



Cidades Compactas Eletrificadas: Brasil

RESUMO PARA FORMULADORES DE POLÍTICAS PÚBLICAS



UC DAVIS
UNIVERSITY OF CALIFORNIA



RESUMO EXECUTIVO

Um novo estudo do Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento e da Universidade da Califórnia em Davis constatou que o Brasil tem potencial para reduzir seus gastos públicos com transporte urbano nos níveis local, estadual e federal em R\$ 1 trilhão até 2050 (valor acumulado). Para tal, o país deve adotar uma combinação de estratégias que promovam a eletrificação veicular, o planejamento de cidades compactas e a substituição modal favorecendo a mobilidade a pé, por bicicleta e em transporte público coletivo. Além disso, apenas a combinação dessas estratégias – e não uma delas aplicada individualmente – será suficiente para promover, de forma coerente e constante, os compromissos mais amplos do país relacionados à redução de suas emissões de carbono. A necessidade conjunta de eletrificação e substituição modal ilustra quão importante será, para o Brasil, estabelecer metas ambiciosas de descarbonização nesse importante setor.

Este estudo investiga quatro cenários possíveis para o transporte urbano de passageiros no Brasil:

- **Cenário de manutenção da conjuntura atual, ou BAU (sigla em inglês para *business as usual*, que significa como de costume, ou manutenção do modelo existente):** Tendência atual para o transporte urbano de passageiros.
- **Cenário de alta eletrificação:** Substituição, da forma mais rápida e viável possível, de veículos de combustão interna por veículos elétricos.
- **Cenário de alta substituição modal:** Transformação mais rápida possível das prioridades de planejamento urbano em favor do uso compacto do solo e do transporte público coletivo, a pé e por bicicleta.
- **Cenário de eletrificação + substituição modal:** Combinação dos dois cenários anteriores.

Os requisitos estimados para cada cenário e os gastos públicos acumulados decorrentes de cada um deles são apresentados na figura A.

Além da economia de custos, o cenário de **eletrificação + substituição modal** reduziria o consumo de eletricidade em 54 bilhões de kWh por ano até 2050, em comparação com o cenário de **alta eletrificação**. Qualitativamente, esse cenário melhoraria a segurança viária, promoveria a inclusão econômica de grupos marginalizados e reduziria a poluição atmosférica.

Requisitos de infraestrutura e custos públicos diretos por cenário						
	Porcentagem de novos veículos leves elétricos	Quilômetros de faixas rodoviárias construídas entre 2015 e 2050 (acumulados)	Quilômetros de trilhos de metrô construídos entre 2015 e 2050 (acumulados)	Quilômetros de faixas de BRT construídas entre 2015 e 2050 (acumulados)	Quilômetros de ciclovias/ ciclofaixas protegidas construídas entre 2015 e 2050 (acumulados)	Gastos do setor público com transporte urbano de passageiros entre 2015 e 2050 (acumulados)
2015 Linha de base	0%					
2050 Manutenção da conjuntura atual	20%	368.000	160	1.280	3.360	R\$ 12 trilhões
2050 Alta eletrificação	100%	368.000	160	1.280	3.360	R\$ 12 trilhões
2050 Alta substituição modal	20%	57.600	2.560	8.160	208.000	R\$ 11 trilhões
2050 Eletrificação + substituição modal	100%	57.600	2.560	8.160	208.000	R\$ 11 trilhões

FIGURA A
Requisitos de infraestrutura e custos públicos

A pesquisa também mede as emissões de gases de efeito estufa provenientes do transporte urbano de passageiros em cada cenário. Os resultados somam-se a um conjunto crescente de evidências e demonstram que o cumprimento dos compromissos assumidos pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris exigirá a adoção de veículos elétricos e uma mudança nos padrões de deslocamento. Não basta que a **alta eletrificação** ou a **alta substituição modal** ocorram no ritmo mais acelerado possível, mas de forma independente uma da outra. Somente por meio da maximização dessas duas estratégias complementares é que o Brasil poderá reduzir suas emissões com rapidez suficiente para se aproximar a um nível compatível com a manutenção do aquecimento global abaixo de 1,5 °C (representado pela área azul na figura B).

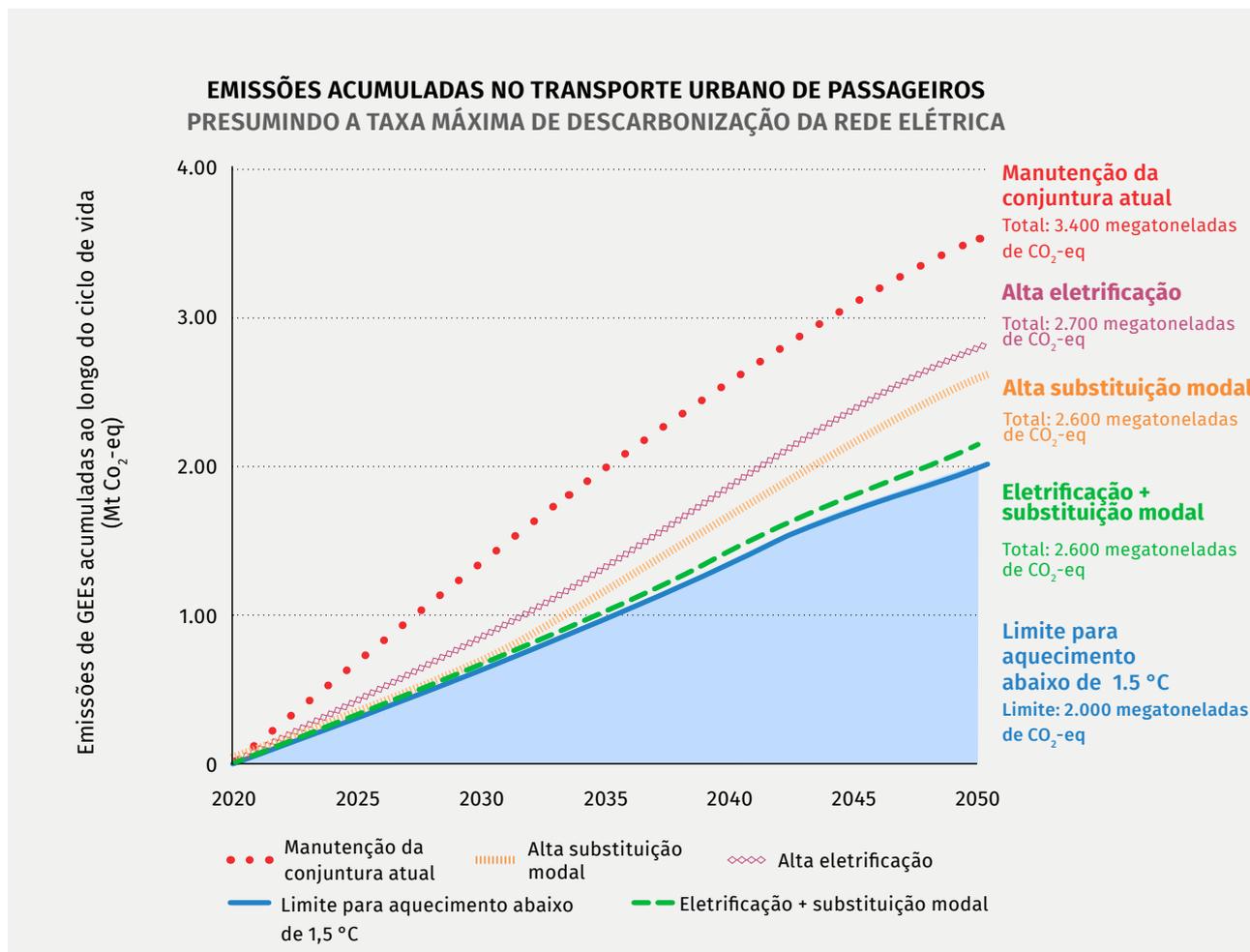


FIGURA B
Emissões de gases de efeito estufa por cenário

Para alcançar o cenário de **eletrificação + substituição modal**, o Brasil precisa reestruturar suas políticas de transporte e uso do solo para priorizar a circulação de pessoas em vez de veículos. Essa reestruturação exigirá incentivos e requisitos para a eletrificação veicular, a construção de cidades compactas e de uso misto e a realocação do espaço viário e do financiamento do transporte, priorizando a mobilidade a pé, por bicicleta e em transporte público coletivo em vez do uso de veículos individuais motorizados. Em todos os cenários, os automóveis ainda representarão uma parte importante do sistema de transporte urbano, mas o cenário de **eletrificação + substituição modal** oferecerá aos brasileiros uma vasta gama de opções de transporte com veículos limpos e eficientes.

Com menos dinheiro sendo gasto na construção de vias expressas, os governos terão mais recursos para dedicar a outros usos ou à redução de impostos. A população, por sua vez, gastará menos com combustível, o que lhe dará a liberdade de investir mais em outras áreas e atividades. Ao proteger nosso planeta das piores ameaças da mudança do clima, permitiremos que o país prospere por muito tempo no futuro.

SUMÁRIO

CIDADES COMPACTAS ELETRIFICADAS: BRASIL

1. CONTEXTO
 2. QUATRO CENÁRIOS
 3. METODOLOGIA
 - 3.1. ESTRUTURAÇÃO DO MODELO
 - 3.2. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS
 - 3.2.1. CENÁRIOS DE TAXAS DE ELETRIFICAÇÃO
 - 3.2.2. CENÁRIOS DE TAXAS DE SUBSTITUIÇÃO MODAL
 4. COMPATIBILIDADE DOS CENÁRIOS COM OS COMPROMISSOS CLIMÁTICOS DO BRASIL
 5. IMPACTOS DOS CENÁRIOS NO CONSUMO DE ELETRICIDADE
 6. DESPESAS PÚBLICAS E PRIVADAS DIRETAS EM CADA CENÁRIO
 7. OBJETIVOS MENSURÁVEIS DO TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS
 - 7.1. OBJETIVOS DE ELETRIFICAÇÃO
 - 7.2. OBJETIVOS DE USO DO SOLO
 - 7.3. OBJETIVOS DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE
- APÊNDICE: DOCUMENTAÇÃO METODOLÓGICA

AGRADECIMENTOS

AUTORES PRINCIPAIS:

Lewis Fulton	Universidade da Califórnia em Davis <i>Diretor de Rotas Energéticas de Transporte Sustentável</i>
Iuri Moura	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento <i>Gerente de Desenvolvimento Urbano Sustentável do ITDP Brasil</i>
D. Taylor Reich	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento <i>Gerente de Ciência de Dados do ITDP</i>

AUTORES SECUNDÁRIOS:

Manuel Blanco	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento <i>Estagiário de Dados de Transporte do ITDP</i>
Clarisse Cunha Linke	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento <i>Diretora Executiva do ITDP Brasil</i>
Ana Nassar	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento <i>Diretora de Programas do ITDP Brasil</i>
Beatriz Rodrigues	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento <i>Gerente de Transporte Público do ITDP Brasil</i>
Farhana Sharmin	Universidade da Califórnia em Davis <i>Assistente de Pesquisa de Pós-Graduação</i>
Leonardo Veiga	Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento <i>Gerente de Monitoramento e Avaliação do ITDP Brasil</i>

REVISORES:

André Cieplinski	Conselho Internacional de Transporte Limpo, Brasil <i>Pesquisador</i>
Márcio D'Agosto	Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Engenharia de Transportes Instituto Brasileiro de Transportes Sustentáveis <i>Professor e pesquisador</i>
Pedro Logiodice	Conselho Internacional de Transporte Limpo, Brasil <i>Pesquisador associado</i>
Thomas Maltese	Rede de Cidades C40 <i>Gerente sênior do ZEBRA</i>
GlauCIA Pereira	Multiplicidade Mobilidade Urbana <i>Pesquisadora</i>
David Tsai	Instituto Energia e Meio Ambiente Observatório do Clima <i>Gerente de Projetos</i>

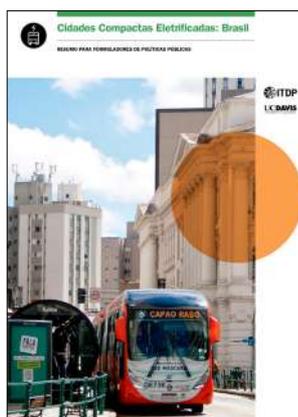


IMAGEM DA CAPA:
Ligeirinho: ônibus de passageiros em Curitiba, Brasil.
FONTE: Cheng NV via Getty Images

1. CONTEXTO

Este estudo é o ponto culminante de uma década de colaboração em modelagem de transporte entre o ITDP e a Universidade da Califórnia em Davis¹. Dez anos de esforços produziram um método detalhado para a modelagem de alto nível do transporte urbano de passageiros. Pela primeira vez, o modelo está sendo usado para publicar resultados analíticos sobre países específicos — como é o caso deste estudo sobre o Brasil e de outros estudos paralelos sobre outras nações.

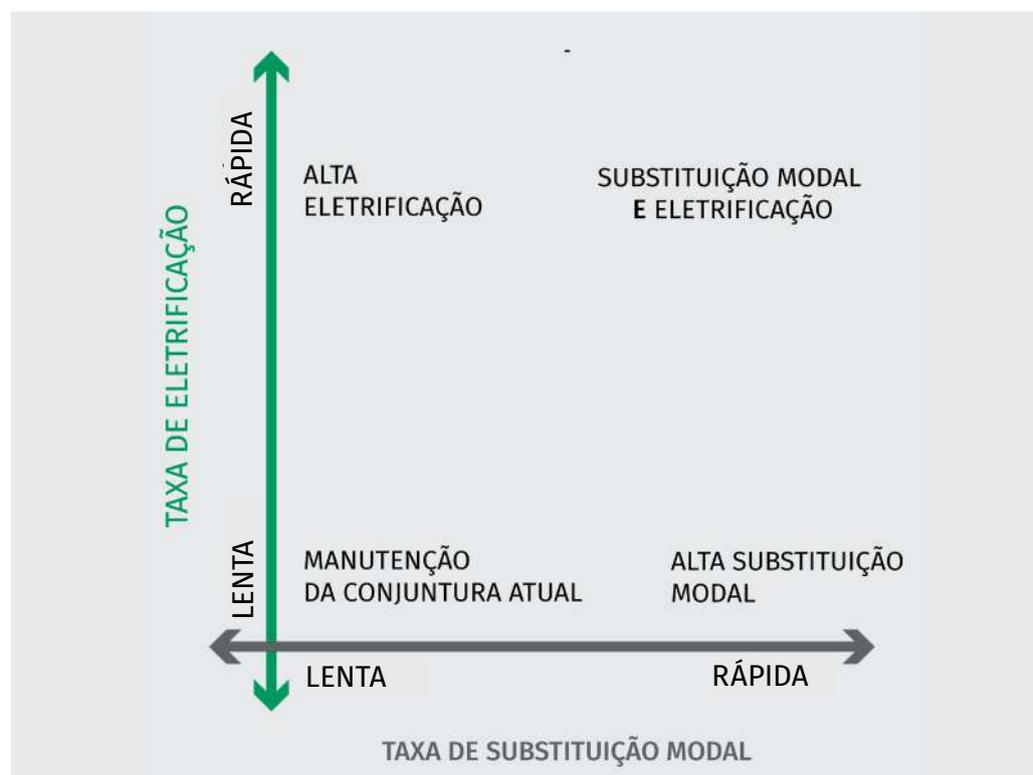
Tal como seu precursor, [O Cenário de Cidades Compactas Eletrificadas](#), este estudo compara as implicações econômicas e ambientais de quatro cenários para o futuro do transporte urbano de passageiros: (1) manutenção da conjuntura atual, ou BAU (expressão em inglês para *business as usual*, que significa como de costume, ou manutenção do modelo existente); (2) alta eletrificação de veículos; (3) promoção de cidades compactas construídas em torno de pedestres, ciclistas e usuários de transporte público coletivo; e (4) combinação da eletrificação de veículos, cidades compactas e substituição modal. O relatório anterior se concentrava na necessidade global de adotar essas estratégias, ao passo que este estudo aborda as especificidades do Brasil. Além de quantificar as emissões de cada cenário, estimamos as quantidades e custos — ou economias — em termos de infraestrutura que resultariam de diferentes cenários para o futuro do Brasil. Os resultados nos oferecem um “roteiro” sobre como esses cenários podem ser concretizados.

2. QUATRO CENÁRIOS

Assim como o estudo global e os relatórios paralelos sobre outros países, este estudo investiga quatro cenários para o transporte urbano de passageiros no Brasil até 2050. Os cenários são apresentados na forma de um diagrama na figura C. Começamos com uma análise qualitativa dos cenários, incluindo um resumo dos impactos que poderiam gerar fora do âmbito de nossa modelagem — fatores como saúde pública e inclusão econômica. Na seção 3 (página 11), definimos os cenários quantitativamente para a modelagem.

Os cenários de **alta eletrificação** ou **alta substituição modal** exigiriam mudanças profundas, mas viáveis, nas políticas em vigor no Brasil — mudanças possíveis no contexto da atual estrutura política e econômica do país. Eles exigiriam uma reestruturação da forma como os orçamentos de transporte são alocados, como o espaço das ruas é usado e como os impostos e subsídios são aplicados a veículos e combustíveis. Contudo, essas seriam mudanças incrementais e viáveis no sistema atual, que não exigiriam uma “revolução” em qualquer sentido econômico, social ou político.

FIGURA C
Diagrama de cenários

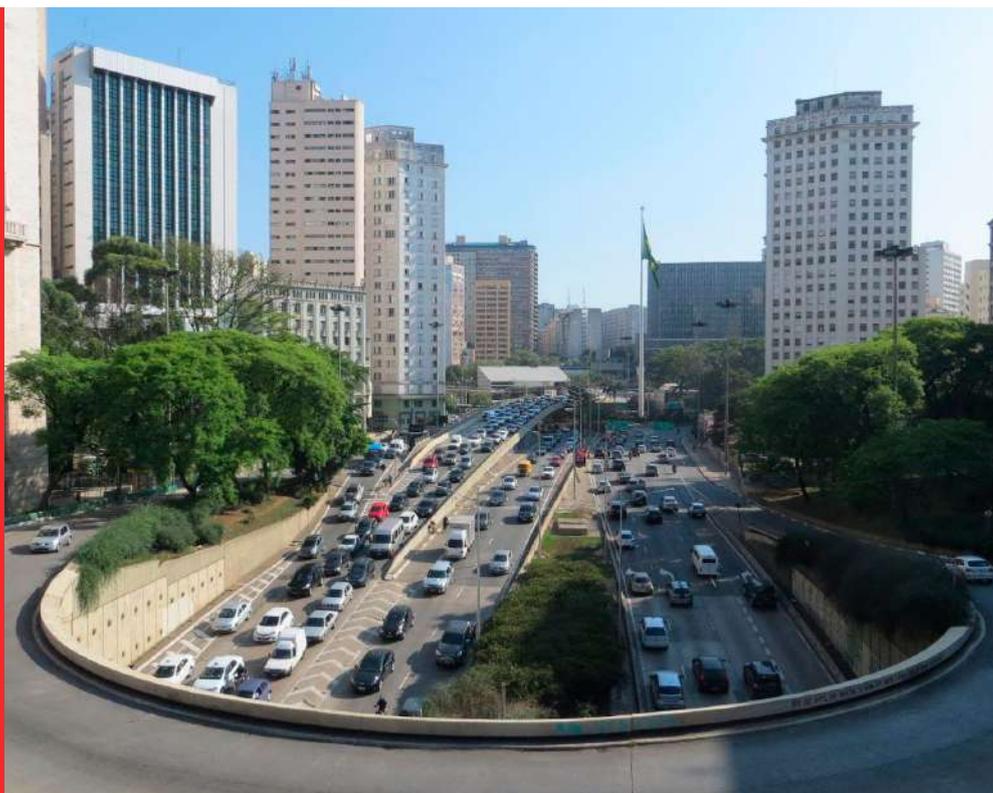


¹ ITDP & UC Davis (2021), [O Cenário de Cidades Compactas Eletrificadas](#); ITDP & UC Davis (2017), [Three Revolutions in Urban Transportation](#); ITDP & UC Davis (2015), [A Global High Shift Cycling Scenario](#); ITDP & UC Davis (2014), [A Global High Shift Scenario: Impacts and Potential for More Public Transport, Walking and Cycling with Lower Car Use](#).

MANUTENÇÃO DA CONJUNTURA ATUAL

Os engarrafamentos em São Paulo exemplificam o futuro no cenário de **manutenção da conjuntura atual**.

FONTE: Danielle Hoppe, ITDP Brasil, São Paulo



Premissas:

- O Brasil mantém sua trajetória atual. O transporte individual motorizado expande-se rapidamente e passa a responder por 67% dos deslocamentos

Impactos qualitativos:

- Aumento das mortes no trânsito;
- Altos custos diretos públicos e privados²;
- Acesso reduzido a oportunidades para pessoas de renda baixa ou historicamente marginalizadas sem carros, o que levaria a um aumento da desigualdade de recursos;
- Aumento da poluição atmosférica local, o que causaria muitas mortes prematuras e aumentaria as despesas do setor de saúde;
- Aumento das vias expressas, dividindo bairros e impulsionando uma expansão pouco favorável ao meio ambiente; e
- Aumento das emissões de carbono, o que levaria à catástrofe climática³.

² Por exemplo, os gastos com infraestrutura viária por quilômetro aumentaram drasticamente: de US\$ 5 milhões por quilômetro na década de 1960 para quase US\$ 19 milhões por quilômetro na década de 1990 (descontando a inflação no período). Ver: American Economic Association (2023), [Infrastructure Costs](#).

³ Andrew Moseman, MIT Climate Portal (2022), [Are electric vehicles definitely better for the climate than gas-powered cars?](#) A resposta é sim, embora a determinação de até que ponto a melhoria é significativa se baseie na fonte de eletricidade e nas emissões derivadas da produção. O cenário de **manutenção da conjuntura atual** incentivaria um desenvolvimento voltado ao uso do automóvel com aumento limitado da energia limpa.

ALTA ELETRIFICAÇÃO



Veículos elétricos, como este ônibus em Maringá, seriam usados em todos os lugares num futuro com cenário de alta eletrificação. **FONTE:** Rafael Calabria, IDEC, Maringá

Premissas:

- A eletrificação avança muito mais rapidamente que o previsto, com 15% dos novos veículos leves sendo elétricos até 2030, e 100%, até 2050.

Impactos qualitativos:

- ✔ Redução acentuada nas emissões de carbono⁴;
- ✔ Redução acentuada da poluição atmosférica e sonora local⁵;
- ✘ Aumento das mortes no trânsito;
- ✘ Altos custos diretos públicos e privados;
- ✘ Acesso reduzido a oportunidades para pessoas de renda baixa sem carros;
- ✘ Aumento das vias expressas, dividindo bairros e impulsionando uma expansão pouco favorável ao meio ambiente; e
- ✘ Consumo da oferta limitada de minerais raros, o que resultaria em preocupações relacionadas à extração, conservação, segurança nacional e cadeias de suprimentos.

Políticas-chave:

- Incentivos para veículos elétricos do lado da oferta e da demanda;
- Metas ambiciosas de economia de combustível e normas para as emissões de escape de gases de efeito estufa;
- Reuso e reciclagem de baterias;
- Instalação equitativa de pontos públicos de recarga padronizados para veículos elétricos (incluindo veículos de duas rodas); e
- Expansão e descarbonização da rede elétrica.

⁴ Com uma alta taxa de eletrificação, as emissões provenientes dos transportes se reduzirão drasticamente. Ver: Andrew Moseman, MIT Climate Portal (2022), [Are electric vehicles definitely better for the climate than gas-powered cars?](#)

⁵ Tsoi et al. (2023), [The co-benefits of electric mobility in reducing traffic noise and chemical air pollution: Insights from a transit-oriented city.](#)

ALTA SUBSTITUIÇÃO MODAL

Num futuro com cenário de alta substituição modal a maioria dos brasileiros nos centros urbanos viveria perto de uma infraestrutura segura para pedestres e ciclistas, como no centro da cidade de São Paulo.

FONTE: Danielle Hoppe, ITDP Brasil, São Paulo



Premissas:

- O planejamento de cidades compactas é aliado à realocação de recursos de financiamento e do espaço viário para pedestres, ciclistas e pessoas usuárias de transporte público coletivo. Neste caso, o Brasil retarda a construção de novas vias expressas urbanas, concentrando-se, em vez disso, na criação de malhas residenciais mais densas, uso misto do solo e infraestrutura adequada para ônibus e bicicletas nas vias existentes. Os deslocamentos em automóveis são reduzidos à metade dos níveis de **manutenção da conjuntura atual** até 2050.

Impactos qualitativos:

- ✔ Redução das mortes no trânsito;
- ✔ Expansão do acesso a oportunidades, especialmente para pessoas de renda baixa, pessoas não brancas e outros grupos que sofrem de segregação espacial, pessoas com deficiência e pessoas idosas ou jovens⁶;
- ✔ Expansão da mobilidade a pé e por bicicleta, o que melhoraria a saúde física e mental da população e reduziria os gastos com saúde pública⁷; e
- ✘ Alta poluição atmosférica e sonora local proveniente de veículos de combustão interna em comparação com o cenário de **alta eletrificação**.

Políticas-chave:

- Realocação de orçamentos de transporte, especialmente projetos de BRT, para beneficiar pedestres, ciclistas e pessoas usuárias de transporte público; e
- Reformulação das vias públicas, substituindo o espaço dedicado aos carros.

⁶ National Library of Medicine (2023), [Does the compact city paradigm help reduce poverty?](#) Vale notar que isso é mais eficaz para mitigar a pobreza em combinação com medidas de acessibilidade habitacional; ver também Urban Institute (sem data), [Causes and consequences: Separate and unequal neighborhoods](#).

⁷ Matthew Raifman et al. (2021), [Mortality implications of increased active mobility for a proposed regional transportation emission cap-and-invest program](#).

ELETRIFICAÇÃO + SUBSTITUIÇÃO MODAL

Num futuro de **eletrificação + substituição modal**, a maioria dos brasileiros se deslocaria a pé, por bicicleta, ou em veículos elétricos, conforme ilustra esta rua compartilhada no Rio de Janeiro.
FONTE: Stefano Aguiar, ITDP Brasil, Rio de Janeiro



Premissas:

- Cidades compactas e substituição modal aliadas à eletrificação rápida: **eletrificação + substituição modal** juntas.

Impactos qualitativos:

- 👍 Redução das mortes no trânsito⁸;
- 👍 Expansão do acesso a oportunidades para todas as pessoas;
- 👍 Expansão da mobilidade a pé e por bicicleta, o que melhoraria a saúde física e mental da população e reduziria os gastos com saúde pública;
- 👍 Ampla redução da poluição atmosférica e sonora local; e
- 👍 Redução considerável das emissões de carbono, o que seria condizente com os termos do Acordo de Paris.

Políticas-chave:

- Todas as políticas listadas para os cenários de **alta eletrificação e alta substituição modal**, exceto pelo aumento das vias expressas; e
- Criação de áreas de baixa emissão para incentivar simultaneamente a substituição modal e a eletrificação dos veículos.

⁸ [Dangerous by Design](#) (2022).

3. METODOLOGIA

Este estudo usa os mesmos métodos do [Cenário de Cidades Compactas Eletrificadas](#) de 2021 e de outros estudos nacionais publicados pelo ITDP e pela UC Davis em 2023 e 2024. Em cada um desses estudos, definimos quatro cenários e estimamos seus impactos utilizando os mesmos métodos de modelagem. Esta seção descreverá, primeiramente, a estrutura desses métodos de modelagem e, em seguida, o processo para definir os cenários a serem usados como referência para a modelagem.

A fim de garantir uma aplicação precisa desse modelo no Brasil, o trabalho foi revisado por especialistas representantes de diversas instituições nacionais de ponta. Os nomes e cargos desses especialistas estão listados nas páginas iniciais deste estudo. Para uma descrição mais detalhada da metodologia, incluindo um conjunto completo de dados, ver o apêndice metodológico.

3.1. Estruturação do modelo

O foco do estudo limita-se ao transporte urbano de passageiros e não inclui viagens intermunicipais e rurais, tampouco transporte de carga de qualquer tipo. A definição de urbano se baseia em dados das Nações Unidas e inclui todas as áreas urbanas ou suburbanas com 300 mil pessoas ou mais⁹. Essa definição abrange cerca de 90% da população brasileira. Outras pesquisas demonstram que tanto a eletrificação quanto a substituição modal serão necessárias para descarbonizar o transporte rural/intermunicipal¹⁰ e o transporte de carga¹¹. Isso nos permite modelar viagens urbanas e suburbanas com mais precisão.

O modelo é calibrado com dados-padrão do setor obtidos do Modelo de Mobilidade¹² da Agência Internacional de Energia, exceto quando houver dados disponíveis mais detalhados e específicos sobre o Brasil. Essa calibração determina a estimativa das condições no ano-base, a projeção do cenário de **manutenção da conjuntura atual** e outros aspectos como fatores de emissões, intensidades de emissão de combustíveis e custos.

Essa abordagem geral de modelagem foi revisada no âmbito da publicação de 2021, e uma lista de revisores pode ser encontrada naquela publicação¹³. Nosso método fornece uma comparação de alto nível de diferentes cenários, em vez de uma análise detalhada de baixo para cima. O resultado é uma perspectiva relevante para o setor do transporte urbano de passageiros em geral, em vez de se concentrar exclusivamente em poucas políticas específicas.

3.2. Definição dos cenários

Após definir o escopo e calibrar o modelo, o próximo passo é definir quantitativamente os quatro cenários para o transporte urbano de passageiros no Brasil, descritos na página 18. A partir do ano-base de 2015¹⁴ e considerando os anos-meta de 2030 e 2050, descrevemos futuros possíveis. Esses cenários não pretendem definir com precisão as únicas opções para o futuro do setor; em vez disso, buscam dar uma ideia das trajetórias gerais possíveis para o transporte urbano de passageiros.

Para a eletrificação, nossa previsão é apresentada na forma da porcentagem de veículos novos elétricos. Os cenários de **manutenção da conjuntura atual** e de **alta substituição modal** compartilham as mesmas taxas de eletrificação mais baixas; e os cenários de **alta eletrificação** e de **eletrificação + substituição modal** compartilham as mesmas taxas de eletrificação mais elevadas. Pode ser que menos carros novos sejam vendidos anualmente no cenário de **alta substituição modal**, mas o percentual de veículos elétricos permaneceria igual. Da mesma forma, as divisões modais e deslocamentos (definidos em termos de pessoas-quilômetros percorridos em modos diferentes) são idênticas nos cenários de **manutenção da conjuntura atual** e de **alta eletrificação**, com níveis mais altos de uso de automóveis. Também são idênticos nos cenários de **alta substituição modal** e de **eletrificação + substituição modal**, com níveis mais baixos de uso de automóveis.

Após definir esses cenários, estimaremos suas implicações. Para cada cenário, com base no tamanho das frotas veiculares e no total de atividade por veículo, estimamos as emissões de gases de efeito estufa de todo o ciclo de vida¹⁵ (seção 4), consumo de energia (seção 5) e quantidades e custos totais de infraestrutura, veículos, combustível e operação (seção 6).

⁹ Departamento das Nações Unidas para Assuntos Econômicos e Sociais (2018), [World Urbanization Prospects](#).

¹⁰ Fórum Internacional de Transportes: OCDE (2023), [ITF Transport Outlook 2023](#).

¹¹ Lynn H. Kaack, Environmental Research Letters (2018), [Decarbonizing intraregional freight systems with a focus on modal shift](#).

¹² O Modelo de Mobilidade está disponível apenas sob licença fechada, e o conjunto de dados completo não pode ser compartilhado. Contudo, todas as variáveis relevantes para o Brasil estão incluídas no apêndice metodológico.

¹³ ITDP & UC Davis (2021), [O Cenário de Cidades Compactas Eletrificadas](#).

¹⁴ Selecionado devido à disponibilidade de dados e à compatibilidade entre estudos semelhantes e, também, para evitar distorções relacionadas à Covid-19.

¹⁵ Inclui emissões não apenas provenientes da produção e consumo de combustíveis ou eletricidade, mas também da fabricação e eliminação de veículos e da construção e

3.2.1. Cenários de taxas de eletrificação

Os cenários de **manutenção da conjuntura atual** e de **alta substituição modal** seguem as mesmas projeções de percentual de veículos novos elétricos, discriminados por ano e tipo de veículo — ou seja, as proporções de veículos vendidos. Nesses cenários, nossas projeções pretendem representar a trajetória atual do país. Essas estimativas foram concebidas para se alinharem a algo entre as projeções conservadoras e moderadas disponibilizadas no Anuário Brasileiro de Mobilidade Elétrica da Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica¹⁶. No entanto, como nossa modelagem não inclui veículos híbridos e a plataforma contém projeções bastante altas para veículos híbridos *plug-in*, aumentamos o percentual de veículos totalmente elétricos para compensar esse fato.

Os cenários de **alta eletrificação** e de **eletrificação + substituição modal** consideram percentuais de participação nas vendas concebidas para se alinharem às projeções “agressivas” da Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica.

Porcentagem de novos veículos elétricos (em vez de veículos a combustão interna)						
	Manutenção da conjuntura atual e alta substituição modal			Alta eletrificação e eletrificação + substituição modal		
	2015	2030	2050	2015	2030	2050
Veículos leves	0%	5%	20%	0%	15%	100%
Veículos de duas rodas/ motocicletas (não inclui bicicletas elétricas)	0%	5%	20%	0%	15%	100%
Ônibus	0%	5%	20%	0%	23%	100%

FIGURA D
Taxas de eletrificação por tipo de veículo, ano e cenário

3.2.2. Cenários de taxa de substituição modal

Os cenários de **manutenção da conjuntura atual** e de **alta eletrificação** incluem divisões modais e projeções de deslocamentos baseadas no modelo de mobilidade da Agência Internacional de Energia (AIE), que é padrão no setor e inclui estimativas para o ano-base e projeções detalhadas dos tipos de deslocamento por modo. Essas estimativas são apresentadas nas figuras E e F.

Os cenários de **alta substituição modal** e de **eletrificação + substituição modal** seguem nossos cálculos em duas etapas. Primeiramente, projetamos possíveis densidades urbanas no Brasil considerando o máximo viável em termos de políticas públicas para promover cidades compactas e de uso misto. Em segundo lugar, identificamos o máximo viável de substituição dos modos carro e motocicleta por mobilidade a pé, por bicicleta e em transporte público coletivo, além das opções de teletrabalho ou de deslocamentos mais curtos. Incluímos um fator para demonstrar como a substituição modal pode ser realizada mais facilmente em comunidades compactas. Para mais detalhes sobre esse processo de modelagem, ver o apêndice metodológico.

A primeira etapa do cálculo baseia-se em dados do projeto de Mapeamento Global de Assentamentos Humanos da Comissão Europeia¹⁷, identificando as tendências atuais de densidade urbana e, em seguida, projetando um cenário de cidades compactas em que diversas políticas se unam para alcançar o seguinte efeito.

No cenário de **alta substituição modal**, as cidades brasileiras param imediatamente de se expandir, não consumindo novos terrenos não urbanizados. Em vez disso, o crescimento populacional se concentra em áreas com menos de 4 mil pessoas por km² com o propósito de elevar a população acima desse nível. Esse limiar é arbitrário, mas reflete um ponto geral em que se torna viável servir áreas urbanas com transporte público. A abordagem de modelagem pretende representar, de forma geral, uma densidade moderada (prédios de apartamentos de três a quatro andares) e uma reforma de zoneamento para permitir a construção multifamiliar (sem estacionamento mínimo) em todos os terrenos urbanos.

Ao contrário de muitos outros países, a maior parte da população urbana brasileira já se encontra nesse nível de cidades relativamente compactas, e a tendência atual é de maior densificação (ver figura E). Uma reforma do uso do solo também será importante para tornar as cidades brasileiras mais sustentáveis, mas essa reforma poderá se concentrar no Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável (DOTS) e nas Cidades de 15 Minutos de uso misto.

¹⁶ Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica no Brasil (2022), [2º Anuário Brasileiro de Mobilidade Elétrica](#).

¹⁷ Comissão Europeia (2022), [Global Human Settlement Layer ghsl.jrc.ec.europa.eu](#)

AGRUPAMENTOS DE DENSIDADE POPULACIONAL URBANA POR ANO E CENÁRIO

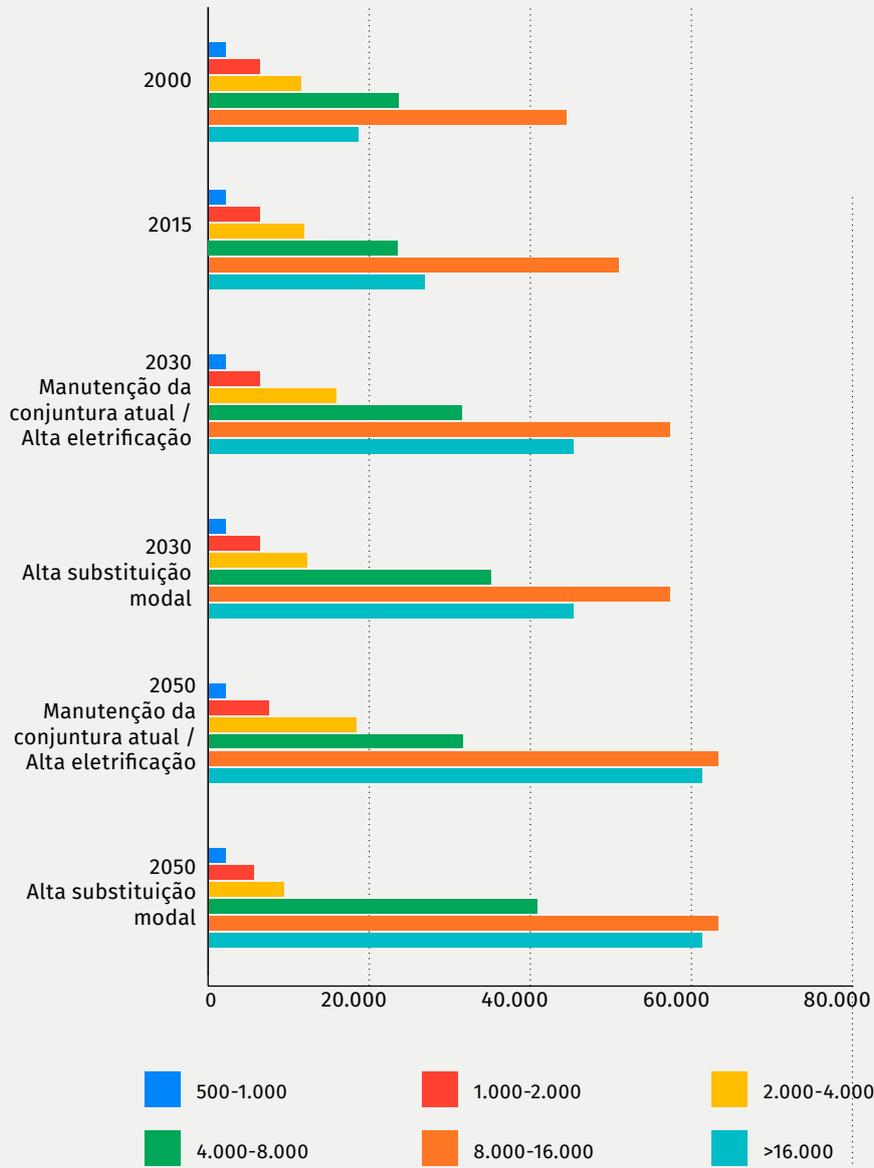


FIGURA E
Agrupamentos de densidade urbana

Na segunda etapa, após estimar as densidades futuras, utilizamos as densidades urbanas potenciais projetadas para identificar as reduções máximas viáveis nos deslocamentos de carro e motocicleta em função dessas densidades. Em comunidades mais compactas, será mais fácil substituir as viagens de carro por outros modos. Estimamos que seja possível alcançar uma redução de 16% no uso de automóveis/motocicletas em relação ao cenário de **manutenção da conjuntura atual** de 2030, e de 53% em relação ao cenário **manutenção da conjuntura atual** de 2050. A redistribuição específica desses deslocamentos para outros modos baseou-se em três fatores. Primeiramente, ela foi parcialmente determinada pela divisão modal observada no Brasil (por exemplo, como o número de passageiros de ônibus já é relativamente alto em comparação a outros países, uma grande quantidade dos deslocamentos em automóveis foi redistribuída para os ônibus). Em segundo lugar, ela foi parcialmente determinada pela densidade das cidades brasileiras (por exemplo, como as cidades brasileiras têm muitos residentes em áreas que superam 16 mil pessoas/km², estimamos que seria possível redistribuir uma parcela significativa dos deslocamentos para o transporte ferroviário, que atende bem essas áreas mais densamente povoadas). Em terceiro, ela foi orientada e aprovada pelos revisores especialistas do Brasil identificados na página 5 (por exemplo, nossas estimativas iniciais indicaram uma redistribuição para a bicicleta que foi considerada pouco realista; logo, reduzimos a previsão de uso da bicicleta em 2050 para um nível mais modesto). Mais detalhes estão disponíveis no apêndice metodológico. Os resultados desses cálculos indicam uma substituição modal relativa ao **cenário de manutenção da conjuntura atual**, conforme demonstram as figuras F e G abaixo.

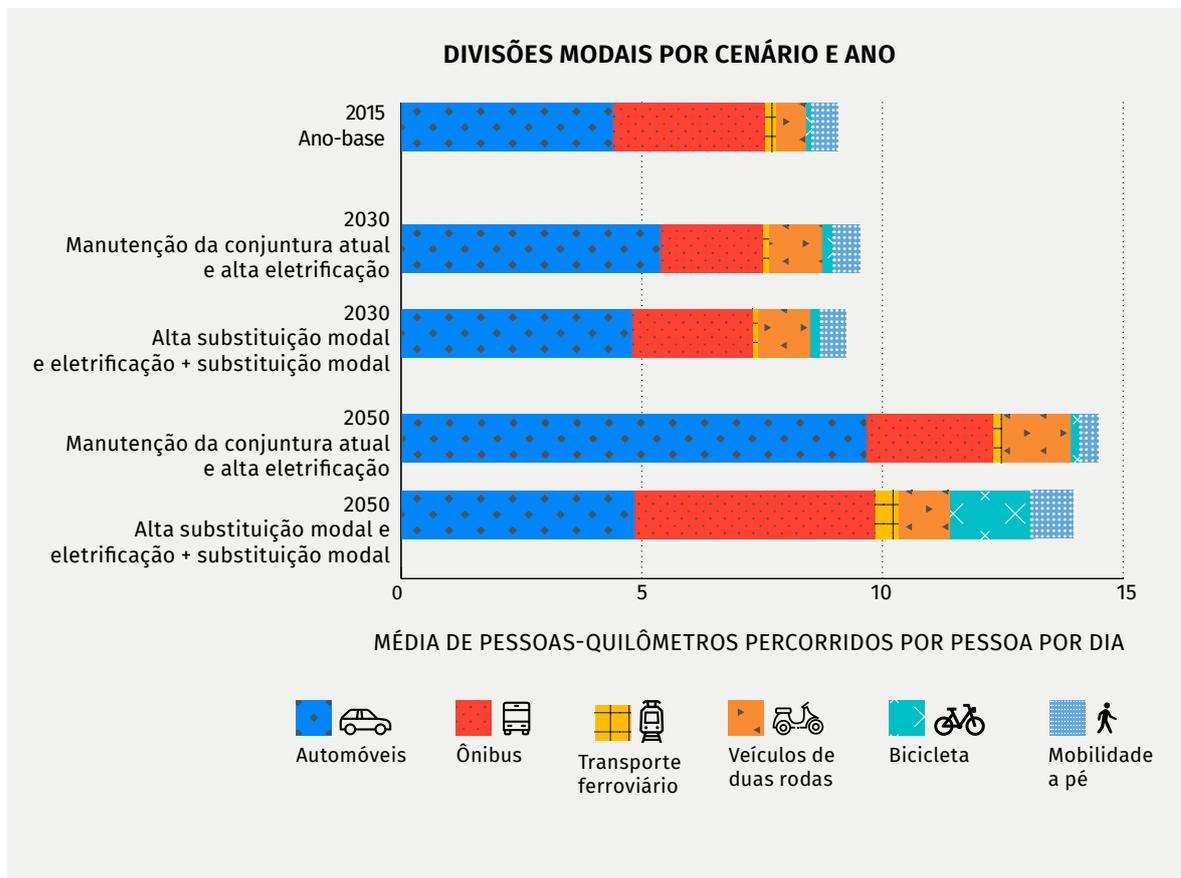


FIGURA F
Deslocamentos

	Divisões modais por cenário e ano (por pessoa-quilômetro percorrido, em vez de por viagem; independente das viagens totais, que crescem com o tempo)				
	2015 Ano-base	2030 Manutenção da conjuntura atual e alta eletrificação	2030 Alta substituição modal e eletrificação + substituição modal	2050 Manutenção da conjuntura atual e alta eletrificação	2050 Alta substituição modal e eletrificação + substituição modal
Automóveis	54%	58%	50%	67%	34%
Ônibus	26%	22%	28%	15%	36%
Transporte ferroviário	2%	2%	2%	1%	4%
Veículos de três rodas	0%	0%	0%	0%	0%
Veículo de duas rodas	10%	12%	9%	13%	5%
Bicicletas	2%	2%	5%	2%	12%
Mobilidade a pé	5%	5%	6%	3%	8%

FIGURA G
Divisões modais por porcentagem de deslocamentos

4. COMPATIBILIDADE DOS CENÁRIOS COM OS COMPROMISSOS CLIMÁTICOS DO BRASIL

Os compromissos brasileiros de redução de gases de efeito estufa são ambiciosos. O Brasil pretende cumprir o Acordo de Paris e zerar suas emissões líquidas até 2050, com metas sólidas ao longo dessa trajetória¹⁸. As metas brasileiras não especificam claramente quais setores da economia serão responsáveis por quais parcelas de descarbonização. Contudo, se presumirmos que o orçamento de carbono será alocado proporcionalmente a diferentes setores com base em seu potencial de redução de emissões, o transporte urbano de passageiros poderá chegar a uma emissão acumulada de não mais de 2 mil Mt de CO₂-eq até 2050. Considerando que, atualmente, a expectativa para esse setor seja de 3.400 Mt de emissões no período, podemos concluir que o objetivo é ambicioso. Nossa modelagem demonstra que o setor brasileiro de transporte urbano de passageiros não conseguirá alcançar esse objetivo de descarbonização nos cenários de **alta eletrificação** ou **alta substituição modal**. Em vez disso, será necessário que ambas as estratégias sejam implementadas de forma conjunta.

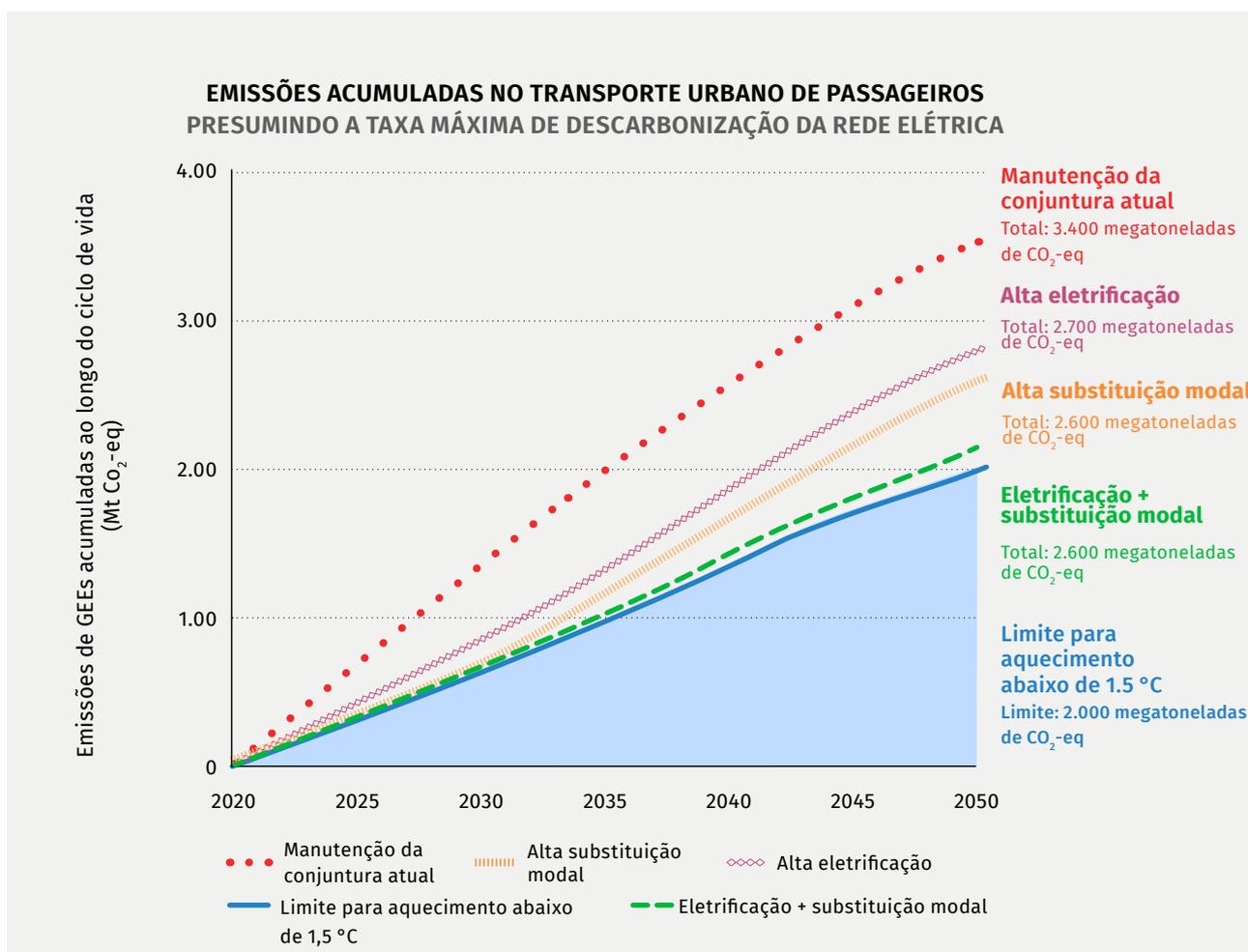


FIGURA H
Emissão de gases de efeito estufa por cenário

Embora os cenários de **alta eletrificação** e **alta substituição modal** possam gerar, separadamente, reduções consideráveis nas emissões de gases de efeito estufa, apenas o cenário combinado de **eletrificação + substituição modal** será capaz de se aproximar de um nível de emissões acumuladas do transporte urbano de passageiros potencialmente compatível com a limitação do aquecimento global a 1,5 °C neste século, como demonstra a área sob a curva azul (limite)¹⁹ na figura H acima²⁰. No entanto, mesmo esse cenário mais completo ainda seria insuficiente.

O cenário de **eletrificação + substituição modal** não é apenas o único que se aproxima da manutenção da temperatura global dentro das metas do Acordo de Paris: é, também, o único cenário que se aproxima da meta brasileira de zerar suas emissões líquidas até 2050.

¹⁸ UNFCCC (2023), *Federative Republic of Brazil Nationally Determined Contribution (NDC) to the Paris Agreement Under the UNFCCC*.

¹⁹ Os orçamentos de carbono são alocados com base na razão entre as emissões acumuladas do Brasil no cenário de **manutenção da conjuntura atual** e as emissões mundiais no mesmo cenário. Para mais detalhes, ver o apêndice metodológico.

²⁰ Nossa análise mostra que o cenário de **eletrificação + substituição modal** excederá o limite de 1,5 °C em cerca de 100 Mt, um déficit que precisará ser compensado pela descarbonização de outros setores da economia brasileira.

EMISSIONES ANUAIS DO TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS EM 2050
PRESUMINDO A TAXA MÁXIMA DE DESCARBONIZAÇÃO DA REDE PÚBLICA

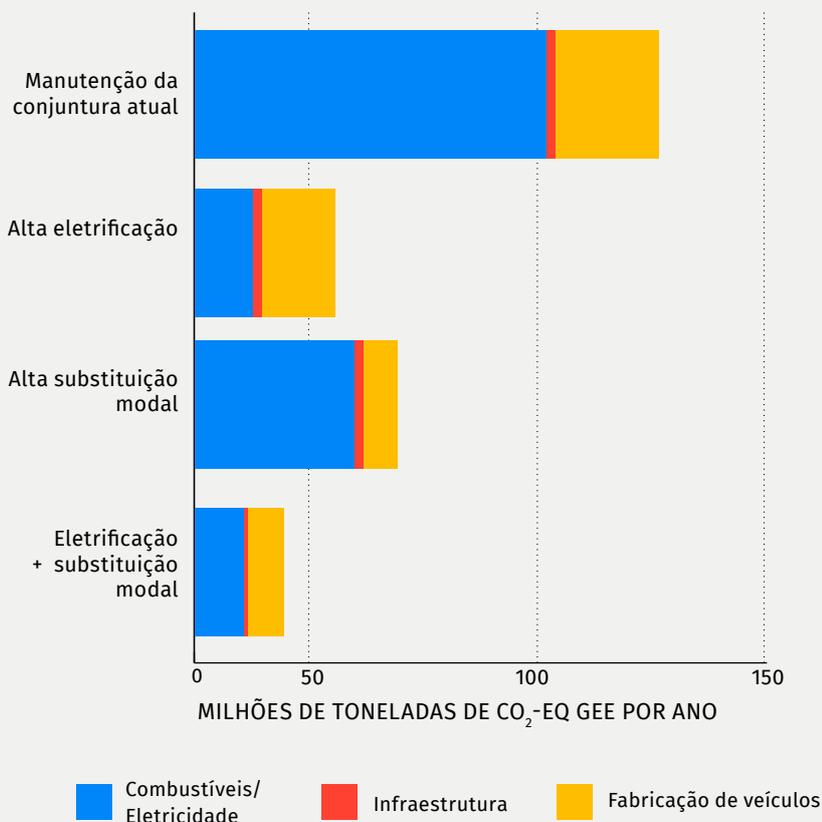


FIGURA I
Emissões anuais de gases de efeito estufa por cenário e fonte

Com uma rede descarbonizada, as emissões geradas por veículos elétricos serão muito baixas. No entanto, o uso de automóveis — elétricos ou não — ainda resultará em emissões substanciais provenientes da pavimentação e manutenção de vias expressas e da produção de aço, baterias e outros processos industriais envolvidos na fabricação e descarte de veículos. No cenário de **alta eletrificação**, como pode ser visto na figura I, mais de metade das emissões são provenientes dessas fontes, que são muito mais difíceis de descarbonizar. Na verdade, a eletrificação aumenta as emissões da fabricação em cerca de 8% em relação ao cenário de **manutenção da conjuntura atual** devido à intensidade das emissões derivadas da fabricação de baterias e de veículos mais pesados²¹. Para que o Brasil possa zerar suas emissões líquidas até 2050, todas as emissões devem ser minimizadas, o que só pode ser realizado por meio da combinação dos cenários de **alta eletrificação** e **alta substituição modal**.

Os biocombustíveis são um componente importante da matriz energética brasileira e são considerados nos cálculos da intensidade de emissões de combustíveis em todo o modelo. As tendências atuais de biocombustíveis no Brasil são incorporadas de forma igual aos cálculos de todos os cenários.

O cenário de **alta eletrificação** também exige um crescimento exponencial na utilização de minerais raros escassos para baterias. Os desafios ambientais, de justiça social e de segurança nacional decorrentes disso seriam significativamente mitigados pela combinação da **alta eletrificação** com a **alta substituição modal** e pela redução da dependência geral de veículos de passageiros durante o processo de eletrificação²².

²¹ O valor de 8% é conservador e se baseia no pressuposto de uma rápida descarbonização do setor industrial até 2050. Oitenta por cento é uma estimativa razoável hoje: Ver Andrew Moseman & Sergey Paltsev, MIT Climate Portal (2022), [Are electric vehicles definitely better for the climate than gas-powered cars?](#)

²² Center on Global Energy Policy (2023), [Q&A: Critical minerals demand growth in the net-zero scenario](#).

5. IMPACTOS DOS CENÁRIOS NO CONSUMO DE ELETRICIDADE

A **alta substituição modal** não apenas oferece certo grau de redundância com a **alta eletrificação**, mas também retira parte do ônus da rápida descarbonização da rede, reduzindo drasticamente o aumento da demanda por eletricidade resultante da eletrificação veicular. Além disso, a **alta substituição modal** aumenta a resiliência em todos os níveis, fornecendo redundância nas opções de transporte.

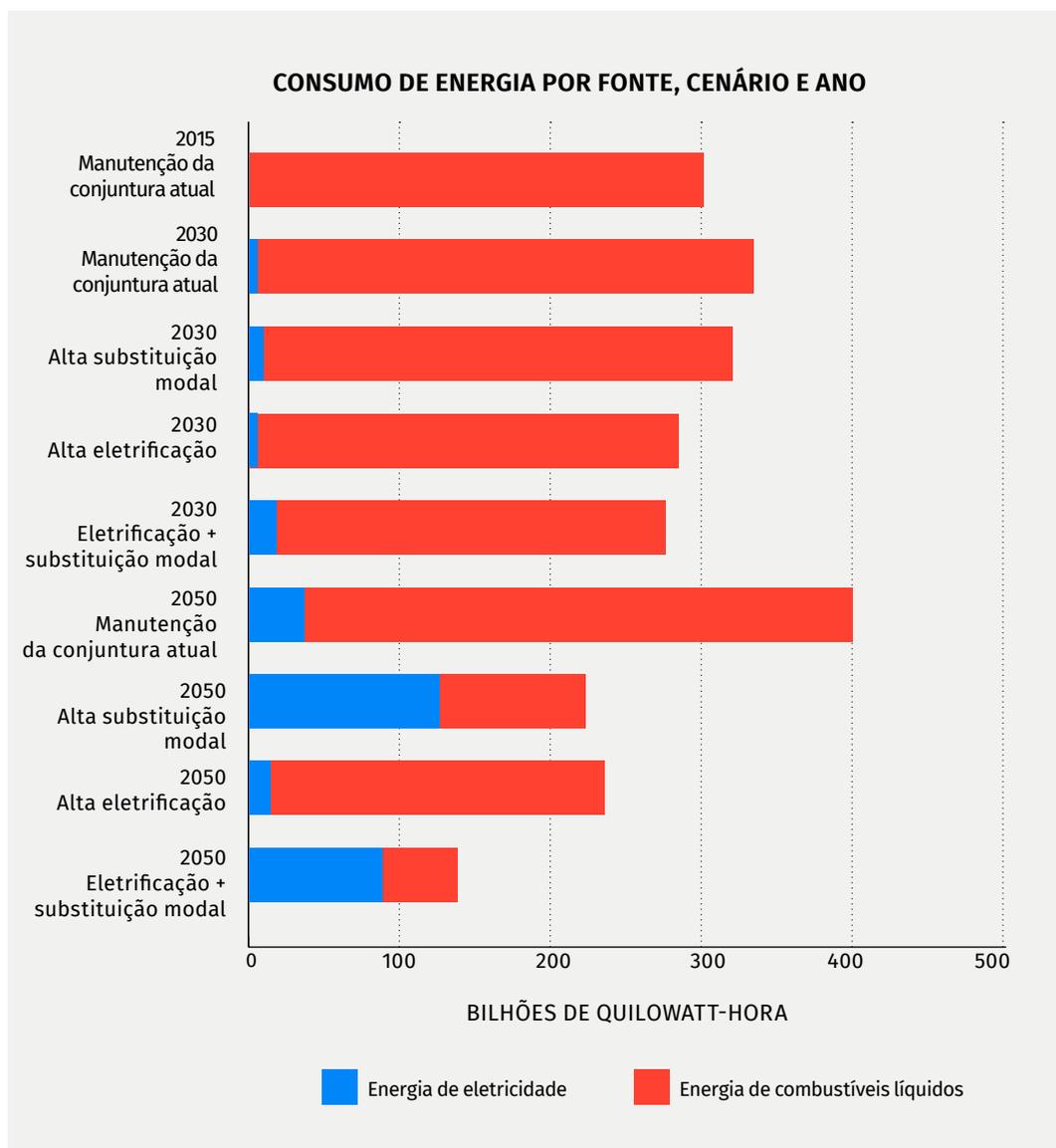


FIGURA J
Consumo anual de energia

O cenário de **alta eletrificação** gera uma grande redução no consumo total de energia em relação ao cenário de **manutenção da conjuntura atual** porque os veículos elétricos são muito mais eficientes por quilômetro que os veículos a combustão interna. No entanto, essa redução no consumo total de energia vem acompanhada de um grande aumento no uso de eletricidade, como pode ser visto na figura J.

No cenário de **alta eletrificação**, o transporte urbano de passageiros no Brasil consumiria cerca de 132 bilhões de kWh de eletricidade anualmente até 2050. O cenário de **eletrificação + substituição modal** reduziria esse consumo em cerca de 41% (54 bilhões de kWh), ou o equivalente à geração anual de energia de quase 11 mil turbinas eólicas. Isso pode significar uma redução nos custos de construção de infraestrutura para a produção de energia renovável ou a liberação de eletricidade para outras necessidades urgentes relacionadas à crise climática.

6. DESPESAS PÚBLICAS E PRIVADAS DIRETAS EM CADA CENÁRIO

Os cenários de **alta substituição modal** e de **eletrificação + substituição modal** geram eficiências capazes de economizar cerca de R\$ 13 trilhões para a economia brasileira como um todo, incluindo os setores público e privado.

A estrutura do sistema de transportes tem muitos impactos na economia de uma nação, tanto diretos quanto indiretos. Nosso modelo tabula apenas os impactos diretos: as despesas de fabricação, manutenção, abastecimento e operação de veículos e as despesas de construção e manutenção de infraestrutura. Isso é demonstrado na figura K.

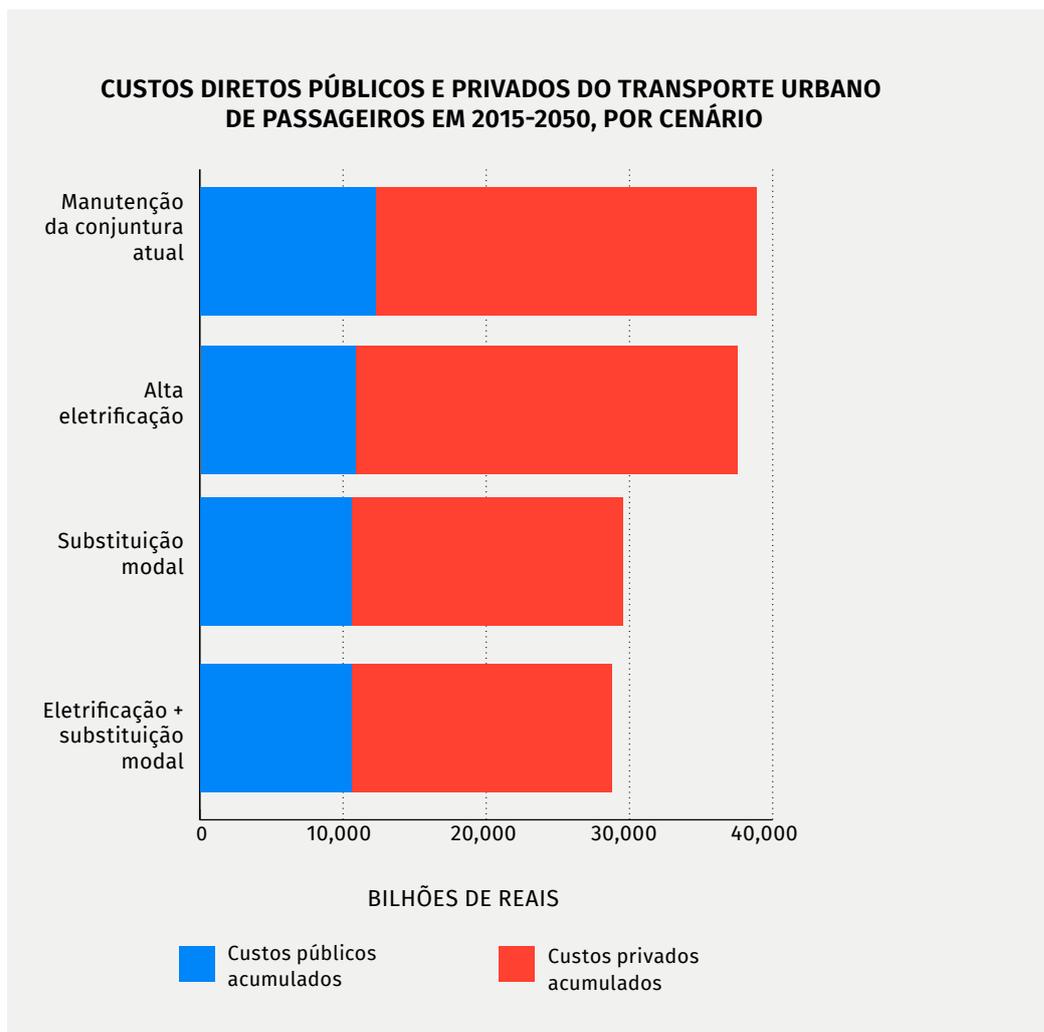


FIGURA K
Custos diretos acumulados do transporte urbano de passageiros

Essas despesas podem ser divididas entre aquelas cobertas, em última instância, pelo setor público e aquelas cobertas por indivíduos²³. A **alta substituição modal** geraria enormes economias para o Brasil — uma redução acumulada de cerca de R\$ 10 trilhões de reais. Desse total, cerca de R\$ 1 trilhão seria revertido para os governos federal, estaduais e locais, conforme ilustra a figura M na seção 7 abaixo.

Nossos cálculos incluem apenas os custos diretos do transporte urbano de passageiros e não os custos indiretos, como despesas com saúde relacionadas a sinistros de trânsito ou a um estilo de vida sedentário; custos relacionados à poluição atmosférica, sonora ou hídrica; ou custos de terras agrícolas ou áreas naturais perdidas devido à expansão urbana; tampouco consideramos os benefícios econômicos derivados da geração de empregos²⁴. Todos esses custos e benefícios indiretos indicam que, provavelmente, os verdadeiros benefícios econômicos do cenário de **eletrificação + substituição modal** seriam muitas vezes superiores aos calculados.

²³ A fim de manter uma atitude mais conservadora, nossos cálculos presumem que o governo arcaria com o custo total das operações de transporte público — ou seja, as tarifas seriam gratuitas. Nossa expectativa é que os subsídios ao transporte público aumentem nos cenários de substituição modal, embora possivelmente não até tal nível.

²⁴ Os investimentos no transporte público geram quase o dobro de empregos por dólar que os investimentos na construção de novas rodovias. Ver: Transportation for America (2021), [Road and public transit maintenance create more jobs than building new highways](#).

7. OBJETIVOS MENSURÁVEIS PARA O TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS

O Brasil tem capacidade de alcançar o cenário de **eletrificação + substituição modal**. Esse cenário gera grandes economias para o setor público, bem como para indivíduos e empresas privadas, ao mesmo tempo que reduz as emissões do transporte urbano de passageiros a um nível mais compatível com o compromisso do país de contribuir para a manutenção do aquecimento global abaixo de 1,5 °C. Não será necessário nenhum financiamento adicional além dos recursos que o Brasil já gasta com o transporte urbano de passageiros — na verdade, o cenário de **eletrificação + substituição modal** exigiria apenas uma mudança nas políticas e a realocação de recursos.

Três elementos devem se unir para que seja possível a realização do cenário de **eletrificação + substituição modal**: primeiro, o aumento da eficiência dos veículos, principalmente por meio da eletrificação; segundo, a reforma do uso do solo para tornar os deslocamentos mais curtos, promovendo cidades compactas de uso misto; e terceiro, a viabilização da substituição modal, principalmente fornecendo infraestruturas alternativas, mas também determinando o custo real dos deslocamentos em automóvel.

Nesta seção, apresentamos metas baseadas em evidências para cada um desses três elementos com base na análise quantitativa deste estudo. Se alcançados, estes objetivos garantirão os benefícios do cenário de **eletrificação + substituição modal**. Os objetivos poderiam ser alcançados de várias maneiras.

7.1. Objetivos de eletrificação

Para alcançar ou exceder os compromissos climáticos do país, a eletrificação deve prosseguir a um ritmo muito mais rápido que o atual. Conforme análise na seção 3.2.1, os veículos novos de diferentes tipos devem ser elétricos, de acordo com as taxas na figura L abaixo. Mais importante ainda, 15% de todos os novos veículos leves vendidos (automóveis e caminhões leves) devem ser elétricos até 2030; e 100%, até 2050. Isso exigirá não apenas o cumprimento das projeções “agressivas” da Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica, mas também a manutenção de políticas e incentivos oferecidos aos consumidores nas próximas décadas.

Porcentagem de novos veículos elétricos (em vez de veículos a combustão interna)						
	Manutenção da conjuntura atual e alta substituição modal			Alta eletrificação e eletrificação + substituição modal		
	2015	2030	2050	2015	2030	2050
Carros e caminhões leves	0%	5%	20%	0%	15%	100%
Veículos de duas rodas/ motocicletas (não inclui bicicletas elétricas)	0%	5%	20%	0%	15%	100%
Ônibus	0%	5%	20%	0%	23%	100%

FIGURA L
Vendas de veículos elétricos por ano e cenário

7.2. Objetivos de uso do solo

Um modelo de desenvolvimento urbano mais compacto e de uso misto gerará benefícios duplos para as cidades brasileiras. Em primeiro lugar, quando as pessoas vivem mais perto de seus locais de trabalho ou lazer, os deslocamentos são mais curtos e, por isso, mesmo os veículos a combustão interna emitem menos gases e geram menos custos. Em segundo lugar, quando os deslocamentos são mais curtos, é mais fácil usar a bicicleta ou o transporte público coletivo, o que promove a substituição modal.

Para realizar o cenário de **eletrificação + substituição modal** e cumprir seus compromissos climáticos nacionais, o Brasil precisará manter políticas que permitam um desenvolvimento urbano compacto, ao mesmo tempo que promovem o uso misto do solo, orientado ao transporte sustentável. Conforme análise da seção 3.2.2 acima, as cidades brasileiras devem permanecer pelo menos tão densas quanto sua trajetória atual as levará a ser.

7.3. Objetivos de infraestrutura de transporte

Esta análise apresenta a agenda mais clara para o terceiro dos três componentes necessários para alcançar o cenário de **eletrificação + substituição modal**: os investimentos específicos em infraestrutura de transporte que serão necessários para atingir tais níveis de substituição modal e as possíveis economias estimadas por meio da aplicação de tal estratégia.

A figura M abaixo indica a extensão dos investimentos em infraestrutura e veículos que o Brasil deve fazer para realizar o cenário de **eletrificação + substituição modal**. Como demonstra a figura M, o elemento de substituição modal do cenário significará que os governos federal, estaduais e locais economizarão cerca de R\$ 1 trilhão até 2050. As despesas de construção e operação do transporte público serão mais que compensadas pela redução da necessidade de construir e manter vias expressas.

Total de nova infraestrutura e veículos necessários em 2015–2030							
	Quilômetros de faixas rodoviárias urbanas	Quilômetro de faixas de BRT	Quilômetros de trilhos de metrô	Quilômetros de ciclovias/ ciclofaixas protegidas	Ônibus	Vagões de trem	Custo total para os governos (bilhões de reais)
Manutenção da conjuntura atual e alta eletrificação	91.200	640	0	2.560	340.000	900	R\$ 3.700
Alta substituição modal e eletrificação + substituição modal	33.600	2.560	480	56.000	380.000	1.300	R\$ 3.400
Total de nova infraestrutura e veículos necessários em 2015–2050							
	Quilômetros de faixas rodoviárias urbanas	Quilômetro de faixas de BRT	Quilômetros de trilhos de metrô	Quilômetros de ciclovias/ ciclofaixas protegidas	Ônibus	Vagões de trem	Custo total para os governos (bilhões de reais)
Manutenção da conjuntura atual e alta eletrificação	368.000	1.280	160	3.360	840.000	2.100	R\$ 12.000
Alta substituição modal e eletrificação + substituição modal	57.600	8.160	2.560	208.000	1.200.000	5.200	R\$ 11.000

FIGURA M
Descrição detalhada dos requisitos de infraestrutura e investimentos por cenário

Esta análise fornece um roteiro claro para investimentos em infraestrutura de transporte em cidades de todo o Brasil.

Mudanças nessa escala são ambiciosas, mas não são inéditas. Paris reduziu seus deslocamentos em automóveis em quase 50% em 30 anos, investindo em outros modos e estratégias de controle do tráfego. Jacarta e Bogotá construíram sistemas de transporte público de média e alta capacidade que atendem a quase 1 milhão de passageiros por dia em apenas 15 anos. Não há razão para que as cidades brasileiras não possam fazer o mesmo.

APÊNDICE: DOCUMENTAÇÃO METODOLÓGICA

Devido a sua extensão, a documentação metodológica não foi incluída nesta versão do relatório. Ela está disponível [neste link](#).



Instituto de Políticas de Transporte & Desenvolvimento

UC DAVIS
UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Taylor Reich
UC ITDP

Lew Fulton
UC DAVIS

NOVEMBRO DE 2024

