



O Cenário de Cidades Compactas Eletrificadas

O ÚNICO CAMINHO PARA LIMITAR O AUMENTO DA TEMPERATURA GLOBAL EM 1,5 °C



UC DAVIS
UNIVERSITY OF CALIFORNIA



AGRADECIMENTOS

CONCEITO

Jacob Mason Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
Heather Thompson Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento

AUTORES PRINCIPAIS

Lewis Fulton Universidade da Califórnia em Davis
D. Taylor Reich Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento

AUTORES

Maha Ahmad Universidade da Califórnia em Davis
Giovanni Circella Universidade da Califórnia em Davis
Jacob Mason Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento

REVISORES

Os especialistas abaixo dispuseram-se generosamente a revisar o conteúdo do estudo:

Sebastian Castellanos World Resources Institute — New Urban Mobility Alliance
Aimee Gauthier Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
Dan Pletchaty Fundação ClimateWorks
Michael Replogle Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
e Departamento de Transportes da Cidade de Nova York (emérito)
Jacob Teter Agência Internacional de Energia
Heather Thompson Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento
Mallory Trouve Fórum Internacional de Transportes
Sheila Watson Iniciativa Global de Economia de Combustíveis

APOIO

O ITDP gostaria de agradecer a seus doadores e apoiadores, entre os quais a Fundação ClimateWorks, por terem tornado possível esta pesquisa.

Muitas outras pessoas — numerosas demais para citar — contribuíram para o sucesso deste projeto, e somos gratos a todas elas. Quaisquer erros ou falhas no produto final são de responsabilidade exclusiva dos autores.

Versão original em inglês publicada em dezembro de 2021. Tradução em português publicada em novembro de 2022.

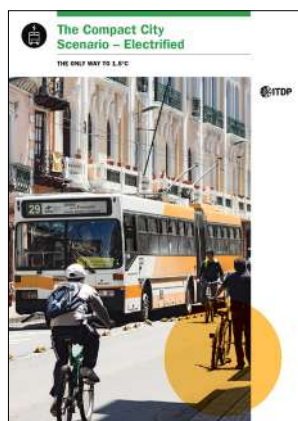


IMAGEM DA CAPA:

Ciclopaseo em Quito,
Equador.
Cortesia de Ted
Timmons.
Disponível sob licença
da Creative Commons
Attribution 3.0
International.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 ABORDAGEM DE MODELAGEM	7
2.1 MÉTODOS	7
2.2 CENÁRIOS	9
2.2.1 <i>Cenário de manutenção da conjuntura atual</i>	9
2.2.2 <i>Cenário de alta eletrificação</i>	11
2.2.3 <i>Cenário de alta substituição modal</i>	12
2.2.4 <i>Cenário de eletrificação + substituição modal</i>	16
3 RESULTADOS	17
3.1 DESLOCAMENTOS	17
3.2 COMPOSIÇÃO DA FROTA	20
3.3 CONSUMO DE ENERGIA	22
3.4 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA	23
3.5 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: CASO DE SENSIBILIDADE	28
3.6 CUSTOS DIRETOS PÚBLICOS E PRIVADOS	29
4 ORIENTAÇÕES SOBRE POLÍTICAS PÚBLICAS	33
4.1 COMO ALCANÇAR A ALTA ELETRIFICAÇÃO	33
4.2 COMO ALCANÇAR A ALTA SUBSTITUIÇÃO MODAL	34



INTRODUÇÃO

1

"As previsões de aquecimento global de 1,5 °C e 2 °C serão excedidas no século XXI, a menos que haja reduções profundas nas emissões de CO₂ [dióxido de carbono] e outros gases de efeito estufa nas próximas décadas."

— Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, [Sexto Relatório de Avaliação](#)

Nos próximos 30 anos, a forma como as pessoas se movimentam nas cidades mudará. As mudanças podem assumir várias formas, e a natureza de tais mudanças terá amplos impactos nas economias, na saúde pública, na justiça social e no clima da Terra. As mudanças serão determinadas pelas políticas públicas que os governos adotarem agora, e seus efeitos durarão décadas ou, quiçá, séculos.

Este estudo modela quatro possíveis cenários de mudanças no transporte urbano de passageiros, a saber: **(1) manutenção do cenário atual**, ou BAU (expressão em inglês para *business as usual*, que significa como de costume, ou manutenção do modelo existente); **(2) extensa eletrificação de veículos**; **(3) promoção de cidades compactas construídas em torno de pedestres, ciclistas e usuários de transporte público**; e a **(4) combinação da eletrificação de veículos, cidades compactas e substituição modal**. Constatamos que, individualmente, a eletrificação ou as cidades compactas não seriam capazes de reduzir as emissões a um nível que limite o aquecimento global a menos de 2 °C. Somente se combinarmos a eletrificação veicular e um projeto de cidades compactas conseguiremos manter o aquecimento global futuro abaixo de 2 °C, o que nos daria alguma chance de o clima retornar a um aquecimento inferior a 1,5 °C até o final do século.

O planeta já se aqueceu de forma considerável. Inundações, incêndios e furacões têm se tornado mais frequentes. Na ausência de um esforço global para reduzir as emissões de carbono a zero líquido até 2050 (ou, no máximo, 2070), a Terra registrará um aquecimento superior a 2 °C até 2100. Se as emissões continuarem a subir no ritmo atual, o aquecimento poderá ultrapassar 5 °C. Isso nos levaria a um futuro de sofrimento humano inimaginável e sem precedentes, com colheitas destruídas, cidades alagadas e incêndios incontroláveis. Centenas de milhões de pessoas¹ se tornariam refugiados ou, pior, pereceriam de fome, ou em guerras e desastres.

Em nível global, o transporte rodoviário de passageiros² é responsável por cerca de 10% das emissões antrópicas de gases de efeito estufa. À medida que os cidadãos das economias emergentes passam a ter dinheiro suficiente para adquirir veículos próprios, as emissões do transporte urbano de passageiros aumentam rapidamente.

Uma abordagem promissora para reduzir as emissões do transporte urbano de passageiros é a adoção de veículos elétricos (VEs). Essa tecnologia está evoluindo rapidamente e, embora sua participação no mercado ainda seja pequena, a adoção de políticas adequadas pode promover a rápida eletrificação das frotas de transporte de passageiros.

Juntas, a eletrificação veicular plena e a descarbonização total da rede elétrica evitariam, teoricamente, todas as emissões relacionadas ao transporte de passageiros. No entanto, como conclui este estudo, é improvável que, mesmo se tivermos metas altamente ambiciosas de eletrificação e descarbonização das redes, consigamos substituir totalmente os veículos com motor de combustão interna (ICE, na sigla em inglês) até 2050. Em outras palavras, a eletrificação, por si só, não é capaz de reduzir as emissões ao nível necessário para garantir um aquecimento inferior a 2 °C.

Caminhadas e bicicletas são modos de transporte sem emissões. Foto de Dar es Salaam, Tanzânia.
FONTE: ITDP África.

¹ Kanta Kumari Rigaud et al. (2018), [Groundswell: Preparing for Internal Climate Migration](#), World Bank, Washington, DC.
² Não inclui o transporte de cargas ou o transporte aéreo. Ver Hannah Ritchie (2020), [Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from?](#), *Our World in Data*, 6 de outubro; Agência Internacional de Energia (2020), [Energy Technology Perspectives 2020](#), IEA, Paris.

Outra abordagem para descarbonizar o transporte urbano de passageiros é a promoção de cidades compactas construídas em torno de caminhadas, bicicletas e transporte público. Em comparação com o desenvolvimento centrado no automóvel, essa abordagem de planejamento urbano pode reduzir drasticamente a demanda por deslocamentos em veículos individuais. Várias cidades ao redor do mundo, como Copenhague e Bogotá, já obtiveram benefícios ao seguir essa estratégia. Além de reduzir as emissões de carbono, as cidades compactas podem reduzir o custo do transporte e promover maior inclusão social.

Tanto a eletrificação quanto as cidades compactas têm um enorme potencial para descarbonizar o transporte urbano de passageiros. Todavia, a escala do desafio supera qualquer uma dessas duas soluções. Como demonstraremos a seguir, nenhuma dessas estratégias, por si só, é suficiente para reduzir as emissões a um nível compatível com a limitação do aquecimento global a menos de 2 °C. Para que isso seja possível, é necessário combiná-las.

Uma vez construídos os bairros e cidades, é mais difícil alterá-los. Portanto, é muito importante que as cidades que estiverem se desenvolvendo e expandindo agora adotem os padrões de crescimento descritos neste estudo. O planejamento das cidades pode ter impactos extremamente duradouros: embora os prédios tenham mudado, os traçados das ruas de Xi'an ou de Roma seguem praticamente os mesmos modelos de milênios atrás. As redes viárias das cidades, assim como sua densidade, são fundamentais para determinar o melhor sistema de transporte a ser implementado. Naturalmente, é possível adaptar subúrbios extensos, como os da América do Norte, com suas vias largas e grandes quarteirões, para torná-los mais favoráveis a pedestres e bicicletas. Contudo, é muito mais fácil impedir que tais subúrbios sejam construídos na África e na Índia. Ao longo dos próximos 30 anos, cerca de 2 bilhões de pessoas a mais migrarão para as cidades. Se agirmos agora, podemos garantir que eles vivam em bairros sustentáveis desde o início.

1.1A ESTUDOS ANTERIORES E REVISÃO POR PARES

Este é o quarto projeto conjunto de pesquisa do ITDP e da UC Davis para modelar os impactos de possíveis cenários futuros de transporte urbano de passageiros³. Assim como os estudos anteriores, esta pesquisa foi realizada sob a revisão de um painel de especialistas representantes de organizações internacionais especializadas no assunto, a saber:

- Agência Internacional de Energia
- Fórum Internacional de Transportes
- Fundação ClimateWorks
- Iniciativa Global de Economia de Combustíveis

As pessoas especialistas examinaram as premissas, a metodologia e as conclusões do estudo para garantir a viabilidade dos cenários e, de acordo com cada cenário, a precisão das conclusões.

1.1B COVID-19

A pandemia de covid-19 afetou o transporte mundial de maneira singular em 2020 e 2021. No entanto, os efeitos de longo prazo da crise ainda não estão evidentes; por isso, optamos por tratar a covid-19 como uma anomalia e usar 2015 como o ano-base de nossa análise.

2

2.1 MÉTODOS

Este relatório baseia-se em três estudos anteriores sobre deslocamentos urbanos realizados pela UC Davis e pelo ITDP e usa a mesma ferramenta de modelagem: um modelo de deslocamentos urbanos de passageiros que inclui vendas de veículos; estoques; tipos de tecnologia e energia; e os próprios deslocamentos. A ferramenta de modelagem é calibrada com dados atualizados⁴. Agregamos informações detalhadas da Agência Internacional de Energia (AIE) e de outras fontes em oito regiões do mundo⁵. Em nível regional, empregamos a mesma abordagem ASIF (sigla em inglês de atividade, estrutura, intensidade e combustível) usada em muitos outros modelos de transporte:

*Atividade * Estrutura * Intensidade * Combustível*

- **Atividade:** deslocamentos *per capita*;
- **Estrutura:** proporção de modos utilizados (por sua vez, uma função das vendas e estoques de veículos por modo e tipo de tecnologia);
- **Intensidade:** eficiência dos modos, medida como o consumo de combustível por quilômetro; e
- **Combustível:** intensidade de carbono dos combustíveis e portadores de energia usados por diferentes tipos de veículos, medida em emissões de carbono por unidade de combustível.

Usamos essa abordagem para modelar quatro cenários para o futuro do transporte urbano de passageiros (descritos na seção 2.2). Começamos projetando o cenário de **manutenção da conjuntura atual** para cada região até 2050, levando em consideração o crescimento da população e da renda. Essas tendências influenciam as taxas de propriedade de automóveis e outras escolhas modais. Em grande medida, nosso **cenário atual** é calibrado conforme as projeções do Modelo de Mobilidade da AIE.

Os outros três cenários modelam futuros em que mudanças nas políticas públicas alterariam o desenvolvimento do transporte urbano de passageiros. Não vinculamos explicitamente as políticas a impactos numéricos. Em vez disso, adotamos uma abordagem qualitativa para prever as políticas que seriam necessárias (ver seção 4) e estimamos quantitativamente os efeitos que essas políticas poderiam ter na atividade, estrutura, intensidade e combustível (ver seções 3 e 4). Essas estimativas são fundamentadas em literatura científica e modelos-padrão da indústria e foram revisadas por especialistas das principais organizações internacionais da área (ver quadro 1.1A).

2.1A MELHORIAS NA MODELAGEM

O *Cenário de Cidades Compactas Eletrificadas* difere dos estudos anteriores do ITDP-UC Davis em três aspectos principais:

- 1 Nosso escopo não se limita às emissões de gases de efeito estufa do uso de veículos (*well-to-wheel* [WtW], ou do poço à roda). Em vez disso, incluímos as emissões da fabricação e do descarte de veículos, o que é especialmente importante no caso de veículos elétricos devido aos processos de fabricação de baterias, que são intensivos em carbono. Também incluímos as emissões da construção e manutenção de infraestrutura, tais como rodovias, ferrovias, ciclovias e vagas de estacionamento. Um estudo recente do Fórum Internacional de Transportes⁶ e do Conselho Internacional de Transporte Limpo⁷ definiu a base para a modelagem dessas emissões indiretas, que também integram o transporte urbano de passageiros. Para todas as fontes de emissões, há incertezas sobre quanta descarbonização pode ocorrer entre agora e 2050. No que diz respeito à geração de eletricidade, presume-se uma profunda descarbonização, conforme o *Cenário de Desenvolvimento Sustentável* da Agência Internacional de Energia. Para a produção, descarte e infraestrutura de veículos, presume-se uma descarbonização bastante intensa (de 50% a 60%) entre agora e 2050, em linha com a descarbonização da indústria descrita no relatório mais conservador da Agência Internacional de Energia, intitulado *Cenário de Promessas Anunciadas*.
- 2 Modelamos detalhadamente as mudanças no uso e na densidade do solo urbano em nível de cidade, com base em dados de densidade populacional de alta resolução de 2000 e 2015 publicados pela Comissão Europeia⁸. Essas projeções são agregadas em nível regional para estimar a demanda futura de deslocamentos. Ver seção 2.2.3 para mais detalhes.
- 3 A taxa projetada de eletrificação veicular (nos cenários de *alta eletrificação* e de *eletrificação + substituição modal*) é maior do que nunca. Alcançar quase 100% de vendas de veículos elétricos em todas as regiões e modos até 2040 representa uma meta muito mais agressiva que qualquer outra modelagem de estudos anteriores. Por outro lado, nossas projeções de possíveis substituições modais permaneceram, em geral, alinhadas às de relatórios anteriores.

2.1B OMISSÕES INTENCIONAIS: BIOCOMBUSTÍVEIS E VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Certas variáveis, embora relevantes para o futuro do transporte urbano de passageiros, foram excluídas do escopo deste estudo. Duas delas são os biocombustíveis e os veículos autônomos. Embora os biocombustíveis sejam cruciais para descarbonizar o setor global de transporte de forma mais ampla, eles são mais relevantes para o transporte marítimo, aéreo e rodoviário de longa distância — que são mais difíceis de eletrificar que o transporte urbano de passageiros⁹.

Os impactos potenciais dos veículos autônomos foram examinados em um estudo anterior, intitulado *Três Revoluções no Transporte Urbano*¹⁰. Desde que o relatório foi publicado, as expectativas do setor em relação à proliferação de veículos autônomos tornaram-se mais conservadoras. Para evitar as incertezas relacionadas à previsão do progresso e à adoção de tecnologias de veículos autônomos, omitimos a automação em nosso estudo, concentrando-nos, de forma mais direta, na eletrificação e na substituição modal.

6 Fórum Internacional de Transportes (2020), *Good to Go? Assessing the Environmental Performance of New Mobility*, ITF, Paris.

7 Georg Bieker (2021), *A Global Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars*, International Council on Clean Transportation.

8 Comissão Europeia, *GHSI - Global Human Settlement Layer*, EC, Bruxelas.

9 Agência Internacional de Energia (2021), *Net Zero by 2050*, IEA, Paris, pp. 134-135.

10 Lew Fulton, Jacob Mason e Dominique Meroux (2017), *Three Revolutions in Urban Transportation*, ITDP e UC Davis.

2.2 CENÁRIOS

Em escala global, o futuro do transporte urbano de passageiros é um tema tão amplo que chega a ser difícil de imaginar. Antes da pandemia, a AIE havia feito uma estimativa aproximada da distância que seria percorrida por passageiros em todo o mundo em 2020: cerca de 28 trilhões de quilômetros, ou uma média de cerca de 3.500 quilômetros por pessoa ao ano. Todavia, o futuro é incerto. Consideramos quatro cenários potenciais: narrativas simplificadas que ilustram possíveis futuros de forma ampla.

São cenários “preditivos” — diferentes dos cenários “retroativos” empregados por outros modeladores. Em estudos “retroativos”, os autores estabelecem uma meta — por exemplo, um setor de transporte com emissões líquidas iguais a zero — e consideram como esse propósito pode ser alcançado. Nossa abordagem começa com rotas viáveis e plausíveis para o futuro do setor de transporte: rotas que poderiam ser percorridas por meio de políticas conhecidas. Em seguida, estimamos as viagens de passageiros e veículos, o uso de energia, as emissões e os custos associados a essas rotas.

Nosso cenário de **manutenção da conjuntura atual** é uma projeção direta de tendências passadas e de políticas declaradas para o futuro, ao passo que os outros três cenários — *alta substituição modal*; *alta eletrificação*; e *eletrificação + substituição modal* — são altamente ambiciosas, exigindo mudanças substanciais nos padrões de viagem, na adoção de veículos e nas políticas públicas internacionais e locais. Vale notar que esses futuros são viáveis. Eles podem ser alcançados com os níveis atuais de financiamento do setor de transportes, as tecnologias atuais e projeções relativamente conservadoras de tendências tecnológicas. A seção 4 deste relatório identifica as principais políticas que podem transformar esses cenários em realidade.

Nós nos concentramos em três anos específicos: 2015, 2030 e 2050. Evitamos 2020 porque os dados sobre todas as variáveis necessárias ainda não estão amplamente disponíveis e porque a pandemia de covid-19 fez de 2020 um ano anômalo para o setor de transportes. Em geral, adotamos a premissa de que as mudanças nesses cenários seriam estáveis entre 2015 e 2030 e que eventuais desvios importantes dessas tendências resultantes da pandemia seriam eliminados até 2030, ou bem antes disso. Presume-se, também, que as tendências se mantenham de 2030 a 2050. No entanto, isso não significa que todas as tendências são tratadas como lineares. Por exemplo, algumas mudanças nas vendas de diferentes tipos de veículos aceleram com o tempo, criando curvas logísticas, ou curvas “S”. Os estoques de veículos ficam abaixo das vendas à medida que a frota é substituída. Em geral, presumimos que os desvios de nosso **cenário atual** levem tempo para ocorrer, com uma aceleração das mudanças após 2030 (em comparação ao período anterior).

2.2.1 CENÁRIO DE MANUTENÇÃO DA CONJUNTURA ATUAL

O cenário de **manutenção da conjuntura atual** reflete as tendências atuais do transporte urbano de passageiros. É um futuro que se parece muito com o presente — só que em escala maior.

Esse futuro é definido pela rápida proliferação de veículos particulares movidos a motor de combustão interna (ICE, na sigla em inglês) em países de renda baixa e média. Na região África-Oriente Médio, por exemplo, o número desses veículos crescerá por um fator de cinco entre 2015 e 2050, atingindo 224 milhões em 2050 — um número significativamente maior de automóveis que nas áreas urbanas dos Estados Unidos hoje. Enquanto isso, os países de renda alta observariam uma expansão tanto das frotas de automóveis quanto dos serviços de transporte público, mas a grande maioria das viagens motorizadas continuaria dependente de combustíveis fósseis.

O cenário de **manutenção da conjuntura atual** se baseia nas projeções da AIE apresentadas no relatório *Perspectivas de Tecnologia de Energia 2020*¹¹ e no Modelo de Mobilidade da AIE adotado no relatório. O modelo fornece a base para o aumento dos deslocamentos por modo e região e para o crescimento das vendas e estoques de veículos por tipo de veículo e tecnologia até 2050.

Nesse cenário, os padrões de viagem seriam dominados por aumentos nos deslocamentos feitos em veículos pessoais, inclusive veículos de duas rodas e veículos leves (carros, SUVs, caminhonetes e *minivans*). Esse crescimento ocorreria às custas dos modos de transporte público, como ônibus e sistemas ferroviários, que cresceriam lentamente na maior parte do mundo. A participação de veículos elétricos no mercado também crescerá lentamente, devendo atingir cerca de 10% das vendas globais de automóveis até 2050.



FIGURA 2.2.1

Esta rua centrada em carros no Cairo representa o futuro para grande parte do mundo no cenário de manutenção da conjuntura atual.

FONTE: Friedrich Stark via Alamy Stock.

IMPACTOS DA PERMANÊNCIA DO CENÁRIO ATUAL SOBRE A EQUIDADE

No cenário de manutenção da conjuntura atual, haveria uma tendência de aumento das diferenças entre as pessoas de renda mais alta e mais baixa. À medida que as cidades se tornassem mais dependentes dos carros, a locomoção das pessoas que não possuem veículos se tornaria cada vez mais difícil. As externalidades negativas do uso de automóveis afetariam as pessoas de baixa renda de maneira desproporcional: a poluição atmosférica, a poluição sonora e as fatalidades no trânsito afetariam principalmente as pessoas que não têm escolha a não ser morar perto de rodovias. Rodovias urbanas atravessariam bairros urbanos. Em alguns lugares, os subúrbios de baixa densidade populacional invadiriam áreas agrícolas e naturais; em outros, um modelo habitacional baseado em arranha-céus e automóveis submeteria a população a altos níveis de poluição sonora e atmosférica causada pelo tráfego. Nesse cenário, as pessoas dirigiriam mais e caminhariam e pedalariam menos, o que acarretaria impactos mentais e físicos, além de consequentes pressões sobre a saúde pública.

2.2.2 CENÁRIO DE ALTA ELETRIFICAÇÃO

As tecnologias de baterias têm evoluído rapidamente, e os preços de compra de novos veículos elétricos (VEs) estão caindo. Em todos os principais mercados mundiais, as emissões de todo o ciclo de vida dos VEs são consideravelmente mais baixas que as dos veículos movidos a combustíveis fósseis. Na maioria dos países, a participação de mercado dos VEs ainda é baixa, mas está aumentando. Ao longo da próxima década, pode haver uma substituição considerável de veículos movidos a motor de combustão interna (ICE) por VEs. Isso pode ocorrer paralelamente aos esforços de descarbonização da rede. Como benefício adicional, a eletrificação dos veículos reduziria não apenas as emissões de gases de efeito estufa, mas também as emissões de poluentes atmosféricos locais¹². A poluição atmosférica é uma das principais causas de morte na maioria dos países; portanto, a eletrificação salvaria vidas no curto e longo prazos.

O cenário de **alta eletrificação** considera um mundo em que a adoção de VEs seria bastante intensa, mas com o propósito quase exclusivo de descarbonizar o transporte urbano de passageiros. Nesse cenário, os formuladores de políticas públicas demonstrariam um compromisso total com a eletrificação, mas não tentariam mudar significativamente, em relação à **manutenção do cenário atual**, o paradigma segundo o qual nossas cidades são planejadas, ou os modos de transporte usados pelas pessoas. Se adotarmos a premissa de uma evolução contínua das tecnologias de veículos elétricos (ou seja, maior autonomia e baterias cada vez mais baratas), os veículos elétricos devem se tornar populares e competitivos (em termos de custos) até 2030 na maioria dos países. Também partimos do pressuposto que a rede elétrica mundial terá sido amplamente descarbonizada até 2050, conforme indica o *Cenário de Desenvolvimento Sustentável* da AIE¹³.

À primeira vista, o mundo de **alta eletrificação** seria muito parecido com o mundo de **manutenção do cenário atual**. Haveria a mesma quintuplicação do número de veículos de passageiros na África e o mesmo *status quo* relativo das participações modais nos países de renda mais alta. A diferença é que, neste cenário, os veículos elétricos se tornariam a maioria até 2050.

Este cenário se baseia em projeções de eletrificação veicular adaptadas da recente declaração da COP26 estabelecendo a meta de encerrar a venda de automóveis e vans movidos a combustíveis fósseis em todo o mundo até 2040¹⁴. Ele atende ou excede as taxas de eletrificação dos ambiciosos cenários de eletrificação recentemente propostos pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, pela AIE, pela BloombergNEF e pela Iniciativa Global de Economia de Combustíveis. De acordo com as projeções do cenário, a maior parte (84%) da frota mundial de veículos motorizados de passageiros (carros, ônibus e veículos de duas e três rodas) seria eletrificada até 2050.



FIGURA 2.2.2
Esta foto de Los Angeles mostra o tipo de infraestrutura centrada em carros que prevaleceria em um futuro de **alta eletrificação**.
FONTE: GaudiLab via Shutterstock.

12 Algumas emissões de poluentes atmosféricos locais também são causadas pela abrasão e desgaste de pneus e lonas de freio. Ver Francesco Cetta et al. (2008), *Comment on "Emissions from brake linings and tires: Case studies of Stockholm, Sweden 1995/1998 and 2005"*, *Environmental Science & Technology* 42(7), 2708–2709.

13 O *Cenário de Desenvolvimento Sustentável* projeta um aquecimento futuro abaixo de 2 °C. Para simplificar, esse nível de descarbonização da rede foi adotado como premissa em todos os quatro cenários.

14 Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de 2021 no Reino Unido (2021), *COP26 declaration on accelerating the transition to 100% zero emission cars and vans*, 10 de novembro.

IMPACTOS DE UM CENÁRIO DE ALTA ELETRIFICAÇÃO SOBRE A EQUIDADE

A **alta eletrificação** acarretaria muitos dos mesmos impactos desiguais do cenário de **manutenção da conjuntura atual**. A saúde pública se deterioraria, pois as pessoas andariam e pedalariam menos. As pessoas de baixa renda que não conseguissem adquirir veículos próprios teriam seu acesso a oportunidades limitado pelo planejamento urbano dominado pelos carros. Os subúrbios se expandiriam rumo a terras agrícolas. No entanto, a população não sofreria com o aumento da poluição atmosférica como no cenário de **manutenção da conjuntura atual**. Logo, seriam mitigados os piores impactos das mudanças climáticas, que afetam de maneira desproporcional as populações mais vulneráveis.

2.2.3 CENÁRIO DE ALTA SUBSTITUIÇÃO MODAL

Várias cidades ao redor do mundo já começaram a adotar políticas de compactação do uso do solo e a reformular seus sistemas de transporte com o objetivo de permitir que a população tenha a mesma facilidade para se deslocar em transporte público, de bicicleta ou a pé quanto de carro. Isso diminui a demanda pela aquisição e uso de automóveis particulares, o que reduz as emissões, mesmo que continuem sendo usados veículos movidos a combustíveis fósseis.

Políticas de uso do solo mais compacto, de uso misto e dirigido ao transporte público podem reduzir a demanda geral por transporte urbano e encurtar os deslocamentos. Faixas de ônibus, ciclovias, transporte ferroviário e calçadas também podem tornar esses modos mais convidativos que os automóveis, incentivando a substituição modal. Assim como a eletrificação, a **alta substituição modal** também geraria benefícios além da descarbonização. Ela melhoraria a mobilidade (especialmente das pessoas de baixa renda); logo, as cidades se tornariam mais equitativas. Como as pessoas passariam a caminhar e pedalar mais, a saúde pública melhoraria, o que reduziria os custos de saúde.

O cenário de **alta substituição modal** descreve um futuro ambicioso, mas plausível, no qual todos os níveis de governo se comprometeriam a construir mais e melhores infraestruturas para transporte público, bicicletas e pedestres; ao mesmo tempo, implementariam políticas sustentáveis de uso do solo e estratégias de redução do tráfego. O cenário pressupõe um aumento muito limitado no financiamento geral do transporte, mas prevê a existência de vontade política para direcionar esses recursos para estratégias multimodais comprovadas.

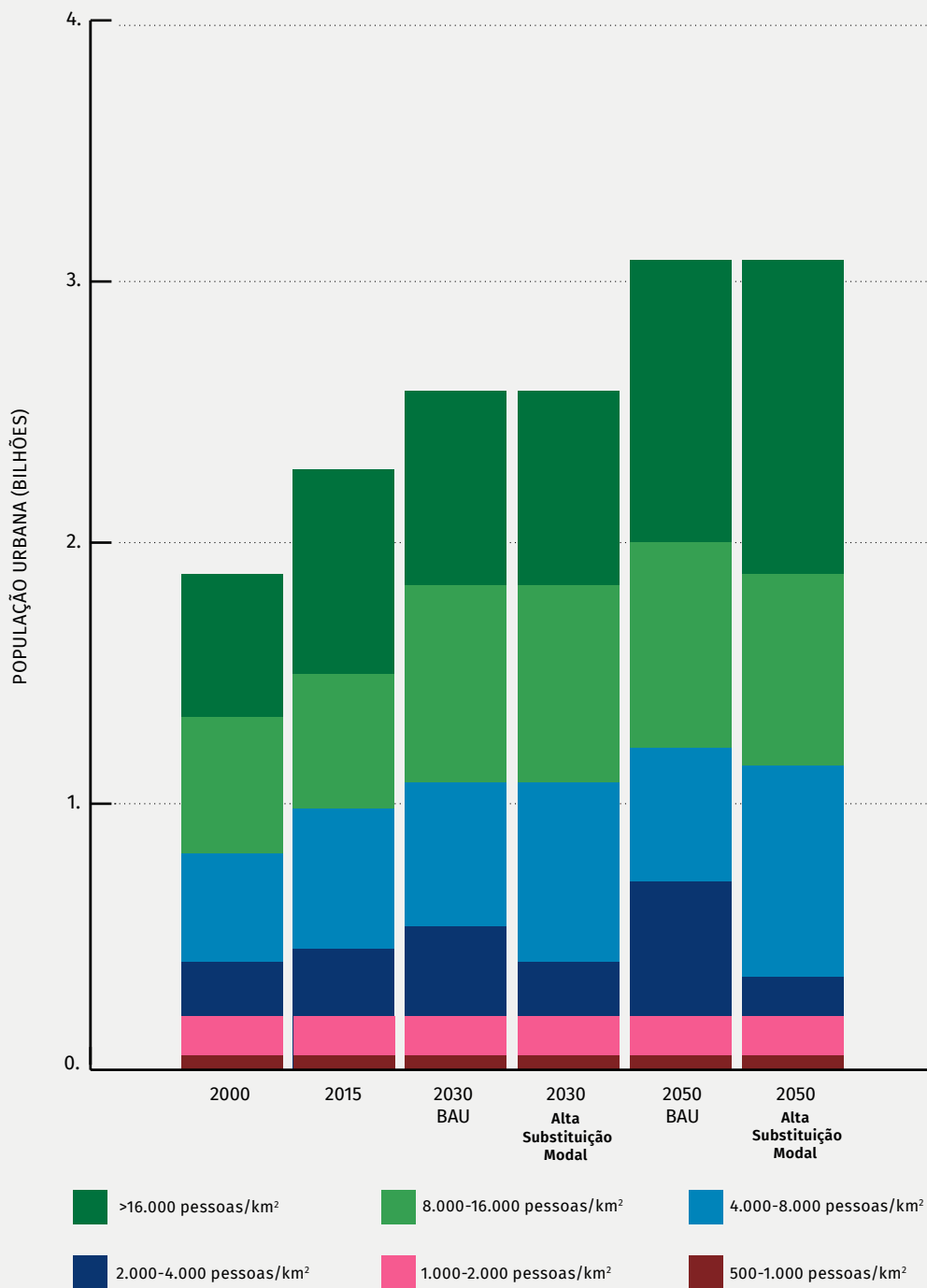
Neste cenário, à medida que as cidades ao redor do mundo crescessem, elas se tornariam mais parecidas com Barcelona que com Atlanta. Haveria uma diminuição geral no uso de veículos particulares nos países de renda mais alta, ao passo que os países de renda baixa e média observariam uma desaceleração no aumento de automóveis em comparação com os **cenários de manutenção da conjuntura atual** e de **alta eletrificação**. As redes de transporte público rápido se expandiriam rapidamente, e as bicicletas elétricas se tornariam bem mais presentes na vida de todos. Os automóveis e ônibus elétricos, no entanto, não seriam comuns. Os recursos para financiar a construção de infraestrutura de transporte público e bicicletas viriam, pelo menos em parte, da redução dos gastos com construção e manutenção de estradas e estacionamentos. Talvez fosse necessário alterar as políticas tributárias, mas os recursos necessários não causariam ônus indevidos aos contribuintes; a população, em geral, também economizaria enormes quantias de dinheiro em custos relacionados a veículos e combustível.

A compactidade das cidades, medida por sua densidade urbana, é um fator-chave para determinar a viabilidade da substituição dos veículos por outros modos de transporte. Ao contrário dos relatórios anteriores do ITDP-UC Davis, este estudo fez um exame aprofundado das densidades urbanas e usou seus resultados para embasar suas projeções de substituição modal.

Inicialmente, usamos dados da Camada Global de Assentamentos Humanos da Comissão Europeia¹⁵ (disponíveis para 2000 e 2015) para entender as condições e tendências atuais de densidade urbana de todas as cidades da Terra com população superior a 300 mil habitantes. Em seguida, agregamos essas projeções municipais em resumos regionais.

As projeções de densidade para o cenário de **manutenção da conjuntura atual** estendem as tendências identificadas na Camada Global de Assentamentos Humanos. As projeções de **alta substituição modal** preveem que as cidades usariam o novo crescimento populacional para adensar o maior número possível de bairros (considerando a meta de pelo menos 4 mil pessoas por quilômetro quadrado). Esse número é uma aproximação da densidade na qual o transporte, a caminhada e a bicicleta poderiam substituir de maneira viável os automóveis para a maioria das necessidades diárias. Novos projetos construídos do zero [*greenfield*] só seriam permitidos quando toda a cidade atingisse a meta de densidade. Esses projetos considerariam uma densidade de até pelo menos 16 mil pessoas por quilômetro quadrado.

MUNDO: POPULAÇÃO URBANA TOTAL POR CATEGORIA DE DENSIDADE



BAU = cenário de manutenção da conjuntura atual | km² = quilômetro quadrado

FIGURA 2.2.3.A
 A maior diferença entre os cenários de **manutenção da conjuntura atual** e de **alta substituição modal** é a redução do número de residentes em bairros urbanos com menos de 4 mil pessoas por quilômetro quadrado.

TABELA 2.2.3A
Embora as populações urbanas cresçam na mesma proporção em todos os cenários, a expansão é muito mais limitada no cenário de **alta substituição modal** que no cenário de **manutenção da conjuntura atual**.

	2000–2015	Manutenção do cenário atual, 2015–2050	Alta substituição modal, 2015–2050
Crescimento da população urbana	400 milhões de pessoas (23% em relação a 2000)	800 milhões de pessoas (34% em relação a 2015)	800 milhões de pessoas (34% em relação a 2015)
Crescimento da área urbana	51 mil km ² (13% em relação a 2000)	110 mil km ² (24% em relação a 2015)	13 mil km ² (3% em relação a 2015)

Reconhecemos que a densidade não é o único fator de uso do solo que influencia a demanda por transporte e que a mistura de diferentes usos também é particularmente importante. No entanto, diante da falta de dados globais confiáveis sobre a mistura de usos do solo nas cidades, esse tema não foi incluído no escopo deste estudo.

Após projetar as densidades futuras (figura 2.2.3A), combinamos a distribuição da densidade demográfica específica de cada região em um **cenário de manutenção da conjuntura atual** com uma fórmula adaptada do modelo gravitacional da mobilidade humana¹⁶, relacionando a densidade à demanda relativa de deslocamentos. Isso nos permitiu projetar o total de pessoas-quilômetros percorridos por ano nos **cenários de manutenção e de alta substituição modal**, independentemente do modo; projetamos uma redução de aproximadamente 11% nos deslocamentos no último cenário (ver seção 3.1).

Nosso segundo passo foi estimar a substituição modal que resultaria apenas da mudança de densidade. Quando uma cidade se torna mais densa, presumimos que sua divisão modal se tornará mais parecida com a divisão modal de outras cidades com densidade semelhante na mesma região, mesmo na ausência de mudanças de políticas públicas que favoreçam o transporte público, as caminhadas ou as bicicletas (além da construção de infraestrutura proporcional).

O terceiro e último passo foi a aplicação de um fator de substituição modal que representasse os impactos das políticas de transporte associadas a um cenário de **alta substituição modal** (figura 2.2.3B). Esse fator realocou os deslocamentos em automóveis para outros modos (e incluiu o teletrabalho como um dos fatores), levando em consideração a distribuição da densidade demográfica de cada região. Por exemplo, em áreas com densidade muito baixa, como alguns subúrbios dos Estados Unidos, apenas uma pequena parte dos deslocamentos em automóveis particulares pode ser substituída por outros modos até 2050. Por outro lado, em áreas densas e de rápido crescimento, como muitas cidades da Índia, é possível realizar uma mudança muito maior: em termos regionais, uma redução de 60% no uso de automóveis em relação ao **cenário de manutenção da conjuntura atual**.

TABELA 2.2.3B
Fatores de substituição modal: em termos percentuais, apresentamos quantos deslocamentos em automóveis particulares, aplicativos de transporte individual e motocicletas migrariam para outros modos no cenário de **alta substituição modal** devido a mudanças nas políticas públicas e na infraestrutura, por categoria de densidade.

	500–1.000 pessoas/km ²	1.000–2.000 pessoas/km ²	2.000–4.000 pessoas/km ²	4.000–8.000 pessoas/km ²	8.000–16.000 people /km ²	>16.000 pessoas/km ²
2030	3%	6%	10%	17%	20%	23%
2050	10%	20%	30%	50%	60%	70%

Até 2050, em relação ao cenário de **manutenção da conjuntura atual**, o cenário de **alta substituição modal** projeta uma redução de cerca de 52% nas pessoas-quilômetros percorridos em automóveis e motocicletas em todo o mundo.

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 tráfego¹⁷. Jacarta construiu um sistema de transporte público de média e alta capacidade que atende a quase 1 milhão de passageiros por dia em apenas 15 anos¹⁸. Não prevemos grandes mudanças nos mercados mais maduros, como os EUA e os países da União Europeia, mas, ainda assim, as mudanças nessas regiões seriam significativas. Os países de crescimento mais rápido observariam mudanças muito maiores em relação ao cenário de **manutenção da conjuntura atual** à medida que mudassem seus padrões de crescimento e evitassem a construção de infraestruturas centradas em carros.

¹⁶ Markuss Schlöpfer et al. (2021), *The universal visitation law of human mobility*, *Nature* 593, pp. 522–527.

¹⁷ Frédéric Heran (2017), *À propos du report modal, les enseignements du cas parisien*, *Les Cahiers Scientifiques du Transport* 71/2017, pp. 99–124. Ver também [este](#) artigo em inglês.

¹⁸ ITDP (2019), *A dignified ride*, *Transport Matters* (blog), 15 de novembro.



FIGURA 2.2.3B
Em certas partes da Cidade do México, a melhoria da infraestrutura de transporte público e de bicicletas já gerou os tipos de substituições modais previstas para o cenário de **alta substituição modal**.

IMPACTOS DE UM CENÁRIO DE ALTA SUBSTITUIÇÃO MODAL SOBRE A EQUIDADE

Num mundo em que menos pessoas usassem automóveis próprios, as pessoas de baixa renda observariam melhorias em sua mobilidade pessoal. Cidades compactas de uso misto que dispusessem de ciclovias e transporte público rápido seriam mais capazes de atender às necessidades diárias dessa população em menos tempo. O aumento do uso de bicicletas melhoraria a saúde cardiovascular; a redução do uso de automóveis melhoraria a qualidade do ar; e as ruas favoráveis aos pedestres reduziram a violência no trânsito (atualmente, a sétima maior causa de morte nos países de renda baixa¹⁹). No cenário de **alta substituição modal**, as cidades caminháveis também se tornariam mais resilientes e capazes de resistir a desastres, como, por exemplo, crises de combustíveis.

2.2.4 CENÁRIO DE ELETRIFICAÇÃO + SUBSTITUIÇÃO MODAL

O cenário de **eletrificação + substituição modal** é uma combinação dos cenários de **alta eletrificação** e de **alta substituição modal**. Ele prevê um mundo em que cada vez mais pessoas deixariam de dirigir e passariam a caminhar, pedalar e usar transporte público, paralelamente à eletrificação em massa dos veículos motorizados.

Embora o futuro de **eletrificação + substituição modal** pareça exigir ainda mais iniciativas governamentais que a adoção individual dos cenários de **alta eletrificação** e de **alta substituição modal**, há, de fato, sinergias substanciais e benéficas entre esses cenários.

Um dos maiores obstáculos para o cenário de **alta eletrificação** é a capacidade de atender à demanda cada vez mais alta por novos veículos elétricos (inclusive suas baterias) e de fornecer a eletricidade limpa necessária para alimentá-los. Quando se diminui a demanda geral por automóveis, a combinação de **alta eletrificação** e **alta substituição modal** tende a reduzir essa barreira (ver seção 3.3).

Outra sinergia está no custo de implementação desses futuros. Os veículos particulares têm um custo alto de operação por passageiro-quilômetro, e o cenário de **alta substituição modal** proporcionaria uma redução considerável nos custos diretos privados e públicos do transporte urbano de passageiros (ver seção 3.6). No cenário de **eletrificação + substituição modal**, essas economias poderiam ser canalizadas para programas de apoio à eletrificação.



FIGURA 2.2.4

Os ônibus elétricos do sistema BRT de Nanning, na China, são um exemplo de um futuro de **eletrificação + substituição modal**.
FONTE: ITDP China.

IMPACTOS DE UM CENÁRIO DE ELETRIFICAÇÃO + SUBSTITUIÇÃO MODAL SOBRE A EQUIDADE

Este cenário ofereceria todos os benefícios do cenário de **alta substituição modal**, além de uma redução muito maior da poluição atmosférica e sonora como resultado da eletrificação veicular.

RESULTADOS

3

A abordagem de modelagem nos permitiu comparar os cenários de **manutenção da conjuntura atual**, de **alta eletrificação**, de **alta substituição modal** e de **eletrificação + substituição modal**, com base em vários de seus impactos. Essas medições foram todas feitas nas oito principais regiões do mundo e agregadas em escala global.

Nossos principais achados são:

- Mesmo o cenário de **alta eletrificação** alinhado às metas mais ambiciosas das principais organizações internacionais seria incapaz de eletrificar totalmente todas as frotas de veículos motorizados até 2050.
- Embora tanto o cenário de **alta eletrificação** quanto o de **alta substituição modal** possam resultar em grandes reduções de gases de efeito estufa até 2050, nenhum dos cenários por si só seria capaz de garantir reduções compatíveis com a possibilidade de limitar o aquecimento global antrópico a 1,5 °C. Tamanha descarbonização só seria alcançada por meio da combinação de **alta eletrificação** e **alta substituição modal**.
- Uma eventual desaceleração da descarbonização das redes elétricas atenuaria as reduções de gases de efeito estufa resultantes da **alta eletrificação**, mas não aquelas resultantes da **alta substituição modal**.
- Os cenários de **alta substituição modal** e de **eletrificação + substituição modal** poderiam reduzir os custos diretos (públicos e privados) do transporte urbano de passageiros em até um terço: cerca de US\$ 5 trilhões por ano.

3.1 DESLOCAMENTOS

Ao longo dos próximos 30 anos, a população mundial se tornará maior, mais rica e mais urbana. Com esses aumentos de população e recursos, os deslocamentos urbanos de passageiros praticamente dobrarão.

Em diferentes cenários, o aumento no número de deslocamentos é tratado de maneiras diferentes (figura 3.1A). O cenário de **manutenção da conjuntura atual** lidaria com o aumento da demanda por deslocamentos da mesma forma que lidamos atualmente com a maior parte do transporte urbano de passageiros: com automóveis movidos a motor de combustão interna. Haveria certo aumento no uso de transporte público, caminhadas, bicicletas e veículos elétricos nos países mais ricos, mas isso seria ofuscado pelo enorme aumento de veículos movidos a motor de combustão interna nos países de renda média e, especialmente, baixa. Na região da África-Oriente Médio, por exemplo, as frotas de carros aumentariam por um fator de cinco.

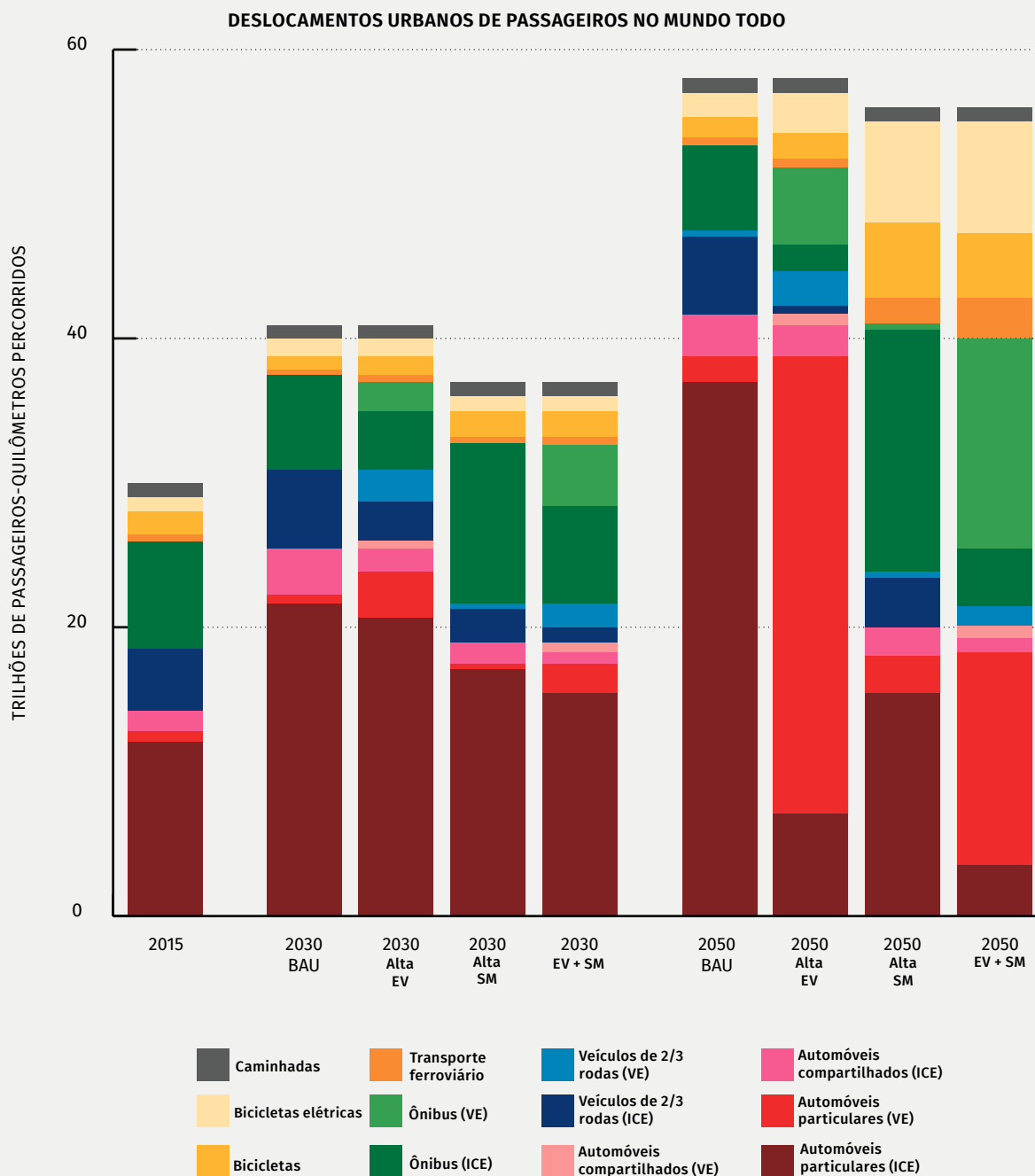
O cenário de **alta eletrificação** apresentaria a mesma divisão modal geral que o cenário de **manutenção da conjuntura atual**, mas a fonte de energia de cada modo mudaria. A previsão é que, até 2050, a maioria dos deslocamentos em veículos motorizados (ônibus, motocicletas e automóveis) usaria energia elétrica, em vez de combustão interna. Em 2050, os poucos deslocamentos em veículos motorizados movidos a combustão seriam, principalmente, aqueles realizados em veículos mais antigos que ainda estivessem em circulação. A expectativa é que, após 2050, essa fração diminuiria rapidamente.

No cenário de **alta substituição modal**, haveria duas mudanças-chave nos deslocamentos urbanos de passageiros. Primeiramente, modelos de desenvolvimento voltados ao transporte público e outras políticas promoveriam cidades compactas e de uso misto. Paralelamente à rápida expansão do teletrabalho, especialmente nos países mais ricos, isso resultaria numa redução da demanda global por deslocamentos urbanos de cerca de 6,5 trilhões de passageiros-quilômetros ao ano (11% do total

no cenário de **manutenção da conjuntura atual**). Em segundo lugar, no cenário de **alta substituição modal**, grande parte dos deslocamentos realizados em automóveis no cenário de **manutenção da conjuntura atual** passariam a ser feitos a pé, de bicicleta (especialmente bicicletas elétricas) e, principalmente, transporte público. As regiões mais ricas observariam um declínio absoluto no uso de veículos particulares em relação a 2015, ao passo que os países de renda baixa e média observariam um aumento muito mais lento. No entanto, esses veículos continuariam a usar as mesmas fontes de energia usadas atualmente (cenário de **manutenção da conjuntura atual**), o que significa que a grande maioria dos ônibus e automóveis em circulação ainda seriam movidos a combustíveis fósseis.

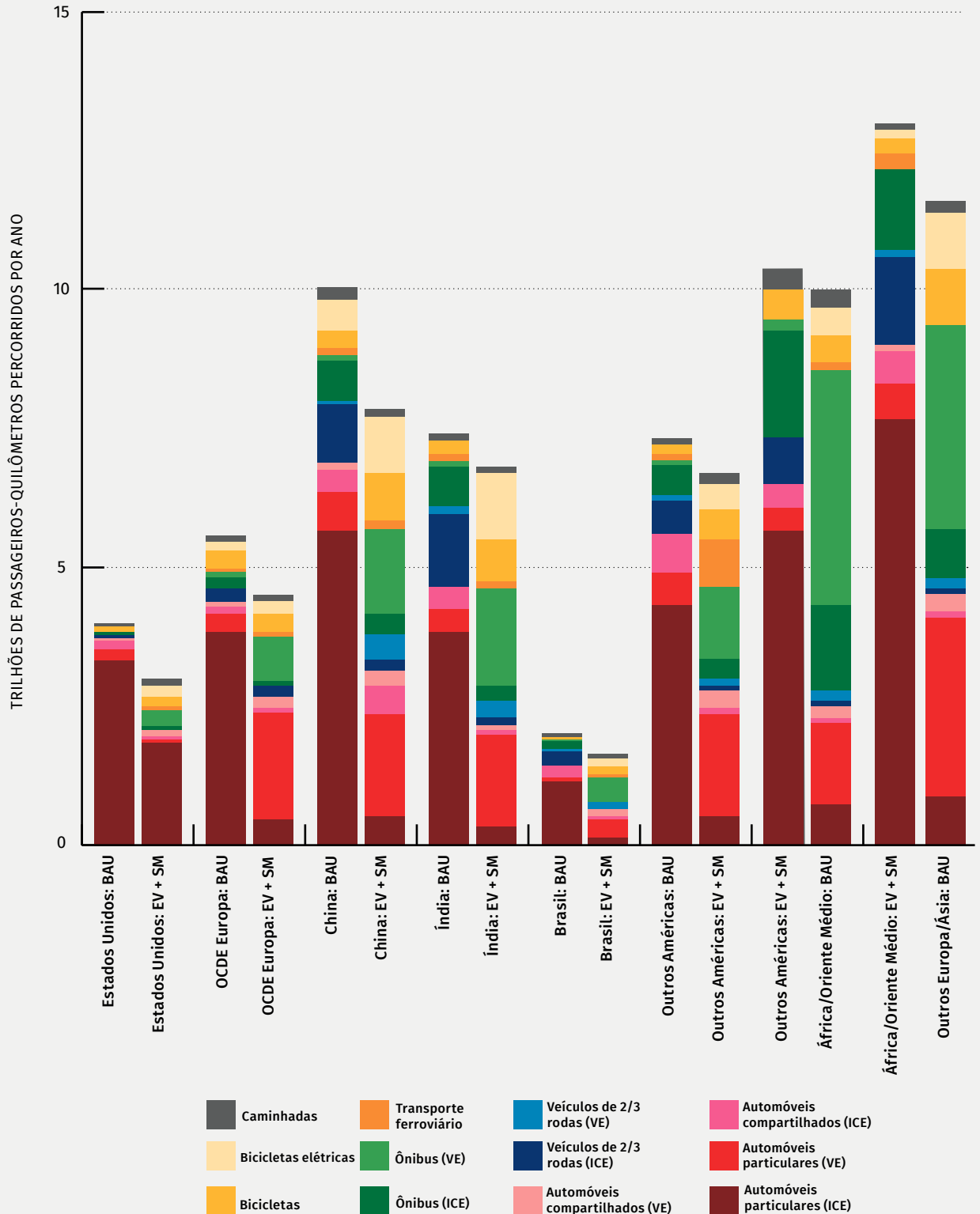
FIGURA 3.1A
Os deslocamentos urbanos de passageiros são menos frequentes e menos dominados por automóveis nos cenários de substituição modal.

O cenário de **eletrificação + substituição modal** projeta um futuro em que as participações modais do cenário de **alta substituição modal** se combinariam às taxas de eletrificação do cenário de **alta eletrificação**. Esse cenário apresenta, de longe, a menor proporção de deslocamentos em veículos movidos a combustão até 2050: apenas 3 trilhões de passageiros-quilômetros por ano, em contraste com os 37 trilhões do cenário de **manutenção da conjuntura atual** (figura 3.1A).



BAU = cenário de manutenção da conjuntura atual | VE = veículo elétrico | EV + SM= eletrificação + substituição modal | Alta SM = alta substituição modal | Alta EV = alta eletrificação | ICE = motor de combustão interna.

DESLOCAMENTOS URBANOS DE PASSAGEIROS EM 2050 POR REGIÃO



BAU = cenário de manutenção da conjuntura atual | VE = veículo elétrico | EV + SM= eletrificação + substituição modal | Alta EV = alta eletrificação | ICE = motor de combustão interna | OCDE = Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

FIGURA 3.1B
Todas as regiões podem alcançar grandes taxas de substituição de deslocamentos em veículos particulares movidos a combustão por veículos elétricos, bicicletas e transporte público.

O cenário de **eletrificação + substituição modal** é o que conseguiria se beneficiar mais da **eletrificação** nas regiões mais ricas, inclusive os Estados Unidos e os membros europeus da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. O cenário de **alta substituição modal**, por sua vez, geraria ganhos maiores nas regiões de crescimento mais rápido, tais como Índia, África e Oriente Médio, além de outros países da Europa e da Ásia (figuras 3.1B e 3.1C).

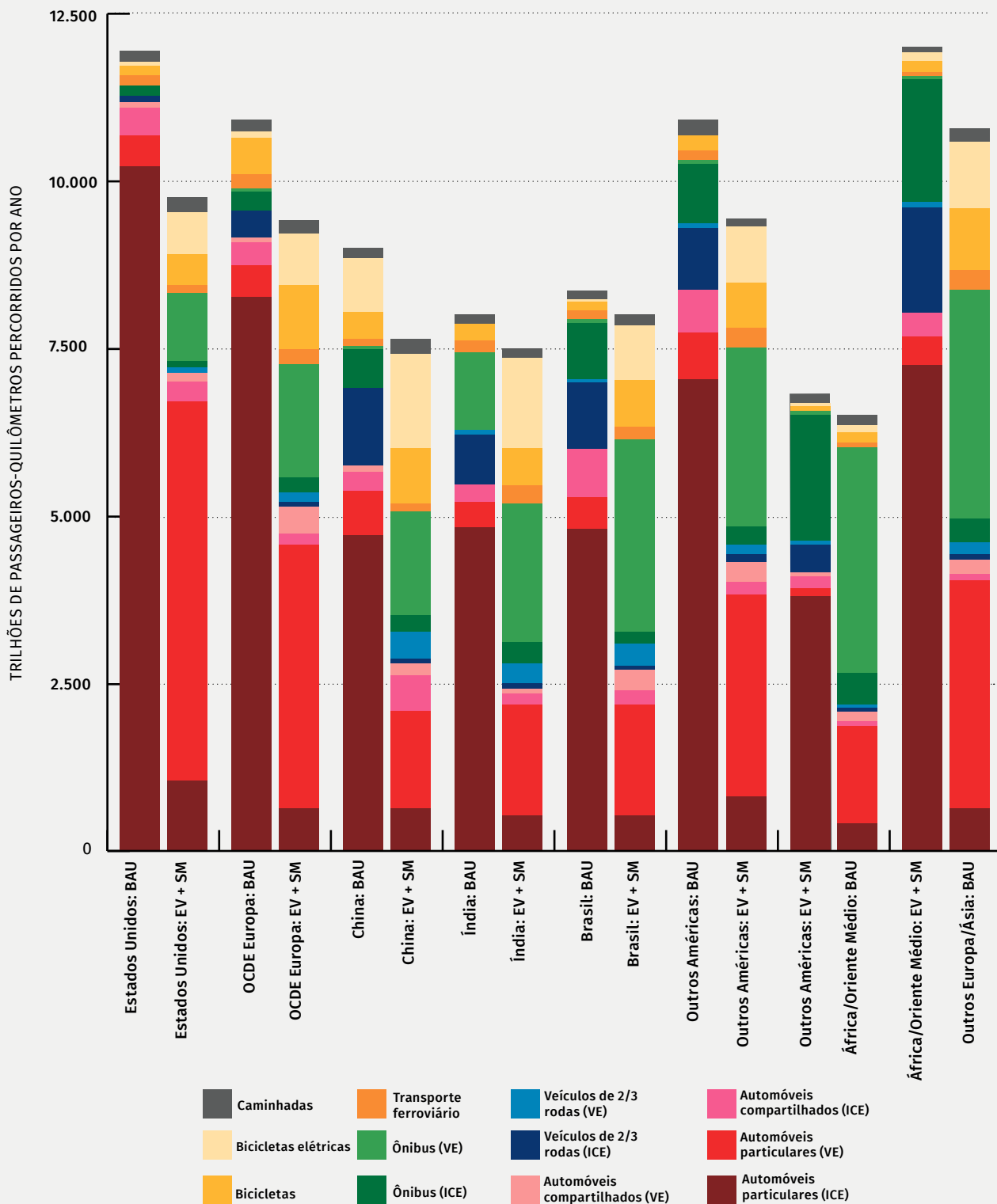
3.2 COMPOSIÇÃO DA FROTA

FIGURA 3.1C

As regiões mais ricas podem alcançar uma maior redução nos deslocamentos *per capita* e uma eletrificação mais extensa, ao passo que as regiões menos ricas podem observar um aumento no uso de bicicletas e transporte público.

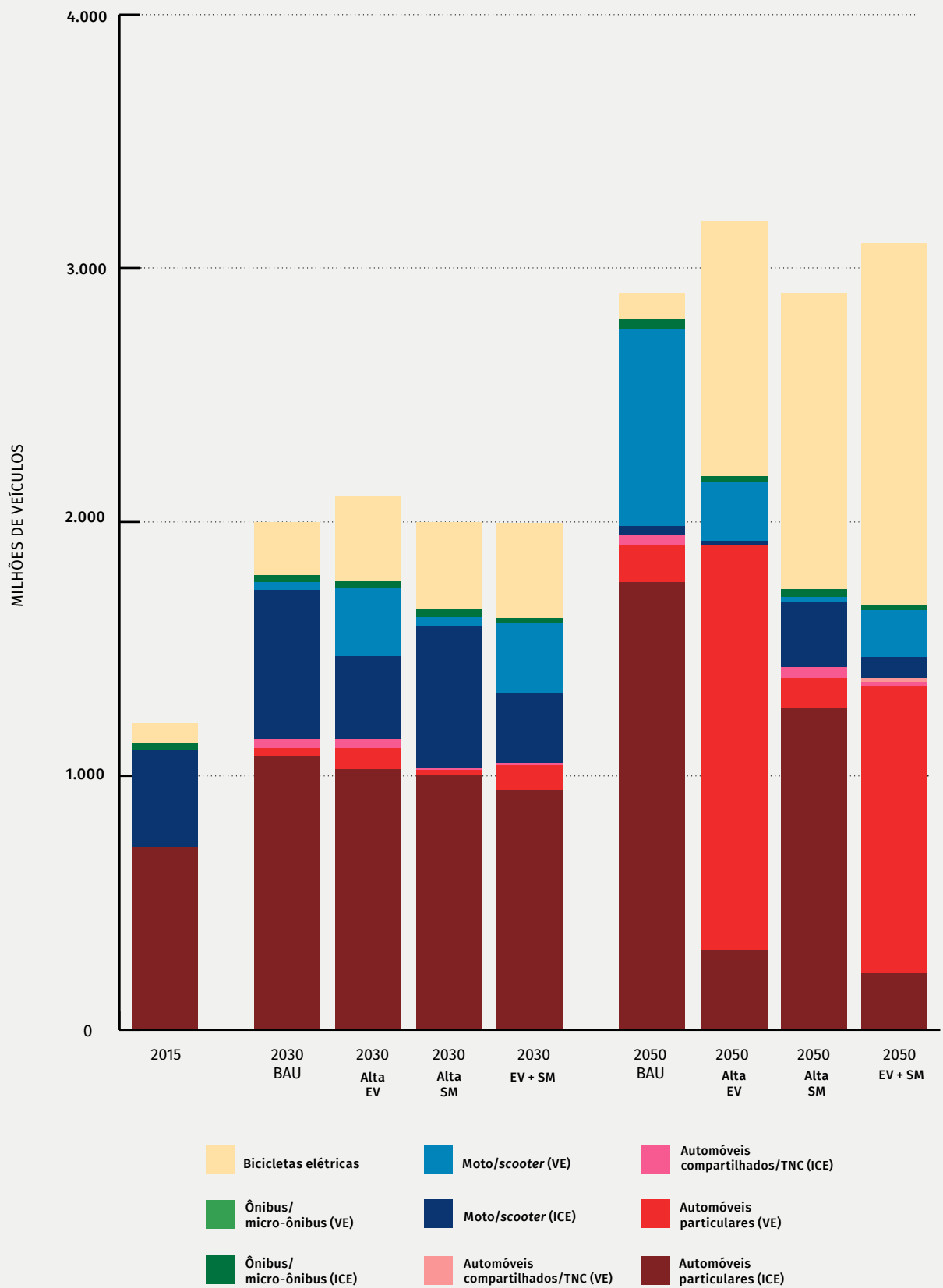
Em todos os quatro cenários, o mundo observaria uma duplicação, em termos aproximados, das frotas de veículos urbanos de passageiros até 2050. Em todos os cenários, exceto no cenário de **manutenção da conjuntura atual**, uma parte significativa desse crescimento seria atendida por bicicletas elétricas. Nos cenários que preveem a eletrificação, as frotas de carros, ônibus e motocicletas seriam, em grande parte, elétricas em 2050. Nos cenários de **alta substituição modal**, por sua vez, o aumento das frotas de automóveis e motocicletas seria consideravelmente atenuado pela substituição modal pelo transporte público (figura 3.2).

DESLOCAMENTOS URBANOS DE PASSAGEIROS EM 2050 POR REGIÃO PER CAPITA



BAU = cenário de manutenção da conjuntura atual | VE = veículo elétrico | EV + SM = eletrificação + substituição modal | Alta EV = alta eletrificação | ICE = motor de combustão interna | OCDE = Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

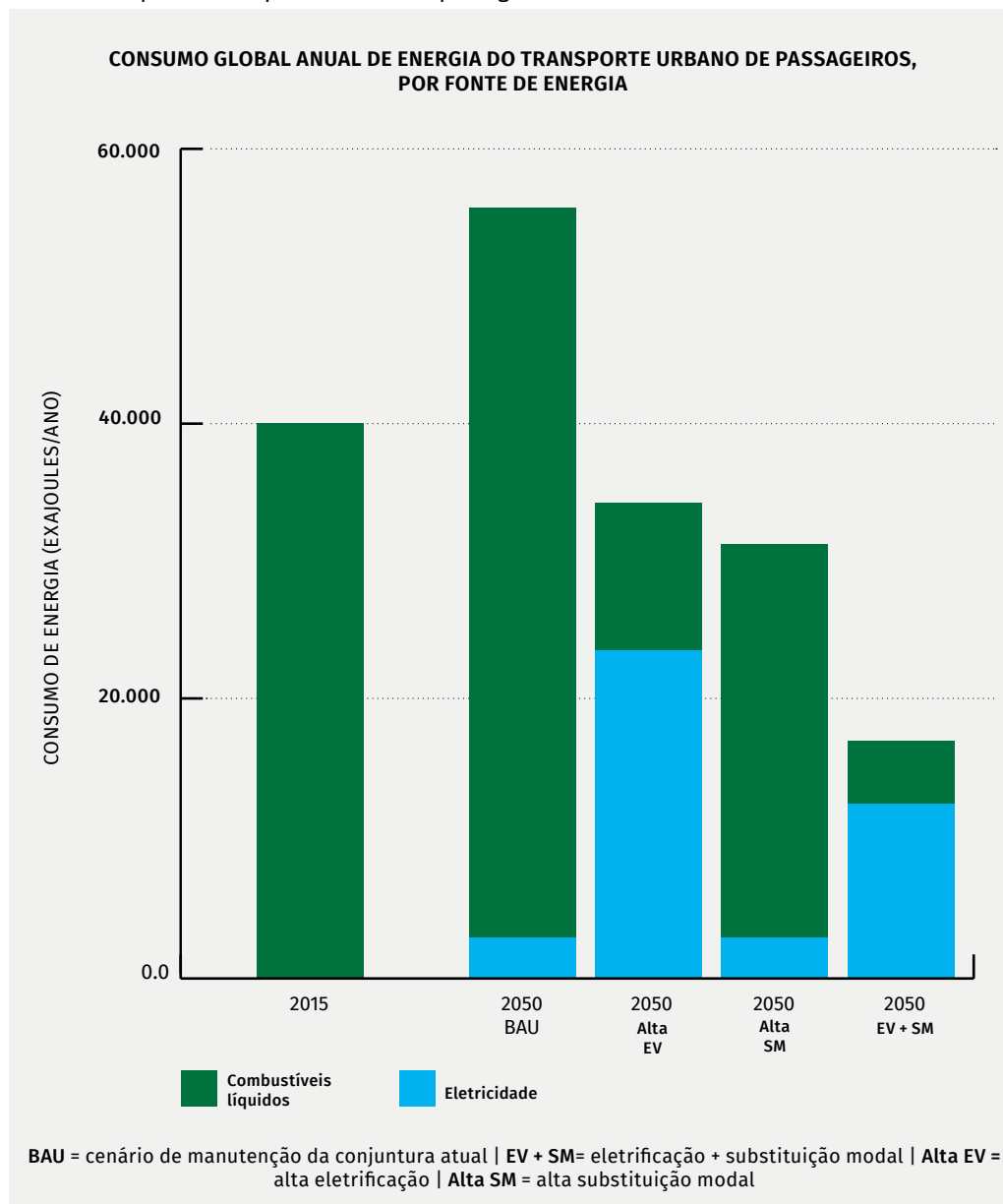
FROTAS DE VEÍCULOS MOTORIZADOS EM TODO O MUNDO



BAU = cenário de manutenção da conjuntura atual | VE = veículo elétrico | EV + SM = eletrificação + substituição modal | Alta EV = alta eletrificação | ICE = motor de combustão interna | TNC = Empresas da rede de transportes (aplicativos de transporte).

3.3 CONSUMO DE ENERGIA

Um dos principais pré-requisitos para grandes frotas de veículos elétricos (tanto automóveis quanto ônibus) é a expansão do fornecimento de energia elétrica. Para que a eletrificação resulte em maiores reduções das emissões de gases de efeito estufa, devem ser priorizadas as fontes de energia renovável. Embora a demanda global de energia diminua de forma semelhante tanto no cenário de **alta eletrificação** quanto no de **eletrificação + substituição modal**, o cenário de **alta eletrificação** gera um aumento considerável e sem precedentes na demanda por eletricidade para o transporte urbano de passageiros.



PÁGINA ANTERIOR

FIGURA 3.2

O aumento das frotas de bicicletas elétricas é um elemento essencial da descarbonização do transporte.

À DIREITA

FIGURA 3.3

O cenário de **alta eletrificação** cria uma grande demanda por eletricidade sustentável, que é menor no cenário de **eletrificação + substituição modal**.

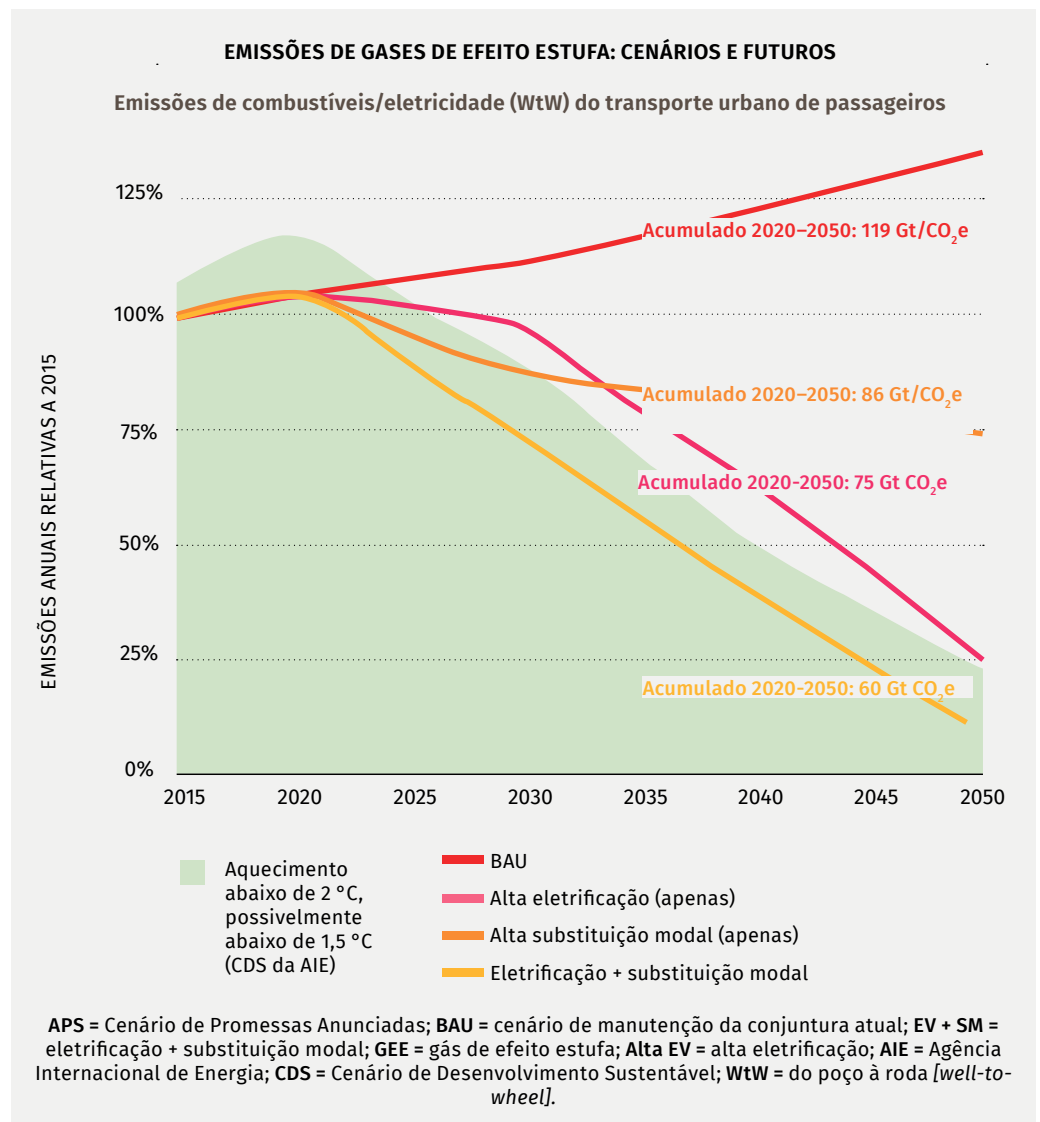
Como resultado da redução na procura por veículos particulares no cenário de **alta substituição modal**, cerca de 300 milhões a menos de veículos elétricos seriam necessários por ano e cerca de 9 mil exajoules a menos de eletricidade para alimentá-los (aproximadamente 40% menos que no cenário de **alta eletrificação**; figura 3.3). A sinergia observada no cenário de **eletrificação + substituição modal** aumentaria a viabilidade da fabricação de veículos elétricos e da transição energética.

3.4 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA

Para limitar o aquecimento global a menos de 2 °C, as emissões de carbono da maioria dos setores energéticos do mundo devem atingir, até 2050, níveis inferiores a 20% de seus níveis de 2015. Acreditamos que o transporte urbano de passageiros precise realizar esse nível de redução, juntamente com os outros setores. A expectativa é que esse futuro possível — descrito como Cenário de Desenvolvimento Sustentável pela AIE — consiga manter o aquecimento global abaixo de 2 °C em relação aos níveis pré-industriais ao longo do século XXI, com um aquecimento global esperado de 1,6 °C até o final do século²⁰. O Cenário de Desenvolvimento Sustentável tem 33% de probabilidade de limitar o aquecimento global a menos de 1,5 °C até 2100.

Entre os quatro cenários para o transporte urbano de passageiros examinados neste relatório, apenas um — **eletrificação + substituição modal** — seria capaz de alcançar reduções de gases de efeito estufa condizentes com o Cenário de Desenvolvimento Sustentável durante todo o período do estudo, ou seja, de 2015 a 2050. Somente o cenário de **eletrificação + substituição modal** seria compatível com esse caminho para limitar o aquecimento global a menos de 2 °C; e somente esse cenário apresentaria alguma chance de limitá-lo a menos de 1,5 °C (figura 3.4A).

Até 2050, o cenário de **alta eletrificação** se aproximaria do Cenário de Desenvolvimento Sustentável, mas, na maior parte do período de 2015 a 2050, ele excederia claramente os limites desse futuro. Os cenários de **alta eletrificação** e **alta substituição modal** podem ser compatíveis com um aquecimento inferior a 2 °C, mas é muito improvável que limitem o aquecimento a menos de 1,5 °C até 2100.



20 Os dados para o Cenário de Desenvolvimento Sustentável, assim como o Cenário de Políticas Declaradas, o Cenário de Promessas Anunciadas, e o Cenário de Emissões Líquidas Zero até 2050, são adaptados de Agência Internacional de Energia (2021), *World Energy Outlook 2021*, IEA, Paris. Nossa adaptação presume que as reduções das emissões do transporte urbano de passageiros (em todos os modos) devem seguir as mesmas curvas relativas a 2015 que as reduções necessárias para o transporte rodoviário de passageiros em veículos leves (urbanos ou não urbanos). Essa abordagem para entender a compatibilidade com os futuros graus de aquecimento global é mais sofisticada que a abordagem descrita no resumo pré-publicação divulgado no início de novembro de 2021. Contudo, a conclusão permanece a mesma: o cenário de eletrificação + substituição modal é o único compatível com um possível aquecimento global inferior a 1,5 °C.

Para fins de clareza, a análise da compatibilidade de nossos cenários com certos limites de emissões ilustrada na figura 3.4A inclui apenas as emissões de combustíveis e eletricidade²¹. Não inclui, portanto, as emissões provenientes da fabricação e descarte de veículos, tampouco da construção e manutenção de infraestrutura. No entanto, essas últimas fontes de emissões não devem ser ignoradas: até 2050, no cenário de **eletrificação + substituição modal**, os veículos e a infraestrutura seriam responsáveis pela maioria das emissões relacionadas ao transporte urbano de passageiros (figura 3.4B).

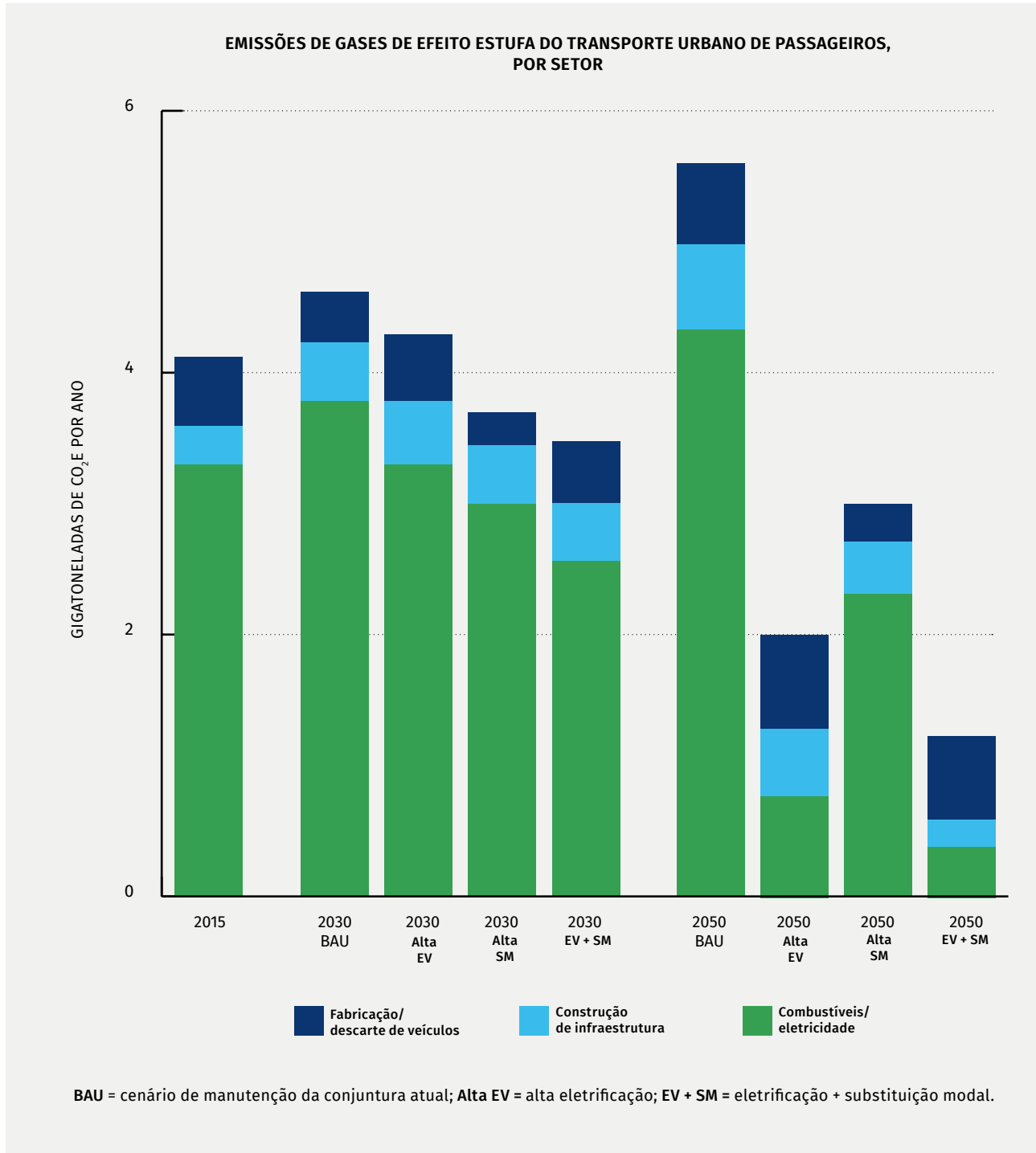
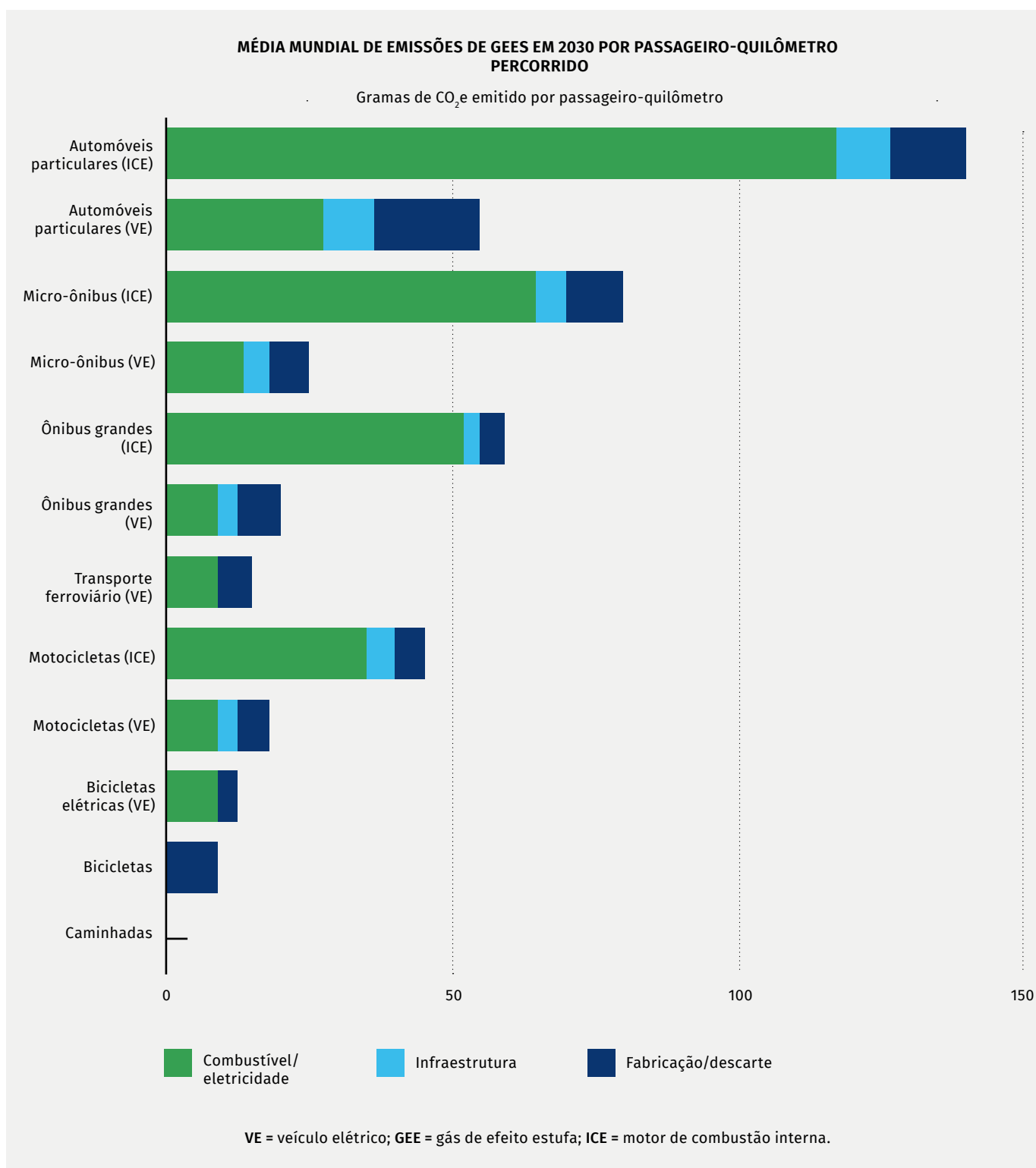


FIGURA 3.4B
Até 2050, nos cenários de alta eletrificação e de eletrificação + substituição modal, as emissões geradas pela fabricação de infraestrutura e veículos seriam superiores às emissões de combustíveis e eletricidade.

Nos cenários de **manutenção da conjuntura atual** e de **alta substituição modal**, assim como ocorre atualmente, a maioria das emissões do transporte urbano de passageiros derivariam de combustíveis e eletricidade. Nos cenários de **alta eletrificação** e **eletrificação + substituição modal**, a maioria dos veículos funcionaria com eletricidade limpa até 2050, o que resultaria numa grande redução nas emissões de combustíveis e eletricidade. Essa redução, no entanto, seria atenuada pelo aumento das emissões da fabricação de veículos e, principalmente, de baterias.

FIGURA 3.4C
Os carros movidos a motor de combustão interna emitem muito mais gases de efeito estufa que qualquer outro modo por passageiro-quilômetro.

A visualização dessas emissões por passageiro-quilômetro (figura 3.4C) nos permite entender que a maioria das emissões dos veículos elétricos derivam da fabricação de baterias e veículos e da construção de estradas. A descarbonização desses processos não é impossível, e fizemos previsões relativamente ambiciosas de avanços técnicos. Contudo, mesmo que todos os veículos fossem elétricos e a rede fosse totalmente descarbonizada, as emissões por quilômetro dos deslocamentos em automóveis ainda seriam várias vezes superiores àquelas dos deslocamentos em transporte público, bicicletas ou a pé.

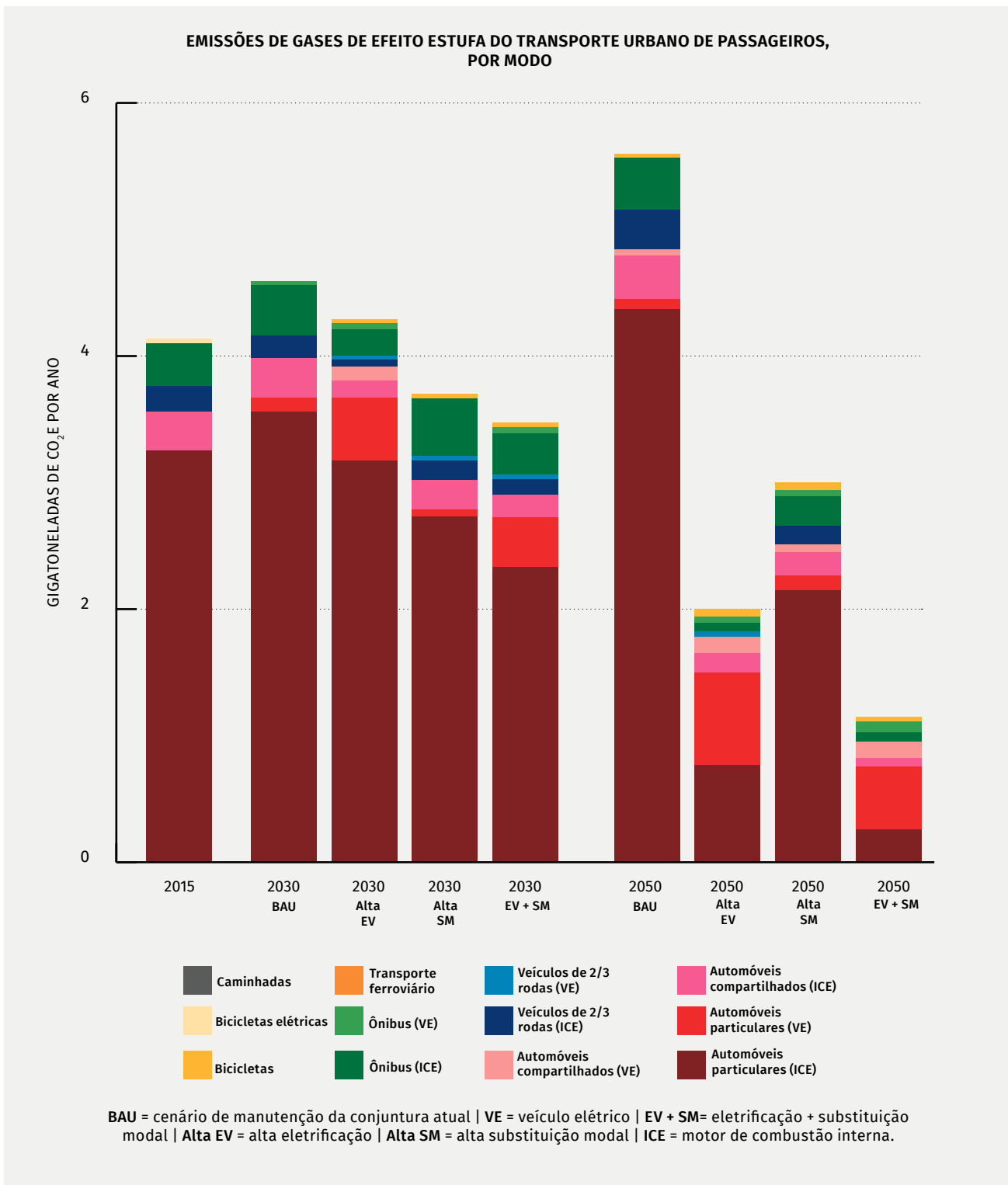


Com base em nossa pesquisa e nas pesquisas da AIE e do Conselho Internacional de Transporte Limpo, concluímos que os automóveis movidos por motores de combustão interna são, de longe, o modo de transporte urbano de passageiros com as mais altas emissões. Os veículos elétricos oferecem enormes economias de carbono em comparação aos automóveis poluentes, assim como os ônibus e motocicletas movidos a combustão. Reduções ainda maiores são oferecidas por ônibus elétricos, trens, motocicletas elétricas e bicicletas. O modo menos intensivo em termos de emissões é, naturalmente, a caminhada.

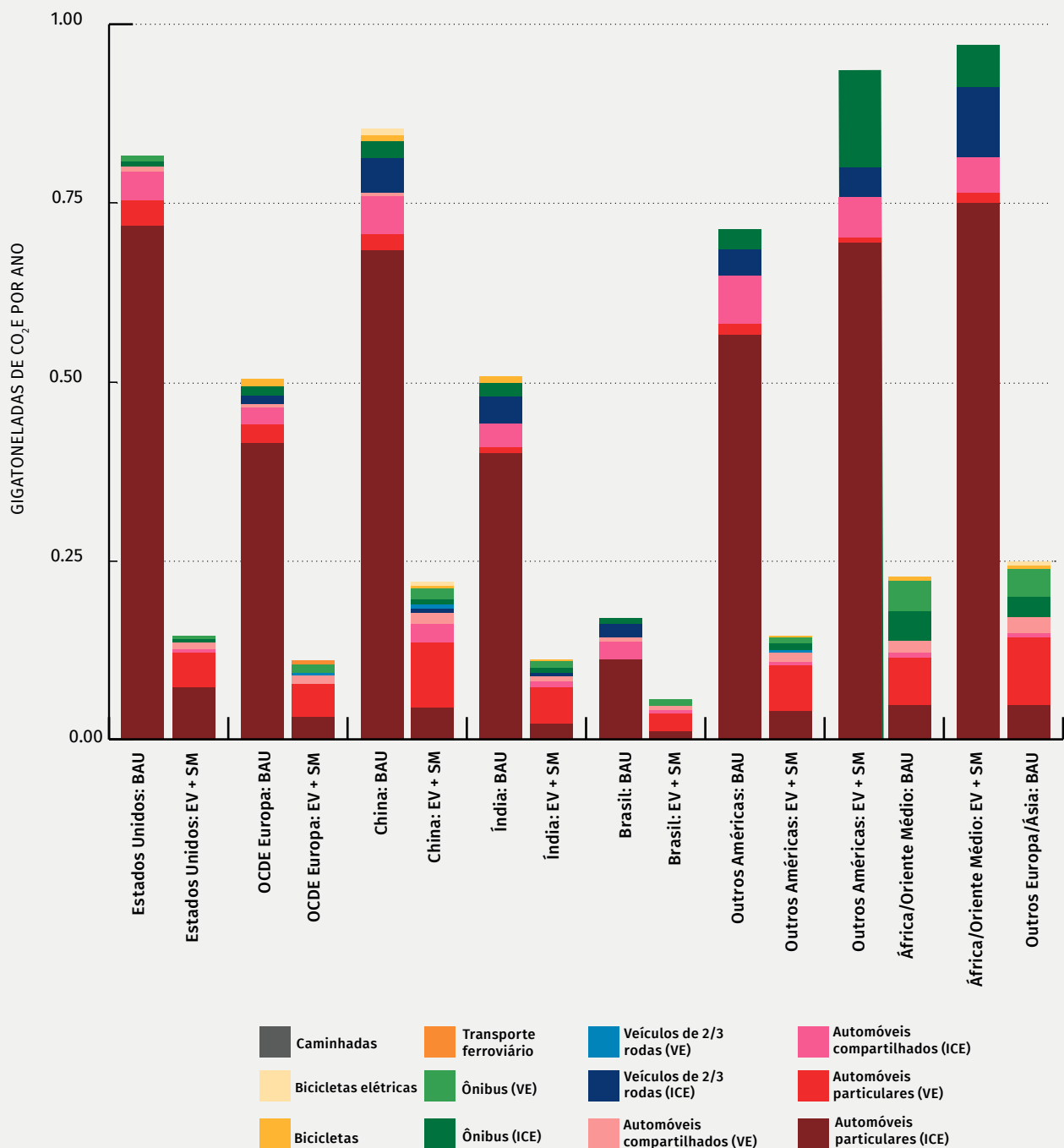
FIGURA 3.4D

Em todos os cenários e em todos os momentos, a grande maioria das emissões são geradas por carros.

Levando em consideração todas as fontes de emissões e analisando todas as regiões, anos e cenários, os veículos particulares são responsáveis pela grande maioria das emissões mundiais de gases de efeito estufa derivadas do transporte urbano de passageiros. Mesmo em um cenário tão ambicioso como o de **eletrificação + substituição modal** de 2050 — em que menos de 40% dos deslocamentos urbanos de passageiros no mundo todo seriam realizados em automóveis (figura 3.1A) e em que a grande maioria desses automóveis seria movida a eletricidade renovável — os carros ainda seriam responsáveis por 80% das emissões do setor (figura 3.4D)



**EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DO TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS EM 2050,
POR REGIÃO**



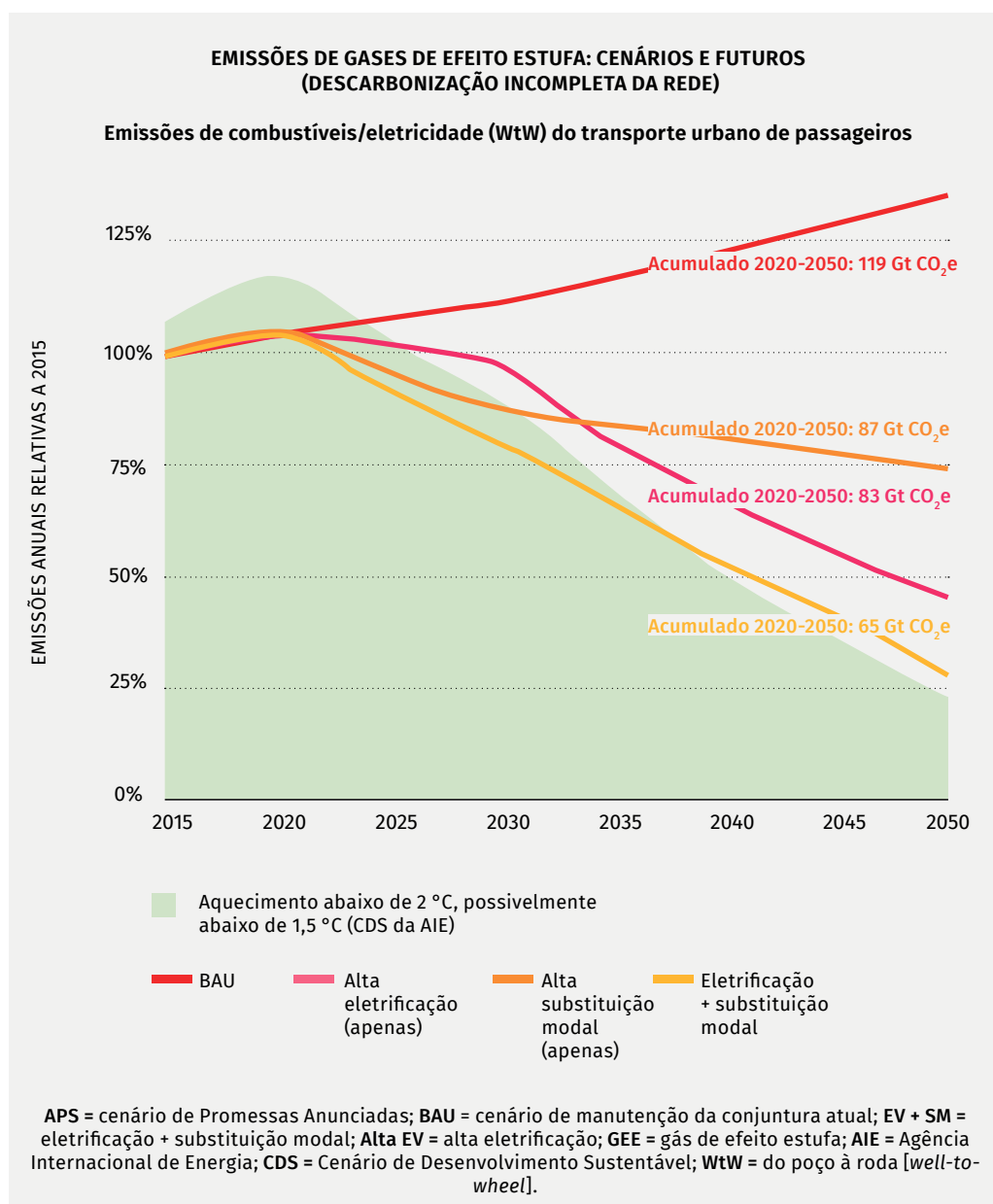
BAU = cenário de manutenção da conjuntura atual | VE = veículo elétrico | EV + SM= eletrificação + substituição modal | Alta EV = alta eletrificação | ICE = motor de combustão interna | OCDE = Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

FIGURA 3.4E
Todas as regiões podem alcançar grandes reduções de emissões com a adoção de **eletrificação + substituição modal**.

Em todas as oito regiões do mundo, observa-se uma redução semelhante das emissões de carbono no cenário de **eletrificação + substituição modal** em relação ao cenário de **manutenção da conjuntura atual** (figura 3.4E).

3.5 EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA: CASO DE SENSIBILIDADE

Os resultados apresentados acima são baseados em uma premissa ambiciosa: que as redes elétricas mundiais fariam uma transição quase plena para energias renováveis até 2050, conforme o *Cenário de Desenvolvimento Sustentável*²², o que é compatível com um aquecimento inferior a 2 °C. Todavia, a descarbonização da rede não deve ser dada como certa. Logo, realizamos uma modelagem alternativa dos quatro cenários de transporte urbano usando as intensidades de carbono da eletricidade descritas no *Cenário de Políticas Declaradas da AIE*²³. O Cenário de Políticas Declaradas não pressupõe nenhuma meta de políticas públicas além daquelas já adotadas, mas presume que essas metas declaradas tenham sido alcançadas. É uma projeção muito mais conservadora que a do Cenário de Desenvolvimento Sustentável, mas não se trata do pior cenário possível.



Apenas com base na premissa desses níveis mais limitados de eletricidade sustentável, constatamos que os cenários de **alta eletrificação** e de **alta substituição modal** atingiriam níveis comparáveis de reduções cumulativas de carbono ao longo do período de 2015 a 2050; e que o cenário de **eletrificação + substituição modal** se aproximaria do limite necessário para garantir que o aquecimento global se limitasse a 2 °C até 2100, sem exceder esse limite (figura 3.5).

O sucesso do cenário de **alta eletrificação** depende da existência de uma rede elétrica descarbonizada. A adoção da eletrificação como única estratégia para que o setor de transportes consiga mitigar as mudanças climáticas equivale a fazer uma aposta com o futuro do planeta. Ao combinarmos a eletrificação com cidades compactas, transporte público, bicicletas e caminhadas, conseguimos criar uma estratégia redundante capaz de reduzir ao máximo as emissões de carbono, mesmo que outros setores — como o de geração de energia — não consigam se descarbonizar a tempo.



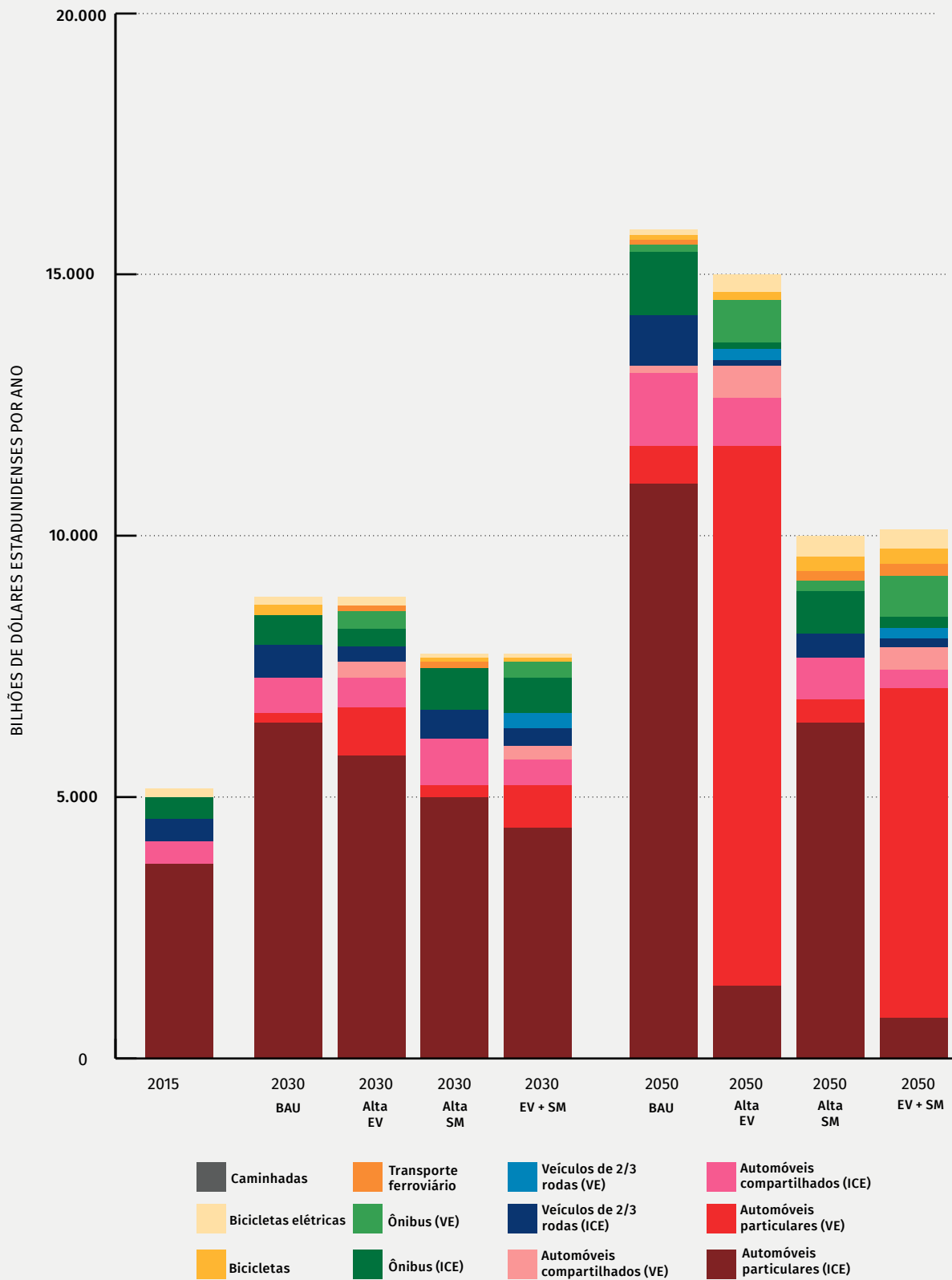
Um ônibus BRT da TransOeste no Rio de Janeiro, Brasil.
FONTE: Stefano Aguilar / ITDP Brasil, Flickr.

3.6 CUSTOS DIRETOS PÚBLICOS E PRIVADOS

Na esteira da pandemia de covid-19, as cidades e nações enfrentam restrições orçamentárias, o que também afeta indivíduos e famílias. O transporte urbano de passageiros representa uma grande despesa nos orçamentos de nações, cidades, indivíduos e famílias.

Nos Estados Unidos, por exemplo, um país cujo sistema de transportes é altamente dependente de veículos particulares, as pessoas da faixa de renda mais baixa gastam até 30% de sua renda com transporte. Na União Europeia, uma região mais compacta e favorável ao transporte público, as pessoas na mesma faixa gastam apenas cerca de 7% de sua renda com transporte²⁴. O transporte pode ser acessível ou caro, dependendo de como está estruturado o sistema de mobilidade de cada cidade.

**CUSTOS DIRETOS PÚBLICOS E PRIVADOS DO TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS,
POR MODO**



BAU = cenário de manutenção da conjuntura atual | VE = veículo elétrico | Alta SM = alta substituição modal
Alta EV = alta eletrificação | ICE = motor de combustão interna.

Nos cenários de **manutenção da conjuntura atual** e de **alta eletrificação**, os custos diretos públicos e privados do transporte urbano de passageiros totalizam cerca de US\$ 15 trilhões por ano até 2050 (figura 3.6A). Nos cenários de **alta substituição modal** e **eletrificação + substituição modal**, esse custo é de apenas US\$ 10 trilhões ao ano. O maior fator dessa despesa é o custo de fabricação dos veículos (~53%), seguido do custo da infraestrutura (~28%), das operações do sistema (~10%) e dos combustíveis e eletricidade (~9%).

Os automóveis, independentemente de serem movidos a combustíveis fósseis ou a eletricidade renovável, constituem o modo comum de transporte urbano menos econômico. Em 2050, os carros representariam uma minoria dos deslocamentos nos cenários de **alta substituição modal** e **eletrificação + substituição modal**, mas ainda seriam responsáveis por uma ampla maioria das despesas relacionadas aos deslocamentos urbanos.

Cidades compactas de uso misto, transporte público, infraestrutura para bicicletas e medidas de controle de tráfego poderiam economizar ao mundo US\$ 5 trilhões em custos diretos públicos e privados por ano até 2050. Esses US\$ 5 trilhões poderiam ser investidos em saúde, educação ou outros setores, num esforço global para mitigar as mudanças climáticas.

Esses números se referem apenas aos custos diretos. Não abrangem os custos indiretos associados ao transporte urbano, tais como:

- O valor do tempo perdido em congestionamentos;
- O valor das vidas perdidas em sinistros de trânsito ou devido à poluição atmosférica;
- As despesas com atendimento de saúde para doenças pulmonares causadas pela poluição atmosférica ou por doenças resultantes da falta de exercícios físicos; ou
- Os custos de fornecimento de eletricidade, água e esgoto para casas em subúrbios de baixa densidade conectados por rodovias urbanas.

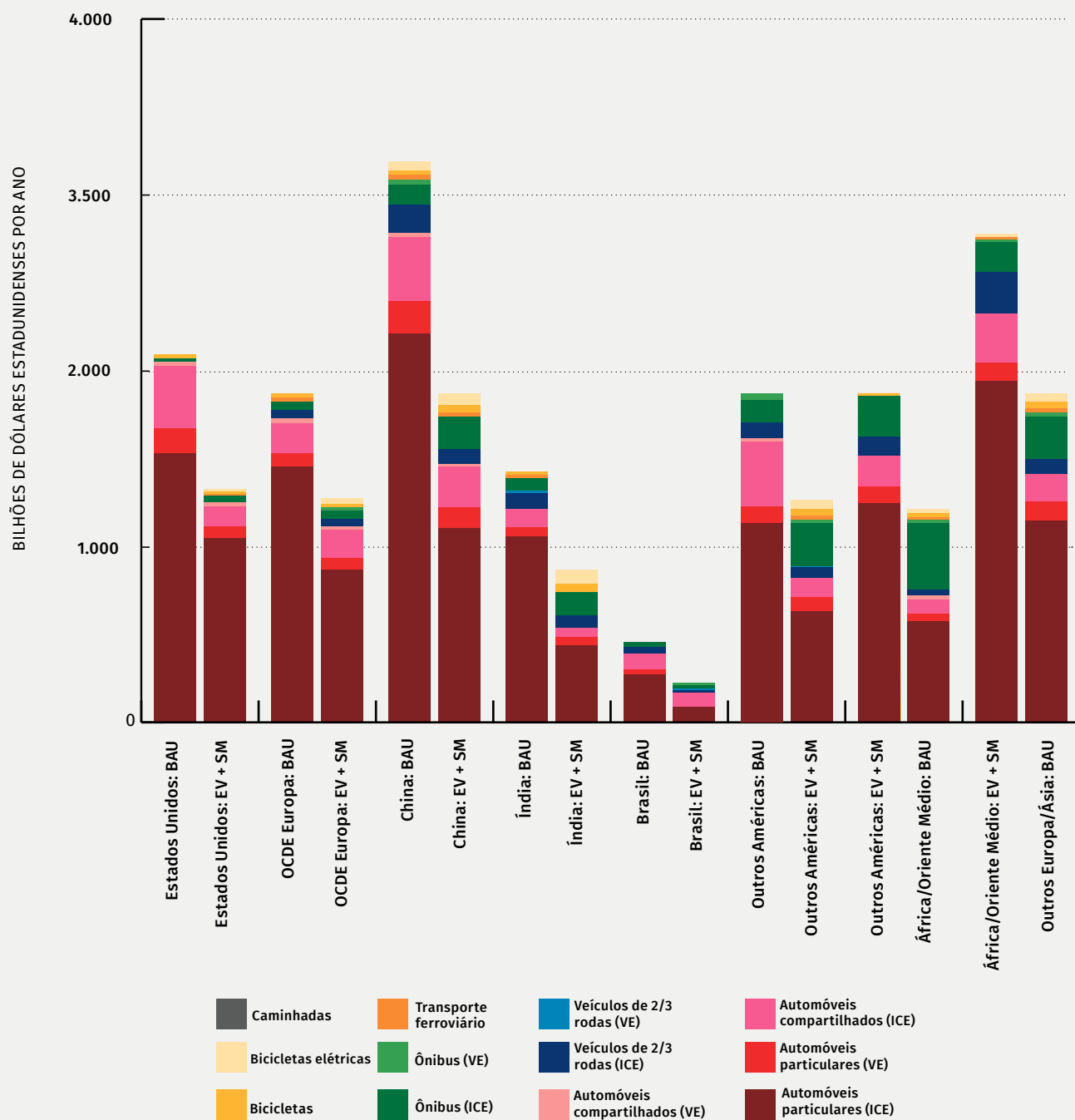
Esses altos custos para a sociedade são intensificados pelos sistemas de mobilidade urbana centrados em automóveis²⁵.

Grandes economias de custos são possíveis em todas as regiões do mundo, mas são ligeiramente mais pronunciadas em regiões com rápido crescimento econômico (figura 3.6B). A China, por si só, poderia economizar US\$ 1 trilhão ao ano até 2050 se adotasse um modelo de cidades compactas, caminhadas, bicicletas e transporte público.

Essas economias não derivariam de uma recessão econômica, nem da deterioração da qualidade de vida das pessoas. Pelo contrário, nosso modelo pressupõe o mesmo ritmo de crescimento econômico em cada um dos quatro cenários; além disso, o cenário de **alta substituição modal** não impediria as pessoas que desejassem ter carros de adquiri-los. Ele simplesmente considera que caminhar, andar de bicicleta e usar transporte público se tornariam formas mais eficientes de se locomover nas cidades que o ato de dirigir, o que removeria grande parte do incentivo à posse de automóveis.

FIGURA 3.6A
(PÁGINA AO LADO)
O cenário de **alta substituição modal** reduz os custos diretos do transporte urbano de passageiros em cerca de um terço.

CUSTOS DIRETOS PÚBLICOS E PRIVADOS DO TRANSPORTE URBANO DE PASSAGEIROS, POR REGIÃO



BAU = cenário de manutenção da conjuntura atual | VE = veículo elétrico | Alta SM = alta substituição modal | ICE = motor de combustão interna | OCDE = Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico.

FIGURA 3.6B
É possível reduzir os custos no mundo todo.

ORIENTAÇÕES SOBRE POLÍTICAS PÚBLICAS

4

A descarbonização do transporte urbano de passageiros exigirá a adoção de diversas políticas em diferentes níveis ao longo de muitos anos. Não há uma solução única, mas, sim, várias abordagens comprovadas que podem ser ampliadas e combinadas.

Este estudo prevê cenários futuros em um nível mais geral, imaginando os tipos de futuros que poderiam ser alcançados por meio de mais comprometimento e uma reforma ampla, em vez de simular os impactos de políticas específicas. O escopo – 30 anos e todo o planeta – é tão vasto que não podemos tratar quantitativamente de medidas individuais. Em vez disso, podemos oferecer orientações sobre os tipos de políticas que já alcançaram efeitos semelhantes em cidades individuais – políticas que podem ser difundidas e adotadas em todo o mundo.

Muitas organizações especializadas já publicaram orientações claras, completas e atualizadas sobre políticas públicas relacionadas à eletrificação veicular, tais como:

- [Cleaner Vehicles](#) (Fórum Internacional de Transportes, 2021)
- [Electrifying Transportation in Municipalities](#) (Coalizão de Eletrificação, 2021)
- [Policies to Promote Electric Vehicle Deployment](#) (AIE, 2021)

A seção 4.1 resume algumas das principais recomendações desses relatórios. A seção 4.2 descreve a experiência dos sete escritórios regionais do ITDP e o sucesso de muitas outras cidades ao redor do mundo na promoção de cidades compactas que privilegiam pedestres, bicicletas e transporte público.

4.1 COMO ALCANÇAR A ALTA ELETRIFICAÇÃO

Em nossos cenários de **alta eletrificação** e **eletrificação + substituição modal**, consideramos um rápido aumento na adoção de veículos elétricos em todo o mundo e uma eliminação gradual da produção de veículos com motor de combustão interna até 2040. Trata-se de uma projeção muito desafiadora, mas viável. É tecnicamente possível, mas seriam necessárias políticas robustas em todos os países para que essa transição fosse realizada tão rapidamente. Para garantir que os veículos elétricos obtenham tal participação no mercado, as políticas e compromissos devem se concentrar no seguinte:

- Assim que possível, **os custos de aquisição de veículos elétricos de todos os tipos devem se equiparar aos de veículos movidos a combustão interna comparáveis**; e **seus custos de uso devem ser inferiores**, em todos os países. Por exemplo, grandes SUVs elétricos devem ser competitivos em termos de custo com grandes SUVs poluentes, tanto no custo total de propriedade quanto no preço de compra. Isso deve acontecer naturalmente, pois os preços das baterias continuam caindo, mas talvez não antes do final da década de 2020, ou, possivelmente, mais tarde. Para alcançar a paridade mais cedo, serão necessários subsídios para a compra de veículos elétricos, tanto do lado da oferta quanto da demanda, durante toda a década de 2020.
- **Sistemas de recarga domiciliar** (ou algo semelhante) devem ser disponibilizados a todos os proprietários de veículos eletrificados. Para aqueles sem acesso a um estacionamento e carregador próprios, devem ser oferecidas estruturas de recarga noturna de baixo custo, reserváveis e perto de casa. A recarga no local de trabalho também é importante, especialmente para aqueles

usuários que percorrem trajetos mais longos. Os governos devem encorajar e apoiar fortemente o desenvolvimento generalizado desse tipo de infraestrutura.

- Deve ser disponibilizada uma **infraestrutura pública de recarga**. A infraestrutura pública oferecerá aos motoristas a confiança de que conseguirão recarregar seus veículos quando e onde quiserem. Além disso, deve ser possível deixar os automóveis durante a noite em estacionamentos públicos com carregador. O custo de recarga deve ser baixo o suficiente para que o custo operacional geral da propriedade de um veículo elétrico seja inferior ao de um veículo movido a motor de combustão interna. A infraestrutura deve contar com estações de recarga “rápida”, mas as de recarga “média” (nível 2: 220 volts) também desempenharão um papel importante. Os governos precisam garantir que sejam feitos investimentos e que sejam criados modelos de negócios viáveis para incentivar o investimento privado, mantendo os preços acessíveis.
- As **oportunidades de aquisição** e a **infraestrutura de reparos** devem ser adequadas. Os consumidores devem poder comprar seus veículos elétricos facilmente, e os reparos devem ser convenientes e acessíveis. Isso significa treinar milhares de técnicos e mecânicos e garantir que as montadoras disponibilizem uma ampla oferta de veículos.
- Também deve haver uma **ampla seleção de modelos de veículos elétricos**, que sejam competitivos com a gama de modelos movidos a motor de combustão interna disponíveis. Nos mercados mais avançados, esses problemas devem ser solucionados até 2025; em todos os outros mercados mundiais, até 2030.
- Os consumidores devem estar a par das novas tecnologias e ter confiança nelas. Campanhas publicitárias das montadoras e **campanhas de informação** dos governos podem desempenhar um papel crucial no aumento da conscientização.
- Outras políticas, tais como exigências (crescentes ao longo do tempo) para que os fabricantes produzam certo número de veículos com emissão zero e outras políticas de desenvolvimento de mercado, também serão muito importantes. Essas políticas já vêm obtendo sucesso em lugares como Califórnia, Noruega e Alemanha.

4.2 COMO ALCANÇAR A ALTA SUBSTITUIÇÃO MODAL

O cenário de **alta substituição modal** considera que muitos usuários de veículos particulares passariam a caminhar, pedalar e usar transporte público. A maior parte dessa substituição não representaria uma diminuição líquida nos deslocamentos de carro, mas sim um não aumento em relação à **manutenção da conjuntura atual**. Embora seja um cenário ambicioso, ele não é inédito. O sucesso do cenário de **alta substituição modal** exigiria uma série de políticas complementares promulgadas por governos em todos os níveis, do internacional ao local. Vale lembrar que isso é possível. Essas políticas seriam aplicadas a quatro áreas principais:

- Uso do solo;
- Caminhadas e bicicletas;
- Transporte público; e
- Controle de automóveis.

As políticas individuais são importantes, mas podem ser combinadas para gerar impactos maiores. Por exemplo, as políticas que aumentam a densidade demográfica perto das estações de transporte público aumentam a sustentabilidade financeira dos sistemas de transporte público, o que eleva o número de passageiros; paralelamente, essa mesma densidade também promove o transporte a pé e em bicicleta.

USO DO SOLO

Os princípios de uso do solo que se aplicam à mobilidade sustentável são a compactidade e o planejamento de uso misto. Em cidades compactas e de uso misto, as pessoas vivem a distâncias curtas de suas necessidades diárias, o que significa que podem caminhar ou pedalar até elas. Cidades compactas e de uso misto também tornam o transporte público mais eficiente, pois há mais destinos ao redor das estações e distâncias mais curtas entre as estações.

Técnicas para promover o uso sustentável do solo	Exemplos de implementação bem-sucedida
Cidades de 15 minutos. Todas as pessoas vivem a uma curta distância a pé de suas necessidades diárias: alimentação, saúde, educação, transporte público, creches e parques.	Paris, França Singapura
Reforma do zoneamento para permitir e incentivar o desenvolvimento de alta densidade em qualquer propriedade, especialmente com disposições de acessibilidade.	Portland, EUA
Estratégias de desenvolvimento voltado ao transporte público para concentrar a população, os empregos e os serviços próximo à oferta de transporte público rápido.	Curitiba, Brasil

CAMINHADAS E BICICLETAS

A mobilidade a pé e por bicicleta são os modos de transporte com a maior eficiência energética disponíveis para a humanidade. Ambas fornecem conexões de “primeira/última milha”, aumentam o número de usuários de transporte público e constituem modos importantes por si só.

Técnicas para promover o transporte a pé e em bicicleta	Exemplos de implementação bem-sucedida
Calçadas de alta qualidade, orientadas por uma estratégia de transporte não motorizado e por guias de projeto de paisagem urbana, como, por exemplo, o Guia Global de Desenho de Ruas .	Chennai, Índia
Redes de ciclovias e ciclofaixas exclusivas, separadas do trânsito e conectadas em toda a cidade.	Bogotá, Colômbia Sevilha, Espanha
Sistemas públicos de bicicletas compartilhadas , que incluam bicicletas elétricas e que sejam bem-integrados ao transporte público.	Hangzhou, China Cidade do México, México

TRANSPORTE PÚBLICO

Mais que qualquer outro modo, o transporte público é capaz de viabilizar o cenário de **alta substituição modal**. Uma expansão significativa do sistema de transporte público é capaz de compensar mais da metade da diminuição nos deslocamentos em automóveis, principalmente com o aumento no uso de ônibus.

Técnicas para promover o transporte público	Exemplos de implementação bem-sucedida
O transporte informal modernizado em torno do transporte público multimodal, em vez de competindo diretamente com ele.	Jacarta, Indonésia
Expansão de redes de ônibus frequentes para que todos os cidadãos possam morar perto de linhas de ônibus com frequência de 10 minutos ou menos.	Seattle, EUA
Construção e expansão da rede de trânsito rápido (inclusive sistemas de metrô, VLT e BRT).	Teerã, Irã Jacarta, Indonésia

CONTROLE DE AUTOMÓVEIS

O uso sustentável do solo, uma infraestrutura eficaz para caminhadas e bicicletas e uma rede de transporte público abrangente e de alta frequência podem facilitar o deslocamento das pessoas pela cidade sem carros. Todavia, para atingir o cenário de **alta substituição modal**, as cidades e países também terão de adotar medidas para relacionar a conveniência e o custo de dirigir a seus efeitos negativos.

Técnicas para controlar os automóveis	Exemplos de implementação bem-sucedida
Precificação de estacionamento: reduzir ou eliminar o estacionamento gratuito em via pública e outros subsídios; desincentivar o estacionamento fora das vias públicas.	São Paulo, Brasil Cidade do México, México
Precificação de emissões: cobrar uma taxa cada vez que um veículo entrar em determinada zona, com base em seu nível de emissões. Isso também incentiva a eletrificação.	Milão, Itália
Precificação de congestionamento: exigir que os veículos paguem uma taxa para entrar ou circular em determinadas áreas.	Londres, Inglaterra Singapura



CONTATO

**INSTITUTO DE POLÍTICAS
DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO**

Tel.: (21) 31531764

E-mail: brasil@itdp.org

Site: www.itdpbrasil.org