alcançar ampla adoção comercial ainda precisa ser comprovado. No Brasil, por exemplo, a empresa começou a testar dez caminhões 100% elétricos em 2024 (Volvo Trucks,

2024b), implantando-os nas operações logísticas de seu próprio complexo industrial em Curitiba. No entanto, a Volvo ainda não articulou planos claros para atingir a meta de 50% de vendas de caminhões elétricos ou para priorizar o Brasil como um mercado emergente-chave para sua estratégia de veículos elétricos.

A Daimler Truck lançou recentemente o Mercedes-Benz eActros 600, um caminhão elétrico de grande porte com autonomia estimada de cerca de 500 quilômetros por carga, com produção em série prevista para começar no final de 2024 na Alemanha. Em 2019, a empresa anunciou sua estratégia de incluir veículos elétricos a bateria produzidos em série em seu portfólio nos principais

mercados – Europa, EUA e Japão – com o objetivo de alcançar uma frota de veículos novos totalmente neutra em carbono nessas regiões até 2039 (Daimler Trucks, 2019). Com uma participação de 21% no mercado interno brasileiro em 2023 (HD + MD), a empresa ainda não anunciou seus planos e metas de eletrificação para o mercado brasileiro (FENABRAVE, 2023).

A Scania tem se concentrado no desenvolvimento de plataformas modulares para caminhões elétricos, que podem ser adaptadas a diversas necessidades operacionais, incluindo entregas urbanas e distribuição regional (Scania AB, 2019). Essa abordagem flexível pode permitir soluções mais personalizadas; no entanto, a penetração no mercado em diversos ambientes operacionais permanece incerta. A eficácia dos projetos modulares na redução dos custos totais de propriedade e na garantia de confiabilidade em diferentes aplicações de transporte de carga ainda não foi totalmente comprovada em operações comerciais em grande escala.

De modo geral, as contribuições desses principais fabricantes revelam que, apesar dos avanços tecnológicos significativos, persistem ainda desafios relacionados a custos, infraestrutura e incertezas de mercado. As experiências de fabricantes globais ressaltam que alcançar a eletrificação generalizada no setor de transporte pesado não é apenas um desafio técnico, mas também requer estruturas políticas coerentes, investimentos substanciais em infraestrutura e avaliações econômicas cuidadosas. Para o Brasil, esses exemplos globais sugerem que, embora o caminho tecnológico para a eletrificação de caminhões seja promissor, replicar tal progresso exigirá a superação de barreiras sistêmicas significativas e o alinhamento de incentivos entre os setores público e privado.

(MacDonnell, 2021) realizaram uma Análise dos Compromissos para Veículos de Média e Pesada Carga com Emissão Zero a partir de 2021. O relatório destaca os principais compromissos, metas e estratégias dos Fabricantes Globais, resumidos na Tabela 9.

TABELA 9 – RESUMO DO COMPROMISSO COM METAS DE EMISSÃO ZERO PARA O SETOR DE CAMINHÕES PRINCIPAIS FABRICANTES

Fabricante	Meta para 2040	Meta para 2050
Daimler Truck	100% de vendas ZEV nos principais mercados em 2039	Frota neutra em CO ₂ nos principais mercados
Volvo Trucks	50% das vendas globais sejam ZEVs	100% das vendas de veículos livres de combustíveis fósseis globalmente
Scania	50% das vendas globais sejam ZEVs	100% da frota livre de combustíveis fósseis globalmente
MAN	Nenhum compromisso específico para 2040	100% das vendas ZEV globalmente
Iveco	Nenhum compromisso específico para 2040	Frota neutra em CO ₂ nos principais mercados
Ford Trucks	00% das vendas de veículos com emissão zero na Europa	Nenhum compromisso específico para 2050
Volta Trucks	100% das vendas ZEV	Nenhum compromisso específico para 2050

Esses compromissos foram estabelecidos por meio de diversos comunicados públicos, relatórios de sustentabilidade, planos de ação corporativos e participação ativa em iniciativas climáticas globais. Muitos fabricantes, incluindo a Daimler, a Volvo e a Scania, estabeleceram metas corporativas voluntárias ao anunciar objetivos de sustentabilidade autoimpostos em seus relatórios de sustentabilidade corporativa, apresentações para investidores e comunicados à imprensa. Esses compromissos estão alinhados com estratégias corporativas mais amplas de emissões líquidas zero e com as metas ESG (Ambiental, Social e de Governança).

Além das metas voluntárias, várias empresas aderiram a compromissos setoriais e iniciativas globais. Por exemplo, algumas assinaram o Memorando de Entendimento (MoU) Global sobre Veículos de Médio e Grande Porte com Emissão Zero, com a meta de 100% de vendas de ZEVs até 2040, enquanto outras, como a Volvo e a Daimler, participaram do The Climate Pledge – uma iniciativa colaborativa liderada pela Amazon e pela Global Optimism com o objetivo de atingir emissões líquidas de carbono zero até 2040.

A conformidade regulatória e os requisitos de mercado também desempenham um papel significativo. **Em regiões como a Europa, os EUA e a China, regulamentações mais rigorosas sobre emissões de CO₂ e mandatos de ZEV estão levando os fabricantes a acelerar sua transição.** Como exemplo, a Ford Trucks se comprometeu com vendas 100% ZEV na Europa até 2040 para cumprir os objetivos do Acordo Verde da UE. Além disso, a pressão crescente de investidores e partes interessadas institucionais levou empresas como a Volvo e a Daimler a migrar para vendas de veículos de emissão zero, garantindo que permaneçam competitivas em um mercado onde grandes operadoras de frotas, como a Amazon e a Maersk, exigem soluções de transporte mais limpas.

Os avanços tecnológicos, impulsionados por investimentos internos em P&D e planos de desenvolvimento tecnológico detalhados, também são fundamentais para esses compromissos. Empresas como a MAN e a Iveco estão desenvolvendo plataformas de caminhões movidos a hidrogênio e bateria elétrica que influenciam diretamente suas metas de adoção de ZEVs, enquanto alguns fabricantes buscam frotas neutras em CO₂ combinando soluções movidas a bateria elétrica, célula de combustível de hidrogênio e biocombustível.

Especificamente, a Volvo se comprometeu a atingir 100% de vendas de veículos com emissão zero globalmente até 2040, alinhando-se ao Memorando de Entendimento Global sobre ZEVs que assinou, e tem como meta descarbonizar todo o seu portfólio de caminhões, substituindo caminhões movidos a diesel por veículos elétricos a bateria e a célula de combustível de hidrogênio. Seu objetivo de longo prazo é alcançar uma frota de veículos totalmente livre de combustíveis fósseis até 2050, trabalhando para uma cadeia de suprimentos com emissões líquidas de CO₂ zero, na qual tanto os caminhões quanto o processo de produção sejam totalmente neutros em carbono. Na mesma linha, a Daimler Truck se comprometeu a garantir que todos os novos caminhões e ônibus vendidos nos principais mercados sejam veículos de emissão zero até 2039, como parte de sua estratégia para se alinhar às metas climáticas e garantir competitividade de longo prazo nos mercados de transporte descarbonizados. A Daimler também tem como meta uma frota 100% neutra em CO₂ de caminhões e ônibus novos em todo o mundo até 2050 – um compromisso que vai além das vendas de caminhões para abranger operações logísticas, cadeias de suprimentos e unidades de produção. Sua estratégia inclui o lançamento de veículos elétricos a bateria, como o Mercedes-Benz eActros.

Outros fabricantes globais estão começando a demonstrar um impulso substancial na eletrificação do transporte pesado. Um dos indicadores mais claros dessa mudança é o desempenho da fabricante chinesa BYD, cujas vendas de caminhões elétricos cresceram rapidamente entre 2023 e 2024. De acordo com a Carbon Tracker (2024), as entregas de caminhões elétricos da BYD agora superam em muito as de fabricantes europeus estabelecidos, como a Daimler e a Volvo.

Esse aumento é atribuído não apenas a um lançamento de produtos mais agressivo, mas também a um modelo de fabricação verticalmente integrado que reduz custos e acelera o tempo de lançamento no mercado. Embora a expansão da empresa para os mercados internacionais não tenha sido isenta de controvérsias – incluindo o recente escrutínio sobre um projeto de fábrica no Brasil (Annabelle Liang, 2024) –, seu desempenho ilustra o ritmo em que novos participantes estão remodelando o cenário competitivo do transporte de carga com emissão zero.

Outra empresa em rápida ascensão é a Windrose, uma startup chinesa de caminhões elétricos que anunciou recentemente planos para estabelecer operações de montagem de caminhões nos Estados Unidos – uma iniciativa relativamente rara entre os fabricantes chineses de veículos elétricos. (Reuters, 2024c) O relatório observa que a carteira de pedidos da Windrose para 2024 já ultrapassa as entregas planejadas de caminhões elétricos por fabricantes tradicionais, como o Grupo Volvo e a Daimler. A Windrose pretende iniciar a implantação de seus caminhões nas estradas ainda este ano, sinalizando não apenas a prontidão

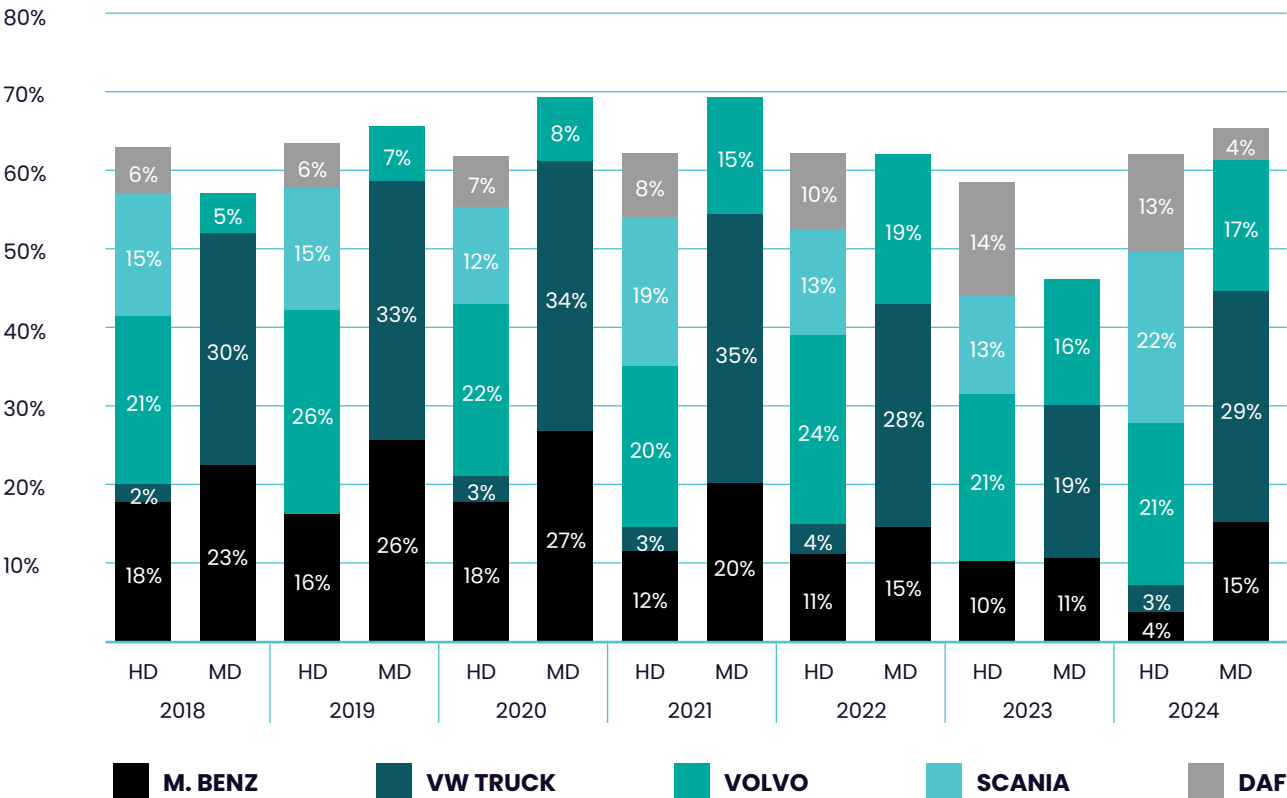
para a produção, mas também a crescente confiança entre as operadoras de logística na adoção de marcas não tradicionais. A capacidade da empresa de expandir rapidamente e garantir contratos nos mercados norte-americano e europeu reflete uma dinâmica em evolução no segmento de veículos pesados, onde a inovação e a agilidade da cadeia de suprimentos estão se tornando cada vez mais decisivas.

Esses desenvolvimentos contrastam com a aceleração mais lenta observada entre muitos fabricantes estabelecidos, que enfrentam restrições de sistemas legados e custos de transição mais elevados. Enquanto os OEMs tradicionais continuam a investir em eletrificação, o mercado parece estar mudando mais rapidamente do que algumas projeções haviam previsto. Os casos da BYD e da Windrose destacam como o panorama está sendo redefinido não apenas por mandatos políticos ou pela prontidão da infraestrutura, mas também por mudanças nas estratégias comerciais e na demanda dos clientes. À medida que os novos participantes demonstram a capacidade de escalar e fornecer soluções de frete elétrico a preços competitivos, seu papel na definição da descarbonização do frete rodoviário torna-se cada vez mais relevante tanto para os formuladores de políticas quanto para os observadores do setor.

Vale ressaltar que o Brasil não figura entre os principais países com políticas nacionais de ZEV para veículos de médio e grande porte, o que destaca uma área de potencial desenvolvimento para o país. A análise das tendências de participação de mercado entre os principais fabricantes de caminhões no Brasil de 2018 a 2024 (FENABRAVE, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024) destaca a dinâmica em evolução nos segmentos de caminhões pesados (HD) e médios (MD). Conforme ilustrado na Figura 3, Mercedes-Benz, Volvo, Scania, DAF e Volkswagen Truck passaram por flutuações significativas na participação de mercado nessas categorias. A Daimler Truck (Mercedes-Benz) apresentou uma tendência de declínio no segmento HD, caindo de 18% em 2018 para 4% em 2024. Por outro lado, a Volvo manteve uma posição relativamente estável, oscilando entre 20% e 26% no segmento HD, enquanto a Scania ganhou força recentemente, atingindo 22% em 2024. No segmento MD, a Volkswagen Truck liderou consistentemente o mercado, com sua participação variando entre 28% e 35% ao longo do período analisado.

Essas tendências refletem o cenário competitivo do setor e podem influenciar a adoção de tecnologias de eletrificação no Brasil. Empresas como a Volvo e a Scania, que estão investindo fortemente em caminhões elétricos globalmente, mantêm uma forte presença no mercado brasileiro, o que pode facilitar futuras transições tecnológicas. No entanto, a falta de compromissos claros com a eletrificação por parte de alguns fabricantes no mercado brasileiro sugere desafios adicionais para a descarbonização do transporte de carga no país.

FIGURA 3: TENDÊNCIAS DE PARTICIPAÇÃO DE MERCADO NOS SEGMENTOS DE CAMINHÕES PESADOS (HD) E MÉDIOS (MD) NO BRASIL (2018-2024)



Teoria da Mudança para o Brasil

Uma visão transformadora está surgindo para o setor de transporte pesado do Brasil – uma visão que prevê um sistema de caminhões totalmente eletrificado, capaz de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, melhorar a saúde pública e impulsionar o crescimento econômico. O objetivo final é criar um sistema de transporte de carga sustentável e resiliente por meio da eletrificação, mas alcançar esse resultado requer uma ação coordenada em vários domínios.

Um fator-chave nessa transformação é a liderança demonstrada pelos fabricantes de caminhões. Por exemplo, a Volkswagen Caminhões e Ônibus (VWCO) foi pioneira na produção de caminhões elétricos pesados no Brasil por meio de sua linha e-Delivery, que atualmente atende à logística urbana e de curta distância. Embora esses veículos sejam adequados principalmente para entregas urbanas, a plataforma estabelece as bases para a expansão para modelos mais pesados e de longa distância. Da mesma forma, a Volvo Trucks já entregou caminhões elétricos pesados no Brasil, incluindo seu modelo FH Electric, projetado para operações regionais de frete. Esses modelos foram adaptados às condições locais e têm sido adotados em vários mercados da América Latina, demonstrando a capacidade do Brasil de produzir veículos elétricos internamente (Volvo Trucks, 2023). A Scania também lançou seus caminhões elétricos de carga pesada, projetados para

distribuição regional e até mesmo aplicações em mineração. A abordagem modular da Scania permite a personalização dos veículos para atender a diferentes necessidades operacionais, embora a aceitação mais ampla do mercado ainda precise ser comprovada (Scania AB, 2019).

O apoio político e os incentivos financeiros representam outro pilar fundamental para a transição. Os incentivos fiscais de São Paulo para veículos elétricos, que atualmente reduzem os impostos sobre a compra de VEs, poderiam ser ampliados para abranger caminhões elétricos pesados, diminuindo assim o ônus financeiro para os operadores de frotas. Inspirando-se nas melhores práticas globais, como a Regulamentação de Caminhões Limpos Avançados (ACT) da Califórnia, que determina uma transição progressiva para a venda de caminhões com emissão zero – com a meta de 100% até 2035 (California Air Resources Board, 2020) –, o Brasil poderia considerar o estabelecimento de mandatos juridicamente vinculativos e a definição de uma meta nacional para eliminar gradualmente as vendas de caminhões a diesel novos. Estruturas semelhantes já estão em vigor na União Europeia, onde os padrões de emissão de CO₂ para veículos pesados, recentemente adotados, exigem uma redução de 90% nas emissões médias da frota de caminhões novos até 2050, acelerando efetivamente a transição para tecnologias de frete com emissão zero (Comissão Europeia, 2024). A introdução de tais políticas poderia ajudar a criar um ambiente regulatório previsível e estimular o investimento e o planejamento de longo prazo em todo o setor.

O desenvolvimento de infraestrutura também é essencial para acelerar a eletrificação dos caminhões. Por exemplo, a expansão da infraestrutura de recarga ao longo de corredores-chave de frete, como a BR-116 e a BR-101, é fundamental para apoiar operações de longa distância. Iniciativas como as estações de recarga renováveis da Neoenergia, que integram energia limpa às redes de recarga, ilustram o potencial de parcerias entre concessionárias e o governo para garantir que a infraestrutura de suporte aos caminhões elétricos seja ampla e sustentável (Neoenergia, 2024).

A colaboração público-privada reforça ainda mais esse esforço transformador. Notavelmente, a Ambev começou a integrar os caminhões e-Delivery da VWCO em sua frota urbana e está explorando o uso de caminhões elétricos para distribuição regional. Essa mudança não apenas oferece um modelo prático para outras empresas de logística, mas também sinaliza que grandes empresas privadas estão começando a internalizar os benefícios ambientais e econômicos da eletrificação. Além disso, programas-piloto liderados pela Maersk em São Paulo e Santa Catarina testaram a viabilidade de caminhões elétricos pesados para o transporte de contêineres. Essas iniciativas, embora ainda em estágios iniciais, fornecem dados valiosos sobre desempenho operacional e escalabilidade, informando futuras decisões de política e investimento (Maersk, 2023).

A conscientização do consumidor e o desenvolvimento do mercado também desempenham um papel fundamental. Destacar as vantagens do custo total de propriedade (TCO) – como custos mais baixos de combustível, manutenção reduzida e maior eficiência operacional – pode ajudar a construir um caso de negócios convincente para que as operadoras de frotas façam a transição para

caminhões elétricos. Além disso, as empresas que adotam a eletrificação podem se beneficiar de uma marca verde, que atrai clientes ecologicamente conscientes e se alinha às tendências globais de sustentabilidade. Programas de treinamento da força de trabalho também são necessários para garantir que motoristas e técnicos de manutenção estejam bem preparados para operar e fazer a manutenção das novas tecnologias de veículos elétricos, apoiando uma transição tranquila em todo o setor.

Em resumo, a teoria da mudança para o setor de transporte pesado do Brasil depende de uma abordagem multifacetada: liderança dos fabricantes, políticas de apoio e incentivos financeiros, desenvolvimento robusto de infraestrutura, parcerias público-privadas eficazes e engajamento ativo dos consumidores e da força de trabalho. Juntos, esses fatores podem criar um setor de transporte rodoviário pesado sustentável e eletrificado que reduza significativamente as emissões, melhore a saúde pública e impulsione o crescimento econômico. Embora os desafios sejam substanciais, o alinhamento com as melhores práticas globais — conforme demonstrado pelos principais atores na Europa, nos Estados Unidos e em outros mercados — pode guiar o Brasil rumo a um futuro resiliente e de baixo carbono.

Como as maiores fabricantes do Brasil podem ajudar a acelerar a transição para caminhões pesados elétricos?

A transição do Brasil para um setor de transporte pesado com emissão zero depende não apenas de marcos normativos robustos e investimentos em infraestrutura, mas também das contribuições proativas de suas maiores fabricantes. Ao alavancar as capacidades nacionais, investir em pesquisa e desenvolvimento (P&D), formar parcerias estratégicas público-privadas, criar condições políticas favoráveis e ser pioneiro em programas de crédito de carbono liderados pela indústria, o Brasil pode acelerar significativamente a eletrificação da frota de caminhões. As seções abaixo descrevem as principais alavancas disponíveis para os principais participantes do mercado.

Produção de baterias e investimento em P&D

Um dos desafios críticos na eletrificação de caminhões é o fornecimento e o custo das baterias. Fabricantes brasileiros como a Volkswagen Caminhões e Ônibus (VWCO), a Mercedes-Benz e a Scania estão bem posicionados para direcionar capital para a produção nacional de baterias e para P&D. O estabelecimento de fábricas locais de células reduziria a dependência de importações, diminuiria os custos de produção e geraria tecnologia adaptada às condições operacionais do Brasil. O recente lançamento pela BYD de uma fábrica de baterias de fosfato de lítio-ferro para ônibus elétricos na Bahia mostra que a produção local é viável e estrategicamente valiosa (BYD Company, 2023). Maiores gastos com P&D também poderiam melhorar a densidade energética, o desempenho do ciclo de carga e a durabilidade, fatores cruciais para aplicações em veículos pesados. Aprimorar a tecnologia de baterias dessa forma reduziria ainda mais os custos do ciclo de vida, impulsionando a aceitação no mercado de caminhões elétricos a bateria em relação aos a diesel.

Parcerias público-privadas para infraestrutura de recarga

A infraestrutura de recarga é outro pilar fundamental para a adoção em larga escala. Grandes operadoras de logística e frotas — Randon, JSL e Gerdau, por exemplo — podem colaborar com autoridades federais, estaduais e municipais para coinvestir em redes públicas de recarga rápida. Em São Paulo, a Enel X e fabricantes de ônibus já firmaram parceria para implantar carregadores de ônibus elétricos urbanos, fornecendo um modelo que poderia ser estendido a corredores de transporte de carga pesada (Enel, 2024). A implantação desse modelo ao longo de rodovias estratégicas, como a BR-116 e a BR-101, mitigaria a ansiedade de autonomia, otimizaria as operações e criaria uma base para a eletrificação nacional. Essas parcerias também têm o potencial de estimular a geração de empregos locais e facilitar a transferência de tecnologia entre os setores público e privado.

Envolvimento nas políticas e regulamentação favorável

Os fabricantes também podem moldar o panorama regulatório que sustenta as decisões de investimento de longo prazo. Instrumentos do lado da oferta — como normas vinculativas de desempenho em emissões de veículos e metas de vendas de caminhões com emissão zero — geram segurança no mercado e incentivam a convergência tecnológica em torno das soluções mais eficazes. Os fabricantes de caminhões do Brasil poderiam endossar publicamente caminhos baseados na ciência, inspirados no Regulamento de Caminhões Limpos Avançados (ACT) da Califórnia (California Air Resources Board, 2020) e nas normas de CO₂ da UE para veículos pesados (Comissão Europeia, 2024). O apoio ativo contrastaria com casos anteriores em que partes do setor automotivo global fizeram lobby por regras mais brandas ou pela dependência prolongada do biodiesel e do gás fóssil (InfluenceMap, 2024). Ao alinhar a defesa corporativa com os objetivos de descarbonização de longo prazo, os fabricantes ajudam a estabelecer condições equitativas e a reduzir o risco de investimentos ociosos em tecnologias de combustão transitórias.

Programas de Créditos de Carbono Liderados pela Indústria

Além da tecnologia e da infraestrutura, os fabricantes podem internalizar benefícios ambientais por meio de esquemas de créditos de carbono. Com base no precedente do RenovaBio no setor de biocombustíveis do Brasil e na prática da Tesla de vender créditos de emissão zero na Califórnia (Jennifer L, 2024), os fabricantes de caminhões poderiam criar uma plataforma setorial que recompensasse a adoção antecipada de caminhões elétricos. Os créditos gerados a partir de reduções de emissões verificadas compensariam os custos iniciais mais elevados e criariam um mecanismo financeiro transparente para a descarbonização em todas as cadeias de suprimentos.

Conclusão final e estudos e estudos de caso regionais

Os maiores fabricantes de caminhões do Brasil ocupam, portanto, uma posição central no avanço da eletrificação do transporte de carga. A produção local de baterias e a P&D podem eliminar uma barreira de custo fundamental; parcerias público-privadas para recarga resolvem as restrições de infraestrutura; o engajamento político pode garantir padrões de desempenho claros e ambiciosos; e esquemas de crédito de carbono podem facilitar a transição financeira para os operadores de frotas. A experiência da Europa, dos Estados Unidos e da China mostra que, quando regulamentações favoráveis e ações do setor privado coincidem, é possível alcançar a paridade do custo total de propriedade (TCO) entre caminhões a diesel e elétricos. Ao aplicar estratégias semelhantes, o Brasil poderia levar os caminhões elétricos a bateria à paridade de custos — proporcionando menores emissões, melhor qualidade do ar e novas oportunidades econômicas.

BIBLIOGRAFIA

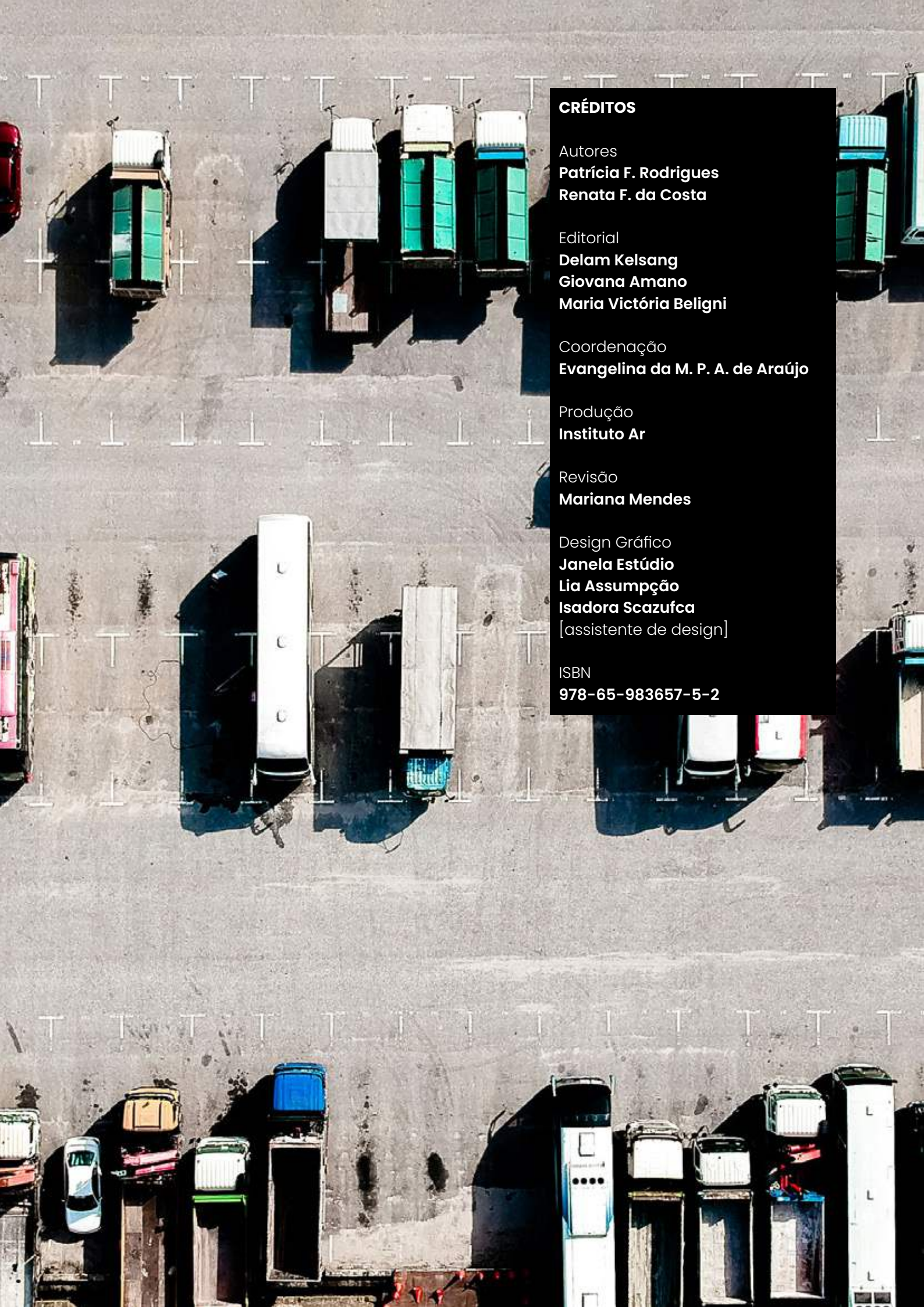
- ABIOVE. (n.d.). Biodiesel. <https://abiove.org.br/biodiesel-main/>
- Andrade, M. D. F., De Miranda, R. M., Fornaro, A., Kerr, A., Oyama, B., De Andre, P. A., & Saldiva, P. (2012). Vehicle emissions and PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 5(1), 79–88. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0104-5>
- Annabelle Liang. (2024). Brazil shuts BYD factory site over 'slavery' conditions. <https://www.bbc.com/news/articles/c8xj9jp57r2o>
- Barata, A. F. (2024). Social participation and mobility justice in Brazil. *Cadernos Metrópole*, 26(60), 465–487. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2024-6004.e>
- Bauer, G., Barbosa De Oliveira-Sales, E., & De Santis Bastos, P. A. (2024). Pollution in the Port Area and Respiratory Events in Santos, Sao Paulo, Brazil. *Epidemiology, Biostatistics, and Public Health*, 19(2). <https://doi.org/10.54103/2282-0930/26785>
- Bauer, G., Oliveira-Sales, E. B. D., Ramires, R. H. D. P., Maquigussa, E., & Bastos, P. A. D. S. (2024). A emissão de NO_x gerada pelos navios no Porto de Santos e a ocorrência de eventos de saúde relacionados a doenças respiratórias no Município de Santos. *Research, Society and Development*, 13(7), e6713746311. <https://doi.org/10.33448/rsd-v13i7.46311>
- Brasil. (2018). Portaria N° 2.200-SEI, de 27 de Dezembro de 2018. <https://www.gov.br/portaria2200sei>
- Ministério da Infraestrutura do Brasil. (2021). Diretrizes para o Programa de Modernização de Rodovias Federais—Inov@BR. https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transporte-terrestre/_inovabr/informacoes-gerais/imagens/manual-inov-br-2021.pdf
- Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços do Brasil. (2020). Rota 2030—Mobilidade e Logística. <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>
- Ministério do Meio Ambiente do Brasil. (2018). Resolução N° 490, de 16 de Novembro de 2018 – Proconve P8.
- Ministério de Minas e Energia do Brasil. (2017). RenovaBio. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>
- Ministério de Minas e Energia do Brasil. (2023). Balanço Energético Brasileiro 2023. <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>
- Ministério de Minas e Energia do Brasil. (2024a). Combustível do Futuro. <https://www.gov.br/mme/pt-br/combustivel-futuro>
- Ministério de Minas e Energia do Brasil. (2024b). Balanço Energético Nacional 2024. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>
- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil. (2022). Anuário Estatístico de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2022. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/oil-natural-gas-and-biofuels-statistical-yearbook-2022>
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). (2007). Programa Procaminhoneiro. https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/imprensa/noticias/conteudo/20070102_not001_07
- BYD Company. (2023, October 10). BYD chega à Bahia e lança pedra fundamental do complexo industrial de Camaçari. <https://www.byd.com/br/noticias-byd-brasil/byd-chega-na-bahia>
- CAE & GCEE. (2025, March). Décarboner le transport routier de marchandises. <https://www.cae-eco.fr/staticfiles/pdf/cae-svg-joint-statement-fret-250320-fr.pdf>
- California Air Resources Board. (2020). Advanced Clean Trucks Regulation. <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/advanced-clean-trucks>
- Carbon Tracker. (2024). Re-fleeting revolution: Delivering financial returns in the electric heavy-duty vehicle transition. <https://carbontracker.org/reports/re-fleeting-revolution-delivering-financial-returns-in-the-electric-heavy-duty-vehicle-transition/>
- Chiquetto, J. B., Alvim, D. S., Rozante, J. R., Faria, M., Rozante, V., & Gobo, J. P. A. (2021). Impact of a truck Driver's strike on air pollution levels in Sao Paulo. *Atmospheric Environment*.
- Chris Roe. (2024). Innovate, collaborate, scale: Inside Amazon's approach to decarbonizing its global network of buildings. <https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/amazon-building-decarbonization-grocery-stores-data-centers>
- Da Motta Singer, J., Saldiva De André, C. D., Afonso De André, P., Monteiro Rocha, F. M., Waked, D., Vaz, A. M., Gois, G. F., De Fátima Andrade, M., Veras, M. M., Nascimento Saldiva, P. H., & Barrozo, L. V. (2023). Assessing socioeconomic bias of exposure to urban air pollution: An autopsy-based study in São Paulo, Brazil. *The Lancet Regional Health - Americas*, 22, 100500. <https://doi.org/10.1016/j.lana.2023.100500>
- Da Silva Marques, K. S., Da Silva Palmeira, A., Moreira, D. M., & Sperandio Nascimento, E. G. (2021). Estimation of emissions by road vehicles in the Metropolitan Region of Salvador. 105–114. <https://doi.org/10.2495/AIR210101>
- Daimler Trucks. (2019). Daimler Trucks & Buses targets completely CO₂-neutral fleet of new vehicles by 2039 in key regions. <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/daimler-trucks-buses-targets-completely-co2-neutral-fleet-of-new-vehicles-by-2039-in-key-regions-44764260>

- Dang, T., & Mourougane, A. (2014). Estimating Shadow Prices of Pollution in OECD Economies. OECD Green Growth Papers, 2014–02. https://www.oecd.org/en/publications/estimating-shadow-prices-of-pollution-in-selected-oecd-countries_5jxvd5rnjnx-s-en.html
- De Castro, D. H., Silva Assis, M. S., Da Penha, P. R., De Franca Filho, M. F., Araújo Moreira, T. A., Rodrigues Filho, F. A., & Mendonça Oliveira, B. (2023). CO2 Emissions Mitigation Analysis Due to The Use of Biodiesel on Heavy-Duty Vehicles in Brazil. 2022–36–0064. <https://doi.org/10.4271/2022-36-0064>
- De Miranda, R. M., De Fatima Andrade, M., Fornaro, A., Astolfo, R., De Andre, P. A., & Saldiva, P. (2012). Urban air pollution: A representative survey of PM2.5 mass concentrations in six Brazilian cities. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 5(1), 63–77. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0124-1>
- Debone, D., Leirião, L. F. L., & Miraglia, S. G. E. K. (2020). Air quality and health impact assessment of a truckers' strike in Sao Paulo state, Brazil: A case study. *Urban Climate*, 34, 100687. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100687>
- EMBRAPA. (2024). Soja em números (safra 2023/24). <https://www.embrapa.br/soja/cultivos/soja1/dados-economicos>
- Enel. (2024). Nova frota de ônibus elétricos é lançada em São Paulo. <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Sustentabilidade/nova-frota-de-onibus-eletricos-enel.html>
- Energy Research Company (EPE). (2024). Sustainable Aviation Fuels in Brazil. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-839/CA-EPE-DPG-SDB-2024-02_SUSTAINABLE%20AVIATION%20FUELS%20-EPE.pdf
- EPA. (2023). Report on the Social Cost of Greenhouse Gases: Estimates Incorporating Recent Scientific Advances. https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-12/epa_scghg_2023_report_final.pdf
- European Commission. (2021). Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en
- European Commission. (2024). Regulation of the European Parliament and of the Council on CO₂ emission standards for new heavy-duty vehicles. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1610/oj>
- European Commission. (2025). Commission protects EU biodiesel industry from dumped Chinese imports. https://policy.trade.ec.europa.eu/news/commission-protects-eu-biodiesel-industry-dumped-chinese-imports-2025-02-11_en
- FENABRAVE. (2018). Informativo—Emplacamentos [PDF]. <https://www.fenabreve.org.br/portaltv2/Conteudo/emplacamentos>
- FENABRAVE. (2019). Informativo—Emplacamentos [PDF]. <https://www.fenabreve.org.br/portaltv2/Conteudo/emplacamentos>
- FENABRAVE. (2020). Informativo—Emplacamentos [PDF]. <https://www.fenabreve.org.br/portaltv2/Conteudo/emplacamentos>
- FENABRAVE. (2021). Informativo—Emplacamentos [Dataset]. <https://www.fenabreve.org.br/portaltv2/Conteudo/emplacamentos>
- FENABRAVE. (2022). Informativo—Emplacamentos [Dataset]. <https://www.fenabreve.org.br/portaltv2/Conteudo/emplacamentos>
- FENABRAVE. (2023). Informativo—Emplacamentos [Dataset]. <https://www.fenabreve.org.br/portaltv2/Conteudo/emplacamentos>
- FENABRAVE. (2024). Informativo—Emplacamentos [Dataset]. <https://www.fenabreve.org.br/portaltv2/Conteudo/emplacamentos>
- Fliehr, O. (2013). Analysis of transportation and logistics processes for soybeans in Brazil. Johann Heinrich von Thünen-Institut. https://doi.org/10.3220/WP_4_2013
- Governo do Brasil. (2025). Programa Nacional de Biodiesel do Brasil completa 20 anos, impulsionando a transição energética com a Lei do Combustível do Futuro. https://www.gov.br/secom/pt-br/acompanhe-a-secom/noticias/2025/janeiro/programa-nacional-de-biodiesel-completa-20-anos-promovendo-transicao-energetica-aliada-a-lei-do-combustivel-do-futuro?set_language=pt-br
- Grangeia, C., Santos, L., & Lazaro, L. L. B. (2022). The Brazilian biofuel policy (RenovaBio) and its uncertainties: An assessment of technical, socioeconomic and institutional aspects. *Energy Conversion and Management*: X, 13, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100156>
- ICCT. (2021). Freight in Brazil: An assessment and outlook for improving environmental performance. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/brazil-freight-assessed-sept21.pdf>
- IEA. (2023). Brazil—Sources of electricity generation. <https://www.iea.org/countries/brazil/electricity>
- IEA Bioenergy. (2023). Status of biofuels policies and market deployment in Brazil, Canada, Germany, Sweden and the United States. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/08/IEABio_LLBF_WP1report_final.pdf
- IEA-EPE. (2021). Brazilian Road Freight Transport Benchmarking. https://www.epe.gov.br/sites-en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-232/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.pdf
- InfluenceMap. (2024). Corporate Climate Policy Engagement Leaders, 2024. <https://influencemap.org/briefing/Global-Leaders-in-Climate-Policy-Engagement-2024-29339>
- International Council of Clean Transportation. (2019). Brazil PROCONVE P-8 Emission Standards. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/P8_emissions_Brazil_update_20190227.pdf
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2015). Survey of best practices in reducing emissions through vehicle replacement programs. https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_HDVreplacement_bestprac_20150302.pdf
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2016a). Brazil's vehicle fleet renewal program should aim to benefit from others' successes, and their mistakes. <https://theicct.org/brazils-vehicle-fleet-renewal-program-should-aim-to-be>

nefit-from-others-successes-and-their-mistakes/

- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2016b). United States efficiency and greenhouse gas emission regulations for model year 2018-2027 heavy-duty vehicles, engines, and trailers. https://theicct.org/sites/default/files/publications/US%20HDV%20Phase%20%20FRM_policy-update_08252016_vF.pdf
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2018). International Evaluation of Public Policies for Electromobility in Urban Fleets. https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCT_Brazil-Electromobility-EN-01112018.pdf
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2021a). Total cost of ownership for heavy trucks in China: Battery-electric, fuel cell electric, and diesel trucks. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/ze-hdvs-china-tco-EN-nov21.pdf>
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2021b). Total cost of ownership for tractor-trailers in Europe: Battery electric versus diesel. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/11/tco-bets-europe-1-nov21.pdf>
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2022). Health impacts and social costs in Brazil of a one-year delay in P-8 standards. <https://theicct.org/brazil-latam-health-impact-p8-feb22/>
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2023a). A total cost of ownership comparison of truck decarbonization pathways in Europe. https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/11/ID-54-%E2%80%93-EU-HDV-TCO_paper_final2.pdf
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2023b). Total cost of ownership of alternative powertrain technologies for Class 8 long-haul trucks in the United States. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/04/tco-alt-powertrain-long-haul-trucks-us-apr23.pdf>
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2024). Electrifying road transport with less mining. https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/12/ID-206-%E2%80%93-Battery-outlook_report_final.pdf
- International Council of Clean Transportation (ICCT). (2025). Update on the global zero-emission vehicle transition in 2024.
- International Energy Agency (IEA). (2021). Net Zero by 2050—A Roadmap for the Global Energy Sector. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
- Jennifer L. (2024). Tesla Hits Record High Sales from Carbon Credits at \$1.79B. <https://carboncredits.com/tesla-hits-record-high-sales-from-carbon-credits-at-1-79b/>
- Krenak, E. (2023). The Violent Cartography of Lithium in Brazil: Indigenous and Traditional Communities Struggle with the Giant of Transition Minerals in Brazil. Cultural Survival. <https://www.culturalsurvival.org/news/violent-cartography-lithium-brazil-indigenous-and-traditional-communities-struggle-giant>
- Kunak. (2023). Air pollution from transport: Causes, effects and solutions. <https://kunakair.com/air-pollution-from-transport/>
- Lapola, D. M., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C., & Priess, J. A. (2010). Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(8), 3388–3393. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907318107>
- Lead the Charge. (2023). Responsible sourcing of transition minerals. <https://leadthecharge.org/solutions/actions/responsible-sourcing-of-transition-minerals/>
- MacDonnell, O. (2021). Review of Commitments for Zero Emission Medium- and Heavy-Duty Vehicles. CALSTART. https://globaldrivetozero.org/site/wp-content/uploads/2021/12/Review-of-Commitments-for-Zero-Emission-Medium-and-Heavy-Duty-Vehicles_Dec_2021_Final-.pdf
- Machado, P. G., Teixeira, A. C. R., Collaço, F. M. de A., Hawkes, A., & Mouette, D. (2020). Assessment of Greenhouse Gases and Pollutant Emissions in the Road Freight Transport Sector: A Case Study for São Paulo State, Brazil. *Energies*, 13(20), 5433.
- Maersk. (2023). Maersk pilots heavy-duty electric truck solutions in Brazil. <https://www.maersk.com/news/articles/2023/09/28/maersk-pilots-heavy-duty-electric-truck-solutions-in-brazil>
- Ministry of Mines and Energy. (2021). Decennial Energy Expansion Plan 2031: Biofuel Supply. https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia/pde-2031/english-version/relatorio_pde2031_cap08_eus.pdf
- MIT. (2020). Stiffer roadways could improve truck fuel efficiency. <https://news.mit.edu/2020/stiffer-roadways-improve-truck-efficiency-emissions-061>
- Neoenergia. (2024). Electric Mobility. <https://www.neoenergia.com/en/research-development-innovation/products-developed/electric-mobility>
- New York State. (2023). Governor Hochul Announces Major Milestone to Advance Infrastructure for Medium- and Heavy-Duty Electric Vehicles. <https://www.governor.ny.gov/news/governor-hochul-announces-major-milestone-advance-in-frastructure-medium-and-heavy-duty>
- Nogarotto, D. C., Canteras, F. B., & Pozza, S. A. (2022). Brazilian truckers' strike and particulate matter (PM10) concentration: Temporal trend and time series models. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 57(3), 477–490. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781386>
- OECD. (2012). OECD environmental outlook to 2050: The consequences of inaction. *International Journal of Sustainability in Higher*

- Education, 13(3). <https://doi.org/10.1108/ijshe.2012.24913caa.010>
- Pérez-Martínez, P. J., De Fátima Andrade, M., & De Miranda, R. M. (2017). Heavy truck restrictions and air quality implications in São Paulo, Brazil. *Journal of Environmental Management*, 202, 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.022>
- Reuters. (2024a). Brazil's Potencial to invest \$109 million to turn biodiesel plant into world's largest. <https://www.reuters.com/sustainability/brazils-potencial-invest-109-million-turn-biodiesel-plant-into-worlds-largest-2024-10-08/>
- Reuters. (2024b). How sustainable soy is critical to saving the Cerrado. <https://www.reuters.com/sustainability/land-use-biodiversity/how-sustainable-soy-is-critical-saving-cerrado-2024-10-21/>
- Reuters. (2024c). Windrose plans truck assembly in U.S. in rare move by Chinese EV firm. <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/windrose-plans-truck-assembly-us-rare-move-by-chinese-ev-firm-2024-07-23/>
- Riham Alkousaa. (2024). Germany launches electric truck charging network. <https://www.reuters.com/sustainability/germany-launches-electric-truck-charging-network-decarbonize-transport-2024-07-03/>
- Rocky Mountain Institute. (2024). The Battery Mineral Loop. https://rmi.org/wp-content/uploads/dlm_uploads/2024/07/the_battery_mineral_loop_report_july.pdf
- Rodrigues, J.-P. (2024). *The Geography of Transport Systems* (6th ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003343196>
- Santos, A., Maia, P., Jacob, R., Wei, H., Callegari, C., Oliveira Fiorini, A. C., Schaeffer, R., & Szklo, A. (2024). Road conditions and driving patterns on fuel usage: Lessons from an emerging economy. *Energy*, 295, 130979. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130979>
- Scania AB. (2019). THE SCANIA REPORT 2019 Annual and Sustainability Report. https://www.scania.com/content/dam/group/investor-relations/financial-reports/annual-reports/Scania_AnnualReport_2019-English.pdf
- Stockholm Environment Institute. (2022). Connecting exports of Brazilian soy to deforestation. <https://www.sei.org/features/connecting-exports-of-brazilian-soy-to-deforestation/>
- Stockholm Environment Institute. (2025). LEAP. <https://www.sei.org/tools/leap-long-range-energy-alternatives-planning-system/>
- SupplyChain. (2025). Why BYD has Bet Big on Brazil for Lithium Supply. <https://supplychaindigital.com/sustainability/byd-expands-into-brazils-lithium-valley-with-acquisition>
- Tiburcio, R. S., Macêdo, T. R. D., & Neto, A. M. P. (2023). Brazilian Biofuels Policy (RenovaBio): Overview and generation of decarbonization credits by biodiesel production facilities. *Energy for Sustainable Development*, 77, 101334. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101334>
- UN-Habitat (Ed.). (2006). *The challenge of slums: Global report on human settlements 2003* (Repr.). Earthscan.
- União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA). (n.d.). Etanol combustível do presente e futuro da mobilidade sustentável. <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/etanol/>
- Valor Econômico. (2023). Government tries to correct distortions in incentive program for trucks. <https://valorinternational.globo.com/business/news/2023/07/09/government-tries-to-correct-distortions-in-incentive-program-for-trucks.ghml>
- Volvo Trucks. (2023, December). Volvo has delivered its first electric trucks in Latin America.
- Volvo Trucks. (2024a). Breakthrough: Volvo to launch electric truck with 600 km range. <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2024/sep/breakthrough-volvo-to-launch-electric-truck-with-600-km-range.html>
- Volvo Trucks. (2024b). Volvo inicia validação de caminhões pesados 100% elétricos na logística de sua fábrica no Brasil. <https://www.volvogroup.com/br/news-and-media/news/2024/sep/volvo-inicia-validacao-de-caminhoes-pesados-100-eletricos-na-lo.html>
- Volvo Trucks. (2024c). Volvo introduces its first ever electric-only truck – optimized for cleaner and safer city transports. <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2024/jan/volvo-introduces-its-first-ever-electric-only-truck-optimized-for-cleaner-and-safer-city-transports.html>
- WHO. (2004). Comparative quantification of health risks: Global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors. World Health Organization.
- World Bank. (2022). The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1816-5>
- World Bank. (2024a). Brazil Overview: Development News, Research, Data. <https://www.worldbank.org/en/country/brazil/overview>
- World Bank. (2024b). GDP per capita (current US\$)—OECD members. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=OE>
- World Economic Forum (WEF). (2017). *The Global Competitiveness Report 2017–2018*. <https://www3.weforum.org/docs/GCR-2017-2018/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2017%E2%80%932018.pdf>

An aerial photograph of a parking lot filled with various trucks. The trucks are parked in neat rows, with some facing the camera and others with their backs to it. The colors of the trucks vary, including white, blue, green, and red. The parking lot is paved with asphalt and has white lines marking the spaces. The shadows of the trucks are cast onto the pavement, indicating a bright, sunny day.

CRÉDITOS

Autores

Patrícia F. Rodrigues

Renata F. da Costa

Editorial

Delam Kelsang

Giovana Amano

Maria Victória Beligni

Coordenação

Evangeline da M. P. A. de Araújo

Produção

Instituto Ar

Revisão

Mariana Mendes

Design Gráfico

Janela Estúdio

Lia Assumpção

Isadora Scazufca

[assistente de design]

ISBN

978-65-983657-5-2