



Guia de Eletromobilidade para Cidades Brasileiras

TRANSPORTE PÚBLICO

BEĨ

Guia de Eletromobilidade para Cidades Brasileiras

TRANSPORTE PÚBLICO

Insper CENTRO DE ESTUDOS
DAS CIDADES
Laboratório Arq.Futuro



Ficha Técnica

COORDENAÇÃO-GERAL

Tomas Alvim

COORDENAÇÃO ACADÊMICA

Adriano Borges Costa

NÚCLEO DE MOBILIDADE URBANA

COORDENADOR

Sérgio Avelleda

COORDENADORA-ADJUNTA

Helena Carvalho Coelho

COORDENAÇÃO DE CONTEÚDO

Rinaldo Gama

ORGANIZAÇÃO

Sérgio Avelleda

Helena Carvalho Coelho

APOIO GRÁFICO

Ana Luiza Aun Al Makul

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Vitor Zanirato

AUTORES

Rafael Barreto Castelo da Cruz

Ariane Fucci Wady

Camilla do Carmo Perotto

COAUTOR

Sérgio Avelleda

REVISÃO

Fabício Pietrobelli

Cristina Albuquerque

Shirley Sodré

Helena Carvalho Coelho

Otacílio Nunes

Equipe BEI

DIREÇÃO EDITORIAL:

Marisa Moreira Salles

Tomas Alvim

EDITORIAL

Laura Aguiar

Renato Rodrigues

Rinaldo Gama

DIREÇÃO DE ARTE

Marisa Moreira Salles

ARTE

Alexandre Costa

PRODUÇÃO GRÁFICA

Luis Alvim

GERENTE DE PROJETOS

Ana Paula Guerra

ADMINISTRATIVO E FINANCEIRO

Raquel Panhan

comercial@bei.com.br

www.bei.com.br

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Guia de eletromobilidade para cidades brasileiras :

transporte público / [Rafael Barreto Castelo da Cruz, Ariane Fucci Wady, Camilla do Carmo Perotto ; coautor Sérgio Avelleda ; organização Sérgio Avelleda, Helena Carvalho Coelho, Centro de Estudos das Cidades – Laboratório Arq. Futuro do Insper]. -- São Paulo : BEI Editora, 2024. PDF

ISBN 978-65-86205-48-0

1. Mobilidade urbana 2. Sustentabilidade 3. Transporte urbano 4. Transporte urbano - Planejamento 5. Veículos a motor - Aspectos ambientais 6. Veículos elétricos I. Cruz, Rafael Barreto Castelo da. II. Wady, Ariane Fucci. III. Perotto, Camilla do Carmo. IV. Avelleda, Sérgio. V. Coelho, Helena Carvalho. VI. Centro de Estudos das Cidades – Laboratório Arq. Futuro do Insper.

24-223772

CDD-388.4

Índices para catálogo sistemático:

1. Transporte urbano : Eletromobilidade : Mobilidade urbana 388.4
Cibele Maria Dias - Bibliotecária - CRB-8/9427

Nota editorial

Este *Guia* foi elaborado pelo Núcleo de Mobilidade Urbana do Centro de Estudos das Cidades – Laboratório Arq.Futuro do Insper, com apoio e cooperação técnica do Itaú Unibanco.

O Centro é resultado de uma parceria firmada em 2019 entre o Insper – Instituto de Ensino e Pesquisa e a plataforma Arq.Futuro. Ele tem na interdisciplinaridade e na inovação a orientação para o ensino e a pesquisa sobre o meio urbano, com a missão de contribuir para um impacto real na vida das populações das cidades.

Centro de Estudos das Cidades – Laboratório Arq.Futuro do Insper

Sumário

INTRODUÇÃO	7
1) O CENÁRIO DA MOBILIDADE ELÉTRICA NO TRANSPORTE PÚBLICO	11
1.1 A fundamental abordagem sistêmica da mobilidade elétrica	23
1.2 Transporte público no cenário brasileiro	30
1.3 Alta urbanização e a eficiência do transporte público	39
1.4 Políticas e programas atuais	49
2) IMPACTOS E BENEFÍCIOS DA MOBILIDADE ELÉTRICA E SUAS BARREIRAS PARA DESENVOLVIMENTO	57
2.1 A eletrificação como oportunidade para o incremento da qualidade do transporte público	64
2.2 Questões ainda não solucionadas	70
2.3 Alguns exemplos já implementados	76
2.4 Experiências internacionais	79
3) POSSÍVEIS STAKEHOLDERS DO ECOSISTEMA DA MOBILIDADE ELÉTRICA	83
3.1 Concessionárias de transmissão e de distribuição e geradora de energia	84
3.2 Concessionários e operadores de mobilidade	85
3.3 Administração direta	87
3.4 Bancos públicos, bancos privados e organismos multilaterais de crédito	89
3.5 Fabricantes de ônibus elétricos	91
3.6 Observações gerais sobre os agentes promotores da eletromobilidade	93
4) ASPECTOS TÉCNICOS DA ELETROMOBILIDADE	96
4.1 Caracterização da rede de transporte	97
4.2 Ônibus para transporte de passageiros	104
4.3 Infraestrutura de recarga	112
4.4 Rede de distribuição elétrica	120
4.5 Responsabilidade pela infraestrutura de recarga	124
5) ASPECTOS FINANCEIROS E ECONÔMICOS	129
5.1. Custo total de propriedade	130
5.2 Energia	132
5.3 Custos de manutenção	137
5.4 Incentivos em âmbito federal	139
5.5 Mecanismos alternativos de financiamento	141
5.6 Externalidades e avaliações socioeconômicas	143

6) POSSIBILIDADES DE CONFIGURAÇÃO DOS CONTRATOS E PARCERIAS PARA AUMENTO DAS FROTAS DE ÔNIBUS ELÉTRICOS	145
6.1 Possíveis contratos públicos efetivados para implementação da mobilidade elétrica nos transportes públicos	146
6.2 Modelos de negócios possíveis decorrentes da adoção de contratos de concessão comum ou patrocinada	149
6.3 Perspectiva dos modelos de negócios sob a ótica da partilha de responsabilidade entre as partes	153
7) CONSIDERAÇÕES FINAIS	157
REFERÊNCIAS	162

Introdução

O presente *Guia* apresenta uma ampliada análise das **oportunidades e desafios da transição para o transporte público elétrico**. Essas oportunidades representam, dentre outros aspectos, um importante passo para a mobilidade urbana sustentável com foco na modernização do transporte coletivo, na melhoria da eficiência e da sustentabilidade e na redução de emissões e poluição sonora. Em que se destacam a melhoria significativa na qualidade de vida urbana, contribuição para a transformação positiva das cidades brasileiras através da mobilidade elétrica e a promoção da sustentabilidade e equidade social.

O **Capítulo 1** apresenta o cenário da eletromobilidade e do transporte público no Brasil com ênfase nas barreiras para a substituição dos veículos a combustão pelos elétricos e já escancara questões como:

Custo inicial elevado: A compra de ônibus elétricos e a infraestrutura de carregamento exigem um investimento inicial significativamente maior em comparação com os veículos a diesel. As baterias elétricas, apesar de estarem se tornando mais acessíveis, ainda representam uma parcela considerável do custo total do veículo;

Falta de infraestrutura de carregamento: A instalação de pontos de carregamento é um desafio logístico e financeiro. A infraestrutura existente é limitada e a expansão requer investimentos substanciais em redes elétricas, estações de carregamento e manutenção;

Barreiras tecnológicas: Embora a tecnologia dos ônibus elétricos esteja avançando, ainda existem desafios relacionados à capacidade e à durabilidade das baterias, tempo de recarga e autonomia dos veículos, especialmente para rotas mais longas e com maiores demandas;

Modelos de negócios e financiamento: A transição para frotas elétricas requer novos modelos de negócios, como contratos de leasing e Parcerias Público-Privadas (PPPs), que precisam ser desenvolvidos e adotados. Tais modelos também precisam garantir a sustentabilidade financeira para os operadores de transporte público;

Regulamentação e políticas públicas: A ausência de regulamentações claras e incentivos robustos dificulta a adoção em larga escala. Políticas governamentais específicas, subsídios e incentivos fiscais são necessários para promover a eletrificação das frotas de transporte público;

Capacitação e conhecimento técnico: A falta de mão de obra qualificada e treinada para operar e manter veículos elétricos e infraestrutura associada é um obstáculo significativo. Programas de treinamento e capacitação são essenciais para garantir a operação eficiente e segura das frotas;

Resistência à mudança: Há uma resistência natural à mudança por parte tanto dos operadores de transporte quanto do público em geral. A familiaridade e a confiança nos

veículos a diesel dificultam a aceitação e a adaptação a novas tecnologias;

Sustentabilidade das fontes de energia: Embora os ônibus elétricos sejam mais limpos, a sustentabilidade de suas operações depende da matriz energética do país. No Brasil, a utilização de fontes de energia renovável precisa ser maximizada para garantir que a eletrificação contribua efetivamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa;

Desafios operacionais: A implementação de frotas elétricas requer ajustes operacionais significativos, incluindo planejamento de rotas, horários de recarga e manutenção. Esses ajustes demandam uma reorganização dos sistemas de transporte existentes;

Retorno sobre investimento: O retorno financeiro sobre o investimento em veículos elétricos pode ser mais longo, o que desencoraja operadores e investidores. Análises econômicas detalhadas e incentivos podem ajudar a mostrar os benefícios a longo prazo, incluindo economia de combustível e manutenção.

Os impactos e benefícios da mobilidade elétrica são destacados no **Capítulo 2**, em que são claros os impactos positivos nessa transição energética, entre os quais se destacam a melhoria na qualidade do ar, a redução de problemas de saúde pública relacionados à poluição, a diminuição do ruído urbano e a potencial redução de tarifas, tornando o transporte público mais acessível. Mesmo com um cenário promissor, existem desafios importantes a serem superados, sejam eles técnicos, operacionais, ambientais, econômicos ou jurídicos, chegando até à criação de um arcabouço legislativo unificado. Ainda no Capítulo 2, dentre os países da América Latina, o Chile e a Colômbia, com estratégias nacionais, vêm se destacando, em que pese o Brasil tenha empenhado esforços conjuntos entre setores público e privado. Para que existam avanços no Brasil, ainda é fundamental que haja um esforço coordenado entre governos, empresas, instituições financeiras e sociedade civil a fim de promover um ambiente favorável ao desenvolvimento da eletromobilidade no país.

O **Capítulo 3** apresenta de forma simplificada o papel dos agentes promotores da eletromobilidade, apontando uma importante relação entre a capacitação adequada dos operadores e as oportunidades para o desenvolvimento do mercado nacional com a promoção de inovação e desenvolvimento industrial. Bancos de fomento, entes federais e outros agentes de financiamento são atores relevantes nesse aspecto, pois podem construir um mercado para permitir que custos de oportunidade entre tecnologias sejam compatíveis e barreiras de financiamento – especificamente na etapa de compra do veículo – sejam superadas.

O **Capítulo 4** contribui com um consistente apontamento de aspectos técnicos ligados à eletromobilidade – é um arrazoador de informações de apoio aos gestores públicos para a tomada de decisão baseada em evidência. Apresenta caminhos para gestão eficiente de dados e infraestrutura de recarga que podem melhor permitir a estruturação financeira adequada para investimento em infraestrutura. A estruturação de um projeto que implanta infraestrutura de recarga para introdução de ônibus elétricos no transporte público requer decisões relativas aos aspectos tecnológicos (principalmente o tipo e respectiva potência dos carregadores) e operacionais (protocolos e faixas horárias de uso, considerando frota dimensionada para o

sistema de transporte) da infraestrutura de recarga, em que se destacam:

A definição de locais potenciais para instalação de infraestrutura de recarga, o que pode considerar tanto localidades já operantes na rede de transporte (como terminais públicos e garagens privadas) quanto terrenos cujo potencial construtivo ainda não foi explorado (em especial aqueles em posse do poder público);

A estimativa de área em cada local identificado para também estimar a quantidade de carregadores a ser implantada e, portanto, a potência total instalada;

A verificação, em conjunto com a concessionária de distribuição de energia, da disponibilidade de redes de média ou alta tensão nos locais selecionados, descartando aqueles que inicialmente exigem investimentos de expansão ou adaptação da rede elétrica de distribuição;

O alinhamento, dentre as alternativas restantes, do atendimento de cada localidade aos serviços que já operam com veículos elétricos ou têm previsão de operarem em fases iniciais de uma transição energética no sistema de transporte, com o propósito de minimizar ineficiências operacionais associadas à quilometragem percorrida fora de serviço para realização da recarga.

O **Capítulo 5** aborda o custo total de propriedade (Total Cost Of Ownership – TCO, na sigla em inglês) e a influência da dimensão da frota como um dos componentes de maior peso sobre o custo total da rede, enquanto os custos operacionais são significativamente menores quando comparados à operação a diesel. A introdução de ônibus elétricos a bateria corresponde a uma alternativa que atende plenamente aos objetivos de descarbonização do transporte público, uma vez que são zero emissão durante a operação. No entanto, também agrega uma nova dinâmica à operação do transporte público, aumentando a complexidade de um processo de transição energética no setor. As baterias de ônibus elétricos são usualmente compostas de módulos menores, permitindo que diferentes arranjos e capacidades possam ser dispostos nos veículos. Nesse sentido, a instalação de baterias maiores aumenta a autonomia de circulação do veículo, enquanto menores capacidades podem exigir mais paradas de recarga ao longo da operação. A energia consumida por um veículo, por sua vez, varia em função de fatores como extensão e topografia da rota, frequência de viagens planejadas em um dia, dinâmica de velocidades e aceleração.

O **Capítulo 6** traz um apanhado regulatório, já apresentado em outras partes, mas com enfoque nos arranjos contratuais possíveis. Há uma síntese das garantias contratuais e revisão de contratos de concessão e do arcabouço legislativo e regulatório de apoio. A importância da abordagem dos aspectos normativos e regulatórios que regem o tema da mobilidade elétrica em todas as esferas da federação se deve ao fato de que a regulação interfere na estrutura de inserção de uma nova tecnologia no mercado, sendo ela fundamentadora de políticas públicas, bem como definidora de parâmetros para novos modelos de negócios, de contratos e de padronizações técnicas. Tais políticas visam criar um ambiente propício para a transição para a eletromobilidade, por meio de incentivos fiscais, subsídios, regulamentações e investimentos em infraestrutura de recarga, com o objetivo de alcançar uma mobilidade mais sustentável

e reduzir as emissões de poluentes. É importante destacar que ambas as frentes são necessárias para construir cidades sustentáveis e resilientes.

A regulação é um mecanismo influente sobre a inserção de uma nova tecnologia no mercado, por ser fundamentadora de políticas públicas, bem como definidora de parâmetros para novos modelos de negócios, de contratos e de padronizações técnicas. Essas políticas estabelecem diretrizes sobre transportes, combate à poluição e desenvolvimento integrado sustentável. Os instrumentos implementados nesses marcos contemplam incentivos fiscais, subsídios, regulamentações e investimentos em infraestrutura de recarga, além de viabilizarem a elaboração de Planos de Desenvolvimento Urbano Integrados (PDUI) e as leis de mobilidade urbana e elétrica municipais.

Outro componente relevante para operar frotas de ônibus elétricos consiste no custo da energia. No Brasil, é possível adquirir energia a partir dos mercados Cativo e Livre de energia. A transição para o transporte público elétrico representa uma oportunidade valiosa e um desafio significativo. Ao modernizarem o transporte coletivo, as cidades não só melhoram a eficiência e a sustentabilidade como também reduzem emissões e poluição sonora. Na América Latina, países como Chile e Colômbia lideram com estratégias nacionais, enquanto no Brasil, apesar da ausência de uma diretiva nacional, esforços conjuntos entre setores privado e governamental estão pavimentando o caminho para uma mobilidade mais sustentável. Desafios técnicos, operacionais, ambientais, econômicos e jurídicos ainda precisam ser superados. A gestão eficiente de dados e infraestrutura de recarga, a capacitação adequada dos operadores e a criação de um arcabouço legislativo unificado são decisivas para o sucesso dessa transição. Como no caso de qualquer guia ou manual, este foi desenvolvido para ser um produto prático, com conteúdo denso apresentado em linguagem objetiva e acessível para o público não especializado, preservando, porém, o interesse dos especialistas. O objetivo é que aqueles que estudem ou implementem projetos de eletromobilidade nas cidades do país encontrem aqui explicações, definições, conceitos, metodologias e ferramental de apoio e exemplos concretos. Portanto, os públicos-alvo do presente *Guia* são: (i) gestores públicos; (ii) lideranças do terceiro setor; (iii) o meio acadêmico e demais interessados em promover melhorias na mobilidade urbana.

1

O cenário da mobilidade elétrica no transporte público

Em âmbito global, as energias renováveis correspondem a mais de 10% do consumo total de energia, considerando todos os fins, e aproximadamente 20% da produção de energia elétrica. No Brasil, esses números são mais expressivos: acima de 90% da produção de energia elétrica é renovável, enquanto nos Estados Unidos mais de 30% do consumo total de energia e 66% da geração de energia elétrica são renováveis. O que se nota no Brasil, no Chile, na Colômbia, no Equador e no Peru é que os programas de energia hidrelétrica de baixo custo atualmente podem competir com as opções termoeletricas. Conforme apontamento do estudo técnico desenvolvido para a São Paulo Transportes S/A (SPTrans) como parte da iniciativa denominada Zebra – Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator (Zebra, 2022), a utilização de fontes renováveis de energia é tema recorrente desde os primeiros encontros sobre mudanças climáticas – a 1ª Conferência Climatológica Mundial foi realizada em Toronto, no Canadá, em 1988, quando então se criou o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O assunto passou a chamar atenção a partir do alerta da comunidade científica em relação às consequências da utilização de combustíveis fósseis para a geração de energia, especialmente no que tange à emissão de gases de efeito estufa – GEE.

Nesse contexto, a eletrificação da frota de transporte público está sendo incentivada pelos governos de diversos países como uma medida para reduzir as emissões de gases poluentes locais, além de inúmeros benefícios urbanos e sociais que precisam ser considerados de maneira concomitante. Essa iniciativa se insere em um cenário de transição energética, com foco na promoção de fontes renováveis de geração elétrica, na implementação de redes inteligentes de energia (smart grids) e, acima de tudo, como uma das estratégias de descarbonização dos componentes da infraestrutura urbana e uso mais eficiente e racional da infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia nas cidades brasileiras. Tal temática foi amplamente discutida na *Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil*, desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Energética em 2020 com apoio do Ministério de Minas e Energia (Brasil. Ministério de Minas e Energia, 2020).

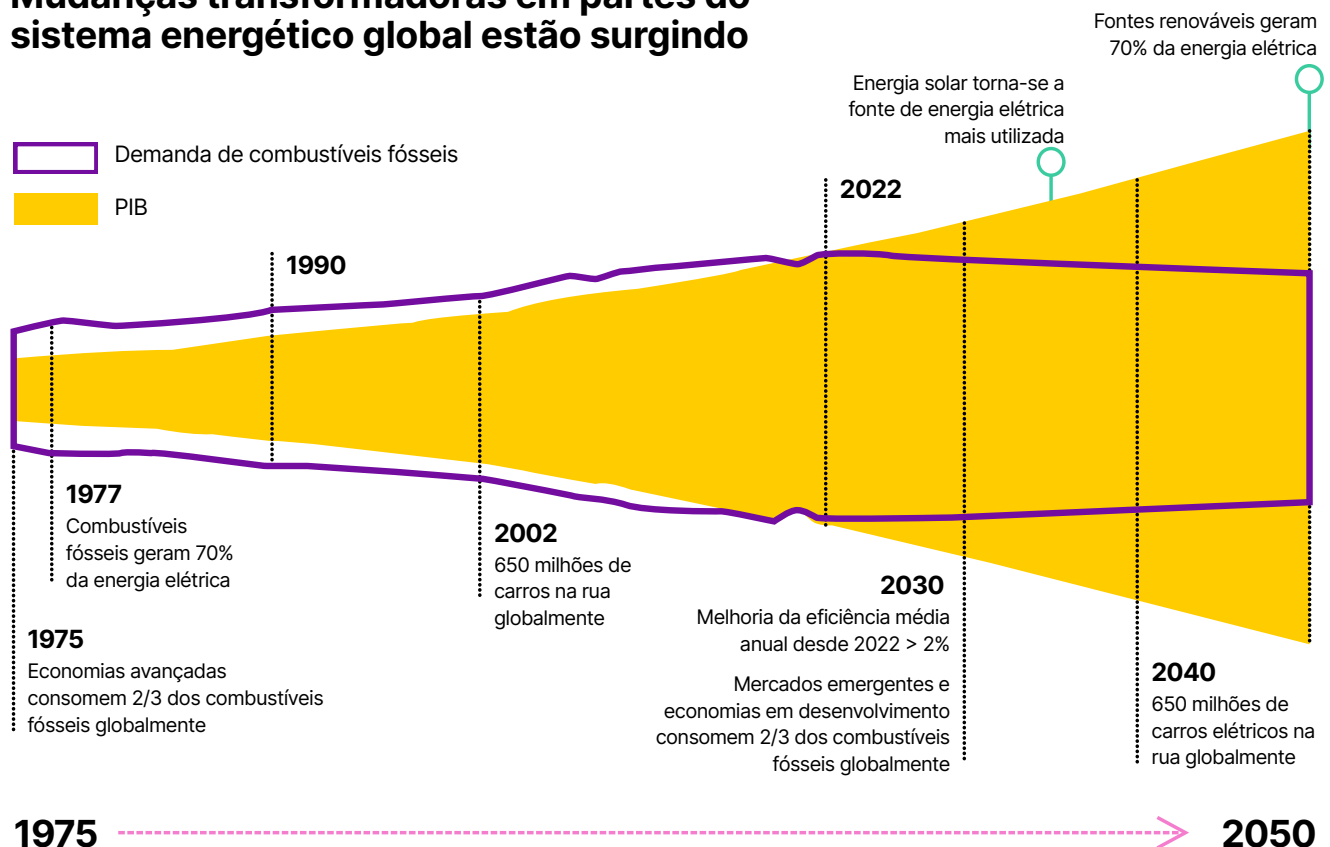
A transição energética é uma preocupação planetária dos últimos 50 anos. O sistema energético global se associa à demanda de combustíveis fósseis e ao crescimento do PIB. Atualmente, há uma preocupação global com a utilização dos combustíveis fósseis, organismos internacionais têm trabalhado historicamente para reverter esse cenário, projeções futuras apontam na direção de um afrouxamento da demanda dos combustíveis fósseis, com sua substituição por energia limpa.

A figura abaixo mostra o cenário de desenvolvimento das tecnologias sustentáveis ao longo do tempo, como pode ser observado pela produção de energia solar e pela mobilidade elétrica, em conjunto com a baixa de demanda para consumo dos combustíveis fósseis em um cenário de 2000 a 2050. Assim, apesar de o crescimento econômico global estar em plena aceleração, o consumo de combustíveis fósseis parece se encontrar em declínio.

A mesma relação se reforça pela figura seguinte, na qual é patente o aumento dos investimentos em tecnologias de produção de energia sustentáveis, em paralelo ao decréscimo das baseadas em combustíveis fósseis.

FIGURA 1

Mudanças transformadoras em partes do sistema energético global estão surgindo



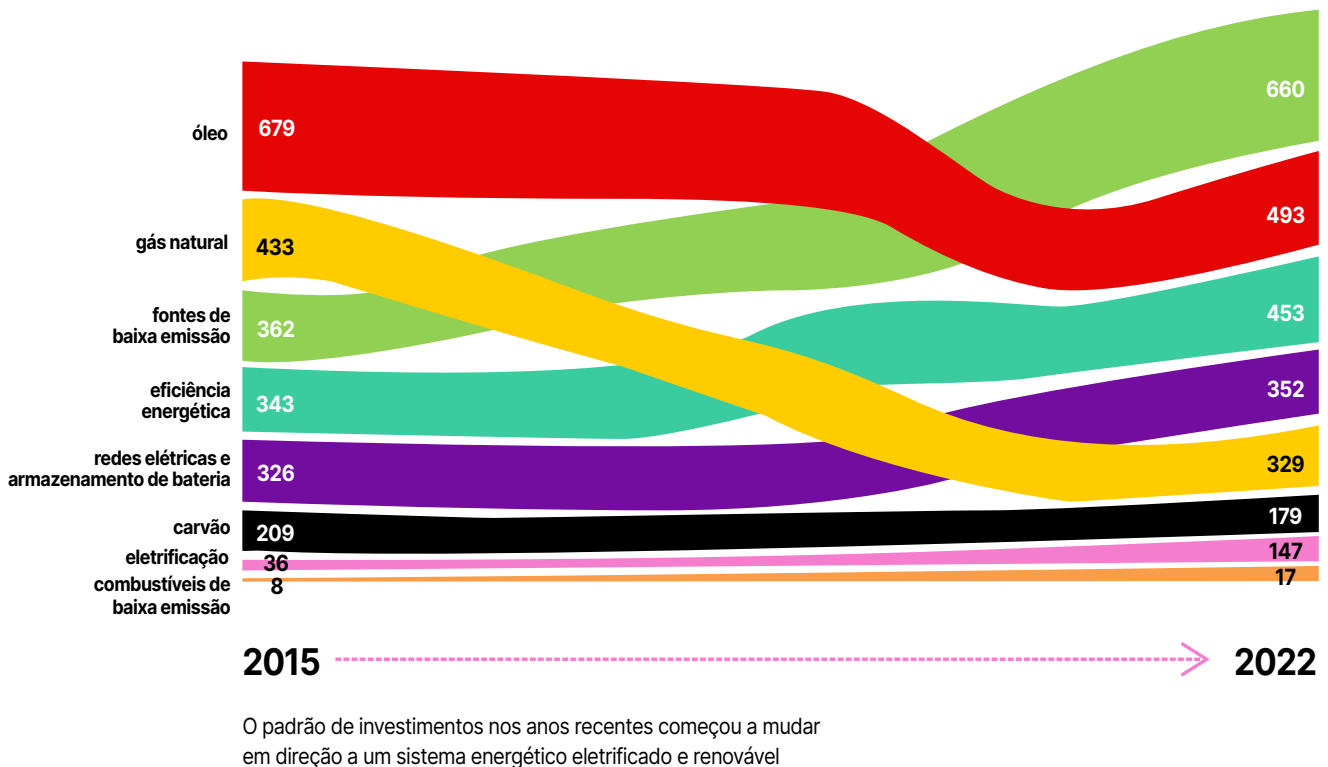
A relação histórica entre crescimento econômico e demanda de combustíveis fósseis está sendo alterada pela emergência de uma nova economia de energia limpa

Fonte: Adaptado de IEA, 2023a.

Os veículos automotores têm sido os principais elementos impulsionadores da transição no processo de eletrificação, sobretudo devido à sua representatividade no consumo de combustíveis fósseis em âmbito mundial, sendo responsáveis por cerca de 18,5% das emissões globais de CO₂ (IEA, 2023a). Dada, assim, a inegável importância da eletromobilidade no contexto socioeconômico e político em que vivemos, torna-se necessário investigar as tendências relacionadas a essa nova realidade da mobilidade urbana. A transição para a eletrificação do transporte público, mesmo com mudanças ainda incipientes, revolucionará o seu funcionamento para além do que conhecemos.

FIGURA 2

Ondas de investimento mundo (bilhões de dólares)



Fonte: Adaptado de Global Outlook, IEA (2023a).

Um exemplo notável de como essa mudança de paradigma tem sido conduzida globalmente é o mercado de ônibus elétricos na China entre 2015 e 2021. Nesse período, o país alcançou um impressionante marco de aproximadamente 700 mil unidades de ônibus a bateria (BEB), fabricados por 63 empresas diferentes (Du et al., 2019; IEA, 2023a). Além de atender à demanda interna, a China emergiu como o maior exportador de ônibus elétricos do planeta. Dez principais fabricantes chineses dominam mais de 78% do mercado global de ônibus elétricos. A líder Yutong detém 22% do mercado, seguida pela BYD, com 14,1%, a Yinlong, com 7,4%, ZhongTong, com 5,9%, e CRRC, com 5,9%, de acordo com dados do início desta década (BloombergNEF, 2020; Electrive, 2022).

Essa liderança chinesa não só destaca a capacidade do país em escalar rapidamente a produção de tecnologias limpas; serve também como um modelo de referência para outras nações em busca de modernizar seus sistemas de transporte público. A pergunta que se coloca é: Como outras

regiões podem aprender com a experiência chinesa para acelerar sua própria transição para a eletromobilidade, promovendo inovação e sustentabilidade?

A China tem experimentado uma variedade de tecnologias de ônibus elétricos, incluindo modelos híbridos (HEB), híbridos plug-in (PHEB) e puramente a bateria (BEB). Com a consolidação dos ônibus a bateria no mercado interno, impulsionada pelas características únicas do sistema de transporte chinês, esses veículos vêm se mostrando uma solução atraente para a transição energética e a adoção da mobilidade elétrica nas cidades (Du e Ouyang, 2017; Zhou e Wolfson, 2016).

Entretanto, essa experiência suscita diversas questões para reflexão: até que ponto a infraestrutura de recarga e as políticas de apoio podem ser replicadas em outros contextos urbanos? Quais são os desafios específicos que outras nações enfrentariam ao tentar adotar tecnologias similares? Além disso, como podemos garantir que a produção e a reciclagem das baterias sejam sustentáveis a longo prazo? A experiência chinesa oferece muitas lições, todavia também levanta importantes considerações sobre a adaptabilidade e a escalabilidade dessas soluções em diferentes realidades urbanas.

As cidades chinesas são densamente povoadas, o que aumenta a demanda por transporte público eficiente, contudo têm investido massivamente em infraestrutura de transporte, incluindo a construção de extensas redes de metrô e vias expressas. Há uma forte ênfase na eletrificação do transporte, com uma crescente frota de ônibus e táxis elétricos nas cidades, associada à mobilidade ativa, em que as bicicletas compartilhadas são amplamente utilizadas e integram-se bem ao sistema de transporte público. Busca-se ainda a implementação de tecnologias avançadas, como pagamento digital, monitoramento por GPS e inteligência artificial para otimização do tráfego. Esse profícuo cenário é possível, pois o governo chinês oferece subsídios e incentivos para promover o uso de veículos elétricos e reduzir as emissões de carbono. Por fim, a integração de diferentes modos de transporte, como metrô, ônibus, bicicletas e trens de alta velocidade, facilitando conexões eficientes, é associada a cidades que são planejadas com foco na acessibilidade e na eficiência do transporte público, incluindo zonas de baixa emissão e vias exclusivas para ônibus.

Na América Latina, os governos têm estabelecido metas ambiciosas para a eletrificação dos transportes públicos. De acordo com relatórios conduzidos pelo C40¹, espera-se que o número de ônibus elétricos aumente mais de sete vezes em 32 cidades latino-americanas até 2030, representando uma oportunidade de investimento superior a US\$ 11 bilhões. Esse crescimento não apenas destaca um compromisso crescente com a mobilidade sustentável como também apresenta um cenário vasto e diversificado para inovações tecnológicas, desenvolvimento de infraestrutura e criação de empregos.

Com um investimento tão significativo, surge a necessidade de um planejamento estratégico robusto, que inclua a construção de redes de recarga eficientes, políticas de incentivo governamental e Parcerias Público-Privadas. Além disso, a transição para frotas elétricas pode catalisar mudanças sociais e ambientais positivas, reduzindo emissões de poluentes e melhorando a qualidade do ar nas cidades. Assim, é crucial considerar como essas transformações podem ser equi-

¹ - C40 é uma rede global de quase 100 prefeitos das principais cidades do mundo que estão unidos em ação para enfrentar a crise climática.

tativas e acessíveis para todas as camadas da sociedade, promovendo uma verdadeira revolução na mobilidade urbana na América Latina (C40 Cities, 2023).

Esse crescimento é impulsionado por iniciativas como o Programa de Mobilidade Sustentável da ONU e o apoio financeiro de instituições como o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Além disso, os relatórios apontam, mais uma vez, que tais investimentos terão como externalidade uma redução significativa das emissões de gases poluentes, melhorando a qualidade do ar e a saúde pública na região. No entanto, existem desafios importantes a serem considerados, como, por exemplo, o risco de se fazer a transição energética nas áreas urbanas sem transferir os custos para o usuário (transporte público financiado por tarifas), a complexidade política e a falta de uma diretriz nacional.

Estudos recentes do C40 (C40 Cities, 2023) apontam que, até o final desta década, espera-se a implantação de 25 mil ônibus elétricos, com a meta de ultrapassar 55 mil até 2050. Esse aumento é substancial quando comparado aos pouco mais de 4 mil ônibus elétricos atualmente em operação em 32 cidades latino-americanas. Além de representar um avanço tecnológico, tal crescimento promete melhorar a qualidade do ar e reduzir significativamente as emissões de gases poluentes. Nesse sentido, é importante refletir: qual será o custo total do projeto e como será financiado?

Além disso, a transição para uma frota de ônibus elétricos oferece benefícios econômicos, como a diminuição dos custos operacionais a longo prazo e a criação de novas oportunidades de emprego no setor de energia renovável. Os fatores que contribuem para isso são:

Alta urbanização

A América Latina e o Caribe são a segunda região mais urbanizada da Terra, depois da América do Norte, com mais de 80% da população vivendo em cidades. Isso implica importantes desafios na mobilidade urbana. Não é incomum no padrão de urbanização brasileiro um espraiamento urbano, o que aumenta o tempo de deslocamento e, consecutivamente, a segregação socioespacial. As cidades brasileiras se desenvolvem com planejamento, sem planejamento e apesar do planejamento.

Alto uso de transporte público

A região latino-americana é uma potência, com desafios e oportunidades, para o transporte público de massa. A rede atualmente implantada de transporte de massa e os veículos de aplicativo de transporte movimentam, em média, mais de 60% de todas as viagens realizadas, um dos mais elevados índices do globo, conforme apontado pelo relatório da rede C40 (C40 Cities, 2023).

Matriz energética com grande potencial climático limpa

Inequivocamente, hoje a América Latina possui a matriz energética mais limpa do planeta, com 25% de sua energia proveniente de fontes renováveis. Em 2013, relatórios (CAF, 2013) já apontavam que esse desempenho é impulsionado principalmente pela significativa contribuição da hidreletricidade e dos biocombustíveis em vários países sul-americanos. Por exemplo, o Brasil é líder mundial em energia hidrelétrica, com cerca de 60% de sua eletricidade gerada por essa fonte. Além disso, o uso de biocombustíveis, como o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, é amplamente difundido na região, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Recentemente, também houve um aumento nos investimentos em energia solar e eólica, fortalecendo ainda mais a matriz energética limpa da região.

Na figura abaixo, elaborada a partir de dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2023b), é possível visualizar o quantitativo de energias renováveis de fonte elétrica da América Latina e do Caribe em comparação com o resto do globo, e o mesmo em relação aos combustíveis fósseis (óleo), demonstrando que a diferença de produção de energia limpa é muito maior, quando comparada com a de combustível fóssil, ou seja, ainda há menor produção de energias não renováveis pela América Latina, em relação ao resto do mundo.

FIGURA 3

Participação do petróleo no fornecimento total de energia (2022)

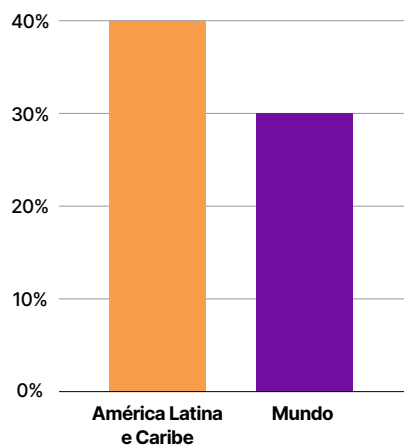


FIGURA 4

Participação das energias renováveis na geração de eletricidade (2022)

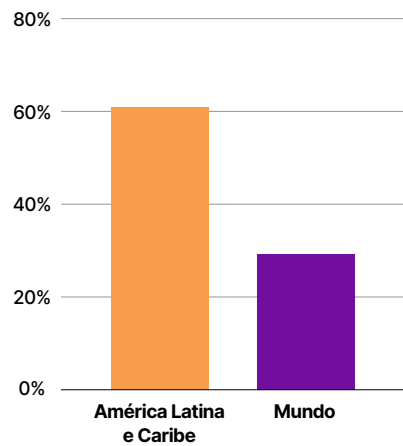
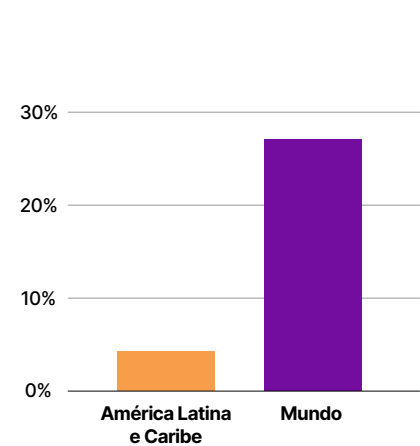


FIGURA 5

Participação do carvão no fornecimento total de energia (2022)



Fonte: Adaptado de Latin America Global Outlook, IEA (2023b).

Em maio de 2024, as maiores frotas de ônibus elétricos registradas na América Latina estavam no Chile (2.043 veículos), Colômbia (1.590 veículos), México (654 veículos) e Brasil (398 veículos). Em termos de cidades, destacavam-se Santiago (2.000 veículos), Bogotá (1.486 veículos), Cidade do México (580 veículos) e São Paulo (219 veículos) (IEA, 2023c). O Chile, em especial, vem sobressaindo na liderança pela redução de emissões e poluição do ar por meio da adoção de ônibus

elétricos, conforme a Análise de Tamanho e Participação do Mercado de Ônibus Elétricos da América Latina realizada pela consultoria Mordor Intelligence (Mordor Intelligence, [s.d.]). O Chile, que anunciou um ambicioso plano para alcançar a eletrificação total das frotas de transporte público até 2040, já desponta como uma das maiores frotas fora da China.

Essa iniciativa não apenas demonstra um compromisso significativo com a sustentabilidade ambiental como também abre um leque de oportunidades para melhorias na infraestrutura urbana e na qualidade de vida da população. A transição para frotas elétricas, inclusive no transporte público, requer um olhar multifacetado, incluindo a expansão das redes de recarga, incentivos fiscais para adoção de novas tecnologias e programas de capacitação para profissionais do setor.

Além disso, é crucial analisar e mitigar os desafios associados a essa transição, como o custo inicial elevado e a necessidade de atualização contínua da tecnologia. Propor soluções inovadoras e parcerias estratégicas entre os setores público e privado será fundamental para garantir o sucesso dessa transição e estabelecer um modelo de referência para outras nações na região.

Um dos principais responsáveis pelo avanço da eletromobilidade no Chile foi o modelo de negócio adotado, que viabilizou contratos de leasing² para aquisição da frota por meio dos quais a empresa concessionária responsável pelo fornecimento dos ônibus elétricos pode ser diferente da concessionária operadora do sistema, com um contrato de arrendamento. Um aspecto fascinante desse modelo no contexto chileno é que a nova frota incorporada ao sistema de transporte público é adquirida como “bens sujeitos a concessão”³. Em outras palavras, o poder público deve ceder o uso dessa frota ao próximo operador, juntamente com o contrato de arrendamento. Isso garante que os veículos permaneçam integrados ao sistema de transporte público, proporcionando continuidade e estabilidade ao serviço. Essa abordagem inovadora assegura que a infraestrutura de transporte evolua sem interrupções, permitindo uma transição suave entre operadores e mantendo o compromisso com a qualidade e a eficiência no transporte urbano.

Seguindo na mesma direção, a Colômbia tem uma Estratégia Nacional de Eletromobilidade e estabeleceu a meta de alcançar 600 mil veículos elétricos até 2030. A capital, Bogotá, anunciou a modernização da frota do TransMilenio com a adição de quase 600 novos ônibus elétricos, totalizando mais de 1.480 veículos desse tipo na frota, o que posiciona a cidade como potencial detentora de uma das maiores frotas de ônibus elétricos fora da China. O Equador, por sua vez, declarou que todos os novos veículos incorporados à frota de transporte público deverão ser elétricos a partir de 2025, reforçando seu compromisso com a sustentabilidade e a redução de emissões de carbono.

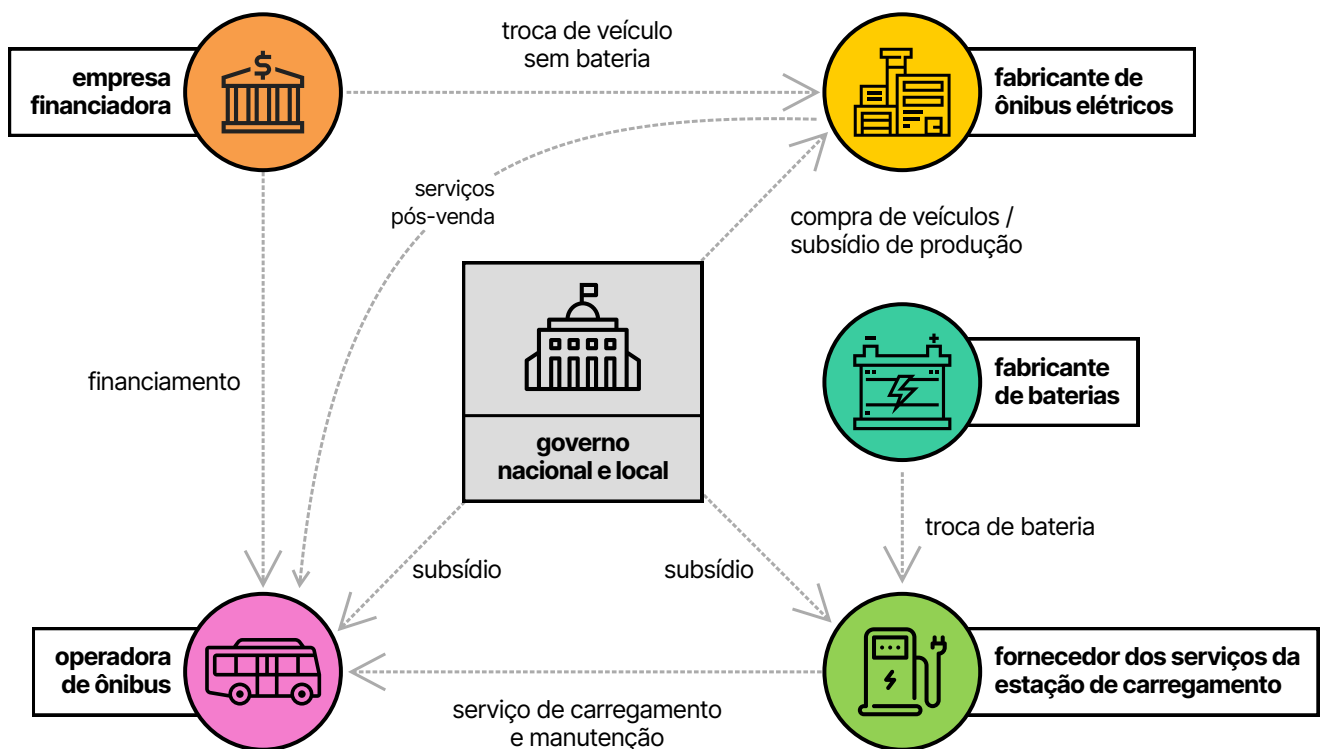
2 - O leasing para a compra e operação de ônibus elétricos é uma prática financeira que permite às empresas de transporte público adquirir veículos elétricos sem a necessidade de um grande investimento inicial.

3 - Leasing financeiro: nesse modelo, a empresa de transporte aluga o ônibus elétrico por um período fixo, ao final do qual geralmente tem a opção de comprar o veículo por um valor residual previamente acordado. Durante o período do contrato, a empresa é responsável pela manutenção e pela operação do ônibus, e os pagamentos de leasing são contabilizados como despesas financeiras. Leasing operacional: a empresa de transporte aluga o ônibus elétrico por um período determinado, sem a intenção de comprar o veículo ao final do contrato. A empresa fornecedora do leasing muitas vezes é responsável pela manutenção e pelo suporte técnico dos veículos. Os pagamentos são contabilizados como despesas operacionais, e não como ativos da empresa.

Recentemente, há informações de que em 2019 a Cidade do México fez um pedido de mais de 60 trólebus com bateria à empresa Yutong. Desses, 40 já foram entregues ao governo mexicano, enquanto a chegada do restante estava prevista para até o final de 2023, mas até abril de 2024 não havia atualizações oficiais sobre a entrega completa desses veículos. Os trólebus encomendados são híbridos, equipados tanto com baterias elétricas quanto com componentes para operação via linha aérea.

Na perspectiva sobre a tomada de decisão de uma empresa multinacional de fabricar esse veículo no Brasil (Ho et al., 2022), é possível destacar que na América Latina é comum encontrar PPPs inovadoras e modelos de concessão diferenciados no setor da eletromobilidade. Nesse esquema, os operadores dos serviços de transporte público rodoviário assumem a responsabilidade pelo financiamento, aquisição e manutenção das frotas, fornecendo ônibus elétricos para operadoras ou municípios através de contratos de longo prazo. O arranjo permite que as operadoras ou municípios se isentem da necessidade de administrar a propriedade e a operação dos veículos.

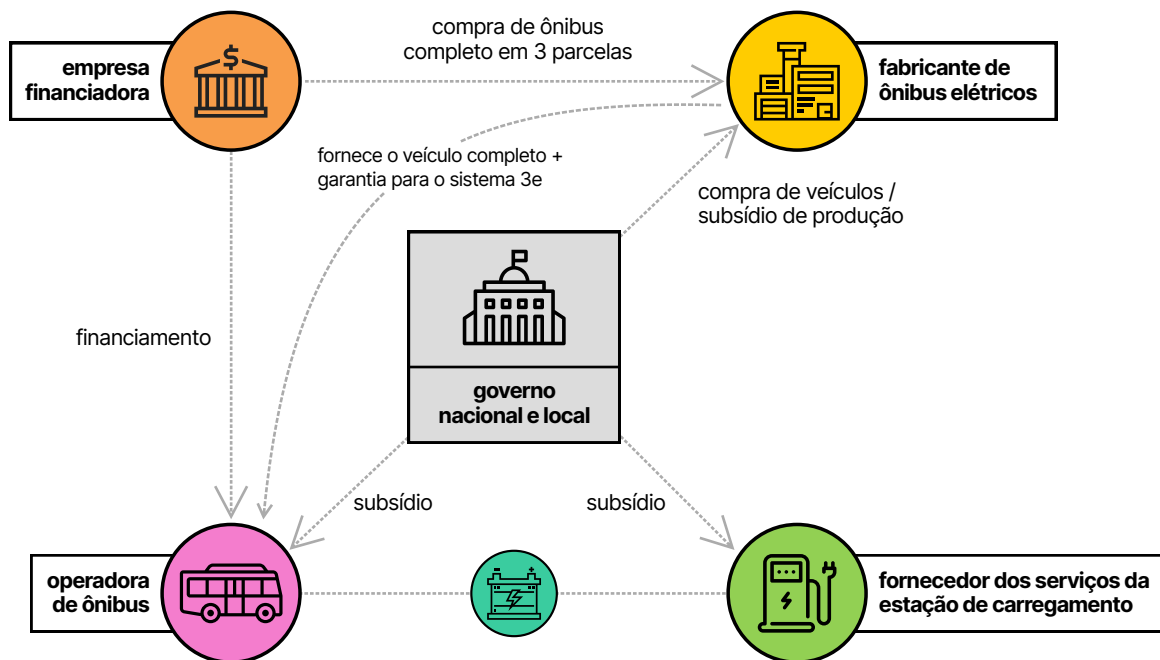
FIGURA 6



Fonte: Adaptado de World Bank, 2021.

Outra estratégia adotada é a subvenção econômica, que busca equilibrar os custos de aquisição, ao mesmo tempo que se incorporam, ainda que indiretamente, os ganhos ambientais e demais externalidades positivas advindas do processo de descarbonização.

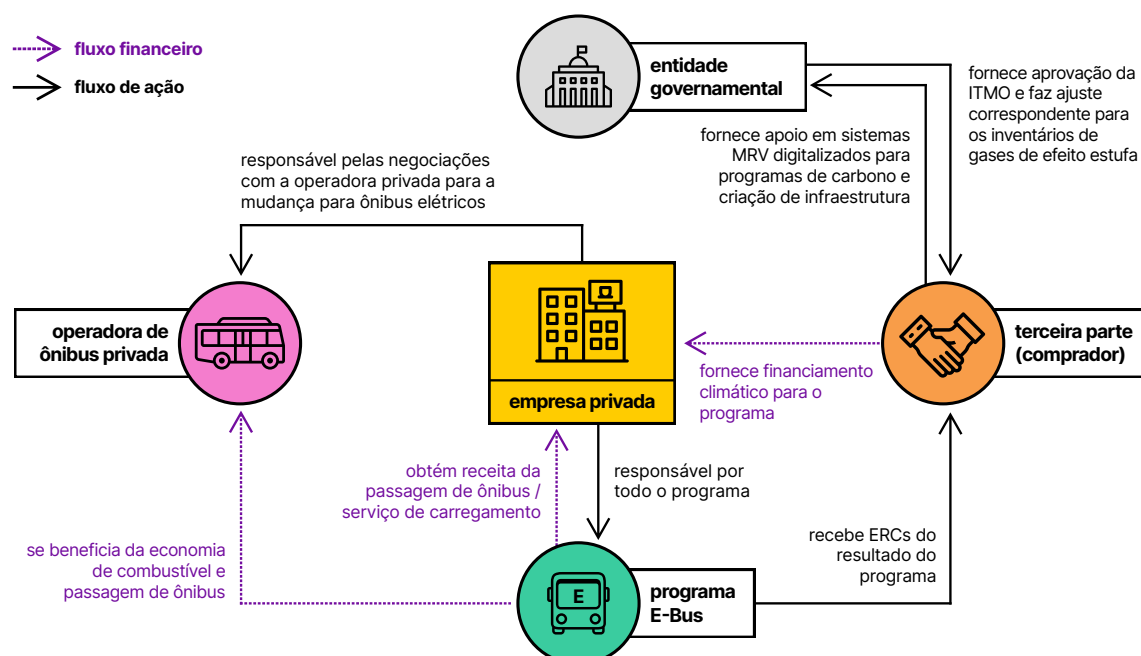
FIGURA 7



Fonte: Adaptado de World Bank, 2021.

Esse modelo de parceria é distinto daquele predominante na maioria das cidades mundo afora, no qual a propriedade dos ônibus geralmente recai sobre um órgão público ou uma única operadora. Na América Latina, essa abordagem colaborativa pode impulsionar a transição para um transporte público mais sustentável e eficiente, destacando a região como um exemplo de inovação no setor de mobilidade elétrica, conforme confirmado em relatório do Banco Mundial e da rede C40 (World Bank, 2024).

FIGURA 8



Fonte: Adaptado de World Bank, 2023.

No Brasil, várias cidades têm implementado operações comerciais, efetivas ou assistidas, com ônibus elétricos incorporados à frota, refletindo um movimento crescente em direção à mobilidade sustentável. Exemplos incluem São Paulo, Campinas, São José dos Campos, Bauru, Curitiba, Rio de Janeiro, Niterói, Salvador e Brasília, onde iniciativas visam reduzir as emissões de carbono e melhorar a qualidade do ar urbano através da adoção de tecnologias limpas no transporte público.

Apesar da importância de testar a tecnologia em projetos-piloto, o tamanho e a quantidade de veículos em operação nem sempre são suficientes para compreender todos os benefícios que os ônibus elétricos podem oferecer à população. Por esse motivo, é necessário que os testes contem com o monitoramento da operação e com maior quantidade de veículos na frota, além de uma clara estratégia de transição (ITDP, 2021).

Ademais, os projetos-piloto desempenham uma fundamental abordagem para a difusão da tecnologia; os testes em condições aproximadas de serviço se propõem a compreender o comportamento e o rendimento da tecnologia em questão em determinado sistema e contexto, sobretudo em termos operacionais; os benefícios não são apenas para a população, e eles, de fato, não costumam ser suficientemente avaliados nos testes, porém esse é o alcance possível dos pilotos. Na prática, nenhum sistema irá implantar uma tecnologia que não tenha sido testada minimamente antes e que garanta segurança operacional.

O governo federal vem atuando através de ações coordenadas ou executadas com exclusividade por meio de entidades públicas ou de Parcerias Público-Privadas, e mais recentemente com financiamento e repasses de recursos no Programa de Aceleração do Crescimento para a renovação de frota no transporte público, em prol do desenvolvimento da eletromobilidade no país. Documentos como o *Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras* (Ministério das Cidades, 2013), desenvolvido pelo Ministério de Desenvolvimento Regional em parceria com o Banco Mundial, já apresentam importantes referências para melhor capacitação dos agentes públicos e privados na direção da implementação de projetos de eletromobilidade.

Tais ações podem não ter necessariamente foco na eletromobilidade, entretanto impulsionam o desenvolvimento tecnológico da indústria nacional de eletrificação veicular, incentivam iniciativas-piloto para a integração desses veículos à rede elétrica, promovem a atualização de regulamentações essenciais para as atividades comerciais relacionadas e impulsionam o crescimento e o fortalecimento do setor empresarial nesse segmento de mercado, em um ecossistema positivo de desenvolvimento nacional.

Na Tabela 1, apresentam-se políticas do governo federal que promovem a eletrificação veicular, incluindo programas de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e políticas públicas voltadas à eletrificação veicular, fundamentais para estimular o desenvolvimento tecnológico e a infraestrutura necessária para a adoção de veículos elétricos no país, conforme *Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil*.

TABELA 1

Políticas de promoção à mobilidade elétrica

Iniciativa	Objetivo	Ato Normativo
Programa de Aceleração do Crescimento	Acelerar o desenvolvimento de infraestrutura essencial para a economia e sustentabilidade.	Lei nº 14.507/2022
P&D Aneel	Estimular a inovação e o desenvolvimento tecnológico no setor de energia.	Resolução normativa 316/2008
RenovaBio	Reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a sustentabilidade no transporte.	Lei nº 13.576/2017
Mobilidade elétrica inteligente (2015)	Desenvolver soluções inteligentes para a mobilidade elétrica e integrar novas tecnologias ao setor.	Lei nº 13.196/2015
Rota 2030	Melhorar a competitividade da indústria automotiva brasileira e promover a sustentabilidade.	Lei nº 13.755/2018
Programa de apoio ao desenvolvimento tecnológico, à inovação e à eficiência energética no setor automotivo nacional	Incentivar a produção e o uso de veículos elétricos, promovendo a sustentabilidade.	Decreto 9442/18
Rede de Inovação Rise	Fomentar a colaboração e inovação em soluções energéticas sustentáveis.	Lei nº 13.755/2018
Plano Nacional de Energia (PNE 2050)	Garantir a segurança energética e a sustentabilidade ambiental a longo prazo.	Portaria 6/2020, Ministério de Minas e Energia
Regulamentação da recarga elétrica como um serviço permitido a qualquer interessado	Promover o desenvolvimento da mobilidade elétrica por meio da expansão dos eletropostos.	Resolução 1.000/Aneel
Programa Mover (Mobilidade Verde e Inovação)	Programa substitutivo do Rota 2030 que objetiva promover a descarbonização e inovação na indústria automotiva nacional.	Medida provisória 1.205/2023
Programa Brasileiro de Mobilidade Sustentável	Aumentar a adoção de veículos elétricos e reduzir a dependência de combustíveis fósseis.	Resoluções 001/86, 18/86 e 307/02, Conama
Promob-e (Projeto Sistemas de Propulsão Eficiente)	Melhorar a eficiência dos sistemas de propulsão e promover a sustentabilidade no transporte.	Projeto de cooperação técnica bilateral (Brasil e Alemanha) implementado pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) – 2017 a 2021

Iniciativa	Objetivo	Ato Normativo
Chamada P&D Aneel (Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica)	Estimular o desenvolvimento de tecnologias e infraestrutura para mobilidade elétrica.	Resolução normativa 819/18
Marco Legal da Geração Distribuída	Inclui incentivos para instalação de infraestrutura de recarga para veículos elétricos.	Lei nº 14.300/2022
Programa de incentivo à circulação de veículos elétricos	Altera o Código de Trânsito Brasileiro, permitindo a circulação de veículos elétricos em faixas exclusivas e dedicando espaço para recarga.	Lei nº 14.071/2020

Fonte: Elaboração própria.

Para atingir metas sociais e ambientais relacionadas à eletromobilidade, é imperativo implementar ações gradativas e permanentes. Exemplos de tais ações incluem:

i) Substituição gradativa da frota de transporte público

A transição para veículos de transporte público com menor potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE) é crucial. O setor de transporte é um dos maiores responsáveis por emissões globais de CO₂ relacionadas à energia. A substituição gradual por ônibus elétricos pode reduzir significativamente essas emissões;

ii) Fiscalização das emissões de veículos a diesel

É essencial o monitoramento rigoroso das emissões da frota circulante de veículos movidos a diesel, assim como compará-las com sistemas elétricos, gerando dados que justifiquem a transição energética baseada em evidências. Estudos mostram que veículos a diesel são uma das principais fontes de poluição do ar nas áreas urbanas, mesmo com a adoção de tecnologias mais eficientes dos motores a diesel, ainda existem emissões importantes neste sistema;

iii) Acompanhamento da política ambiental

A integração das políticas ambientais com as ações de mobilidade é fundamental para garantir a eficácia das medidas de eletromobilidade. A implementação de políticas coordenadas pode maximizar os benefícios ambientais e sociais. Em países como a Noruega, onde políticas ambientais rigorosas são combinadas com incentivos à eletromobilidade, houve um aumento significativo na adoção de veículos elétricos, resultando em melhorias na qualidade do ar e redução das emissões de GEE. Essas ações, se implementadas de maneira contínua e coordenada, podem contribuir substancialmente para a mitigação das mudanças climáticas e para a promoção de um transporte mais sustentável em termos globais.

1.1 A fundamental abordagem sistêmica da mobilidade elétrica

O que se tem notado na atualidade é que – apesar de os ônibus elétricos e a infraestrutura de carregamento requererem um investimento de capital inicial (duas a três vezes maior do que as opções a diesel), bem como o abastecimento das frotas eletrificadas depender de uma rede elétrica robusta, que garanta a prontidão dos veículos – os custos das baterias e os valores das despesas operacionais anuais estão em queda.

Além disso, o desempenho e a confiabilidade dos ônibus elétricos têm evoluído rapidamente. Os fabricantes estão desenvolvendo veículos mais leves e eficientes, equipados com baterias de longa duração e oferecendo maior confiabilidade, com melhores garantias de funcionamento. Essas melhorias estão tornando os ônibus elétricos uma escolha cada vez mais viável e econômica para sistemas de transporte urbano sustentáveis, garantindo a segurança operacional.

Com avanços tecnológicos contínuos e escalonamento da produção, espera-se que os custos dos componentes dos ônibus elétricos diminuam, impulsionados por governos determinados a descarbonizar seus sistemas de transporte.

Observa-se nos dias de hoje um grande interesse do setor privado – como investidores, bancos, fabricantes, seguradoras etc. – em investir no desenvolvimento de infraestrutura sustentável como estratégia de negócios e associação positiva com o setor público.

Um dos desafios para a promoção da eletromobilidade reside em alinhar essa complexa rede de atores para promover concorrência, transparência e um retorno adequado para todos os agentes. É esperado no curto prazo que as compras de ônibus elétricos cresçam substancialmente. Estima-se que até 2025 mais de 250 mil ônibus elétricos estarão em operação em termos mundiais, impulsionados por iniciativas governamentais contínuas voltadas para o fomento da mobilidade elétrica.

Em dezembro de 2015, quase 200 países, incluindo o Brasil, assinaram o Acordo de Paris, um marco internacional que entrou em vigor em novembro do ano seguinte. O acordo estabelece metas para limitar o aumento da temperatura global a 1,5 °C, visando mitigar as emissões de gases de efeito estufa e orientar investimentos e fluxos financeiros alinhados a esse objetivo. Tal compromisso reflete um esforço coletivo para enfrentar os desafios das mudanças climáticas, com o Brasil participando ativamente das discussões e implementações necessárias para alcançar os objetivos estabelecidos.

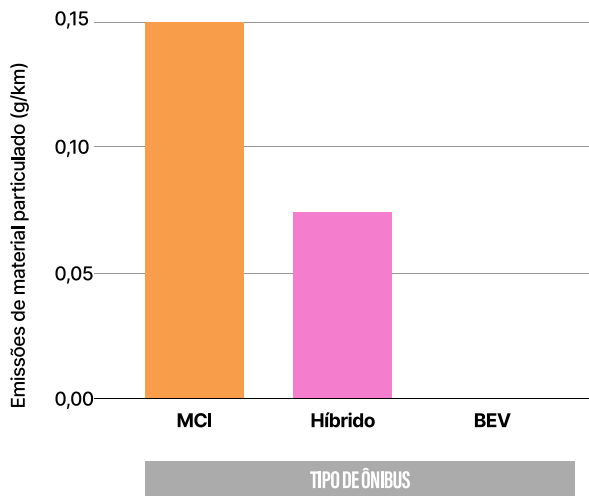
A implementação dessas metas requer a adoção de práticas e políticas que promovam a mobilidade sustentável, como o uso de transporte público eficiente, veículos elétricos e infraestrutura adequada para reduzir a pegada de carbono das cidades.

Mesmo que essas medidas não sejam mandatórias, as nações signatárias do Acordo de Paris devem aderir a princípios fundamentais, como a estratégia 20/20/20, que visa reduzir as emissões de dióxido de carbono em 20%, aumentar a produção de energia renovável em 20% e melhorar a eficiência energética em 20%. Nesse contexto, o setor de transportes, responsável pela maior parcela das emissões de gases de efeito estufa (GEE), desempenha um papel crucial na implementação eficaz do Acordo. A transição para formas de mobilidade sustentável, como o uso de

veículos elétricos, transporte público eficiente e infraestrutura de transporte verde, é essencial para alcançar aquelas ambiciosas metas voltadas para a redução global das emissões de carbono, contribuindo assim para a saúde e o bem-estar das populações afetadas pela poluição veicular.

FIGURA 9

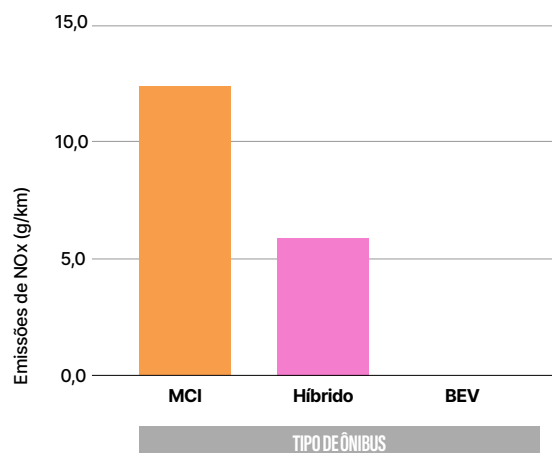
Comparação de emissões de material particulado entre diferentes tipos de ônibus



Estima-se que aproximadamente 64 mil pessoas na América Latina e no Caribe morram prematuramente a cada ano devido à poluição do ar relacionada ao transporte. As emissões de gases de efeito estufa (GEE) variam significativamente entre ônibus elétricos a bateria (BEV), híbridos e a combustão interna (MCI).

FIGURA 10

Comparação de emissões de NOx entre diferentes tipos de ônibus



Os ônibus a combustão interna (MCI), com combustível diesel ou gasolina, têm emissões diretas com maiores níveis de emissões de CO₂, NO_x, e material particulado (PM). Os ônibus híbridos, com combinação de motor elétrico e motor a combustão interna, têm emissões diretas menores que os ônibus MCI, pois o motor elétrico é usado para suportar o motor a combustão, reduzindo a quantidade de combustível fóssil queimado. Os ônibus elétricos a bateria (BEV) têm emissões diretas mais próximas de zero emissão no ponto de uso. Todavia, as emissões podem ocorrer durante a geração da eletricidade utilizada, dependendo da fonte de energia (carvão, gás natural, renováveis etc.).

Os dados referentes às emissões podem variar dependendo do modelo do ônibus, do combustível utilizado e da eficiência energética. Segundo dados da Cepal (Gramkow e Oliveira, 2023):

Ônibus a combustão interna (MCI)

Emissões de CO₂e⁴ : aproximadamente 1.200 g/km a 1.500 g/km;

Emissões de NO_x: aproximadamente 10 g/km a 15 g/km;

Emissões de material particulado (PM): aproximadamente 0,1 g/km a 0,2 g/km.

Ônibus híbridos

Emissões de CO₂e: aproximadamente 500 g/km a 800 g/km;

Emissões de NO_x: aproximadamente 5 g/km a 7 g/km;

Emissões de material particulado (PM): aproximadamente 0,05 g/km a 0,1 g/km.

Ônibus elétricos a bateria (BEV)

Emissões de CO₂e (dependendo da fonte de energia elétrica):

- Fonte de energia renovável: aproximadamente 0 g/km a 50 g/km;
- Matriz energética média: aproximadamente 100 g/km a 200 g/km.

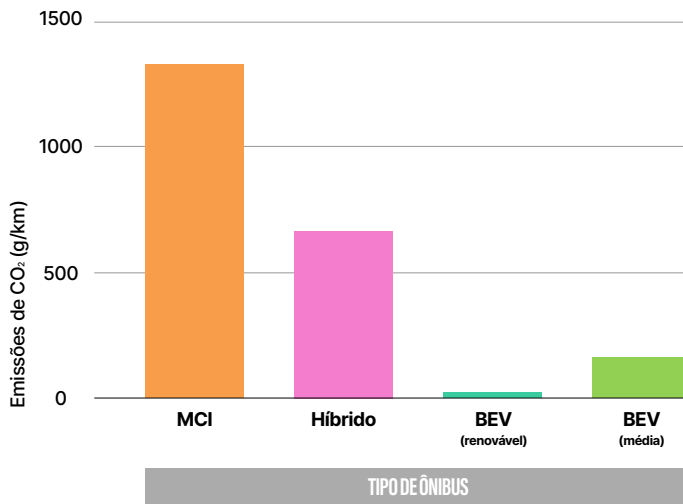
Emissões de NO_x: aproximadamente 0 g/km;

Emissões de material particulado (PM): aproximadamente 0 g/km.

4 - CO₂e (dióxido de carbono equivalente) – É uma medida métrica utilizada para comparar as emissões de vários gases de efeito estufa com base no potencial de aquecimento global. O dióxido de carbono equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas de GEE pelo seu potencial de aquecimento global.

FIGURA 11

Comparação de emissões de CO₂ entre diferentes tipos de ônibus



Nota-se que uma abordagem sistêmica incorporando os setores de transporte e energia, e suas inter-relações com políticas fiscais, políticas de financiamento e investimentos em infraestrutura, se materializa em aspectos de sustentabilidade para o desenvolvimento das cidades.

Autores como Alogdianakis e Dimitrou (2023) apontam, por exemplo, que os altos impostos sobre os combustíveis fósseis afetam positivamente o transporte público elétrico, pois os custos das emissões somados aos dos combustíveis reduzem a sustentabilidade financeira do setor do sistema de transportes altamente carbonizados.

Em um cenário moderno de análise de negócios, incorporar, com a maturidade que o tema merece, os custos associados às emissões são emergentes, somados a alguns fatores, tais como:

Doenças respiratórias e cardiovasculares: A poluição do ar pode causar ou agravar doenças como asma, bronquite, enfisema, ataques cardíacos e acidentes vasculares cerebrais;

Mortalidade prematura: A exposição prolongada a poluentes atmosféricos pode reduzir a expectativa de vida;

Transtornos psíquicos: A exposição prolongada a ruídos pode gerar problemas ligados ao sono, e ainda aumentar a chance do desenvolvimento de transtornos psíquicos, insônia e ansiedade;

Perda de produtividade: Problemas de saúde relacionados à poluição podem resultar em dias de trabalho perdidos e redução da produtividade dos trabalhadores;

Custos médicos diretos: Despesas com tratamentos médicos, hospitalizações e medicamentos;

Mudanças climáticas: Aumento da frequência e da severidade de eventos climáticos extremos, como furacões, inundações, secas e ondas de calor;

Danos aos ecossistemas: Acidificação dos oceanos, perda de biodiversidade, destruição de habitats e alterações nos ciclos ecológicos;

Danos à agricultura: Mudanças climáticas podem afetar negativamente a produção agrícola, resultando em perdas econômicas para os agricultores;

Infraestrutura: Custos de reparo e adaptação de infraestruturas danificadas por eventos climáticos extremos;

Desigualdade: Comunidades vulneráveis frequentemente sofrem mais com os efeitos da poluição e das mudanças climáticas, exacerbando desigualdades sociais;

Deslocamento populacional: Eventos climáticos extremos podem forçar populações a se deslocarem, resultando em custos associados ao reassentamento e ao apoio social;

Políticas de redução de emissões: Implementação de regulamentos e políticas para reduzir emissões, como impostos sobre carbono, que podem resultar em custos para as empresas;

Tecnologia de controle de emissões: Investimentos necessários para adotar tecnologias que reduzam emissões em indústrias e veículos;

Perda de habitat: Poluição e mudanças climáticas podem destruir habitats, afetando a vida selvagem e resultando em custos de conservação.

Afora os aspectos relacionados às emissões, a tomada de decisões e o planejamento de políticas precisam reconhecer, além dos destacados acima, uma outra infinidade de fatores ao abordar a eletromobilidade. Isso abarca impactos potenciais na segurança do transporte, emissões de gases e de ruídos e as implicações nas redes elétricas.

Os registros de veículos leves elétricos superaram, no planeta, 2 milhões de unidades, impulsionados por uma variedade de incentivos governamentais, incluindo políticas fiscais favoráveis, apoio financeiro direto e subsídios para a compra desses meios de transporte (Gramkow e Oliveira, 2023). Países como China, Japão, Noruega, Suécia, Finlândia, Bélgica, Holanda e Luxemburgo se destacaram com altos números de licenciamentos, refletindo seu compromisso com a promoção da mobilidade elétrica e a redução das emissões de carbono no setor de transporte. No Brasil, entrou recentemente na pauta de discussão política uma série de incentivos fiscais aplicados apenas para tecnologias com propulsão elétrica (carros elétricos e híbridos).

Nações que se destacam na mobilidade elétrica, individual ou no transporte público, frequentemente sobressaem não apenas por terem renda per capita acima da média global como também porque realizam investimentos substanciais e implementam políticas de longo prazo para promover a adoção de tecnologias para tal tipo de transporte. Um exemplo notável é a China, que, apesar de ter uma renda per capita relativamente baixa em comparação com outros líderes em mobilidade elétrica, emergiu como o maior mercado global para veículos elétricos. Em 2020, os veículos elétricos representaram aproximadamente 2% de todas as vendas de veículos leves no país. Embora seja absolutamente um valor pequeno, evidenciou um crescimento significativo e um forte apoio governamental para essa tecnologia.

É importante destacar que o progresso da China nesse campo se deve em grande parte a medidas focadas na redução da dependência energética de uma matriz poluente, ou baseada em carbono, no incentivo a setores industriais específicos e na utilização de recursos minerais para a produção de baterias. Além disso, a necessidade de reduzir as emissões de poluentes locais tem sido um motivador crucial para essas iniciativas.

A mobilidade sustentável representa uma das grandes oportunidades para um extraordinário impulso à sustentabilidade, com um portfólio variado e crescente de soluções dirigidas aos meios de locomoção caracterizados por baixas emissões de carbono e eficiência energética.

Além da importância dos investimentos em mobilidade ativa, como o uso de bicicletas e caminhadas, vêm se destacando a intensificação do uso de biocombustíveis, a eletrificação dos veículos e o desenvolvimento de tecnologias de hidrogênio verde.

Como já apontado, estudos recentes mostram que o uso de biocombustíveis pode reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa quando comparado ao de combustíveis fósseis tradicionais. Contudo, a eletrificação dos veículos, particularmente com baterias de estado sólido, promete maior eficiência energética e menor impacto ambiental conforme documento desenvolvido para impulsionar os investimentos em ônibus elétricos no Brasil pela Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (Cepal) em 2023.

Essas inovações tecnológicas, aliadas a políticas públicas e investimentos adequados, são cruciais quando se trata da transição para uma mobilidade mais sustentável e para a redução das emissões globais de carbono.

Investir em ônibus elétricos para transporte público é uma opção relevante devido à sua sustentabilidade e eficiência ambiental. Tais investimentos são cruciais para reduzir significativamente as emissões de GEE, diminuir a poluição do ar nas cidades e melhorar a qualidade de vida dos habitantes.

A transição para ônibus elétricos também contribui para a eficiência energética, uma vez que esses veículos têm menor consumo de energia em comparação com os tradicionais, movidos a combustíveis fósseis.

Além disso, a adoção de ônibus elétricos incentiva o desenvolvimento e a implementação de novas tecnologias, gerando oportunidades de inovação na indústria automotiva e no setor de energias renováveis.

O citado documento Impulsionando investimentos em ônibus elétricos no Brasil: uma agenda de trabalho, produzido pela Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (Cepal) em 2023, aponta alguns fatores que são fundamentais para alcançar uma mobilidade urbana mais limpa e sustentável na América Latina e enfrentar desafios como o congestionamento do tráfego e a poluição; é essencial focar em diversos fatores críticos. Esses fatores podem ser resumidos assim:

Descarbonização do setor de transportes – A redução das emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes é crucial. Estudos indicam que, na América Latina, o transporte representa cerca de 15% das emissões totais de GEE, com a maior parte proveniente de veículos movidos a combustíveis fósseis;

Superação da emergência climática e emissões atmosféricas – É necessário adotar medidas rigorosas para enfrentar a emergência climática e reduzir as emissões atmosféricas. As cidades da América Latina sofrem com altos níveis de poluição do ar, que afetam a saúde pública e o meio ambiente;

Promoção da eficiência no consumo energético e uso inteligente do espaço urbano – A eficiência energética e o uso inteligente do espaço urbano são fundamentais para uma mobilidade sustentável. Iniciativas como a implementação de sistemas de transporte público elétrico e a criação de zonas de baixa emissão podem contribuir significativamente para a eficiência urbana;

Impactos positivos na saúde, na qualidade de vida e na produtividade – A transição para formas de transporte mais sustentáveis pode melhorar a saúde pública ao reduzir a poluição do ar e promover a atividade física. Além disso, a diminuição do congestionamento pode aumentar a produtividade econômica, reduzindo o tempo de deslocamento;

Contribuição para o crescimento econômico e desenvolvimento da indústria – O desenvolvimento de tecnologias de transporte sustentável pode estimular a economia, promovendo a inovação e o crescimento da indústria automotiva e de energia limpa no Brasil em particular e na América Latina como um todo;

Geração de empregos e renda – A transição para uma mobilidade sustentável pode criar oportunidades de emprego nos setores de fabricação, manutenção e infraestrutura de veículos elétricos, além de fomentar o crescimento de pequenas e médias empresas envolvidas no ecossistema de mobilidade.

Ao implementar essas ações, a América Latina pode não apenas mitigar os impactos ambientais do setor de transportes como também promover um desenvolvimento urbano mais sustentável e equitativo, melhorando a qualidade de vida de sua população e impulsionando o crescimento econômico regional.

No entanto, a preferência por veículos particulares em detrimento do transporte público continua a ser uma barreira significativa à utilização generalizada de ônibus elétricos, problema já associado às frotas a diesel, mas que se assevera, pois a redução das receitas tarifárias nos sistemas de transporte gera uma pressão sobre a viabilidade econômica e financeira na substituição de frota. Políticas públicas de incentivo e a criação de uma infraestrutura adequada para carregamento elétrico e de indução da demanda no transporte público são essenciais para superar essas barreiras.

Não se nega a ideia de que a mobilidade seja um conceito muito abrangente. Ao se referir a ela, é importante incluir todos os atributos que lhe são decorrentes – deslocamento, transporte, acessibilidade etc. –, conceitos, aliás, que, muitas vezes, acabam confundidos com a própria mobilidade; e a descarbonização do transporte público é um dos ingredientes nesse ecossistema de movimentação de pessoas e cargas.

A partir dessa definição, fica claro que existe um vínculo estreito entre mobilidade e acessibilidade. Mobilidade é a capacidade do indivíduo de se locomover, dependendo da disponibilidade de diferentes modos de transporte, inclusive a pé. A Política Nacional da Mobilidade Urbana Sus-

tentável, do Ministério das Cidades (Brasil, 2012), define mobilidade urbana como um atributo associado a pessoas e bens, relacionado às necessidades de deslocamento no espaço urbano conforme as atividades desenvolvidas.

Nesse contexto, pode-se dizer que a mobilidade é um conceito muito mais amplo e complexo do que somente o transporte público ou transporte individual de pessoas. Fora isso, pode-se afirmar que a solução para a sua melhoria também passa pela redução do uso do transporte individual e exclusivo, para além da eletrificação do transporte público, pois essa mudança de perspectiva do cidadão e usuário da cidade resultaria muito mais benéfica, sob os aspectos econômicos e sociais, do que a alteração do paradigma da tecnologia adotada (se elétrica ou a combustão).

Assim, é importante ressaltar que, para que tal mudança aconteça a contento, seria importante, se não imprescindível, adotar políticas complementares à eletrificação, a exemplo das “congestion pricing”⁵ e dos distritos de zero emissão⁶, endereçando financiamentos e incentivos de maneira mais abrangente para os demais aspectos que envolvem a mobilidade urbana sustentável com subsídios cruzados incorporados ao modelo de negócio.

1.2 Transporte público no cenário brasileiro

O artigo 21 da Constituição Federal de 1988 (Brasil, 1988), nos incisos XII e XX, atribui à União a competência para explorar, direta ou indiretamente, os serviços de transporte rodoviário interestadual e internacional de passageiros, além de estabelecer diretrizes para o desenvolvimento urbano, incluindo habitação, saneamento básico e transportes urbanos (Orrico Filho e Santos, 1996).

Nos últimos anos, as diretrizes de mobilidade urbana foram revisadas para promover a integração multimodal e a mobilidade sustentável. A discussão no âmbito federal do Marco Legal do Transporte Público Coletivo reforça a emergente reestruturação do modelo de prestação de serviços de transporte público coletivo no Brasil. O principal objetivo dessas revisões é atender às crescentes demandas urbanas e minimizar o impacto ambiental das cidades, considerando ainda a sustentabilidade financeira do sistema. Essas atualizações refletem um esforço contínuo para alinhar a política de mobilidade urbana às melhores práticas internacionais e às necessidades específicas das cidades brasileiras, garantindo um desenvolvimento urbano mais eficiente e ecologicamente responsável.

5 - “Congestion pricing”, ou preço de congestionamento, é uma estratégia de gestão de tráfego que envolve a cobrança de taxas para o uso de vias em horários de pico ou em áreas altamente congestionadas. O objetivo é reduzir a demanda nessas regiões ou períodos, incentivando os motoristas a usar alternativas como transporte público, horários de deslocamento fora do pico ou rotas diferentes. Essa medida ajuda a diminuir o congestionamento, melhorar a eficiência do transporte e reduzir a poluição ambiental.

6 - Distritos de zero emissão são áreas urbanas onde apenas veículos que não emitem poluentes, como elétricos ou movidos a hidrogênio, são permitidos. O objetivo é melhorar a qualidade do ar, reduzir a poluição sonora e promover um ambiente mais saudável e sustentável. Esses distritos incentivam o uso de transporte público limpo, bicicletas e caminhada, contribuindo para a redução geral das emissões de GEE e poluentes atmosféricos.

A mobilidade urbana é uma função social fundamental para o bom funcionamento da cidade e depende de um planejamento racional e participativo. A legislação brasileira, através do Estatuto da Cidade e da Lei da Política Nacional de Mobilidade Urbana, enfatiza a importância do transporte público como um direito social essencial. Esse direito é crucial para assegurar o acesso dos cidadãos a outros direitos básicos, como saúde, educação e trabalho, destacando a necessidade de um sistema de transporte público eficiente e acessível.

A Política Nacional de Mobilidade Urbana no Brasil, instituída pela Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012, tem o objetivo de orientar o planejamento e a gestão do transporte urbano no país. Ela busca promover a acessibilidade e a mobilidade de modo sustentável, eficiente e inclusivo, atendendo às necessidades da população urbana e contribuindo para a melhoria da qualidade de vida nas cidades brasileiras.

Seguindo ainda essa linha, o artigo 22 da Constituição Federal estabelece que é competência privativa da União legislar sobre as diretrizes da política nacional de transportes e sobre o trânsito e o transporte. No que se refere aos municípios, o artigo 30 atribui a eles a competência de organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local, incluindo o transporte coletivo. Ele é considerado um serviço essencial, sendo vital para a qualidade de vida urbana e para a promoção de uma mobilidade mais inclusiva e sustentável.

O arcabouço legal do transporte público no Brasil é objeto constante de estudos; nele, os municípios têm um papel fundamental. Por isso, é importante enfatizar sua função na organização e na prestação de serviços públicos locais, incluindo o transporte público (Tomasevicius Filho, 2014). Com a utilização de um planejamento estratégico aliada à participação ativa da sociedade, é possível construir um sistema, um programa ou uma política de transporte público que atenda às necessidades de todos os cidadãos, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida e para a preservação do meio ambiente.

Existe uma importante relação entre transporte e desenvolvimento urbano que pode, em certa medida, ser altamente influenciada por aspectos jurídicos relativos às concessões de transporte público. É preciso avaliar, e discutir, a extensão das atribuições do direito público em relação aos agentes privados envolvidos nesses serviços. A coordenação entre diferentes níveis de governo (federal, estadual e municipal) é essencial para a efetiva implementação da política, e até mesmo a governança inframunicipal com atuação inter (e multi) secretarial deve ser encarada de maneira mais eficiente.

Destaca-se, também, o complexo cenário jurídico do transporte público no Brasil, com foco no papel dos municípios e na necessidade de clareza jurídica e responsabilização nas concessões de transporte público. Note-se que, no Brasil, o transporte é um bem público e só pode ser oferecido por um órgão público ou concessionado a um operador privado (Tomasevicius Filho, 2014). Existe uma razão histórica e conceitual para tal organização e a “reserva” desse mercado.

Além de mitigarem as falhas inerentes à livre concorrência, os modelos regulatórios contemporâneos dos últimos 30 anos foram concebidos para contemplar e – de forma saudável e alinhada com o interesse público – fomentar a colaboração entre o poder público e o setor privado na pres-

tação de serviços de transporte. Esse enfoque transcende a mera maximização do retorno financeiro, reconhecendo e valorizando o papel social primordial que o transporte público desempenha (Orrico Filho e Santos, 1996).

Isso, porém, nos leva a refletir sobre algumas questões fundamentais: Como podemos garantir que essa colaboração beneficie verdadeiramente o público? De que maneira podemos equilibrar os interesses privados com as necessidades sociais e ambientais? E quais mecanismos regulatórios adicionais são necessários para assegurar que o valor social do transporte público seja prioritário? Essas perguntas precisam ser exploradas para desenvolver um sistema de transporte mais justo, eficiente e sustentável.

Oliveira et al. (2019), em uma análise do ciclo regulatório no setor de transportes urbanos, revela que, até a segunda metade do século passado, a maioria dos sistemas municipais de transporte urbano era operada pela iniciativa privada, com poucas cidades contando com empresas sob responsabilidade do poder público. Entretanto, no final do século XX, a crise econômica e fiscal que afetou o Estado brasileiro trouxe à tona debates sobre a desestatização e a abertura de alguns mercados à livre competição. Atualmente, estamos vivenciando uma nova onda nesse setor (Orrico Filho e Santos, 1996).

A desestatização e as Parcerias Público-Privadas tornaram-se práticas comuns adotadas pela União, pelos estados e, mais recentemente, pelos municípios brasileiros. Esse movimento reflete um esforço contínuo para equilibrar eficiência econômica com a necessidade de serviços públicos de qualidade. Ele se intensificou com a promulgação da Lei de Concessões em 1995 (Brasil, 1995), que estabeleceu o marco regulatório para a transferência da gestão de serviços públicos para a iniciativa privada. Nos anos 2000, essa tendência continuou, com a implementação de PPPs para projetos de infraestrutura, incluindo o transporte urbano, gerando discussões sobre a acessibilidade e a equidade no acesso ao transporte público.

A discussão se amplia ao considerar os impactos dessas mudanças na experiência dos usuários, na sustentabilidade do sistema e na capacidade dos novos operadores de atenderem às complexas demandas das comunidades urbanas. Essa transição provocou um intenso debate político e acadêmico acerca do comportamento competitivo dos novos operadores de serviços públicos de transporte e suas repercussões na qualidade do serviço oferecido. Tal cenário tem instigado há décadas análises profundas e reflexões críticas sobre como a entrada de novos atores no mercado pode influenciar tanto a eficiência quanto a equidade na prestação dos serviços de transporte urbano (Orrico Filho e Santos, 1996). Em várias cidades ao redor do globo, a concessão de serviços de transporte público tem mostrado resultados variados. Por exemplo, em Londres, a privatização dos ônibus, em 1986, levou a uma eficiência maior e a uma redução nos custos operacionais, todavia também gerou preocupações sobre a consistência na qualidade do serviço e o aumento das tarifas para os usuários.

A transição para o modelo híbrido levanta outra questão crucial: Como garantir que a qualidade e a acessibilidade do transporte urbano não sejam sacrificadas em prol da eficiência econômica?

No Brasil, o cenário é igualmente complexo. Em São Paulo, a concessão de linhas de ônibus para operadores privados visava melhorar a eficiência e a cobertura do serviço (Tomasevicius Filho, 2014). Contudo, pesquisas recentes indicam que, apesar de algumas melhorias na pontualidade

e na modernização da frota, ainda existem desafios significativos, como a falta de transparência nos contratos e a insatisfação dos usuários com o atendimento.

Adicionalmente, embora a concessão possa trazer benefícios como a renovação da frota e a introdução de novas tecnologias, também é primordial garantir uma regulação eficaz para evitar práticas monopolísticas e assegurar que a qualidade do serviço atenda às necessidades da população.

Portanto, ainda que a concessão de serviços públicos de transporte possa oferecer vantagens, ela deve ser cuidadosamente planejada e monitorada para garantir que os benefícios superem os desafios e que a qualidade do serviço seja prioritária.

Nas grandes cidades brasileiras, o processo de expansão do transporte alternativo ocorreu notavelmente a partir do início dos anos 90, com a proliferação de operadores irregulares, como vans e micro-ônibus. Historicamente, a introdução desses serviços impulsionou uma rápida ampliação da oferta de transporte, em especial nas áreas periféricas, que eram frequentemente negligenciadas e carentes de redes de transporte público oficiais (Oliveira et al., 2019). Essa evolução trouxe à tona diversas questões importantes: Até que ponto a presença desses operadores irregulares supriu efetivamente a demanda nas áreas periféricas? Quais foram os impactos na qualidade e na segurança do transporte oferecido? Como essa dinâmica influenciou a regulamentação e a formalização dos serviços de transporte público? Além disso, é essencial refletir sobre os desafios e oportunidades que surgem com a integração dessas soluções alternativas ao sistema oficial de transporte urbano. Ao abordar essas questões, podemos entender melhor como equilibrar inovação e regulamentação.

No início, esses operadores, em sua maioria individuais, atuaram nas franjas do transporte coletivo tradicional, frequentemente realizado em meio a dificuldades financeiras das empresas públicas, com a proposta de oferecer um serviço mais rápido e confortável, em áreas periféricas, densas e com grande demanda pelo transporte público, sobretudo aquele que pudesse atender a última milha percorrida.

Essa situação suscita mais questões fundamentais: Como podem as políticas públicas equilibrar a necessidade de flexibilidade e inovação com a exigência de qualidade e estabilidade nos serviços de transporte? De que maneira pode-se integrar operadores alternativos de modo que complementem, em vez de competirem, com o sistema tradicional? E quais modelos de regulamentação poderiam assegurar tanto a viabilidade financeira dos operadores quanto a satisfação e a segurança dos usuários? Essas abordagens são cruciais para desenvolver um sistema de transporte urbano eficiente, inclusivo e sustentável a longo prazo.

O que se notou, e se nota, é que a introdução desregulamentada desses serviços, ao longo do tempo, começou a competir com o sistema tradicional de transporte de média e alta capacidade, gerando desequilíbrios operacionais em todo o sistema. Nas cidades que viveram esse fenômeno, a experiência evidenciou de maneira inequívoca os limites de uma operação desregulamentada. Tais limites manifestaram-se não apenas na qualidade do serviço prestado ao usuário final como também na sustentabilidade financeira dos operadores (Golub et al., 2009).

Em um contexto de falta de recursos financeiros, como uma barreira significativa para a expansão e melhoria dos sistemas de transporte, vans lotadas na hora do pico, sem horário nem rotas explícitas para o usuário, e longos períodos de espera eram fatos comuns no dia a dia de um sistema que caminhava financeiramente para uma situação insustentável, dado o excesso de competição, irregular e desregulamentada, no mercado (Orrico Filho e Santos, 2002).

No final dos anos 1990 e início da década de 2000, amparadas pelo estado da arte em práticas internacionais e pela promulgação da Lei de Concessões no Brasil, algumas das maiores cidades do país começaram a conceber e implementar a regulamentação da oferta de serviços de transporte baseada na licitação de concessões para a exploração do sistema de transporte. Essa iniciativa marcou uma mudança paradigmática na gestão do transporte público urbano, introduzindo mecanismos que buscavam assegurar transparência, competitividade e qualidade nos serviços prestados. A implementação desse sistema de concessões foi fundamentada em princípios de eficiência econômica e sustentabilidade operacional, com o objetivo de harmonizar os interesses públicos e privados – e é essencial para compreender as dinâmicas e desafios envolvidos na regulamentação dos serviços de transporte e para aprimorar as políticas públicas voltadas à mobilidade urbana.

A análise desse período revela importantes questões a serem consideradas: **Quais foram os impactos dessa transição na qualidade e na acessibilidade dos serviços de transporte? De que forma a regulamentação através de concessões afetou a sustentabilidade financeira e operacional dos sistemas de transporte urbano? E como as experiências internacionais influenciaram as práticas adotadas no contexto brasileiro?**

Como medida para corrigir os efeitos colaterais da concorrência e da livre exploração irregular em sistemas de transporte público, os processos licitatórios foram reformulados. O objetivo: transferir a concorrência entre operadores privados para um nível de competição pelo mercado, em vez de uma competição direta no mercado.

Essa mudança na abordagem visou minimizar os problemas associados à concorrência irrestrita, como a superlotação de rotas lucrativas, a prestação inadequada de serviços em áreas menos rentáveis e a falta de coordenação entre diferentes operadores. Em lugar de permitir que múltiplas empresas operem simultaneamente nas mesmas rotas, as licitações agora concentram-se em conceder a operação de determinadas áreas ou rotas a um único operador por meio de um processo competitivo e transparente.

Nesse modelo, as autoridades públicas definem os parâmetros de serviço, qualidade e tarifa, e os operadores privados competem para ganhar o direito exclusivo de operar dentro desses parâmetros. Tal tipo de concorrência tende a assegurar que os operadores privados se comprometam com altos padrões de serviço e inovação para vencer a licitação, ao mesmo tempo que as autoridades públicas podem exercer um controle mais rigoroso sobre a qualidade e a eficiência do transporte público oferecido.

Uma possível evolução dessa sistemática é uma abordagem que pode permitir uma melhor integração dos serviços de transporte público, em um arranjo para que um único operador possa ser responsável pela coordenação de diferentes modos de transporte (como bicicletas, ônibus, trens e metrô) dentro de uma área específica. Isso resulta em um sistema de transporte mais

coeso e eficiente, com horários e tarifas integrados, facilitando a mobilidade dos passageiros.

Em suma, a transição para a concorrência pelo mercado, através de processos licitatórios bem estruturados, busca equilibrar os benefícios da eficiência do setor privado com a necessidade de um serviço público de qualidade, acessível e bem coordenado.

Observa-se que, como medida corretiva para os efeitos colaterais da livre concorrência, os processos licitatórios passaram a ser desenvolvidos com o propósito de transferir a competição entre operadores privados para o nível da competição pelo mercado. Essa abordagem não apenas mitiga os desequilíbrios operacionais gerados pela concorrência desregulada como também promove um ambiente no qual a qualidade do serviço e a eficiência operacional são priorizadas (Orrico Filho e Santos, 2002). Para avançar nesse contexto, é crucial continuar aprimorando os processos licitatórios, incorporando critérios que incentivem a inovação, a sustentabilidade e a satisfação do usuário. Além disso, deve-se garantir mecanismos robustos de fiscalização e avaliação contínua, assegurando que os operadores cumpram os padrões estabelecidos e que o transporte público atenda às necessidades da população de maneira eficaz e inclusiva, ainda levando em conta novas formas de Parcerias Público-Privadas para fomentar a transparência nos processos de concessão e integrar tecnologias emergentes.

É importante destacar que, embora os ganhos sejam nítidos, há de se atentar para o fato de que esse modelo de competição pelo mercado tem considerado, nos últimos anos (pelo menos para o modo rodoviário urbano, i. e., os ônibus públicos), que a competição entre operadores não é mais sustentável. Infelizmente, existe um agravamento da situação financeira do serviço, que requer elevados custos de fiscalização e pode incentivar também práticas de disputa que prejudicam a sua qualidade e até mesmo a formação de cartéis altamente organizados e irregularidades em algumas das empresas.

Para evitar os efeitos negativos da livre competição em sistemas de transporte público, pode-se implementar processos licitatórios que tragam a concorrência já para avaliação de um nível pré-operacional. No modelo de competição pelo mercado, o objetivo é garantir que apenas a melhor proposta tenha direito de operar, permanecendo protegida da competição direta no dia a dia ao longo de todo o contrato.

Esse modelo vem sendo adotado com sucesso em várias partes do mundo. No Brasil, por exemplo, a fiscalização dos contratos públicos de transporte é realizada por agências reguladoras e órgãos de controle, como a ANTT (Agência Nacional de Transportes Terrestres) e os Tribunais de Contas. Esses órgãos são responsáveis por monitorar o cumprimento dos termos contratuais, a qualidade do serviço prestado e a adequação das tarifas cobradas.

Internacionalmente, países como França e Reino Unido também adotam rigorosos processos de licitação e fiscalização para garantir a eficiência e a qualidade do transporte público. Na França, a Autorité de la concurrence e outras entidades regionais monitoram os contratos, enquanto no Reino Unido a Competition and Markets Authority desempenha um papel similar, assegurando que os operadores cumpram os padrões estabelecidos.

No modelo de competição pelo mercado, a licitação pública define parâmetros claros para a prestação do serviço, como frequência, pontualidade, manutenção de veículos e atendimento ao

cliente. Os operadores privados competem para ganhar a concessão com base nesses critérios. Uma vez escolhido, o operador vencedor recebe exclusividade para operar a rota ou área designada, permitindo-lhe focar a melhoria contínua do serviço sem a pressão de uma concorrência diária desleal (Santos e Orrico Filho, 1996).

A fiscalização contínua é essencial para o êxito desse modelo. Autoridades reguladoras realizam auditorias periódicas e inspecionam os serviços para garantir que os operadores cumpram os termos contratuais e mantenham altos padrões de serviço. Penalidades e sanções podem ser aplicadas em casos de descumprimento, assegurando assim que os interesses dos usuários sejam sempre priorizados.

Essa abordagem permite uma gestão mais eficaz do transporte público, promovendo uma melhor qualidade de serviço e maior satisfação dos passageiros, na medida em que evita os problemas comuns associados à competição desregulada. Isso pode apontar para uma transição do poder concedente do Estado para um modelo regulador a partir de uma agência pública municipal, quando for o caso.

Em relação às cidades brasileiras, vislumbra-se um cenário promissor, marcado por um consenso relativo sobre a organização do mercado de transporte urbano no país. Alicerçadas na capacidade reguladora dos agentes públicos, a organização e a operação do sistema de transporte devem estruturar editais, parcerias e concessões que impulsionem um modelo de competição pelo mercado. Tal modelo apresenta-se como a solução ideal para assegurar um sistema sustentável e apto a atender às necessidades dos usuários de maneira eficiente. Nesse contexto, emerge como central o debate sobre os subsídios governamentais ao transporte público de passageiros. A discussão gira em torno de como esses subsídios podem ser otimizados para não apenas garantir a viabilidade financeira dos operadores como também promover a equidade no acesso ao transporte e incentivar práticas sustentáveis.

Os subsídios para o transporte público já são uma prática comum tanto no Brasil quanto em várias outras nações, com o objetivo de tornar o transporte mais acessível, eficiente e sustentável. Por aqui, os subsídios são frequentemente utilizados para manter as tarifas acessíveis, principalmente para populações de baixa renda, idosos e estudantes. Metrôpoles nacionais, como São Paulo e Rio de Janeiro, investem recursos significativos para subsidiar as tarifas, cobrindo parte dos custos operacionais das empresas de transporte. Isso é feito através de repasses diretos, isenções fiscais e outras formas de apoio financeiro.

Países como França, Alemanha, Japão e Estados Unidos também implementam subsídios robustos para o transporte público. Na França, o governo central e as autoridades locais subsidiavam uma parte considerável dos custos operacionais, permitindo tarifas acessíveis e serviços de alta qualidade. Em cidades alemãs como Berlim, os subsídios são usados para integrar diferentes modos de transporte, facilitando a mobilidade dos cidadãos e promovendo o uso do transporte público em detrimento dos carros particulares (o que, aliás, ocorre também em São Paulo na relação entre os governos estadual e municipal, na interface entre “trilhos e rodas”). No Japão, além de subsídios diretos, o governo investe em infraestrutura de alta qualidade para garantir a eficiência e a pontualidade dos serviços. Nos Estados Unidos, cidades como Nova York e São Francisco também dependem de subsídios governamentais para manter e expandir

suas redes de transporte público.

Os subsídios desempenham um papel crucial na promoção da equidade social e no combate à mudança climática, incentivando o uso do transporte público e reduzindo a dependência de veículos privados. Essa prática não só melhora a acessibilidade como também contribui para a redução dos congestionamentos e das emissões, promovendo um ambiente urbano mais sustentável e saudável. Esses ganhos ambientais e de saúde pública precisam começar a entrar na análise econômica e financeira dos sistemas de transporte, e, talvez, na elaboração de orçamentos públicos que permitam a inclusão de tais externalidades positivas quantificadas.

Por outro lado, é inegável que a mobilidade urbana no Brasil ainda depende substancialmente do transporte rodoviário, sobretudo do transporte individual motorizado. Dados da CNT (2022) revelam que 54% das viagens realizadas no país são feitas sobre rodas, sendo 30% em veículos individuais motorizados, como automóveis e motocicletas, e 24% utilizando o transporte coletivo, ônibus. Esses dados sublinham a predominância do transporte motorizado individual na matriz de mobilidade brasileira, levantando questões críticas sobre sustentabilidade, congestionamento e qualidade de vida urbana. Ao mesmo tempo, a significativa utilização do transporte coletivo aponta para uma necessidade urgente de investimentos e melhorias nesse setor, visando oferecer alternativas viáveis e atrativas que possam reduzir a dependência dos veículos particulares.

É relevante salientar que, nas últimas duas décadas, tem-se observado no Brasil uma tendência ascendente na utilização de transporte individual em detrimento do transporte coletivo nas áreas urbanas (Pereira e Schwanen, 2013). Nos últimos anos, dados apontam que a frota de veículos particulares aumentou mais de 100%, enquanto a utilização do transporte público sofreu uma redução de aproximadamente 30%. Embora essa substituição do transporte coletivo pelo individual ocorra em todas as faixas de renda, a tendência é significativamente mais pronunciada entre as famílias de menor poder aquisitivo; estas, frequentemente, optam por motocicletas ou veículos usados devido à baixa qualidade e confiabilidade dos serviços de transporte coletivo disponíveis. Tal fenômeno acarreta maiores despesas com transporte para essas famílias e contribui de maneira substancial para o agravamento da poluição urbana, em quase todos os seus aspectos deletérios.

Ademais, a operação de ônibus elétricos difere substancialmente da operação de ônibus a diesel, o que exigirá, no mínimo, que as cidades invistam em capacitação de pessoal para administrar e manter veículos e infraestruturas correspondentes. Em contrapartida, o potencial dos ônibus elétricos para fomentar um complexo econômico inovador e próspero no país é considerável. As cidades brasileiras podem proporcionar oportunidades de recapacitação e requalificação aos trabalhadores, eventualmente afetados pela crise, permitindo sua reinserção no mercado de trabalho no setor de transporte de baixo carbono. Essa iniciativa não apenas promove a sustentabilidade ambiental como também impulsiona o desenvolvimento econômico e social, criando um ambiente propício para a inovação e a geração de empregos de alta qualificação com desenvolvimento local (Ministério das Cidades, 2013a).

Até 2030, a previsão é de que pelo menos 15 milhões de empregos possam ser gerados pela descarbonização da economia em toda a América Latina (BID e OIT, 2020). O *Caderno técnico de refe-*

rência para eletromobilidade nas cidades brasileiras, produzido pelo Ministério de Desenvolvimento Regional e pelo Banco Mundial em 2022 (Ministério das Cidades, 2013), aponta que uma transição efetiva ajuda a restaurar os ecossistemas e estimula a produção de energia elétrica limpa a partir de inovações tecnológicas em cadeia.

O investimento em tecnologias limpas e a restauração ambiental são estratégias universais que promovem não apenas a sustentabilidade como também o crescimento econômico e a geração de empregos. No total, o número de empregos diretos e indiretos na América Latina impulsionado por políticas robustas de sustentabilidade e investimentos em tecnologias verdes pode chegar a 22,5 milhões. No Brasil, estima-se a criação de 7,1 milhões de empregos em um cenário de baixas emissões de carbono.

Esse potencial é comparável ao da China, onde políticas agressivas de descarbonização e desenvolvimento de energia limpa também resultaram em milhões de novos postos de trabalho. Da mesma forma, nos Estados Unidos, a transição para uma economia de baixo carbono pode criar milhões de empregos, principalmente nos setores de energia renovável e infraestrutura verde.

Diante dessa problemática, é importante que a eletromobilidade seja priorizada em modos de transporte coletivos e públicos, que sejam eficientes no uso do espaço viário e na quantidade de pessoas transportadas. Embora os carros elétricos utilizem uma tecnologia veicular menos poluente em comparação com os carros movidos a combustão, eles não contribuem para uma distribuição mais justa dos espaços públicos nas ruas e avenidas. **A persistência do uso de veículos individuais, mesmo que menos poluentes, perpetua problemas como congestionamento, ocupação excessiva do espaço urbano e limitações à mobilidade coletiva, além de não resolver integralmente os desafios de sustentabilidade urbana e equidade no uso dos recursos públicos.** Observa-se que, numa situação habitual de viagens em transporte individual motorizado com uma pessoa dirigindo, o espaço ocupado é de 60 m², enquanto numa operação ideal de transporte coletivo de 45 passageiros por ônibus o espaço ocupado por pessoa cai para 9,8 m², conforme aponta o *Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras* (Ministério das Cidades, 2013).

Os sistemas de transporte público coletivo municipais e metropolitanos desempenham um papel precípua na mobilidade urbana, representando 59% dos deslocamentos nas cidades brasileiras com mais de 60 mil habitantes. Desse total, 53% são realizados por ônibus, enquanto 6% utilizam sistemas metroviários. Em contraste, apenas 14% dos deslocamentos são feitos por automóveis e motocicletas, com os restantes 27% distribuídos entre outros modais, como aviões, navios, bicicletas e caminhadas (ICS, 2020; NTU, 2020; Carniatto Silva, 2022). Essa dependência significativa do transporte coletivo evidencia a importância de investimentos contínuos na melhoria da infraestrutura e na qualidade dos serviços oferecidos.

Em cidades como São Paulo e Rio de Janeiro, por exemplo, a expansão das linhas de metrô e a implementação de corredores exclusivos para ônibus têm sido medidas essenciais para atender à crescente demanda e reduzir o tempo de deslocamento dos passageiros. Observando metrópoles de outros países, é notável que capitais como Paris e Londres vêm alcançando sucesso na integração de diferentes modais de transporte público, promovendo uma mobilidade mais eficiente

e sustentável. Nesses contextos, a coexistência harmoniosa entre ônibus, metrô, trens suburbanos e ciclovias tem se mostrado eficaz na redução da dependência de veículos particulares e na melhoria da qualidade de vida urbana.

Portanto, ao considerar o cenário brasileiro, é evidente que uma abordagem integrada e investimentos robustos são primordiais para continuar avançando na direção de um sistema de transporte mais eficiente e sustentável.

1.3 Alta urbanização e a eficiência do transporte público

A América Latina é a região mais urbanizada do mundo em desenvolvimento, com dois terços da população residindo em cidades com 20 mil habitantes ou mais e quase 80% vivendo em áreas urbanas. Esse processo acelerado de urbanização vem gerando consequências significativas. A infraestrutura urbana tem se mostrado insuficiente para atender à crescente demanda, resultando em uma deterioração progressiva do meio ambiente.

A urbanização rápida e desordenada contribuiu para a formação de favelas ou assentamentos informais, caracterizados por condições precárias de habitação e saneamento. Esse cenário é agravado pelas severas desigualdades socioeconômicas presentes na região, que estão entre as mais pronunciadas do planeta. As disparidades econômicas e sociais exacerbam os desafios urbanos, criando um ambiente em que o acesso a serviços básicos, como saúde, educação e transporte, é profundamente desigual.

A América Latina, portanto, enfrenta o desafio de equilibrar seu crescimento urbano com a necessidade de desenvolver uma infraestrutura adequada e sustentável, enquanto trabalha para mitigar as desigualdades socioeconômicas. Políticas públicas eficazes e investimentos significativos em infraestrutura são imperativos para melhorar a qualidade de vida urbana e promover um desenvolvimento mais equitativo e sustentável na região.

TABELA 2

Comparação de dados urbanos de cidades

Cidade	Área (km ²)	População (hab)	Densidade (hab/km ²)	Extensão metroviária (km)
São Paulo	1.521,20	11.451.245	7.527,76	104,20
Bogotá	1.775,98	7.968.095	4.486,59	24,00
Buenos Aires	200,00	3.120.612	15.603,06	64,00
Santiago	2.029,19	6.143.444	2.587,52	120,00
Nova York	778,16	8.335.897	11.318,35	380,00
Cidade do México	2.072,00	9.209.944	6.163,00	201,10

Cidade	Área (km ²)	População (hab)	Densidade (hab/km ²)	Extensão metroviária (km)
Paris	105,39	2.890.000	26.650,00	219,90
Grande Londres	1.572,00	8.900.000	5.600,00	402,00
Xangai	746,00	24.500.000	13.400,00	632,10
Nova Déli	1.295,00	30.000.000	23.166,02	239,00
Tóquio	2.187,00	14.050.000	6.390,00	304,5
Moscou	2.150,00	13.000.000	6046,51	346,20
Barcelona	91,4	1.850.000	20.240,00	139,40
Pequim	16.807,8	22.200.000	1.320,00	572,00
Roma	842,00	2.500.000	2.950,00	61,00
Istambul	1.166,00	15.000.000	12.864,49	328,70
Lagos	738,00	14.000.000	18.970,19	13,00
Jacarta	1.360,00	14.250.000	10.500,00	20,10

Fonte: Elaborado pelos autores com base em World urbanization prospects (United Nations, 2018).

No Brasil, a rápida e efervescente urbanização aproximou muitos brasileiros de melhores oportunidades de emprego e renda, no entanto rapidamente resultou em numerosas dificuldades na mobilidade urbana, como o crescimento excessivo e desordenado das cidades, a segregação espacial e a concentração de serviços nos centros urbanos.

A insuficiência de alternativas de mobilidade, como sistemas de transporte público eficientes e acessíveis, agrava ainda mais a situação, resultando em uma dependência excessiva dos transportes individuais.

O fenômeno levou à fragmentação do espaço urbano e à oferta insuficiente de alternativas de mobilidade para atender ao crescente número de passageiros dependentes dos transportes públicos. Além disso, houve uma sobrecarga do sistema viário, bem como a degradação ambiental e dos espaços públicos decorrentes da poluição, congestionamentos, ruídos e outros impactos negativos.

A urbanização acelerada, com ou sem planejamento adequado, acentuou a segregação espacial, criando áreas urbanas densamente povoadas e carentes de infraestrutura básica, enquanto os serviços permanecem concentrados nos centros urbanos. Essa distribuição desigual de recursos e serviços contribui para a fragmentação do espaço urbano, dificultando a integração e a coesão social.

Segundo dados da Uber, apontados por Oliveira et al. (2019), a plataforma já é uma realidade nos sistemas de transporte urbano das cidades, está presente em mais de 10.000 cidades ao redor do mundo, contando com mais de 75 milhões de usuários cadastrados e mais de 15 milhões de viagens diariamente (Uber, 2023). Comparando com os números do relatório anual do UITP (Associação Internacional de Transporte Público) sobre os sistemas de metrô no mundo, observa-se que para cada 1 cidade com esse tipo de modal há outras 2,4 cidades com Uber, embora o número de viagens seja na razão de uma do aplicativo para dez na modalidade de transporte público de alta capacidade (UITP, 2022). Portanto, é imperativo que políticas públicas e sistemas de planejamento urbano estratégicos sejam implementados para enfrentar esses desafios, promovendo um desenvolvimento urbano mais sustentável e equitativo.

Diante de tal cenário, os gestores urbanos vêm refletindo sobre as políticas públicas de mobilidade em conjunto com o desenvolvimento urbano, visando encontrar alternativas de transporte que possam ser implementadas para proporcionar uma mobilidade urbana eficiente aos cidadãos. A busca pela mobilidade sustentável nas cidades da América Latina emerge como uma oportunidade significativa para a geração de valor nas políticas sociais, ambientais e urbanas (BID, [s.d.]). Nos últimos anos, o debate sobre a mobilidade urbana sustentável tem ganhado destaque crescente, destacando não apenas os desafios como também as inúmeras oportunidades para inovação, desenvolvimento econômico, melhoria da qualidade de vida urbana e resposta à emergência climática.

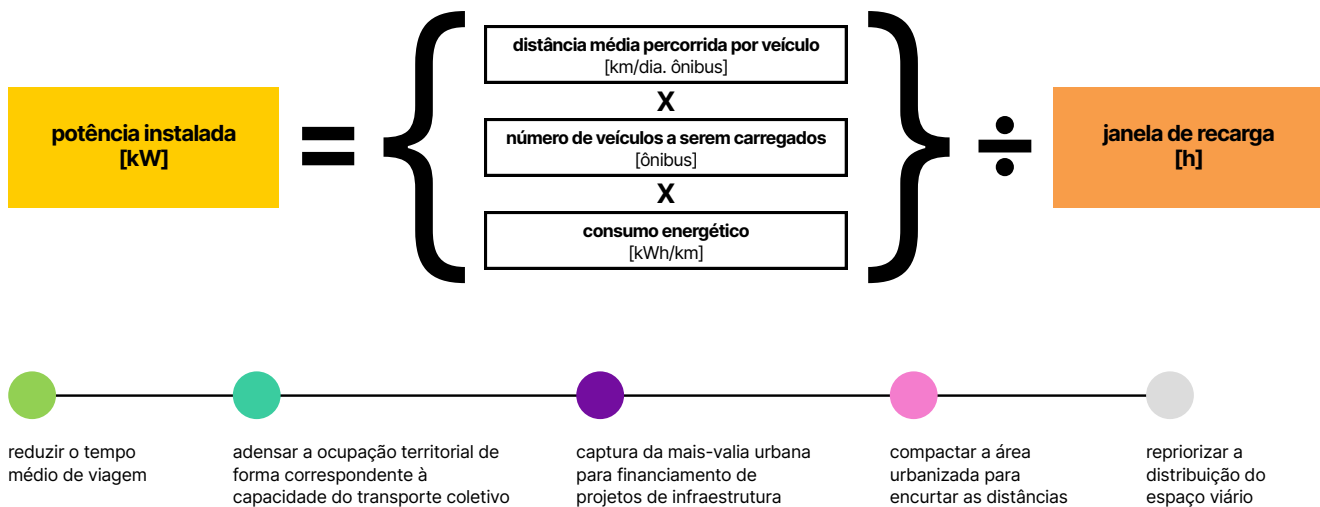
Em metrópoles latino-americanas como São Paulo e Cidade do México, os engarrafamentos resultam em perdas econômicas anuais que superam bilhões de dólares e em níveis alarmantes de poluição do ar, afetando a saúde pública e a qualidade de vida dos cidadãos. A Organização Mundial da Saúde (OMS) aponta que a poluição do ar é responsável por cerca de 7 milhões de mortes prematuras por ano, com uma parte significativa dessas ocorrendo em áreas urbanas densamente povoadas.

Além disso, o setor de energia é mencionado com frequência na busca de soluções que contribuam para a descarbonização e a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, bem como para a maior eficiência energética e a modernização dos sistemas e do setor. A integração de tecnologias limpas e renováveis, juntamente com a modernização da infraestrutura energética, é vista como crucial para apoiar a transição para um modelo de mobilidade mais sustentável e resiliente. Por exemplo, a adoção de veículos elétricos e a expansão de redes de transporte público movidas a energia limpa têm demonstrado potencial significativo na redução das emissões urbanas.

Portanto, a interseção entre mobilidade urbana e eficiência energética não só promove a redução da pegada de carbono como também melhora a qualidade de vida urbana, criando cidades mais habitáveis e ambientalmente responsáveis.

FIGURA 12

Aspectos de planejamento urbano para a eletromobilidade



A mobilidade sustentável no contexto socioeconômico das áreas urbanas pode ser abordada por meio de ações integradas sobre o uso e a ocupação do solo, bem como pela gestão eficiente dos sistemas de transporte. Essas ações visam garantir o acesso equitativo aos bens e serviços para todos os habitantes, promovendo uma eficiência operacional que contribua para a qualidade de vida da população atual, ao mesmo tempo que preserva os recursos para as gerações futuras. O planejamento sobre uso e ocupação do solo urbano, visto de maneira estratégica, deve focar um planejamento urbano que favoreça o adensamento inteligente de áreas já servidas com infraestrutura, a mistura e diversidade de usos e a proximidade entre residências, empregos e serviços como meio de redução das distâncias e das necessidades de viagens motorizadas. Essa abordagem minimiza a necessidade de deslocamentos longos e a dependência de veículos particulares, promovendo alternativas de mobilidade ativa, como caminhadas e ciclismo, e o uso de transporte público de alta capacidade.

Se a viagem for necessariamente motorizada, a gestão dos transportes deve ser orientada para a implementação de sistemas integrados e multimodais, que otimizem a utilização dos recursos existentes e incentivem o uso de tecnologias limpas e eficientes. Isso inclui a expansão das redes de transporte público, a adoção de veículos elétricos e a melhoria das infraestruturas para modos de transporte não motorizados. Para alcançar esses objetivos, é fundamental a articulação entre políticas públicas, investimentos em infraestrutura e a participação ativa da comunidade na tomada de decisões. Dessa forma, é possível criar um ambiente urbano sustentável que não só atenda às necessidades atuais da população como também preserve e melhore as condições ambientais e socioeconômicas para as futuras gerações.

Sobre o planejamento do uso e ocupação do solo urbano, o artigo 30 da Constituição Federal do Brasil atribui aos municípios a competência de promover o adequado ordenamento territorial, através do planejamento e do controle do uso, do parcelamento e da ocupação do solo urbano (inciso VIII). No contexto da política urbana, destaca-se a responsabilidade do poder

público municipal em executar a política de desenvolvimento urbano, conforme diretrizes gerais estabelecidas por lei, com o objetivo de ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes (artigo 182 da Carta Magna). No Brasil, o Estatuto da Cidade estabelece instrumentos importantes como o Plano Diretor, que orienta o crescimento urbano de modo sustentável e inclusivo.

Em Copenhague, na Dinamarca, o planejamento urbano integrado e a política de “Finger Plan”⁷ estruturam o desenvolvimento da cidade ao longo de corredores de transporte público, promovendo a densificação controlada e a preservação de áreas verdes. Freiburg, na Alemanha, é conhecida por suas práticas exemplares de desenvolvimento sustentável, com bairros como Vauban, que são projetados para serem ecologicamente corretos, priorizando o transporte público, ciclovias e a eficiência energética das construções. Em Singapura, o governo utiliza um rigoroso planejamento urbano e políticas de uso do solo que incluem a otimização do espaço por meio de edifícios de uso misto e da integração de infraestrutura verde. Essas estratégias garantem que o crescimento urbano seja gerido de maneira a melhorar a qualidade de vida e a sustentabilidade ambiental.

Os subsistemas urbanos de mobilidade e de uso do solo são transversais entre si e dialogam com diversos princípios constitucionais como, por exemplo, a proteção do meio ambiente, o combate à poluição, a promoção da habitação, da saúde e da educação.

Nesse sentido, as competências que estão diretamente relacionadas à garantia de tais princípios são assuntos interligados e intrínsecos à realidade e aos problemas específicos de cada cidade, havendo diversas questões de interesse local para regulação transversal.

Considerando o pressuposto de que a mobilidade urbana e o uso do solo urbano são elementos indissociáveis, o Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável (DOTS) tem se tornado um princípio norteador em planos e projetos urbanos em diversas cidades de vários continentes (ITDP, 2016). Essa abordagem, fundamentada em princípios de planejamento urbano sustentável e transportes eficientes, incentiva a criação de territórios que utilizem o espaço de forma otimizada, promovendo a vitalidade e a diversidade urbanas.

O DOTS busca integrar o desenvolvimento urbano com sistemas de transporte sustentáveis, facilitando o acesso das pessoas aos serviços, empregos e áreas de lazer. Estudos mostram que essa abordagem resulta em comunidades mais coesas e funcionais, reduzindo a dependência de veículos particulares e promovendo meios de transporte ativos, como caminhar e andar de bicicleta. Diversos Planos Diretores municipais no Brasil têm adotado há mais de uma década essa metodologia como elemento estruturador de suas políticas urbanas, tais como São Paulo, Belo Horizonte, Recife e Rio de Janeiro.

7 - A política de “Finger Plan” é um plano de desenvolvimento urbano implementado na capital dinamarquesa na década de 1940. Seu objetivo é organizar o crescimento da cidade de maneira sustentável, concentrando o desenvolvimento urbano ao longo de cinco principais corredores de transporte que se estendem do centro da cidade, parecendo os dedos da mão. Entre esses corredores, áreas verdes e rurais são preservadas. O “Finger Plan” facilita o acesso ao transporte público, reduz a dependência de veículos privados e protege espaços naturais, promovendo um desenvolvimento urbano equilibrado e sustentável.

Em Portland, nos Estados Unidos, a implementação do DOTS tem levado à criação de corredores de transporte que combinam densidade habitacional com acesso eficiente ao transporte público, resultando em uma redução significativa nas emissões de carbono e na melhora da qualidade de vida dos residentes. Da mesma forma, em Curitiba, o uso de corredores de ônibus integrados ao planejamento urbano tem sido um exemplo de sucesso na aplicação do DOTS, promovendo um desenvolvimento urbano equilibrado e sustentável, estudado nas últimas décadas como um exemplo global.

Na Europa, capitais como Estocolmo e Amsterdã vêm adotando o DOTS para desenvolver áreas urbanas compactas e conectadas, onde a proximidade e a integração entre diferentes zonas da cidade são asseguradas por meio de um transporte público eficiente e de alta qualidade. Esses exemplos ilustram como o DOTS pode servir como uma ferramenta eficaz para criar cidades mais sustentáveis e resilientes, nas quais o uso do solo e a mobilidade são planejados de maneira coordenada para beneficiar a sociedade como um todo.

Portanto, a implementação do DOTS em projetos urbanos não apenas promove a melhor distribuição espacial de atividades e de pessoas, mas também a sustentabilidade ambiental, com a redução da pressão nas áreas protegidas, e garante uma coesão social maior e acessibilidade urbana, contribuindo para o desenvolvimento harmonioso e sustentável das cidades. Considerando essa abordagem, que estimula a criação de territórios capazes de promover maior vitalidade e diversidade urbanas, é possível afirmar que, resumidamente, o DOTS se baseia nos seguintes princípios:

Compactação da área urbanizada para encurtar as distâncias

A compactação da área urbanizada visa reduzir as distâncias entre as atividades diárias dos residentes, promovendo um ambiente urbano mais eficiente e sustentável. Estudos indicam que áreas urbanas compactas contribuem para a diminuição do tempo de deslocamento, incentivando o uso de modos de transporte ativos e reduzindo as emissões de carbono.

Adensamento da ocupação territorial correspondente à capacidade do transporte coletivo

O adensamento planejado da ocupação territorial deve ser correlacionado à capacidade dos sistemas de transporte coletivo existentes e projetados. Isso implica um desenvolvimento urbano que suporte uma alta densidade populacional sem sobrecarregar a infraestrutura de transporte, promovendo a eficiência e a viabilidade econômica dos serviços públicos.

Mistura de usos do solo para estimular a diversidade demográfica e de renda

A integração de diferentes usos do solo, como residencial, comercial e institucional, é precípu para criar bairros dinâmicos e inclusivos. Essa abordagem promove a diversidade demográfica e de renda, facilitando a convivência de diversas faixas socioeconômicas e fortalecendo a coesão social.

Priorização da distribuição do espaço viário

A redistribuição do espaço viário deve priorizar meios de transporte sustentáveis e eficientes, como o transporte público, bicicletas e pedestres. Essa reconfiguração contribui para a redução do congestionamento e a melhoria da qualidade do ar, além de promover a segurança viária.

Integração das diversas regiões por meio de sistemas de transporte coletivo de qualidade

A integração eficiente das diferentes regiões urbanas requer sistemas de transporte coletivo de alta qualidade, que ofereçam cobertura abrangente, confiabilidade e conforto. A conectividade intermodal, facilitando transições suaves entre diferentes meios de transporte, é essencial para um sistema de mobilidade coeso.

Criação de bairros que estimulem a caminhada

O desenho urbano deve favorecer a caminhada, com calçadas amplas, seguras e acessíveis, além de uma infraestrutura urbana que promova a segurança e o conforto dos pedestres. Bairros caminháveis incentivam um estilo de vida saudável e reduzem a dependência de veículos motorizados.

Priorização de redes de mobilidade por bicicleta

A implementação de redes de ciclovias seguras e bem conectadas deve ser uma prioridade, incentivando o uso da bicicleta como um meio de transporte viável e sustentável. Infraestruturas adequadas, como estacionamentos para bicicletas e integração com outros modos de transporte, são essenciais para promover a mobilidade ciclística.

Comércios no térreo, fachadas ativas e fruição pública

O desenho urbano e arquitetônico com maior cuidado e planejamento no térreo das edificações propicia a criação de espaços que aumentam a segurança, promovem a interação social e revitalizam áreas urbanas, criando ambientes dinâmicos e acessíveis que enriquecem a vida comunitária e impulsionam a economia local.

O planejamento urbano integrado ao DOTS e a substituição da frota de ônibus por veículos elétricos ou híbridos transformam cidades. A substituição da frota de ônibus contribui para a qualidade do ar, enquanto o planejamento urbano, com uso misto do solo e densificação inteligente, juntamente com o DOTS, garante que os transportes sejam acessíveis e eficazes, melhorando a mobilidade urbana e a qualidade de vida dos cidadãos.

Assim, paralelamente às atividades relacionadas à substituição da frota em si, incluir um caminho político-regulatório no cronograma de planejamento permite a elaboração de ações que rezejem a prioridade de distribuição do espaço viário, prevendo a cobertura do serviço em escala e uma integração modal de qualidade que permita aos usuários acessar diferentes partes da cidade com segurança e agilidade.

Não é mais possível imaginar planejamento de transportes sem considerar o planejamento urbano, e vice-versa, mas, além dos sistemas de financiamento das transformações urbanas, é importante considerar o financiamento da frota de transporte urbano nesse arranjo. O financiamento à eletromobilidade no Brasil é crucial para a transição sustentável e a descarbonização do setor de transportes. Tal financiamento inclui incentivos fiscais, subsídios governamentais e Parcerias Público-Privadas que estimulem tanto a infraestrutura de recarga como a produção de veículos elétricos. Além disso, programas de financiamento específicos, como o Rota 2030, visam apoiar a inovação tecnológica e a competitividade da indústria automotiva nacional. Esses investimentos são primordiais para modernizar o transporte público, reduzir as emissões de gases de efeito estufa e melhorar a qualidade de vida urbana, alinhando-se com os compromissos climáticos internacionais do Brasil.

TABELA 3

Mecanismos nacionais e internacionais de financiamento e cooperação

Mecanismos	Finalidade
BNDES Finame Mobilidade Baixo Carbono	Financiamento para aquisição de ônibus elétricos, movidos a biocombustíveis e gás, chassis, equipamentos de recarga e infraestrutura de geração e abastecimento.
BNDES Fundo Clima – Subprograma Mobilidade Urbana, Máquinas e Equipamentos	Ampliação de capacidade produtiva para produção de ônibus elétricos.

Mecanismos	Finalidade
BNDES Finem – Meio Ambiente – Ônibus baixa emissão	Financiamento para aquisição de ônibus e caminhões elétricos, híbridos, biocombustíveis, gás natural e biometano
Refrota – Caixa Econômica Federal	Concessão de crédito para renovação e ampliação de frotas de ônibus para empresas concessionárias e permissionárias de transporte público.
Chamada 22, P&D Aneel	Desenvolvimento de soluções em mobilidade elétrica eficiente (direcionamento de 1% da receita operacional das concessionárias e permissionárias do setor elétrico a projetos de P&D).
ZEBRA (Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator)	Projeto para aceleração do desenvolvimento da eletrificação e redução de emissões no transporte público nas principais cidades da América Latina.
E-Motion: E-Mobility and Low Carbon Transportation	Projeto que visa o desenvolvimento de parcerias para a viabilização da transição para o transporte de baixa ou zero emissão em regiões diversas do país. Liderado pela AFD (Agência Francesa de Desenvolvimento) e pela GIZ (Agência Alemã de Cooperação Internacional).
TUMI – Transformative Urban Mobility Initiative	Iniciativa global visando promover mobilidade sustentável – liderada pelo Ministério Federal Alemão para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ), pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) e por outras entidades parceiras.
Transition to Electromobility in Brazilian Cities – Banco Mundial	Visa a promoção da mobilidade elétrica nas cidades brasileiras, com apoio à infraestrutura de recarga, assistência para desenvolvimento de políticas públicas, capacitação de gestores públicos e estruturação de financiamentos.
Programa de Mobilidade Urbana Sustentável de Curitiba – BID e Prefeitura de Curitiba	Visa promover a mobilidade urbana sustentável, com objetivos de modernização do transporte público, melhoria da infraestrutura, planejamento mais eficiente, melhora da qualidade do ar e eficiência energética.

Fonte: Elaboração própria inspirada em Barassa et al., 2022.

Observando o cotidiano do setor de transporte urbano nas principais cidades do país, percebe-se uma crescente integração dos sistemas tradicionais de ônibus, metrô e trens de subúrbio com os novos serviços de transporte por aplicativo. Essa sinergia facilita a mobilidade dos cidadãos, oferecendo alternativas mais flexíveis e eficientes para os deslocamentos urbanos. (Hensher, 2017).

Mecanismos internacionais de apoio técnico são essenciais para a transição energética no transporte público. Organizações como o Banco Mundial, a Agência Internacional de Energia Renovável (Irena) e a Parceria para a Mobilidade Sustentável de Baixo Carbono (SLoCaT) oferecem financiamento, consultoria e recursos técnicos. Esses programas facilitam a adoção de tecnologias limpas, como ônibus elétricos e sistemas de recarga, e promovem políticas de mo-

bilidade sustentável. A cooperação global e o compartilhamento de melhores práticas são essenciais para acelerar a descarbonização do transporte público e melhorar a qualidade de vida urbana em todo o planeta.

A Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ) tem desempenhado um papel significativo no apoio ao desenvolvimento de ônibus elétricos no Brasil. Através de projetos como o Promob-e, a GIZ oferece assistência técnica e financeira, promove Parcerias Público-Privadas e facilita a transferência de tecnologia. Essas iniciativas visam reduzir as emissões de GEE e fomentar a sustentabilidade no transporte público urbano, contribuindo para a modernização da infraestrutura de mobilidade elétrica no país.

A governança institucional para a mobilidade urbana e o uso do solo pode ser estruturada por meio de um sistema abrangente de regulações e contratos. A modelagem e o conteúdo desses instrumentos são cruciais para potencializar conceitos emergentes, como a Mobilidade como Serviço (MaaS), que encapsula os princípios da revolução digital na indústria dos transportes.

É possível entender a MaaS como um sistema de integração e comercialização da oferta de serviços de transportes urbanos a partir da promoção da acessibilidade no nível do utilizador. Um sistema MaaS tem a visão estratégica e global de oferecer ao usuário final a melhor solução em transporte entre o par de origem e destino desejados por meio de uma combinação eficiente de diferentes serviços de transporte organizados em uma interface única de informação e pagamento (Kamargianni et al., 2016; Matyas e Kamargianni, 2018).

A MaaS integra diversos modos de transporte em uma única plataforma digital, facilitando o planejamento, pagamento e uso contínuo de serviços de mobilidade. A implementação eficaz de MaaS exige uma cooperação intersetorial robusta, envolvendo governos, empresas de transporte e tecnologia e outras partes interessadas. Derivado do conceito de MaaS, o Software como Serviço (SaaS) aplica-se à emergência de novas tecnologias, empresas e sistemas de transporte que abordam a mobilidade como um ecossistema de serviços integrados. Esse modelo promove soluções eficientes para conectar pessoas e atividades no espaço urbano, aprimorando a interligação e a funcionalidade dos serviços de mobilidade de forma holística e inovadora (Utriainen e Pöllänen, 2018; Kamargianni et al., 2016; Melo et al., 2018). Exemplos de cidades como Helsinque e Barcelona, que já adotaram modelos de MaaS, demonstram melhorias significativas na eficiência do transporte urbano e na redução das emissões de carbono. Com uma governança adequada, é possível promover a sustentabilidade, aumentar a acessibilidade e melhorar a experiência do usuário no sistema de transporte urbano.

Porém, para que esses modelos sejam efetivamente implementados e alcancem seu potencial máximo, algumas questões precisam ser abordadas: **Como garantir a cooperação intersetorial necessária para a implementação da MaaS? Quais políticas e regulamentações devem ser desenvolvidas para suportar essa integração? E de que maneira a governança pode assegurar que os benefícios da MaaS e do SaaS sejam distribuídos de maneira equitativa entre todos os usuários do sistema de transporte urbano?**

A implementação da MaaS no Brasil visa agregar diversos modos de transporte – como ônibus, metrô, bicicletas compartilhadas e serviços de transporte por aplicativo – em uma única plataforma digital. Isso facilita o planejamento, o pagamento e o uso contínuo desses serviços, tor-

nando a mobilidade mais acessível e eficiente. Para que a MaaS seja eficaz no país, são necessárias uma governança robusta, regulamentações claras e colaboração entre setores público e privado em um ecossistema de serviços de transporte agregados de forma a promover sempre a solução mais eficiente de conexão entre pessoas e atividades no espaço urbano.

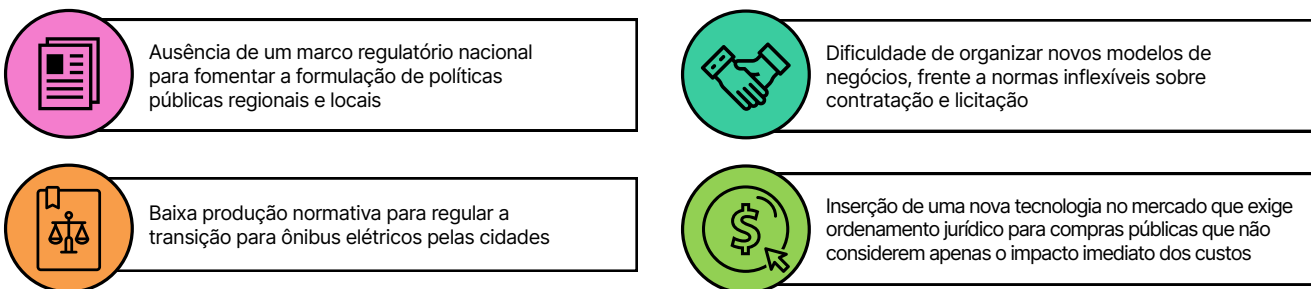
Smith et al. (2018) delineiam três cenários-base para o desenvolvimento dos sistemas MaaS, considerando a capacidade operacional assumida pelo poder público. No nível mais fundamental, denominado “orientado pelo mercado”, o poder público atuaria exclusivamente como provedor do sistema de transporte coletivo (e. g., ônibus, metrô, trens), enquanto autorizaria a comercialização de bilhetes por terceiros, que assumiriam a função de agregadores. Opostamente, os autores se referem a um sistema todo (i. e., integração e comercialização) controlado pelo poder público em que os operadores privados apenas entrariam como prestadores dos serviços de mobilidade (e. g., carros, bicicletas e patinetes compartilhados). Entre esses dois cenários opostos também é explorada uma terceira via, na qual o agente regulador público assumiria a responsabilidade pela integração dos sistemas de transporte, enquanto um ou mais parceiros privados seriam encarregados da comercialização dos pacotes de serviços.

1.4 Políticas e programas atuais

A importância da abordagem dos aspectos normativos e regulatórios que regem o tema da mobilidade elétrica em todas as esferas da federação se deve ao fato de que a regulação interfere na estrutura de inserção de uma nova tecnologia no mercado, sendo ela fundamentadora de políticas públicas, bem como definidora de parâmetros para novos modelos de negócios, de contratos e de padronizações técnicas.

FIGURA 13

Aspectos de planejamento urbano para a eletromobilidade



Na atualidade, algumas normas que materializam essa decisão figuram em diversos atos normativos federais e estaduais – alguns dos quais já citados – e veiculam princípios, medidas e diretivas que afetam direta ou indiretamente o desenvolvimento da mobilidade elétrica, conforme mostra o quadro a seguir:

TABELA 4

Ato normativo-regulatório	Objetivos
Lei federal nº 12.587/12 Política Nacional de Mobilidade Urbana	Estabelece os princípios, diretrizes e objetivos da mobilidade no Brasil, visando orientar a atuação, dos governos federal, estadual e municipal, em busca de um padrão de mobilidade nacional, bem como os demais atos normativos que estruturam o setor.
Lei federal nº 13.755/18 Programa Rota 2030	Possibilita às montadoras definir estratégias de investimento e venda de veículos elétricos, sendo prevista a diminuição do IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) no contexto do desenvolvimento urbano, além de promoção de P&D voltadas à busca de melhores soluções tecnológicas de baixa emissão, com prioridade para os veículos elétricos híbridos e a etanol.
Decreto federal nº 9.442/18	Ato normativo administrativo infralegal, que altera as alíquotas do IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) incidente sobre veículos equipados com motores híbridos e elétricos.
Resolução normativa nº 1.000/2021 (altera a resolução 819/2018)	Trata-se de resolução editada pela Aneel e estabelece procedimentos e condições para a realização de atividades de recarga de veículos elétricos, cuja principal contribuição foi a de considerar a recarga dos veículos elétricos e dos plug-in como um serviço, com potencial de ser desenvolvido por qualquer interessado. Esse ato normativo será estudado com maior profundidade adiante.
Lei federal nº 10.973/04, regulamentada pelo decreto federal 6.259/07	Institui o Sistema Brasileiro de Tecnologia (Sibratec) para apoio do desenvolvimento tecnológico.
Lei federal nº 9.991/2000	Dispõe sobre investimentos em pesquisa e desenvolvimento pelas empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviços elétricos voltados à eficiência energética.
Lei federal nº 12.187/2009 (Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC) + decreto nº 9.578/2018)	Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima, estabelecendo objetivos, diretrizes e instrumentos para o desenvolvimento sustentável, com foco no baixo consumo de carbono, na geração e distribuição de energia elétrica e nos transportes públicos menos poluentes.
Programa Mover (Mobilidade Verde e Inovação) MP 1205/2023	Incentiva a mobilidade urbana sustentável e a eletrificação do transporte público no Brasil.
Resoluções Camex nº 86/2014, nº 97/2015, nº 27/2016	Atos administrativos normativos, infralegais, expedidos pela Câmara de Comércio Exterior, órgão vinculado ao Ministério da Fazenda, cujos objetivos são a redução ou isenção de imposto de importação sobre veículos elétricos puros ou híbridos de passeio e os de transporte de mercadorias.

Ato normativo-regulatório	Objetivos
Resolução Conama nº 18 Proconve / Resoluções Camex 86/2014, 97/2015, 27/2016 (Câmara do Comércio da Economia, para redução ou isenção do imposto de importação sobre veículos elétricos)	Alteram a Lista Brasileira de Exceções à Tarifa Externa Comum do Mercosul, modificando a política tarifária dos veículos elétricos (o imposto de importação passou de 35% para 0%).

Dessa maneira, a partir da Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/09), bem como da Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012) e do Estatuto da Metrópole (Lei nº 13.090/2015) – que são normas federais gerais, as quais estabelecem as diretrizes sobre transportes, combate à poluição e desenvolvimento integrado sustentável –, elaboram-se os Planos de Desenvolvimento Urbano Integrados (PDUI) e as leis de mobilidade municipais. A propósito, algumas cidades têm implementado normas e políticas para promover a mobilidade elétrica, refletindo um esforço crescente em direção à sustentabilidade urbana. Um exemplo é São José dos Campos (SP), que possui os seguintes atos normativos direta e indiretamente relacionados ao desenvolvimento da mobilidade elétrica:

Lei municipal nº 12.587/2021 (disciplina o uso do sistema viário urbano de SJC, com objetivos claros de incorporação do desenvolvimento sustentável do município);

Lei complementar nº 612/2018 (institui a Política Municipal de Mobilidade Urbana com diretriz de promoção do desenvolvimento sustentável, o estímulo ao desenvolvimento científico e tecnológico e uso de energias renováveis e menos poluentes);

Lei municipal nº 9.684/2018 (estabelece a política municipal de incentivo ao uso dos carros elétricos e híbridos);

Lei complementar nº 620/2019 (institui a Linha Verde, corredor sustentável para desenvolvimento de centralidades e implantação de TRM – Transporte Rápido de Massa);

Decreto municipal nº 18.350/2019 (prevê a incorporação de novas tecnologias aos serviços de compartilhamento de veículos sem condutor vinculado).

O que se nota na prática para alguns dos casos mencionados é: i) Custo inicial elevado, em que o alto custo de aquisição de veículos elétricos e da infraestrutura de recarga representa um obstáculo significativo; ii) A infraestrutura de recarga tem mostrado que as cidades possuem insuficiência de estações de recarga, o que é um desafio crítico para a adoção ampla de veículos elétricos, de modo geral; e iii) Políticas e incentivos em que a falta de políticas robustas e incentivos fiscais suficientes para consumidores e empresas ainda é uma barreira.

Por outro lado, esse cenário apresenta oportunidades gerais em que se ressaltam: i) Parcerias Público-Privadas que possam acelerar o desenvolvimento da infraestrutura necessária; ii) Sustentabilidade urbana em que a mobilidade elétrica contribui significativamente para a redução das emissões de GEE e para a melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas; e iii) Inovação e liderança, apontando que cidades que adotam a mobilidade elétrica podem posicionar-se como

líderes em sustentabilidade e inovação, atraindo investimentos e talentos.

Destaquem-se, ainda, outros exemplos brasileiros, tais como:

São Paulo – A capital paulista tem o Programa de Mobilidade Elétrica, que oferece benefícios fiscais como a isenção do rodízio municipal para veículos elétricos e híbridos. O principal desafio enfrentado é a infraestrutura insuficiente para recarga, o que limita a adoção em larga escala. Entretanto, existe uma oportunidade significativa para expandir a rede de carregamento, incentivando Parcerias Público-Privadas. Além disso, tem metas muito claras quanto à adoção massiva de frota de ônibus elétrico.

Rio de Janeiro – A cidade vem investindo na ampliação da frota de ônibus elétricos e na implementação de pontos de recarga. A capital fluminense enfrenta desafios relacionados ao alto custo inicial de aquisição de veículos elétricos e à falta de incentivos financeiros suficientes. As oportunidades incluem a criação de políticas de subsídios e a atração de investimentos para a infraestrutura de recarga, além de programas de conscientização pública sobre os benefícios dos veículos elétricos.

Curitiba – Conhecida por suas inovações em transporte público, está explorando a integração de veículos elétricos em sua rede de transporte. Um dos desafios é a resistência inicial dos operadores de transporte em migrar para uma tecnologia nova e ainda mais cara. A oportunidade está na possibilidade de liderar pelo exemplo, influenciando outras cidades a adotar práticas semelhantes e atraindo recursos e tecnologia de empresas especializadas.

É possível observar que existem alguns atos normativos que tratam do tema da eletrificação dos transportes públicos, tanto de maneira direta como transversal, demonstrando que ainda há uma timidez do Poder Legislativo nacional no enfrentamento desse assunto.

Tal conjuntura se reflete, também, na formulação de políticas públicas para a implementação e a aceleração da eletrificação do país, especialmente do transporte público, como podemos verificar a partir do quadro que segue, no qual são apresentadas as principais políticas públicas nacionais que norteiam o tema da mobilidade elétrica em geral:

TABELA 5

Conteúdo da política	Política	Escopo da política
Padrões de emissões	1986: Proconve – Fase L-6 para veículos leves (2014) e P-7, para pesados (2012).	Influência na direção da busca da diminuição das emissões, desenvolvimento e difusão de conhecimento. Na versão 2023, contém informações sobre autonomia do veículo elétrico (quilômetros e alcance).
	2008: Programa de Etiquetagem Veicular (PBEV), coordenado pelo Inmetro, em vigor (2023).	

Conteúdo da política	Política	Escopo da política
Incentivos de compra VEs	2015: Resolução da Camex nº 97 – isenção de imposto de importação de VEs.	Formação de mercado. ⁸ Experimentação empresarial.
	2016: Redução de imposto de importação para VEs para transporte de mercadorias.	
	2018: Decreto nº 9.442 – redução na alíquota do IPI para VEs, conforme eficiência energética e massa. De 7% a 18% para elétricos e de 9% a 20% para híbridos, menos 2% para híbridos flex.	
Uso de VEs e incentivos de circulação	2014: Isenção do IPVA para VEs em oito estados (RS, MA, PI, CE, RN, PE, SE, PR).	Formação de mercado.
	2014: Alíquota diferenciada e reembolso (IPVA) em quatro estados (MS, SP, RJ, AL).	
	2020: Lei municipal nº 17.336 Município de São Paulo – previsão de solução para carregamento de veículos elétricos em edifícios (condomínios) residenciais e comerciais.	
Dispensas sobre restrições de acesso	2015: Isenção de rodízio em São Paulo.	Formação de mercado.
	2016: Isenção de taxas de estacionamento e vagas exclusivas em Fortaleza e Curitiba.	
Regulamentar atividade de recarga de veículos elétricos	REN 1.000/2021 (revoga 819/2018): Resolução Normativa Aneel estabelece os procedimentos e as condições para a atividade de recarga de veículos elétricos, inclusive para fins de exploração comercial.	Formação de mercado Experimentação empresarial.

8 - Dizer que um incentivo ou subsídio tem como escopo a formação de mercado significa que ele terá influência no aumento ou na diminuição da demanda. Afetando a demanda, há maior oferta da tecnologia, seja pela redução do preço (por exemplo, se diminuída a alíquota de um tributo, afetando o preço final ao consumidor), seja pela confiança que o setor automotivo tem na diretiva governamental demonstrada pela norma, lei, decreto. Tudo isso afeta o mercado e contribui para a “formação do mercado” da nova tecnologia, no caso, o veículo elétrico.

Conteúdo da política	Política	Escopo da política
Desenvolvimento de inovações tecnológicas relevantes para o setor elétrico	2020: Chamada Estratégica 22 (P&D Aneel), financia projetos de “Desenvolvimento de soluções em mobilidade elétrica eficiente”.	Desenvolvimento e difusão de conhecimento. Mobilização de recursos. Influência na direção da busca.

Fonte: Elaboração a partir de Gramkow e Oliveira, 2023.

Já sob o aspecto municipal, as cidades possuem baixo grau de autonomia para legislar sobre transportes, sendo competência privativa da União legislar a respeito dessa matéria (artigo 22, IX, Constituição Federal). Nesse caso, os municípios detêm competência complementar, ou seja, podem legislar naquilo que a União determina ou possibilita. Tome-se, por exemplo, a capital mineira, Belo Horizonte. Lá, o Plano Diretor de Mobilidade Urbana – PlanMob-BH 2030 (Belo Horizonte, 2017) foi dividido em oito eixos, sendo um deles (Cidade Sustentável) com indicadores, metas e ações voltadas para a promoção de uma mudança da matriz energética do sistema de transportes, que deve ser operado por veículos de baixo impacto ambiental. Algumas das metas definidas até 2030 são: i) 100% de veículos movidos a combustíveis não fósseis na frota contratada pelo município; e ii) 40% de renovação da frota de ônibus por veículos híbridos ou não movidos a derivados do petróleo.

Para permitir uma visão panorâmica, a título de encerramento desse tópico, o quadro a seguir sintetiza a legislação em algumas importantes cidades brasileiras:

TABELA 6

Cidade	Regulamentação
Campinas	• Plano de Mobilidade Urbana (2019); • Fundo de Desenvolvimento da Mobilidade (2019); • Política Municipal de Enfrentamento dos Impactos da Mudança do Clima e da Poluição Atmosférica de Campinas (2020).
Curitiba	• PlanMob Curitiba – Plano Diretor com diretrizes para mobilidade sustentável (Decreto nº 1244/2015); • Projetos específicos como Inter 2 e Ligeirão Leste-Oeste; • Lei nº 12.597/2008, com alterações de 2023, para incluir ônibus elétricos e autorizar subvenção para compra destes veículos.
Belo Horizonte	• Plano Diretor de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte (PlanMob-BH 2030).
Brasília	• Política Nacional de Mobilidade Elétrica (PL 2156/21); • Decreto 40.245/2019 (diretrizes e incentivos para eletrificação das frotas distritais); • Prime (programa de incentivo à mobilidade elétrica); • Lei nº 6.620/2020 (visa incentivar o uso de veículos elétricos e implementar pontos de recarga no DF).

Cidade	Regulamentação
Manaus	• Plano de Mobilidade Urbana (2015).
Porto Alegre	• Plano de Mobilidade Urbana (2019).
Rio de Janeiro	• Política Municipal Sobre Mudança do Clima e Desenvolvimento Sustentável (2011); • Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (2019); • Plano de Desenvolvimento Sustentável e Ação Climática da Cidade do Rio de Janeiro, desenvolvido com o apoio da ONU-Habitat e alinhado à Agenda 2030 (2021); • Programa de Eliminação de Emissões de Gases Poluentes (2021).
Salvador	• Política Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2015); • Plano de Mobilidade Urbana Sustentável (2018).
São Paulo	• Política de Mudança do Clima (2009), art. 50; • Plano de Mobilidade Urbana (2015); • Plano de Ação Climática do Município de São Paulo 2020-2050 (2018); • Lei nº 17.376/2020 (inclui, no Calendário de Eventos da Cidade, o Dia da Mobilidade Elétrica, o Dia do Carro Elétrico e o Dia do Veículo Elétrico); • Atribuições da Secretaria Executiva de Mudanças Climáticas (Seclima) e coordenação da Secretaria para a execução de todas as políticas relacionadas ao clima (2021); • Lei nº 17.563/21 permite aos compradores de VE descontar os créditos de IPVA a quem tem débitos de IPTU.
São José dos Campos	• Decreto municipal nº 17.462, de 19 de maio de 2017. Regulamenta a Lei municipal nº 12.587/2012 (Disciplina o Uso do Sistema Viário Urbano de São José dos Campos para a exploração de serviço de transporte individual privado remunerado de passageiros e de serviço de compartilhamento de veículos intermediados por plataformas digitais, com diretrizes para desenvolvimento sustentável e adoção de novas tecnologias.); • Lei complementar municipal nº 576, de 15 de março de 2016, alterada pela Lei complementar federal nº 612, de 30 de novembro de 2018 (instituiu a Política Municipal de Mobilidade Urbana, contemplando como diretriz a promoção do desenvolvimento sustentável, o estímulo ao desenvolvimento científico-tecnológico e uso de energias renováveis e menos poluentes); • Lei municipal nº 9.684, de 28 de março de 2018 (estabelece a política municipal de incentivo ao uso de carros elétricos e híbridos, inclusive com a criação de um Parque Tecnológico, objetivando o estímulo à promoção da mobilidade de baixa ou zero emissões); • Lei complementar nº 620, de 11 de julho de 2019 (institui a Linha Verde no município de São José dos Campos, sendo um corredor sustentável destinado a interligar as regiões da cidade, com fundamento na mobilidade e no desenvolvimento urbanos, de centralidades, mediante implantação de Transporte Rápido de Massa – TRM, execução de obras viárias, Habitação e Interesse Social, dentre outros); • Decreto municipal nº 18.350, de 22 de novembro de 2019 (dispõe sobre a exploração de serviços de compartilhamento de veículos sem condutor vinculado, que deverá ser realizada por veículos elétricos, com desconto de 90% no valor da outorga, e da taxa de uso do sistema de compartilhamento com atendimento físico, bem como isenção de tarifa de regularização do estacionamento rotativo em vias públicas do município).

Fonte: Elaboração própria a partir de Wady (2021) e do *Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras* (Ministério das Cidades, 2013).

Em resumo, não há dúvida de que é de enorme importância a existência de normas gerais federais sobre diretrizes e políticas nacionais de transportes, sem as quais os estados e municípios ficam inertes (Wady, 2021).

2

Impactos e benefícios da mobilidade elétrica e suas barreiras para desenvolvimento

A sustentabilidade é, atualmente, uma arena política relevante para governos locais. As cidades são atores centrais no que diz respeito ao assunto e começaram a avaliar os impactos negativos da emissão de poluentes. Dos 17 objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS), da agenda 2030 da ONU-Habitat, dez estão ligados, direta ou indiretamente, à mobilidade sustentável.

A crescente preocupação com os efeitos nefastos da poluição atmosférica e o agravamento das mudanças climáticas impulsionam a busca de soluções sustentáveis e tecnicamente viáveis no âmbito do transporte público, considerando a dimensão que esse setor assume nas cidades brasileiras. Em tal contexto, a eletrificação de frotas de ônibus emerge como uma alternativa promissora para reduzir drasticamente as emissões de gases poluentes e o efeito estufa.

O documento Desafio: mobilidade urbana e mudanças climáticas, desenvolvido pelo Centro Brasileiro de Análise e Planejamento – Cebrap em 2023 (Cebrap, 2023), em parceria com o Itaú Unibanco, aponta que as ações relacionadas ao transporte público de baixas emissões, isto é, com emissões reduzidas ou nulas, têm recebido atenção especial recentemente, sobretudo pela participação de veículos pesados, como os ônibus, nas emissões locais.

De maneira geral, uma política de promoção do transporte público sustentável visa a substituição de veículos movidos a combustíveis fósseis por alternativas menos poluentes. Estudos científicos indicam que a redução de emissões de poluentes como dióxido de carbono (CO₂), óxido de nitrogênio (NOx) e material particulado fino (PM_{2,5} e PM₁₀) é crucial para a sustentabilidade dos sistemas de transporte público. A distinção entre ações globais e locais nas emissões de gases é fundamental: o CO₂, um gás de efeito estufa, tem impacto planetário ao contribuir para o aquecimento global e as mudanças climáticas. Em contrapartida, os NOx e materiais particulados têm impactos locais imediatos, como a degradação da qualidade do ar e efeitos adversos à saúde pública, incluindo doenças respiratórias e cardiovasculares.

Nessa direção, programas locais de transporte público sustentável contribuem para mitigar os efeitos da mudança climática pela diminuição da emissão de GEE. Não é prematuro afirmar que a adoção de tecnologias elétricas e híbridas pode diminuir significativamente essas emissões, contribuindo tanto para a mitigação das mudanças climáticas em escala mundial quanto para a melhoria da qualidade do ar nas áreas urbanas. A promoção de veículos elétricos, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, ajuda a diminuir a poluição sonora e os impactos negativos à saúde pública associados aos poluentes atmosféricos. Portanto, a transição para um transporte público mais sustentável apresenta benefícios múltiplos, abordando questões ambientais globais e locais simultaneamente.

Na América Latina, metrópoles como Bogotá, Buenos Aires, Cidade do México, Santiago e São Paulo aprovaram leis e planos municipais para alcançar gradualmente uma meta de carbono zero nas próximas décadas (Terraza; Blanco; Vera, 2016).

Como se sabe, as emissões de veículos movidos a combustíveis fósseis são responsáveis por parcelas significativas das emissões locais de gases que aceleram o aquecimento do planeta, como o dióxido de carbono (CO₂). Estimativas indicam que atualmente as cidades são responsáveis por 75% das emissões globais de CO₂; o transporte e a construção civil figuram como os setores que mais contribuem para esse número (Unep, 2017).

Ressalte-se que, conforme o documento produzido pelo Cebap, citado anteriormente, as mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais do século XXI, com implicações profundas para a sustentabilidade ambiental, econômica e social. Evidências indicam que a transição para tecnologias mais limpas e eficientes é essencial para mitigar os impactos das mudanças climáticas e alcançar as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa. Estudos mostram que a adoção de energias renováveis, o aumento da eficiência energética e a implementação de soluções de mobilidade urbana sustentável são estratégias cruciais para reduzir a pegada de carbono e promover um desenvolvimento mais sustentável. É necessário reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa em 45% em relação aos níveis de 2010 até 2030 para limitar o aquecimento global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais.

Para alcançar essa meta, é essencial que a participação das energias renováveis na matriz energética global atinja pelo menos 40% até 2040. A mobilidade urbana é um componente-chave nesse esforço. O setor de transportes é responsável por mais de 20% das emissões globais de CO₂ relacionadas à energia. A implementação de soluções de mobilidade urbana sustentável, como o aumento do transporte público e a promoção do uso de bicicletas e veículos elétricos, pode reduzir significativamente essas emissões. Substituir 20% dos carros a gasolina por veículos elétricos até 2030 poderia reduzir as emissões de CO₂ em até 8 milhões de toneladas por ano na União Europeia. São necessários investimentos globais em infraestrutura sustentável da ordem de US\$ 90 trilhões até 2030 para suportar um crescimento econômico resiliente ao clima e promover a sustentabilidade ambiental.

Nesse contexto, a adoção de ônibus elétricos surge como uma solução viável e necessária. Projeta-se que até 2050 a eletrificação do transporte público pode reduzir significativamente as emis-

sões de dióxido de carbono e outros poluentes. A visão para 2050 inclui cidades com sistemas de transporte público altamente eficientes e sustentáveis, em que a eletrificação desempenha um papel central. A implementação de ônibus elétricos em larga escala é uma parte incontornável dessa transição. Com a melhoria contínua das tecnologias de baterias e a expansão da infraestrutura de recarga, espera-se que os ônibus elétricos se tornem cada vez mais econômicos e acessíveis.

Além disso, a integração de fontes de energia renovável para alimentar esses veículos elétricos pode maximizar os benefícios ambientais, criando um ciclo virtuoso de sustentabilidade. A colaboração entre governos, setor privado e sociedade civil será essencial para impulsionar essas mudanças, garantindo políticas de apoio, investimentos e inovação tecnológica.

Em suma, a adoção de ônibus elétricos é um passo estratégico para enfrentar as mudanças climáticas, promovendo um futuro mais limpo, saudável e sustentável. Até 2050, espera-se que essa transição contribua significativamente para a redução das emissões globais, alinhando-se com os objetivos climáticos internacionais e melhorando a qualidade de vida nas cidades ao redor do mundo.

Em São Paulo, por exemplo, o sistema de ônibus municipais emitiu mais de 1,4 milhão de toneladas de CO₂ em 2016 (Cetesb, 2017). Nesse sentido, programas que priorizam o uso de tecnologias mais limpas no transporte público desempenham um papel-chave na promoção da qualidade do ar e do desenvolvimento sustentável. A adoção de ônibus elétricos poderia reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂) em até 250 milhões de toneladas anuais até 2050. (WRI Cidades, [s.d.]). Cidades como Shenzhen, na China, já lideram essa transformação, com uma frota de mais de 16 mil ônibus elétricos em operação, o que resultou em uma redução de 48% nas emissões de carbono relacionadas ao transporte público.

A Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil, desenvolvida pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2020 com apoio do Ministério de Minas e Energia (EPE, 2020) aponta a contribuição das emissões relativas aos ônibus urbanos, conforme é destacado no estudo publicado pelo International Council on Clean Transportation – ICCT (2017). Segundo o documento, os ônibus urbanos com motor a combustão interna (MCI) de gerações mais antigas produzem um quarto das emissões de carbono negro⁹ do transporte rodoviário, apesar de constituírem apenas 1% da frota global de veículos rodoviários.

As emissões de material particulado (MP) são especialmente relevantes nos corredores de ônibus urbanos onde há uma alta concentração desses veículos. No Brasil, os estudos indicam que os corredores de ônibus nas principais cidades, como São Paulo e Rio de Janeiro, apresentam

9 - O carbono negro é um componente ultrafino do MP (material particulado), potente, de curta duração e com um impacto de aquecimento 900 a 3.200 vezes superior ao do dióxido de carbono, operando também como portador universal de toxinas nos pulmões e na corrente sanguínea, e contribuindo para mortes prematuras por poluição do ar (ICCT, 2017).

níveis de MP2,5 e MP10 até cinco vezes superiores aos limites recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS). Comparativamente, cidades globais como Londres e Nova York, que têm implementado frotas de ônibus elétricos, registram níveis significativamente menores de material particulado nesses corredores, demonstrando a eficácia da transição para tecnologias mais limpas.

A substituição de veículos com motor a combustão interna por veículos elétricos destaca-se como uma das principais alternativas para a resolução do problema das emissões de material particulado. Além disso, outras medidas, como o sucateamento de veículos antigos, a proibição de circulação de veículos mais poluentes e o estabelecimento de limites rigorosos para a idade dos veículos em operação, também podem contribuir de forma eficaz para a mitigação das emissões.

Acrescente-se que a introdução em larga escala de ônibus elétricos nas frotas municipais constitui uma transição significativa sob a perspectiva tecnológica. Embora os ônibus elétricos não sejam uma novidade para muitas cidades, com mais de 500 mil unidades operando globalmente, o modelo contemporâneo de veículo movido a bateria, promovido pela indústria e por entidades internacionais, ainda enfrenta barreiras técnicas e lacunas de conhecimento que não foram completamente superadas. No Brasil, por exemplo, cidades como São Paulo e Curitiba estão começando a implementar ônibus elétricos, todavia enfrentam desafios relacionados à infraestrutura de recarga e à capacitação técnica para manutenção desses veículos. A falta de padronização, mundo afora, das tecnologias de recarga e a limitada autonomia das baterias são obstáculos que ainda necessitam de soluções inovadoras para que a transição seja plenamente eficaz.

A energia consumida na tração dos veículos pode ser dividida entre diferentes fontes e diferentes modos. Por muitas décadas, o transporte rodoviário – principalmente ônibus no contexto do transporte público – foi dominado por motores a combustão baseados em combustíveis fósseis.

Atualmente, à luz dos objetivos climáticos, a descarbonização das frotas de veículos está em andamento em diversas cidades do globo. Novas tecnologias de propulsão estão permitindo que as emissões de carbono dos veículos sejam significativamente reduzidas, para não falar de outros benefícios, como a redução da poluição e a geração de uma nova cadeia de valor de máquinas, equipamentos, insumos, capacitação e oportunidades de emprego e renda.

Muitas empresas de transporte público começaram a aumentar a quantidade de veículos limpos em suas frotas rodoviárias, seja investindo na aquisição de novas unidades, seja atualizando os sistemas de abastecimento já existentes para combustíveis mais limpos. Na capital paulista, por exemplo, operadores de transporte como a SPTrans têm incorporado ônibus elétricos e híbridos, competindo para oferecer um serviço mais sustentável e eficiente. Além disso, a indústria automotiva nacional, representada por empresas como a Eletra e a BYD Brasil, está se posicionando competitivamente ao fornecer soluções tecnológicas avançadas para esses operadores, promovendo uma cadeia produtiva mais verde e inovadora. Essa competição não só beneficia os operadores de transporte ao reduzir custos operacionais e melhorar a qualidade do serviço como também fortalece o setor produtivo brasileiro ao incentivar a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias limpas.

Uma nova matriz energética pode ser considerada no sistema de transporte como aqueles veículos alimentados por:

- ✱ **Eletricidade;**
- ✱ **Hidrogênio;**
- ✱ **Gás natural (GNC, GNL);**
- ✱ **A maioria dos biocombustíveis não misturados com fósseis convencionais combustíveis;**
- ✱ **Gás liquefeito de petróleo (GLP).**

Cabe salientar que os ônibus movidos a gás liquefeito de petróleo (GLP) apresentam desafios ambientais significativos. Embora emitam menos dióxido de carbono (CO₂) comparados aos veículos a diesel, a queima de GLP ainda libera óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas finas (PM), que contribuem para a poluição do ar e problemas respiratórios. Além disso, a extração e o processamento de gás liquefeito de petróleo podem causar danos ambientais, como a degradação do solo e a contaminação da água. Portanto, enquanto o GLP é uma alternativa intermediária, a transição para tecnologias totalmente limpas, como a dos veículos elétricos, é imprescindível para a sustentabilidade ambiental.

É importante diferenciar entre veículos “limpos” e “provisão de energia”. A maneira como uma fonte de energia é produzida impacta as emissões de carbono na operação da solução. Por exemplo, a energia fornecida para um veículo a gás natural veicular (GNV) tem fortes implicações na intensidade global de carbono de operação, dependendo de se ela é de origem natural (gás não renovável) ou biometano (produzido a partir de resíduos agrícolas ou residenciais, considerados renováveis). O veículo identificado como “limpo”, sob uma perspectiva teórica ou legislativa, pode ser alimentado com energia não renovável.

A pegada de CO₂ “do poço à roda” (Well-to-Wheel, W2W) em sistemas de transporte refere-se a uma análise abrangente das emissões de GEE ao longo de todo o ciclo de vida do combustível e do veículo. Essa análise inclui duas principais parcelas: a fase de geração (“do poço ao tanque” ou Well-to-Tank, W2T) e a fase de uso (“do tanque à roda” ou Tank-to-Wheel, T2W).

Na fase de geração (W2T), as emissões são produzidas durante a extração, o processamento e o transporte do combustível. Para combustíveis fósseis como o diesel e o GLP, essa etapa inclui atividades de exploração e refino, que são altamente intensivas em carbono. No caso da eletricidade, a fonte de geração (carvão, gás natural, renováveis) é crucial para determinar o impacto ambiental.

A fase de uso (T2W) envolve as emissões diretas do veículo enquanto ele está em operação. Para veículos a combustão interna, essa etapa gera significativas emissões de CO₂, NOx e material particulado (PM), liberados diretamente pelo escapamento. Em contraste, veículos elétricos não têm emissões de escapamento, contudo sua pegada total depende da mistura energética usada para gerar a eletricidade.

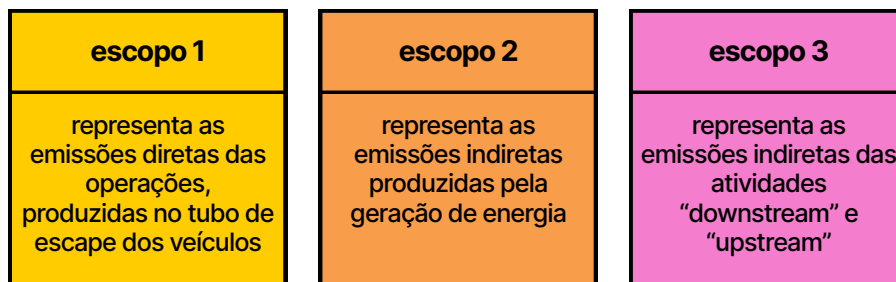
A análise W2W é essencial para entender o verdadeiro impacto ambiental de diferentes tecnologias de transporte. Estudos mostram que, embora veículos elétricos possam ter uma pegada W2T elevada se a eletricidade for gerada a partir de fontes fósseis, eles ainda tendem a ser mais eficientes e menos poluentes que veículos a combustão interna quando operados em redes elétricas com alta penetração de renováveis.

A Agência Internacional de Energia (AIE) estima que o consumo de energia do setor de transportes representa 24% das emissões globais¹⁰, no entanto o desafio da atualidade é estabelecer uma análise destacando essas emissões em todo o fluxo W2W, em cada fase “do poço ao tanque”, ou Well-to-Tank, W2T, e na fase de uso (“do tanque à roda” ou Tank-to-Wheel, T2W). Considerando essas emissões, o setor de transportes será crucial para alcançar os objetivos do Acordo de Paris. A operação de veículos de transporte público compreende uma proporção significativa de emissões e é a razão pela qual as operadoras devem priorizar as reduções nessa área. Isso implica não apenas eliminar gradualmente o uso de combustíveis fósseis nos meios de transporte como também garantir o abastecimento de energia a partir de fontes renováveis, reduzindo o consumo geral de energia de todos os ativos de transporte público.

As emissões associadas à fabricação de veículos representam uma parcela significativa no ciclo de vida do transporte público. Historicamente, essas emissões não eram consideradas nos veículos de combustão interna, focando-se apenas as emissões diretas durante o uso do veículo. Mas, com a transição tecnológica para veículos elétricos e alternativas limpas, surge uma preocupação crescente com uma análise holística e integrada de todos os processos e componentes envolvidos.

Essa nova abordagem reconhece que a fabricação de baterias e outros componentes avançados pode ser intensiva em carbono, exigindo uma avaliação crítica do impacto ambiental total dos veículos. A consideração das emissões “do poço à roda” (W2W) e “da fábrica à estrada” (Factory-to-Road) é indispensável para uma compreensão completa e transparente da sustentabilidade dos novos sistemas de transporte. A necessidade de reduzir as emissões não só no uso como também na produção está impulsionando inovações na cadeia de suprimentos, materiais e processos de fabricação, destacando a importância de uma transição verdadeiramente sustentável. Em síntese, as emissões são categorizadas em três diferentes âmbitos:

FIGURA 14



Fonte: Adaptado de UITP (2023).

¹⁰ - Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-by-sector-2018>>.

A transição para uma frota totalmente elétrica pode evitar cerca de 1.379 mortes prematuras por ano no Brasil, de acordo com dados divulgados pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Unep, 2019). Pesquisas sugerem que, se todas as frotas urbanas da Terra fossem eletrificadas, poderíamos evitar até 280 mil mortes prematuras até 2050. Esse impacto positivo resultaria não apenas da eliminação das emissões de escapamento como também da redução da poluição sonora e da diminuição do efeito de ilha de calor urbana.

Os modelos da ONU e da OMS são ferramentas essenciais para estimar mortes prematuras relacionadas à qualidade do ar. Eles utilizam dados sobre a concentração de poluentes atmosféricos, como partículas finas (PM_{2,5}), dióxido de nitrogênio (NO₂) e ozônio (O₃), para calcular o impacto na saúde pública. Ao mesmo tempo, combinam medições de poluição do ar com dados epidemiológicos que vinculam a exposição a esses poluentes a uma série de doenças respiratórias e cardiovasculares.

Esses modelos, porém, usam dados epidemiológicos que podem não refletir as condições locais de saúde e suscetibilidade populacional. **Como poderiam ser ajustados para considerar variáveis locais específicas? A precisão das estimativas depende da qualidade e da abrangência dos dados de poluição do ar. Em regiões onde a monitorização é limitada, como em alguns países em desenvolvimento, as estimativas podem ser menos confiáveis. Então, como esses modelos podem ser adaptados para melhorar a precisão em tais áreas? Como podem ser aprimorados para integrar outros fatores ambientais – poluição sonora e efeito de ilha de calor, por exemplo, que também impactam significativamente a saúde pública?**

A exposição ao ruído ambiental é outro importante fator de risco para a saúde, associada a doenças cardiovasculares, distúrbios do sono e estresse. Entretanto, a poluição sonora geralmente não é integrada nos modelos de estimativa de mortalidade prematura da ONU e da OMS. Áreas urbanas tendem a ser mais quentes do que as áreas rurais circundantes, um fenômeno conhecido como efeito de ilha de calor. Esse aumento de temperatura pode exacerbar os problemas de saúde, principalmente durante ondas de calor, aumentando a mortalidade e a morbidade. Todavia, o efeito de ilha de calor também não é completamente contabilizado nos modelos de qualidade do ar.

Conforme estudo do ICCT (2022) que analisa o desempenho operacional e financeiro da eletrificação de 20 linhas de uma operadora de ônibus urbanos na cidade de São Paulo, a comparação de custos por quilômetro entre diesel e energia elétrica revela uma redução de 73%, passando de R\$ 3,10 para R\$ 0,84. Nesse caso, **o combustível representa aproximadamente um terço dos custos operacionais totais das empresas de ônibus, indicando uma significativa economia potencial com a eletrificação das frotas. O custo de operação representa apenas cerca de 7,5% do custo total de propriedade (TCO) do ônibus elétrico – para os veículos a diesel, o valor é em torno de 25%. Essa vantagem no custo operacional do elétrico praticamente compensa seu custo mais elevado de aquisição e de aluguel da bateria, que correspondem a cerca de 35% do TCO por quilômetro.**

A cidade de São Paulo possui a maior frota de ônibus do Brasil e uma das mais extensas da América Latina, com aproximadamente 14 mil veículos em operação. Para reafirmar seu compromisso no combate às mudanças climáticas, o município sancionou, em 2018, a Lei nº 16.802, que esta-

belece a meta de eliminar 100% das emissões de CO₂ de origem fóssil e reduzir em 95% as emissões de material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NOx) até o ano de 2038.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente do Chile, que se debruçou sobre a questão na América Latina, a melhoria da qualidade do ar poderá propiciar benefícios anuais de US\$ 8 bilhões ao setor de saúde no país. O governo chileno estima que a operação e a manutenção da nova frota sejam, respectivamente, 70% e 37% mais econômicas que as dos ônibus movidos a diesel. No Brasil, segundo o *Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras* (Ministério das Cidades, 2013), considerando a previsão de que 25% dos ônibus sejam elétricos até 2030, estima-se que o número de pessoas afetadas por doenças respiratórias caia de 40.613 em 2019 para 2.175 em 2030 graças à melhoria da qualidade do ar. A expectativa é que os níveis de mortalidade sejam zerados até lá, mantendo-se apenas os casos de licenças/afastamentos profissionais e dias de escola perdidos relacionados a esse tipo de doença.

A rápida urbanização, as crescentes preocupações ambientais, o congestionamento do tráfego, as mudanças nos padrões de mobilidade e as políticas governamentais de promoção do transporte público são fatores que impulsionam a demanda pelo mercado de ônibus elétricos na América Latina. A adoção de ônibus elétricos pode contribuir significativamente para a redução das emissões de poluentes. Um ônibus elétrico é capaz de reduzir mais de 60 toneladas de emissões de carbono em um ano, chegando até 101 toneladas por ano, saindo de mais de 1.500 g/km no ônibus a diesel a quase zero no ônibus elétrico, conforme estudos realizados pelo ICCT (2022).

2.1 A eletrificação como oportunidade para o incremento da qualidade do transporte público

O setor de transportes motorizados é o maior consumidor de energia no Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2022, e aproximadamente 50% da demanda energética desse setor é suprida por fontes não renováveis, derivadas do petróleo. A eletrificação dos ônibus, além de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, pode aumentar a confiabilidade dos sistemas de transporte público, contribuindo para a sustentabilidade energética e a redução das emissões de poluentes (EPE, 2020).

O transporte público é o principal emissor de CO₂ no setor energético brasileiro, representando 48% do total de emissões, conforme o Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Seeg¹¹). Apesar da implantação de programas de redução de emissões e da adoção de tecnologias avançadas, como catalisadores, o significativo aumento no número de automóveis levou a uma duplicação das emissões de CO₂ entre 2010 e 2020. Essa tendência sublinha a necessidade urgente de transição para sistemas de transporte público mais sustentáveis, como a eletrificação das frotas de ônibus, para mitigar os impactos ambientais (Carniatto Silva, 2022).

Conforme a Nota técnica 66, de maio de 2020, do Ipea, Entrada de meios alternativos de transporte urbano: histórico e perspectivas (Ipea, 2020), o setor de transportes é, igualmente, o maior

11 - Disponível em: <<https://plataforma.seeg.eco.br/>>.

consumidor global de combustíveis derivados de petróleo, respondendo por 57% da demanda mundial. Aproximadamente 20% do consumo final de energia no planeta e 15% das emissões antropogênicas globais são provenientes de atividades de transporte. Todo o setor industrial, por exemplo, e falando em termos mundiais, tem um consumo de energia de aproximadamente 54% e é responsável por cerca de 21% das emissões globais de GEE. Proporcionalmente à relação consumo de energia/emissões, para o caso do transporte, este é o setor mais preocupante; para cada 1 unidade de consumo de energia há 0,75 unidade de emissões geradas, o que é alarmante; na indústria essa proporção é de 1/0,39.

Em 2021, segundo Carniatto Silva (2022), o setor de transportes no Brasil consumiu 85,1 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep¹²), 32,5% da demanda nacional ofertada de energia; dessa forma, o setor de transportes destaca-se como o maior consumidor da matriz energética do país, com 77% de seu consumo de combustíveis oriundos de fontes não renováveis de energia, derivados do petróleo (EPE, 2020). Dados apontam que dos 260 Mtep em 2017, 83,2 milhões eram para o setor de transportes (33%), e há as seguintes projeções para 2027: dos 335 Mtep previstos, 104 milhões serão para o setor de transportes (32%), conforme o Plano decenal de expansão de energia elaborado pela Empresa Pública de Energia (EPE, 2017).

Dados do Seeg¹³ indicam que as emissões totais de CO₂ do setor de energia, provenientes da produção ou do uso de combustíveis, lançaram 413,7 MtCO₂, o que representa 19% do total nacional – 1.388.519.254 toneladas, sendo que 196,5 MtCO₂ (47%) de toda a emissão por energia foram produzidas pelo setor de transportes.

Com os avanços tecnológicos das baterias, que agora oferecem maiores alcances, menores custos e recuperação de energia através da frenagem regenerativa, juntamente com estratégias aprimoradas de carregamento, os ônibus elétricos a bateria emergem como uma opção estratégica no cenário urbano. Esses veículos não apenas reduzem a poluição do ar e sonora como também melhoram significativamente a eficiência energética. Ademais, inovações recentes incluem o desenvolvimento de sistemas de carregamento ultrarrápido, baterias de estado sólido com maior densidade energética e maior segurança, além da integração de tecnologias de inteligência artificial para otimização de rotas e gestão da frota. Contudo, é imperativo considerar que seu impacto ambiental está intrinsecamente ligado à origem da energia utilizada, sublinhando a importância de fontes energéticas renováveis para maximizar os benefícios ambientais dessa tecnologia (Silva; Marchi Neto; Seifert, 2016; Carniatto Silva, 2022).

O Brasil desponta no mercado das energias renováveis, revelando um potencial imenso que começa a ser explorado. A produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos, impulsionada pela implementação da geração distribuída, tem experimentado um crescimento vigoroso. Embora a maioria das instalações ainda esteja no setor residencial, os sinais de expansão são pro-

12 - A tonelada equivalente de petróleo (tep), ou o milhão de toneladas equivalente de petróleo (Mtep) é uma unidade de energia definida como o calor liberado na combustão de uma tonelada de petróleo cru, aproximadamente 42 gigajoules. Por exemplo, 1 barril de petróleo equivalente (bpe) contém aproximadamente 0,146 tep (isto é, há aproximadamente 6,841 bpe em uma tep).

13 - Disponível em: <<https://plataforma.seeg.eco.br/>>.

missores. Tal cenário levanta várias questões de pesquisa intrigantes: **Quais são os principais desafios técnicos e econômicos que o país enfrenta para ampliar a geração fotovoltaica em escala comercial e industrial? Como as políticas públicas e os incentivos fiscais podem ser otimizados para acelerar a adoção de energia solar em diferentes setores? Qual é o impacto ambiental e socioeconômico da transição para fontes de energia renováveis no contexto brasileiro? E de que maneira a infraestrutura atual pode ser adaptada para integrar eficientemente a geração distribuída no sistema elétrico nacional?**

Um dado relevante sobre a análise operacional de veículos elétricos é a distância média percorrida pelos ônibus, a qual serve como um indicador da utilização do transporte urbano rodoviário coletivo. O parâmetro reflete o tamanho médio dos trajetos realizados por esses veículos e a frequência com que ocorrem.

A distância média percorrida¹⁴ é usualmente influenciada pela demanda, sendo que maiores trajetos e frequências podem indicar maior demanda por transporte público. Entre as possíveis metodologias para estimar essa distância, uma abordagem viável é basear-se no tamanho médio da população dos municípios. O que se nota na prática é que a distância média percorrida não é apenas uma função espacial local, pois municípios mais populosos tendem a apresentar maior distância média percorrida pelos ônibus, devido à maior extensão das áreas urbanas e à necessidade de atender a uma população maior, o que reforça a importância de veículos elétricos eficientes e de grande alcance para satisfazer essa demanda (ANTP, 2018).

A influência da distância média percorrida sobre a viabilidade técnico-econômica dos ônibus elétricos em comparação com os modelos a diesel pode ser considerável. Como já apresentado, observa-se frequentemente que os custos variáveis totais associados à operação dos ônibus elétricos são inferiores aos custos variáveis relacionados à operação dos ônibus a diesel. Essa diferença de custos se deve especialmente à maior eficiência energética dos veículos elétricos e à menor necessidade de manutenção, o que torna os ônibus elétricos uma opção mais atraente e sustentável para o transporte urbano coletivo (ICCT, 2019).

O estudo realizado pela Bloomberg Finance *Electric buses in cities - driving towards cleaner air and lower CO₂* (BloombergNEF, 2018) analisa a eficiência dos sistemas de recarga em ônibus elétricos e revela que a distância diária percorrida impacta significativamente a economia em comparação com os ônibus a diesel. Considerando quatro tipos de ônibus com diferentes configurações de recarga, os resultados mostram que quanto maior a distância diária percorrida, maior a economia de custos variáveis, devido à maior eficiência energética dos ônibus elétricos. Diferentes sistemas de recarga – como rápida, lenta, em intervalos e noturna – influenciam diretamente a operacionalidade e os custos, permitindo que os ônibus elétricos compensem os custos fixos iniciais mais elevados de modo mais eficaz do que os ônibus a diesel.

Segundo o estudo, em cidades de maior porte, os ônibus frequentemente percorrem distâncias superiores a 300 km/dia. Nesses casos, é recomendável que os operadores optem por veículos

14 - Importante destacar que a principal métrica utilizada em análise de dados para transporte é o índice de passageiros transportados por quilômetro (IPK). Ele é a razão entre o número total de passageiros equivalentes transportados e a quilometragem percorrida no sistema de transporte público coletivo por ônibus.

equipados com baterias de maior capacidade, como aquelas de 350 kWh. Em contraste, em cidades de médio ou pequeno porte, onde as distâncias diárias percorridas são aproximadamente de 160 km, ônibus com baterias de menor capacidade podem ser mais adequados e eficientes. Essa adequação contribui para a otimização dos custos operacionais e para a sustentabilidade dos sistemas de transporte urbano, ajustando a capacidade das baterias à demanda específica de cada contexto urbano, reforçando a associação entre o planejamento de transportes e o planejamento urbano.

De acordo com o levantamento, para menores distâncias percorridas, os ônibus a diesel apresentam um custo total anual inferior ao dos ônibus elétricos. Isso se deve ao menor custo de aquisição inicial dos veículos a diesel. No entanto, ao considerar o alcance do TCO, é importante notar que esses custos totais anuais não contemplam a amortização do Capex ao longo da vida útil das tecnologias, nem contabilizam os custos das externalidades associadas à operação do diesel, como poluição e impactos na saúde pública. Para distâncias maiores, os ônibus elétricos emergem como uma alternativa economicamente vantajosa, devido à sua maior eficiência energética e a menores custos operacionais a longo prazo. A análise completa do TCO, que inclui todos esses fatores, revela que os ônibus elétricos são competitivos e sustentáveis para operações de maior alcance.

O TCO (do inglês, Total Cost of Ownership¹⁵), custo total de propriedade, como já dito neste trabalho), é uma métrica abrangente que inclui todos os custos associados a aquisição, operação e manutenção de um ativo ao longo de sua vida útil. Para ônibus elétricos e a diesel, o TCO tradicionalmente inclui os seguintes componentes:

Capex (Capital Expenditure)

Custos de aquisição do veículo, incluindo a infraestrutura necessária (como estações de recarga para ônibus elétricos);

Opex (Operational Expenditure)

Custos operacionais, como consumo de energia ou combustível, manutenção e reparos;

Custos de manutenção

A manutenção regular e preventiva, reparos de componentes, substituição de peças etc.;

Seguro e licenciamento

Custos anuais de seguro e taxas de licenciamento;

Depreciação

A depreciação do valor do veículo ao longo do tempo.

Em geral, quanto maior a quilometragem percorrida por ônibus elétricos, maior a economia gerada nos custos variáveis, facilitando a compensação dos custos fixos mais elevados associados a

15 - O TCO inclui o custo vitalício da compra (custos de capital) e da manutenção (custos operacionais e de manutenção) de um ônibus, bem como os custos de instalação e manutenção da infraestrutura de carregamento.

esses modelos. Para uma comparação precisa entre diferentes tecnologias de ônibus elétricos, é fundamental que as análises de TCO sejam meticulosamente elaboradas. Metodologias internacionais, como aquelas recomendadas pela UITP – International Association of Public Transport (UITP, 2022) e pela BloombergNEF (2020), incorporam fatores como custos de aquisição, manutenção, operação e depreciação. Essas análises também devem considerar incentivos fiscais e o impacto da vida útil das baterias. Uma abordagem abrangente e detalhada do TCO permite uma avaliação mais precisa da viabilidade econômica das diferentes tecnologias de ônibus elétricos em comparação aos modelos tradicionais a diesel.

A eletrificação de frotas de ônibus também deve ser analisada sob o ponto de vista de políticas públicas. Nesse contexto, políticas públicas referem-se às ações, diretrizes e medidas governamentais voltadas para a promoção e incentivo da adoção de veículos elétricos no transporte público. Tais políticas visam criar um ambiente propício para a transição para a eletromobilidade, por meio de incentivos fiscais, subsídios, regulamentações e investimentos em infraestrutura de recarga, com o objetivo de alcançar uma mobilidade mais sustentável e reduzir as emissões de poluentes. É importante destacar que ambas as frentes são necessárias para construir cidades sustentáveis e resilientes. Assim sendo, para uma análise mais holística e precisa do TCO, é essencial incorporar as externalidades ambientais e de saúde pública em que se sugere a inclusão das seguintes melhorias:

Emissões de gases de efeito estufa (GEE)

Custo social do carbono (SCC), que quantifica o impacto econômico das emissões de CO₂;

Poluição do ar

Custos associados à emissão de poluentes como NO_x, PM_{2,5} e PM₁₀, que podem ser calculados usando valores de custo por tonelada de poluente emitido, conforme diretrizes da EPA (Environmental Protection Agency), dos EUA, ou da Cetesb (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo);

Impactos na saúde

Custos relacionados ao tratamento de doenças respiratórias e cardiovasculares causadas pela poluição do ar, utilizando metodologias da OMS e estudos locais;

Mortalidade prematura

Custos associados à mortalidade prematura devido à poluição, calculados com base em valores de vida estatística (Value of Statistical Life – VSL) usados por agências como a EPA (Environmental Protection Agency), dos EUA, e a OMS.

Poluição sonora

Quantificação dos custos associados à poluição sonora, que impacta a saúde mental e física dos residentes urbanos.

Existem várias metodologias estabelecidas internacionalmente para o cálculo de externalidades positivas que já caminham nessa direção, cada uma adaptada para considerar diferentes aspectos do custo e impacto das tecnologias de transporte. A seguir, alguns exemplos notáveis:

Metodologia da EPA (Environmental Protection Agency, EUA)

Modelo BENMAP (Environmental Benefits Mapping and Analysis Program).

Descrição: Utilizado para calcular os benefícios econômicos da redução de poluentes, incluindo os custos evitados em saúde pública.

Metodologia da OMS (Organização Mundial da Saúde)

Ferramenta HEAT (Health Economic Assessment Tool).

Descrição: Avalia os benefícios econômicos da atividade física promovida pelo uso de modos de transporte ativo, como bicicletas e caminhadas.

Componentes: Redução de mortalidade e morbidade, benefícios econômicos associados à saúde pública.

Aplicação: Planejamento urbano e transporte sustentável.

No contexto urbano, foram propostos diversos frameworks para guiar a elaboração de políticas voltadas para as mudanças climáticas, abrangendo tanto ações de adaptação climática quanto de mitigação climática. “Adaptação climática” refere-se às medidas e estratégias implementadas para enfrentar os impactos e efeitos adversos das mudanças climáticas em ambientes urbanos. Essas ações visam tornar as cidades mais resilientes e capazes de lidar com eventos climáticos extremos, como enchentes, ondas de calor e tempestades, além de garantir a proteção das infraestruturas e a segurança das comunidades locais. Por outro lado, “mitigação climática” diz respeito às iniciativas que têm o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e outros poluentes na atmosfera, com o intuito de diminuir a intensidade das mudanças climáticas no longo prazo.

Assim, são propostos planos que abrangem iniciativas em diversas frentes para minimizar a emissão de poluentes e, portanto, o aquecimento global. Essas iniciativas estratégicas são usualmente sugeridas de maneira integrada, mobilizando recursos em diversas instituições e temas para alcançar metas que são comuns ao ambiente urbano. É importante sublinhar que a capacidade governamental de tomar medidas eficazes para mitigar as mudanças climáticas depende do acesso a dados de boa qualidade sobre as emissões de GEE no estágio anterior à proposição das intervenções.

Por isso, um inventário de emissões de poluentes permite que as cidades compreendam a contribuição de diferentes atividades, determinem onde concentrar melhor os esforços de mitigação, estabeleçam metas alinhadas ao contexto almejado de redução de emissões e desenvolvam estratégias eficazes para atingi-las. Destacam-se duas metodologias desenvolvidas no Brasil e aplicáveis nesse contexto:

Pacote **gtfs2emis**¹⁶ (para linguagem R), desenvolvido pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), que estima emissões de poluentes no transporte público a partir de documentações estáticas da rede de transporte e considerando suas características espaciais e operacionais (Vieira, Pereira & Andrade, 2023);

Processamento implementado no **Monitor de ônibus SP**¹⁷, do Instituto de Energia e Meio Ambiente (Iema), que se baseia no monitoramento contínuo de redes de transporte (a partir da transmissão de dados de posição dos veículos) para estimar poluentes emitidos considerando características dos veículos e condições reais de tráfego.

Ademais, monitorar o progresso das metas é essencial para garantir o êxito da política. Conforme indica o C40 (2021) – Grupo de Liderança Climática, que reúne cidades comprometidas em reduzir as emissões de gases de efeito estufa –, um plano de ação climática deve conter:

- * Uma visão ou declaração de compromisso para estabelecer o cenário para a ação;
- * Aspectos-chave da base de evidências utilizada para informar as ações climáticas;
- * Informações de contexto para explicar a importância da ação;
- * Informações sobre os benefícios sociais, ambientais e econômicos mais amplos das ações climáticas.

2.2 Questões ainda não solucionadas

Pode-se dizer que, sob o ponto de vista político e de estrutura de governança, existe uma fraca coordenação horizontal e vertical entre órgãos governamentais, decorrente, em muito, da ausência de uma política pública nacional que fomente a descarbonização. Tanto políticas públicas que desestimulem a indústria incumbente quanto as que incentivem e apoiem as envolvidas no mercado de tecnologias sustentáveis são escassas e, na maioria das vezes, sem metas específicas que contribuam para a aceleração do processo de transição para a mobilidade elétrica.

Enfatize-se que os custos iniciais de veículos elétricos são altos e as estações de recarga, em quantidade insuficiente. Numa comparação com os veículos a combustão, as estações de recarga integram a relação dos altos investimentos, o que não é necessário para os veículos a combustão, cujas redes de abastecimento são adequadas à demanda. Outrossim, os mecanismos de financiamento disponíveis seguem escassos, tornando lenta a transição para a adoção da nova tecnologia.

16 - Disponível em: <<https://osf.io/preprints/osf/8m2cy>>.

17 - Trata-se de uma ferramenta on-line que, a partir de dados de GPS, estima as emissões dos ônibus geridos pela SPTrans, empresa responsável pela coordenação, controle e planejamento da mobilidade por ônibus em São Paulo. Disponível em: <<https://energiaambiente.org.br/onibus-sp#metodo>>.

Some-se ainda que as instituições financeiras são cautelosas sobre a concessão de empréstimos a operadores envolvendo os veículos elétricos, existindo, também, um déficit de recursos humanos qualificados. A dificuldade dos municípios em captar recursos de organismos multilaterais de crédito (BID, CAF e BNDES) está frequentemente ligada à sua limitada capacidade de endividamento, falta de garantias suficientes e desafios técnicos e administrativos para a elaboração e execução de projetos. Mas algumas estratégias e circunstâncias específicas têm permitido que operadores e municípios, mesmo aqueles com limitações, consigam acessar essas linhas de financiamento para projetos de eletromobilidade.

Por outro lado, os organismos multilaterais de crédito vêm dando prioridade a projetos que promovem a sustentabilidade ambiental, em particular aqueles que contribuem para a redução das emissões de carbono e impulsionam a mobilidade sustentável. Esse foco em políticas verdes e sustentáveis tem levado a uma maior oferta de linhas de financiamento especificamente para projetos de eletromobilidade. Para contornar a limitação de endividamento, muitos municípios vêm recorrendo a garantias oferecidas por governos nacionais ou outras entidades públicas. Além disso, a criação de fundos de garantia específicos para projetos de mobilidade sustentável tem ajudado a mitigar os riscos percebidos pelos credores.

No que tange aos ônibus elétricos, eles se destacam por não gerarem emissões de escapamento e pelo potencial de reduções na emissão de CO₂ quando se considera todo o seu ciclo de vida.

É crucial avaliar a necessidade de expansão adicional da geração de energia elétrica para atender à crescente demanda de veículos elétricos. Porém, ao contrário de muitas nações, o Brasil possui uma matriz elétrica predominantemente renovável, devido ao elevado percentual de fontes de energia renováveis em sua composição (EPE, 2019). É preciso também registrar que os ônibus a diesel vêm se tornando cada vez mais eficientes e limpos, reduzindo a diferença entre ambas as motorizações.

Por um lado, a tecnologia dos ônibus a diesel tem passado por significativas melhorias nas últimas décadas, com o objetivo de reduzir as emissões de poluentes e minimizar seu impacto ambiental. Os novos motores a diesel são projetados para serem mais eficientes, o que significa que eles produzem mais potência com menos combustível, o que resulta em menores emissões de dióxido de carbono (CO₂).

A tecnologia de injeção de combustível de alta pressão e sistemas de gerenciamento eletrônico ajudam a otimizar a combustão e melhorar a eficiência do motor. Os sistemas pós-tratamento de emissões têm um papel decisivo na redução das emissões de poluentes dos motores a diesel, com filtros de partículas diesel (DPF) que capturam e armazenam partículas (PM) geradas durante a combustão, evitando sua liberação no ambiente. Esses filtros são periodicamente regenerados para queimar e eliminar as partículas acumuladas. Há também os sistemas de redução catalítica seletiva (SCR), que utilizam um agente redutor – geralmente ureia (AdBlue) –, injetado no sistema de escape para converter os óxidos de nitrogênio (NOx) em nitrogênio e água, substâncias inofensivas ao meio ambiente; e catalisadores de oxidação diesel (DOC), que ajudam a converter monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos não queimados em dióxido de carbono.

Sem mencionar que a utilização de combustíveis diesel com baixo teor de enxofre é uma medida importante para reduzir a emissão de enxofre e a formação de partículas finas (PM). O

diesel com baixo teor de enxofre também melhora a eficiência dos sistemas de pós-tratamento de emissões, como os DPFs e os SCRs. A adoção de turbocompressores nos motores a diesel melhora a eficiência da combustão, aumentando a quantidade de ar que entra no motor e permitindo uma queima mais completa do combustível. Isso resulta em menores emissões de CO₂ e outros poluentes. Os sistemas de start-stop automaticamente desligam o motor quando o veículo está parado e o religam quando o motorista acelera, reduzindo o tempo de funcionamento do motor em marcha lenta e, conseqüentemente, as emissões.

Enfim, embora os ônibus a diesel ainda emitam poluentes, as inovações tecnológicas têm reduzido significativamente essas emissões. Regulamentações ambientais mais rigorosas, como os padrões Euro VI na Europa e os padrões EPA Tier 4 nos Estados Unidos, vêm forçando os fabricantes de ônibus a diesel a adotar essas tecnologias avançadas para cumprir os limites de emissões cada vez mais baixos.

Por outro lado, a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil enfrenta desafios significativos, em especial com o crescimento da demanda por veículos elétricos e a transição para fontes de energia mais limpas. A necessidade de adequação das infraestruturas públicas de distribuição é um componente imprescindível que, infelizmente, tem sido muitas vezes negligenciado em muitos projetos no país.

A crescente demanda por energia elétrica, impulsionada pela eletrificação do transporte público e privado, exige uma capacidade aumentada na rede de distribuição. As redes atuais muitas vezes não foram projetadas para suportar a carga adicional que os veículos elétricos impõem. O reforço das infraestruturas existentes envolve a atualização e a substituição de componentes antigos, a instalação de novos transformadores e a ampliação das subestações. Isso garante que a rede possa lidar com picos de demanda e distribuir energia de modo eficiente e seguro. A execução dessas melhorias na infraestrutura é um processo complexo e demorado, que pode levar anos para ser concluído. Inclui planejamento, obtenção de licenças, financiamento, contratação de empreiteiros e realização das obras propriamente ditas.

Muitos projetos de eletrificação no Brasil subestimam a necessidade de adequação da infraestrutura de distribuição. O foco tende a ser na implementação rápida de novas tecnologias, sem o devido planejamento para garantir que a rede de distribuição possa suportar a carga adicional. Há uma carência de investimentos suficientes na modernização da infraestrutura de distribuição. Os investimentos necessários para a atualização da rede são significativos e muitas vezes enfrentam limitações orçamentárias e burocráticas.

A coordenação entre os diferentes níveis de governo, concessionárias de energia e outros stakeholders é, com frequência, deficiente. A falta de uma regulação clara e de incentivos adequados para o fortalecimento da infraestrutura também contribui para a negligência desse componente. A desatenção à adequação da infraestrutura de distribuição pode resultar em quedas de energia, sobrecargas e falhas na rede, impactando negativamente a confiabilidade do fornecimento de energia e a qualidade do serviço para os consumidores.

Também de ordem prática e ordinária, algumas questões são relevantes, tais como: O que vai acontecer se ninguém percebeu que o carregador instalado só pode ser utilizado num tipo de veículo ou num tipo de tecnologia? O que fazer com toda a infraestrutura e o investimento já

feitos no momento de renovação desses ônibus elétricos? O que fazer se patentes criarem restrições técnicas que impeçam mudanças?

Em outras nações, como Alemanha e Noruega, projetos de eletrificação de transporte incluem, desde o início, a modernização da infraestrutura de distribuição, com investimentos robustos em redes inteligentes e sistemas de gestão de energia. A formação de Parcerias Público-Privadas pode ser uma solução eficaz para financiar e implementar as melhorias necessárias na infraestrutura de distribuição. Essas parcerias podem ajudar a mobilizar recursos e expertise para projetos de longo prazo.

Para que o Brasil possa avançar na transição para um sistema de transporte mais sustentável e eletrificado, é fundamental que a adequação da infraestrutura de distribuição de energia seja tratada como uma prioridade. Isso requer planejamento estratégico, investimento adequado e uma coordenação eficaz entre todos os stakeholders envolvidos. Somente com uma infraestrutura robusta e modernizada será possível garantir a confiabilidade e a eficiência do fornecimento de energia necessário para suportar a crescente demanda dos veículos elétricos e outras tecnologias emergentes.

Frente a tal cenário, e indo além das possíveis barreiras políticas e econômicas, outro foco importante é o desafio tecnológico – que não se resume apenas aos elétricos –, como também em que medida essa tecnologia está em disputa com outras alternativas, caso dos veículos movidos a gás natural ou biocombustíveis. Existe um lobby importantíssimo da indústria de gás e biocombustível. Os ônibus elétricos são uma tecnologia relativamente emergente e, em razão disso, a disponibilidade de profissionais qualificados para assumir cargos especializados em projetos de eletromobilidade é escassa.

Esse é um desafio que não afeta apenas as posições ligadas à operação dos veículos; os impactos são sentidos sobretudo na área de gestão. No caso dos ônibus elétricos, a escassez de especialistas pode dificultar a elaboração de editais de contratação e especificação de veículos adequados para cada cidade. Ônibus elétricos a bateria têm desempenho variado a depender das condições térmicas, do perfil e da extensão das rotas e da topografia, entre outros fatores.

A revenda de ônibus antigos e poluentes não deveria ser considerada algo positivo no modelo atual, considerando os esforços de renovação para uma frota descarbonizada.

O alto custo inicial dos ônibus elétricos, que na América Latina não raro varia de US\$ 260 mil a US\$ 475 mil, também pode impedir avanços na elaboração de planos e metas. Muitas cidades não se sentem capazes de levantar os recursos necessários para o investimento inicial de uma frota elétrica em escala. Por outro lado, sistemas com menos usuários e menor cobertura territorial podem iniciar com uma frota menor para que se percebam os impactos positivos. Ademais, normalmente a articulação entre a prefeitura e as partes interessadas tende a ser menos complexa nesse caso, o que facilita a tomada de decisões.

Mesmo que o custo total de propriedade dos ônibus elétricos decresça ao longo do tempo em relação ao dos veículos a diesel, o critério de menor preço ainda pauta muitos dos processos administrativos e as linhas de crédito que viabilizam legalmente a aquisição e locação dessas tecnologias.

Nesse contexto, deve-se ressaltar que é necessário somar a tais questões uma análise mais holística que envolve o denominado “balanço social” representado por essa nova tecnologia. Trata-se, assim, de uma avaliação que mede e comunica o impacto de tal tecnologia sobre a

sociedade e o meio ambiente. Ele considera os benefícios, como a redução da poluição do ar e do ruído, a melhoria da saúde pública e o potencial para diminuir as emissões de GEE.

Além disso, o balanço pode abordar desafios, como os custos de implementação e a infraestrutura necessária, proporcionando uma visão abrangente sobre a viabilidade e o valor agregado da tecnologia à comunidade.

Existem estudos que fazem um paralelo entre o balanço social de ônibus elétricos e o de veículos a combustão, focando principalmente as emissões de gases de efeito estufa ao longo do ciclo de vida dos veículos. Um estudo do International Council on Clean Transportation em 2023 (ICCT, 2023) destacou que, apesar de os veículos elétricos envolverem emissões na sua produção e, dependendo da fonte, no carregamento das baterias, eles são significativamente mais eficientes e menos poluentes ao longo de todo o seu ciclo de vida em comparação com veículos a combustão interna.

Outro exemplo de estudo relacionado ao assunto é um projeto na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), que introduziu um ônibus elétrico da BYD para comparação direta com ônibus a diesel no que tange a impactos ambientais e eficiência operacional. O projeto incluiu o estabelecimento de uma estação de carregamento para as baterias e utilizou um sistema de monitoramento para acompanhar o funcionamento do ônibus elétrico em tempo real. Esse estudo, financiado pela CPFL Energia, através do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, objetivou não apenas avaliar os benefícios ambientais dos ônibus elétricos como também contribuir para a formação acadêmica de estudantes.

De acordo com Quarles, Kockelman e Mohamed (2020), incluindo a infraestrutura de carregamento necessária, espera-se que até 2030 os elétricos tornem-se mais competitivos, quando comparados aos ônibus a diesel, especialmente em relação aos seus preços. Por outro lado, avanços tecnológicos estão tornando os ônibus elétricos cada vez mais viáveis. As baterias estão se tornando mais eficientes e menos caras, enquanto a infraestrutura de carregamento está se expandindo com velocidade. Governos ao redor do mundo estão implementando políticas de apoio à eletrificação de frotas de ônibus. Programas de incentivos financeiros, subsídios e regulamentações ambientais mais rigorosas estão impulsionando a adoção de tecnologias de transporte limpas. A pesquisa fornece insights sobre as implicações orçamentárias de eletrificar uma frota de ônibus para energia elétrica. Ainda sobre as barreiras, de forma objetiva podemos organizá-las como:

Alto custo

O preço elevado dos ônibus elétricos é atribuído principalmente aos altos custos de alguns de seus componentes, em especial a bateria, e à produção em menor escala¹⁸. Na América Latina, países como Chile e Colômbia têm enfrentado esses desafios ao implementar frotas de ônibus elétricos. Por exemplo, em Santiago, Chile, o custo elevado das baterias e a

18 - Bakker e Konings, 2018; Lajunen, 2014, conforme informações do Estudo técnico desenvolvido para a SPTrans como parte da iniciativa Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator – Zebra, financiado em 2022 por P4G, Instituto Clima e Sociedade – ICS e Transformative Urban Mobility Initiative – Tumi (Zebra, 2022).

necessidade de importação de componentes contribuem significativamente para o preço final dos veículos. Igualmente, em Bogotá, Colômbia, a produção em menor escala dos ônibus elétricos resulta em custos unitários mais altos, dificultando a competitividade em comparação com os ônibus a diesel.

Baixa autonomia operacional

A autonomia dos ônibus elétricos é frequentemente vista como uma barreira, sendo menor do que a dos veículos com motores de combustão interna equivalentes. Essa autonomia é determinada pelo equilíbrio entre capacidade, peso, volume e custos das baterias. Baterias com menores capacidades podem reduzir os custos e aumentar a eficiência energética devido ao seu menor peso (Lee et al., 2021), conforme informações do estudo técnico desenvolvido para a SPTrans acima mencionado (Zebra, 2022). Todavia, isso deve ser cuidadosamente balanceado com a necessidade operacional de garantir que os ônibus possam completar seus trajetos diários sem necessidade de recargas frequentes. Exemplos na América Latina, como a implementação de ônibus elétricos em Santiago e Bogotá, mostram que estratégias de recarga, como estações de recarga rápida em terminais e durante intervalos programados, são essenciais para mitigar as limitações de autonomia e garantir a viabilidade operacional.

Por outro lado, o custo operacional (redução do consumo) é uma das principais vantagens dos ônibus elétricos a bateria, em comparação com os ônibus convencionais. Seu baixo consumo energético resulta em custos operacionais significativamente inferiores (Feng e Figliozzi, 2013; Hellgren e Jonasson, 2007). Lajunen (2014) destaca que o consumo de energia dos veículos elétricos pode ser até cinco vezes menor do que o consumo equivalente dos ônibus a diesel. O ICCT desenvolveu simulações para algumas rotas de ônibus na capital paulista e as estimativas indicaram que o consumo de energia dos ônibus elétricos a bateria seria equivalente a 28% do consumo dos ônibus a diesel (Eufrásio et al., 2022), também de acordo com informações do estudo técnico desenvolvido para a SPTrans citado anteriormente (Zebra, 2022).

Destacando os fatores que influenciam no consumo energético, estudos voltados para veículos a combustão interna mostram que ele é influenciado por fatores que podem ser agrupados nas seguintes categorias: viagem, clima, veículo, rodovia, tráfego e motorista (Ahn et al., 2002; Zhou, Jin e Wang, 2016), conforme informações do referido estudo técnico desenvolvido para a SPTrans como parte da iniciativa Zebra (2022).

Contratos de longo prazo, sem cláusulas prevendo obrigatoriedade de incorporação de novas tecnologias, metas de redução de emissões de poluentes e parâmetros de qualidade orientados por critérios de emissão zero também reduzem a competitividade dos veículos elétricos e impõem dificuldades à escalabilidade da frota.

O Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras (Ministério das Cida-

des, 2013) aponta que, embora muitos projetos-piloto saiam do papel, eles não evoluem proporcionalmente à demanda pelo serviço e/ou conforme as metas estipuladas pela cidade, dada a robustez do investimento. São Paulo, por exemplo, é o município brasileiro que lidera o ranking com a maior quantidade de ônibus elétricos no país. Esses veículos, contudo, ainda correspondiam a apenas 1,5% da frota total em 2021.

Com a combinação de avanços tecnológicos, apoio governamental e benefícios econômicos e ambientais, a eletrificação das frotas de ônibus está posicionada para ser uma das histórias de sucesso mais significativas em sustentabilidade urbana antes de 2030.

2.3 Alguns exemplos já implementados

Em junho de 2009, a capital paulista sancionou a Lei nº 14.933, conhecida como Lei de Mudanças Climáticas, que instituiu a Política de Mudança do Clima na cidade. A lei estabeleceu diretrizes ambiciosas, incluindo a redução de pelo menos 10% ao ano na quantidade de ônibus movidos a combustíveis fósseis, com a meta de eliminar completamente esses veículos da frota urbana até 2018.

No entanto, essa meta revelou-se irrealista e desafiadora. Apesar dos esforços iniciais, a transição para uma frota de ônibus totalmente livre de combustíveis fósseis enfrentou diversos obstáculos, como a falta de infraestrutura adequada, altos custos de aquisição de ônibus elétricos e a necessidade de um planejamento mais detalhado e sustentado. Como resultado, a implementação plena da lei não foi alcançada dentro do prazo estipulado, refletindo a necessidade de uma abordagem mais pragmática e gradual na transição para tecnologias de transporte mais limpas.

Ocorre que tal propósito não foi alcançado em nenhum ano. O fracasso em cumprir as metas estabelecidas pela Lei de Mudanças Climáticas, aliado à crescente pressão da população e da sociedade civil, levou a Câmara Municipal paulistana a promulgar uma nova legislação. Esse desfecho evidencia a disparidade entre a ambição legislativa e a capacidade de implementação prática, sublinhando a necessidade de políticas mais realistas e de um compromisso mais forte com a infraestrutura e os recursos necessários para uma transição efetiva para um transporte público sustentável.

Essa alteração, em São Paulo, foi realizada por meio da Lei municipal nº 16.802/2018, que estipulou objetivos ambiciosos de redução das emissões de escapamento: 50% para CO₂, 90% para material particulado (MP) e 80% para óxidos de nitrogênio (NOx) em um período de 10 anos, tomando como referência os níveis de 2016. Para um prazo de 20 anos, a lei prevê a eliminação total das emissões de CO₂ e uma redução de 95% nas emissões de NOx e MP. Mas a efetividade dessas metas depende de uma série de fatores críticos que foram subestimados, como o investimento necessário em infraestrutura de recarga, a disponibilidade de tecnologia e os altos custos iniciais associados à transição para veículos mais limpos. A promulgação da nova legislação, embora bem-intencionada, pode novamente falhar em alcançar seus objetivos se não houver um comprometimento real e ações concretas para superar os desafios práticos e financeiros inerentes a essa transição.

TABELA 7

Metas para redução gradual de emissões na Cidade de São Paulo

Lei nº14.933/2009, artigo 50	Redução de, no mínimo, 10% do número de ônibus movidos a combustíveis fósseis ao ano, objetivando a eliminação total em 2018 (meta não cumprida)
Lei nº 16.802/2018 (nova redação do artigo 50, da Lei nº 14.933/2009)	• Eliminação das emissões de escapamento de CO₂ e redução de emissões de NOx e MP em 95% • Instituição do Comfrota-SP (representantes de secretarias municipais, operadores e representantes da sociedade civil) para acompanhar a implementação da lei
Portaria SMT nº 81/2020	Suspensão temporária da aquisição de novos ônibus e permissão de maior idade média da frota devido à pandemia de Covid-19
Programa de Metas 2021-2024	Declaração de intenção de integrar, no mínimo, 2.600 ônibus elétricos para o município até o fim do mandato (declaração na meta 50)

As metas para viabilizar uma redução gradual das emissões de dióxido de carbono (CO₂), de material particulado (MP) e de óxidos de nitrogênio (NOx) ao longo dos anos, com foco na eliminação até 2038, a partir da Lei do Clima (Lei municipal nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018), estão intrinsecamente ligadas ao processo de concessão para a operação de ônibus na cidade de São Paulo. No contexto dessas concessões, a Lei do Clima impõe requisitos ambientais que os operadores de transporte devem atender.

Durante os processos de licitação para concessão de linhas de ônibus, as empresas concorrentes precisam apresentar planos detalhados de como irão adaptar suas frotas para cumprir os objetivos de redução de emissões estabelecidos pela lei. Isso inclui a incorporação de tecnologias mais limpas, como ônibus elétricos ou híbridos, e a implementação de sistemas de gerenciamento de frota que monitorem e minimizem as emissões.

Mesmo com as metas se referindo apenas às emissões de escapamento, a lei determina que a escolha da alternativa tecnológica busque, dentro de custos aceitáveis, a aplicação rigorosa da Lei do Clima. Sublinhe-se que o processo de concessão tem como propósito garantir que os operadores de transporte não apenas cumpram as normas ambientais como também promovam um transporte público mais sustentável e eficiente para maximizar a redução de emissões de origem fóssil em todo o ciclo de vida do combustível ou energia.

Além disso, é precípuo que haja fiscalização contínua e mecanismos de incentivo para garantir que as empresas de transporte estejam alinhadas com os objetivos ambientais a longo prazo.

Dessa maneira, a Lei do Clima não apenas estabelece metas ambientais ambiciosas como também redefine os critérios de concessão de operação de ônibus na cidade de São Paulo, impulsionando

nando uma mudança estrutural no modo como o transporte público é gerido e operado, com um foco claro na sustentabilidade e na melhoria da qualidade do ar urbano. A substituição dos ônibus existentes por aqueles que utilizem tecnologias mais limpas deve ser gradual, à medida que os veículos antigos ultrapassam a idade máxima permitida contratualmente. O quadro a seguir resume a legislação estadual em São Paulo.

TABELA 8

Decreto nº 65.881/2021 (Plano de Ação Climática do Estado de São Paulo – Net Zero 2050)	Adesão do Estado de São Paulo às campanhas Race to Zero e Race to Resilience no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Visa redução das emissões de GEE com neutralização de emissões líquidas até o ano de 2050 e uma melhor capacidade de adaptação aos impactos do aquecimento global.
Lei estadual nº 17.615/2022	Institui o Fundo de Aval para Desenvolvimento da Eficiência Energética no Estado de São Paulo e constitui o Conselho Estadual de Orientação de Eficiência Energética (ratifica protocolo de intenções firmado entre Estado de São Paulo e Distrito Federal e demais unidades da federação para formação do “Consórcio Interestadual sobre o Clima: Brasil Verde”).
Lei estadual nº 16.956, de 21 de março de 2019	Autoriza instituição de uma Política Estadual de Mobilidade Metropolitana, regida pelo disposto em legislação federal, priorizando o transporte público não poluente, o incentivo ao desenvolvimento científico-tecnológico, visando a diminuição de custos ambientais e socioeconômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas, o estímulo ao empreendedorismo, às startups com soluções inovadoras na área da mobilidade urbana, dentre outras disposições.
Decreto estadual nº 58.584/18	Por meio do artigo 3º, regulamenta a Lei estadual nº 14.751/08, que isenta os veículos movidos a propulsão elétrica do cumprimento das restrições de circulação em decorrência do programa denominado “rodízio”, vigente na Cidade de São Paulo.
Decreto estadual nº 58.107, de 5 de junho de 2012	Institui a Estratégia para o Desenvolvimento Sustentável do Estado de São Paulo 2020, visando estabelecer uma agenda para o desenvolvimento sustentável do Estado de São Paulo, apresentando metas setoriais, concedendo benefícios fiscais aos veículos menos poluentes e que se utilizem da eletrificação (redução de 25% para 12% da alíquota nas operações de energia elétrica, quando utilizada no transporte público eletrificado), como também reduzir em 20% a emissão de dióxido de carbono, conforme estabelecido na Política Estadual de Mudanças Climáticas.
Lei estadual nº 13.296/2008	Concede alíquota diferenciada para cálculo do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) para veículos elétricos.

2.4 Experiências internacionais

2.4.1 Colômbia

A Colômbia se destaca na implementação da mobilidade elétrica na área de transportes coletivos, possuindo uma das maiores frotas de ônibus elétricos da América Latina. São 1.486 ônibus somente na cidade de Bogotá (E-BUS RADAR¹⁹).

Esse estado atual de eletrificação no país teve como origem diversas normas gerais, direcionadas a diminuir as emissões de gases poluentes e de efeito estufa, que atuam e atuaram de forma indireta na transição para o ônibus elétrico. Tais normas se originaram a partir do comprometimento com as diretrizes do Acordo de Paris e da Agenda 2030. Elas constituem duas leis: a Lei nº 1.931/2018, em que são dispostos os regramentos para gestão da mudança climática, assim como estabelece o CNPES 3918 (Conselho Nacional de Política Econômica e Social), por meio do qual foram definidas metas e estratégias para transição; e a Lei nº 1.955/2019, que deu origem ao PND (Plano Nacional de Desenvolvimento), normatizando um marco regulatório e uma política integral para fomentar a transição para a mobilidade zero ou baixa emissão.

Já em termos de atuação direta, implementou-se a denominada Estratégia Nacional da Mobilidade Elétrica (2018-2022), fundamentada na Lei nº 1.964/2019, por meio da qual o Congresso colombiano determinou que o Ministério dos Transportes e do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável iniciariam o desenho de políticas públicas para a promoção da eletrificação dos transportes em toda a Colômbia.

Essas políticas foram centradas em incentivos ao uso de veículos elétricos ou zero emissão, como desconto no valor do Imposto de Propriedade veicular, tarifas diferenciadas de estacionamento e isenções tributárias.

A Lei federal nº 1.964/2019 ainda determinou que o governo colombiano teria até 2025 para, em conjunto com os municípios, cumprir um mínimo de 30% de suas frotas em veículos elétricos, havendo uma determinação específica para os ônibus elétricos, que aumenta as porcentagens de substituição a cada ano, a partir de 2025 – inicia em 10%, chegando a 100% em 2035.

Essa legislação ainda normatizou as estações de recarga, de maneira que, até 2022, cada município deveria ter, no mínimo, cinco estações de recarga rápida, seguindo o modelo de PPPs, com garantia das empresas distribuidoras de energia elétrica, inclusive disciplinando que o Ministério de Minas e Energia regulamentaria as condições necessárias para que os postos de combustíveis pudessem ampliar suas ofertas de serviços para incluir pontos de recarga de veículos elétricos.

Essa lei federal foi tão decisiva para a Colômbia que se partiu de um cenário de cerca de 300 ônibus elétricos em 2019 para os atuais 1.600. A estratégia nacional do país se baseou em quatro pilares:

19 - Disponível em: <<https://www.ebusradar.org/>>.

- * Ações gerais de incentivo à adoção de tecnologias de zero e/ou baixa emissão;
- * Medidas específicas de desenvolvimento do mercado;
- * Fortalecimento do marco regulatório, político e institucional;
- * Desenvolvimento de infraestrutura de recarga antecipando o aumento da demanda dos veículos elétricos.

Basicamente, estas são as normas que estão regulamentando a transição do transporte público para a eletromobilidade:

TABELA 9

Leis e atos normativos federais	Escopo
Lei nº 1.931/2018	Estabelece diretrizes para a gestão da mudança climática.
Conpes 3918	Definição de Metas e estratégia para cumprimento dos ODS (Agenda 2030).
Lei nº 1.955/2019	Originou o PND (Plano Nacional de Desenvolvimento), normatizando um marco regulatório e uma política integral para fomentar a transição para a mobilidade de zero ou baixa emissão.
Lei nº 1.964/2019	Criou a Estratégia Nacional da Mobilidade Elétrica (Enme).
Lei nº 1083/2006	Lei de ordenamento territorial, que prioriza modos alternativos de transporte, bem como transporte público coletivo limpo.
Resolução 182.087, Ministério de Minas e Energia e Ministério do Meio Ambiente	Estabelece limites de enxofre na composição do diesel.
Resolução 2.254/2017, Ministério do Meio Ambiente	Estabelece parâmetros para qualidade do ar.
Decreto 2.051/2019, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação	Estabelece redução das alíquotas de importação para carros elétricos (0%) e movidos a gás natural (5%).
Decretos 1564; 2205 e 2143/2017 + Resoluções Meio Ambiente 1988/2000 e 463/2018	Regulam a Reforma Tributária de 2016, concedendo incentivos tributários para o transporte elétrico, incluindo-o nos bens gravados com tarifa de 5% de IVA (Imposto de Valor Agregado), chegando a casos de isenção total, a depender do tipo de veículo elétrico.
Resolução 41286/2016, Ministério de Minas e Energia	Adoção do Plano de Ação Indicativo de Eficiência Energética para o desenvolvimento do Programa de Uso Racional e Eficiência de Energia 2017-2022.

2.4.2 Chile

O Chile também desenvolveu uma Estratégia Nacional da Mobilidade Elétrica (2017, atualizada em 2021), coordenada pelos Ministérios de Energia, Transportes e Comunicação e Meio Ambiente. Essa política visa a articulação dos esforços públicos e privados com o intuito de acelerar a introdução de tecnologias limpas e eficientes no transporte, reconhecendo e legitimando a necessidade da construção de uma governança multissetorial e multidisciplinar para realizar a transição energética no setor. Sua determinação é para a melhoria da qualidade do ar e a modernização veicular, com o cumprimento das metas e compromissos assumidos pelo Chile com as mudanças climáticas (Política Nacional de Energia 2050, de 2015, aprovada pelo decreto supremo nº 148), concentrando os esforços nos processos licitatórios, nos quais a eletrificação foi utilizada como elemento de competitividade.

O início dessa política se deu com a substituição de seis operadores para o sistema Transantiago com o escopo de renovar 100% da frota de transporte público e 40% do particular, baseando-se, para tanto, no Plano de Descontaminação Atmosférica Santiago Respira. Os primeiros ônibus elétricos do Chile foram colocados em operação com os operadores que estavam no sistema; em um segundo momento foi realizada a licitação para acelerar a transição, e agora já há uma segunda rodada de licitação para outra parte do sistema.

Conforme consta do documento Estratégia Nacional, 1/3 do consumo energético do Chile é proveniente do setor de transportes, sendo que 98% dele é movido a combustão interna.

Importante ressaltar que o Chile não produz veículos automotores; ele é, na realidade, um grande importador. O país também não está inserido no mercado produtivo de baterias. É, entretanto, um grande produtor de lítio – 1/3 da produção global –, essencial para as baterias.

A “estratégia nacional” chilena está focada em cinco objetivos:

- * Regulação que desenvolva o setor energético e ambiental de mobilidade;
- * Desenvolvimento do transporte público;
- * Formação de capital humano;
- * Formação de um mercado autossuficiente;
- * Geração de espaços de conhecimento e difusão de informações para que os stakeholders possam tomar decisões sobre eletromobilidade.

A partir desses propósitos foram desenvolvidos eixos estratégicos e linhas de ação. Houve um esforço em estabelecer um arcabouço normativo para veicular diretivas sobre emissões, segurança, manutenção e operação dos veículos elétricos. Também foram desenvolvidas políticas públicas baseadas em subsidiar e incentivar o mercado, redução de impostos e subsídios diretos para a compra de veículos elétricos e a construção de eletropostos. Em janeiro de 2023, o Chile adquiriu mais 214 ônibus elétricos, totalizando 2.480 desses veículos em sua frota (37% da frota total). Abaixo, podemos vislumbrar as principais estratégias utilizadas e ainda em desenvolvimento.

TABELA 10

Estratégia / Regulamentação	Escopo
Estratégia Nacional de Eletromobilidade	Até 2035, todos os veículos leves e médios, transporte público (ônibus, táxis e táxis compartilhados) e maquinário móvel grande comercializados no país serão de emissão zero. Até 2040 para maquinaria móvel pequena, e até 2045, para todo o transporte de carga e ônibus intermunicipais.
Nova Regulação para Requisitos Estruturais e de Segurança	Estabelece requisitos técnicos e de segurança aplicáveis a veículos elétricos e híbridos, baseando-se em normas da UE, EUA e Coreia. Tornou-se obrigatória 12 meses após sua publicação (2017).
Lei de Eficiência Energética e Metas de Veículos de Emissão Zero	Inclui padrões de economia de combustível para veículos leves, médios e pesados, incentivos fiscais para veículos de emissão zero, interoperabilidade dos sistemas de recarga para veículos elétricos e designação do hidrogênio como combustível oficial. Metas de vendas de veículos de emissão zero até 2045.
Plano de Prevenção e Descontaminação da Poluição Atmosférica	No que se refere à região metropolitana de Santiago, estabelece marco regulatório para padrões de eficiência energética para a frota de veículos, visando reduzir consumo de combustível e emissões poluentes. Incentivos para carros híbridos e elétricos.

3

Possíveis stakeholders do ecossistema da mobilidade elétrica

O caminho decisório para adoção de um transporte público de baixa emissão – elétrico – passa pela coordenação das esferas pública e privada, envolvendo a necessidade de uma institucionalização da decisão de eletrificar, que, por sua vez, depende de um modelo de governança alinhado com uma agenda sustentável, ou seja, uma coordenação necessária para alcançar determinados resultados (Consoni et al., 2018).

Por outro lado, há preocupações com a segurança e a proteção energética, problemas estruturais e impactos econômicos nas indústrias automotivas e de energia. Os interesses de diferentes grupos precisam ser reconhecidos e os impactos positivos e negativos têm de ser cuidadosamente avaliados (Auvinen et al., 2016).

O múltiplo envolvimento de diversos atores representa, na atualidade, uma oportunidade e um desafio. Consiste na compreensiva participação dos diferentes grupos envolvidos, tais como: i) Município, região metropolitana, estado e governo federal; ii) Operadores públicos e/ou privados; iii) Fabricantes dos ônibus elétricos; iv) Fabricantes dos carregadores; v) Companhias de distribuição de energia elétrica; vi) Empresas de infraestrutura; vii) Fornecedores de softwares e hardwares; viii) Instituições financeiras; ix) Passageiros e população; x) Especialistas em transporte de passageiros; xi) Organizações de apoio ao transporte; e xii) Universidades.

A articulação de atores no setor de ônibus para transporte público tem gerado tanto oportunidades quanto barreiras nos níveis federal e municipal. A coordenação entre as esferas federais, estaduais e municipais é fundamental para desenvolver uma legislação que promova a implementação da mobilidade elétrica nos transportes coletivos por ônibus. Todavia, essa articulação enfrenta desafios significativos (BID, 2023). Os prestadores de serviços de transporte, que atualmente são responsáveis pela aquisição das frotas e pelo contato direto com os passageiros, encontram-se numa posição difícil. A transição para ônibus elétricos depende fortemente das políticas de mudança vigentes no município ou das leis federais, criando barreiras substanciais para a substituição das frotas.

A fim de atingir com sucesso a transição para as frotas elétricas devem ser desenvolvidos mecanismos de articulação e governança, sobretudo associados a questões institucionais e financeiras, juntamente com questões políticas. Em âmbito estadual e municipal, uma parcela de novos modelos de contrato de concessão também procura incluir metas e incentivos para a eletromobidade. Nesse contexto é importante destacar:

Desarticulação entre níveis de governo

A falta de uma coordenação eficaz entre os diferentes níveis de governo resulta em políticas fragmentadas, que dificultam a implementação homogênea de ônibus elétricos;

Falta de incentivos econômicos

Sem incentivos financeiros adequados, como subsídios ou financiamentos favoráveis, os prestadores de serviços de transporte podem achar economicamente inviável a transição para ônibus elétricos;

Infraestrutura insuficiente

A infraestrutura necessária para suportar uma frota elétrica, como estações de carregamento e oficinas especializadas, ainda é insuficiente em muitas áreas, representando um obstáculo significativo;

Legislação desatualizada

Muitas leis e regulamentos não acompanham o ritmo das inovações tecnológicas e das necessidades emergentes de mobilidade elétrica, criando um ambiente regulatório desfavorável.

Diante de tal cenário, torna-se urgente a necessidade de investigar formas eficazes de coordenação entre os níveis federal, estadual e municipal para desenvolver uma legislação coesa e favorável à mobilidade elétrica. É preciso: a) Estudar os tipos de incentivos econômicos que poderiam facilitar a transição para ônibus elétricos, incluindo análises de custo-benefício de subsídios, isenções fiscais e programas de financiamento; b) Pesquisar as melhores práticas para o desenvolvimento rápido e eficiente de infraestrutura de suporte para frotas elétricas, incluindo a distribuição geográfica otimizada de estações de carregamento; c) Avaliar as leis e regulamentos atuais e propor adaptações que acompanhem as inovações tecnológicas e as necessidades emergentes de mobilidade elétrica.

3.1 Concessionárias de transmissão e de distribuição e geradora de energia

A estruturação de um projeto de eletromobidade exige a colaboração e o engajamento de diversos setores, e as empresas de energia desempenham um papel fundamental nesse processo. Essas empresas são vitais para a viabilização da mobilidade elétrica no Brasil, fornecendo a energia necessária para o funcionamento dos veículos elétricos e estabelecendo a infraestrutura de recarga essencial para suportar a nova tecnologia. Tendo isso em vista, algumas reflexões são imperativas: **Como as empresas de energia podem superar as limitações atuais e investir de maneira mais eficaz na infraestrutura de recarga para veículos elétricos, especialmente ônibus?**

Quais são as estratégias mais viáveis para integrar fontes de energia renovável com a infraestrutura de recarga, garantindo um fornecimento de energia sustentável e confiável? De que maneira as empresas de energia podem colaborar com outros setores, como o automotivo e o de transporte público, para acelerar a adoção de veículos elétricos? Como os novos modelos de negócios podem ser estruturados para aproveitar as oportunidades emergentes no campo da mobilidade elétrica, equilibrando inovação tecnológica e viabilidade econômica?

Segundo o *Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras* – Volume II (Ministério das Cidades, 2013b), também é importante identificar a presença de universidades que tenham realizado pesquisas sobre o tema da mobilidade elétrica. Essas instituições fornecem evidências e documentos técnicos relevantes para a implementação de projetos dessa natureza e, frequentemente, estão vinculadas à realidade do município ou estado onde se encontram baseadas.

As empresas nacionais de energia vêm se destacando na arena da mobilidade elétrica através de suas iniciativas em projetos de demonstração. Esses projetos são cruciais para a pesquisa e a compreensão das tecnologias de veículos elétricos, suas aplicações práticas e as implicações para o sistema de energia. Eles permitem que as empresas adquiram conhecimento técnico e operacional, avaliem a viabilidade econômica e identifiquem os desafios e oportunidades associados à eletromobilidade.

Um dos motores principais dessas iniciativas é o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), regulamentado pela Lei nº 9991/2000. Esse programa obriga as empresas de energia a investir em pesquisa e desenvolvimento, o que justifica os esforços contínuos no campo da mobilidade elétrica. Os projetos financiados por ele permitem que as empresas explorem novas tecnologias, desenvolvam infraestrutura de recarga e testem novos modelos de negócios que podem emergir com a expansão da mobilidade elétrica.

Apesar dos avanços significativos, as empresas de distribuição de energia ainda enfrentam limitações quando se trata de investir em ativos de transporte, como a infraestrutura de recarga para ônibus elétricos. A falta de investimentos diretos nesse tipo de ativo revela uma lacuna que precisa ser preenchida para que a transição para a mobilidade elétrica ocorra de modo eficaz. A viabilidade dessa infraestrutura é crucial para garantir a operabilidade contínua e eficiente dos veículos elétricos em larga escala.

As empresas de energia têm um papel estratégico na criação de novos modelos de negócios que podem surgir com a mobilidade elétrica. Isso inclui o desenvolvimento de soluções para a gestão da demanda de energia, tarifação dinâmica, serviços de recarga rápida e integração com fontes de energia renovável. Além disso, as empresas podem explorar Parcerias Público-Privadas para facilitar a construção e manutenção da infraestrutura necessária, diversificando assim suas fontes de receita e contribuindo para a sustentabilidade do sistema de transporte.

3.2 Concessionários e operadores de mobilidade

A operação eficiente do sistema de transporte público, em especial no contexto de uma transição para ônibus elétricos, exige a manutenção dos serviços de acordo com parâmetros rigoro-

sos estabelecidos em editais e contratos. Esses parâmetros são não apenas técnicos e operacionais como também ambientais, sociais e econômicos. Cumprir essas regras é essencial para garantir que a transição para um sistema de mobilidade elétrica ocorra de forma sustentável e sem interrupções nos serviços oferecidos à população.

Os operadores de mobilidade precisam se adaptar às novas exigências, como a redução de emissão de poluentes, que são frequentemente incorporadas em contratos como metas obrigatórias. A capacidade de cumprir essas metas sem comprometer a qualidade do serviço exige um planejamento detalhado e uma gestão eficiente dos recursos.

A transição para uma frota de ônibus elétricos envolve a aquisição de novos veículos e a construção ou reforma de garagens e pontos de recarga. Viabilizar os recursos necessários para essas aquisições dentro dos prazos compatíveis com os cronogramas de redução de poluentes é um desafio significativo. Os operadores de mobilidade devem garantir que os investimentos em infraestrutura sejam realizados de maneira eficaz para suportar a nova tecnologia.

Esse processo demanda uma coordenação estreita com fabricantes de veículos, fornecedores de tecnologia e autoridades reguladoras. A implantação de infraestrutura de recarga adequada e bem distribuída é essencial para garantir a operabilidade dos ônibus elétricos e a continuidade dos serviços.

A constituição de garantias ou parcerias com investidores representa um elemento crítico para a obtenção dos financiamentos necessários à transição para a mobilidade elétrica. Operadores de mobilidade precisam buscar formas inovadoras de financiamento, incluindo PPPs e colaborações com o setor privado. Essas parcerias podem oferecer os recursos financeiros e técnicos necessários para implementar as mudanças de modo eficiente.

Além disso, a estruturação de garantias financeiras adequadas pode atrair investidores, reduzindo os riscos associados aos projetos de mobilidade elétrica. A confiança dos investidores é essencial para assegurar a disponibilidade de capital em condições favoráveis.

A viabilização de operações de leasing para as baterias dos ônibus elétricos e renovação de frotas representa uma solução prática para mitigar os altos custos iniciais de aquisição. O leasing de baterias permite que os operadores de mobilidade distribuam os custos ao longo do tempo, melhorando a viabilidade econômica da transição.

Modelos de leasing também podem incluir manutenção e substituição de baterias, o que é vantajoso para garantir a eficiência e a longevidade dos veículos. Esse tipo de arranjo pode ser especialmente atraente para operadores que enfrentam restrições orçamentárias, permitindo-lhes acessar a tecnologia de ponta sem comprometer a estabilidade financeira.

Tal contexto abre espaço para importantes oportunidades de pesquisa e estudo, com questões do tipo: Como os operadores de mobilidade podem garantir a adesão contínua às exigências ambientais e sociais, mantendo ao mesmo tempo a viabilidade econômica dos serviços? Quais estratégias podem ser adotadas para acelerar a construção de infraestrutura de recarga de maneira sustentável e econômica? De que maneira as Parcerias Público-Privadas podem ser estruturadas para maximizar os benefícios tanto para operadores quanto para a

sociedade? Como os modelos de leasing para baterias podem ser otimizados para reduzir custos e melhorar a eficiência operacional a longo prazo?

Como parte do diagnóstico, será fundamental identificar as demandas atuais dos operadores, os problemas e dinâmicas financeiras em relação à remuneração do serviço e os custos e receitas pela venda e compra de ônibus a diesel.

3.3 Administração direta

Na administração pública, a estruturação de projetos de eletromobilidade aponta algumas questões interessantes: **Como garantir a coordenação efetiva entre os diversos níveis de governo e instituições de fomento para maximizar os recursos disponíveis para projetos de eletromobilidade? Quais mecanismos podem ser implementados para assegurar a transparência e a eficiência na gestão dos fundos garantidores e dos recursos orçamentários? De que forma a definição das tarifas pode equilibrar a necessidade de sustentabilidade financeira com a acessibilidade para a população? Quais são as melhores práticas para estruturar Parcerias Público-Privadas que promovam a inovação e a eficiência nos projetos de eletromobilidade?**

A estruturação de um projeto dessa natureza é um processo complexo, que envolve múltiplas etapas e a coordenação de diversos atores. Na administração pública direta, isso implica a elaboração de um plano detalhado que contemple a transição para veículos elétricos, incluindo a aquisição de novas frotas e a instalação da infraestrutura necessária. Esse plano deve considerar aspectos técnicos, financeiros e legais, garantindo que todas as fases do projeto estejam alinhadas com os objetivos de sustentabilidade e eficiência do transporte público.

Tal atividade do poder público local ou do poder concedente pode ser compartilhada em uma estrutura de governança que contaria com:

- ✳ **Empresas públicas de transporte de passageiros;**
- ✳ **Agências municipais;**
- ✳ **Agências estaduais;**
- ✳ **Agências federais.**

A gestão do sistema de eletromobilidade exige uma abordagem integrada que combine monitoramento contínuo, manutenção preventiva e corretiva, além de um uso eficiente de recursos. A administração pública deve estabelecer mecanismos de controle e avaliação de desempenho para garantir que os serviços de transporte atendam às expectativas da população e às normas estabelecidas. Isso inclui a formação de equipes especializadas e a implementação de sistemas de gestão inteligentes que utilizem dados em tempo real para otimizar a operação dos veículos elétricos.

A interoperabilidade e, principalmente, os padrões de carregamento são questões-chave que os governos vêm procurando abordar e que se refletem tanto nos investimentos quanto nas

intervenções da indústria. Atualmente, existem quatro principais tecnologias competindo nesse espaço (Plug-in, Pantógrafo, Indução e Carregamento em rota), no entanto existem outras, emergentes, e métodos inovadores que estão sendo explorados – Carregamento Rápido em Corrente Contínua (DC Fast Charging), Troca de Baterias (Battery Swapping), Carregamento de alta tensão (High Voltage Charging), Carregamento através de Smart Grids e Carregamento por hidrogênio (células de combustível).

A viabilização dos recursos necessários ao investimento em eletromobilidade envolve tanto fontes orçamentárias quanto extraorçamentárias. A administração pública deve alocar recursos dentro do orçamento municipal para suportar os custos iniciais de implementação. Adicionalmente, é crucial buscar alternativas de financiamento extraorçamentário, como PPPs, emissão de títulos verdes e acesso a fundos internacionais destinados a projetos de sustentabilidade.

O governo federal dispõe de poder e da responsabilidade de orientar de maneira regulamentar os projetos em nível estadual e municipal. Leis sobre mudanças climáticas em nível federal são de suma importância para que as cidades estruturam projetos que visem contribuir para a realização das metas de emissões em nível nacional. O governo federal pode emitir títulos verdes para agilizar os investimentos em projetos de baixa ou zero emissão. E ainda: o financiamento de projetos de eletromobilidade por meio de green bonds (títulos verdes) no Brasil pode ser impulsionado pelo decreto federal nº 10.387/2020; ele está voltado para projetos de infraestrutura com benefícios sociais e ambientais.

A articulação com instituições de fomento e outros níveis de governo é fundamental para obter linhas de financiamento compatíveis com os limites e condições municipais, conforme estabelecido na Lei de Responsabilidade Fiscal (LRF). Essa colaboração pode envolver a negociação de condições favoráveis de crédito, a obtenção de subsídios e a coordenação de esforços para maximizar os recursos disponíveis. A administração pública deve trabalhar de modo proativo para identificar e acessar essas oportunidades, garantindo que os projetos de eletromobilidade sejam financeiramente viáveis e sustentáveis a longo prazo.

O Padrão de Qualidade BRT (Bus Rapid Transit) publicado em 2016 pelo ITDP (ITDP, 2016) aponta que as prefeituras estão encarregadas de administrar a alocação do orçamento e as estratégias para reduzir as emissões do setor de transporte na cidade. Com a aprovação da Câmara e dos órgãos de controle, o Executivo municipal poderá criar fundos de garantia para a alocação de recursos para investimentos em projetos que reduzam o impacto das mudanças climáticas. Ele também deve definir as principais características das concessões de serviços de transporte público, bem como o valor das tarifas do transporte.

A autoridade de transporte fornece diretrizes, concede e fiscaliza os serviços públicos em sua área de atuação. Ela desempenha um papel fundamental na exigência de padrões e indicadores mínimos para a prestação do serviço e na definição adequada das condições das concessões aos operadores.

A definição dos valores das tarifas é um aspecto essencial para assegurar o equilíbrio econômico e financeiro dos contratos de eletromobilidade. As tarifas devem ser estabelecidas de forma a cobrir os custos operacionais, incluindo a manutenção dos veículos elétricos e a infraestrutura de recarga, ao mesmo tempo que permaneçam acessíveis à população. A administração pública

deve realizar estudos de viabilidade econômica para determinar tarifas justas e sustentáveis, evitando déficits financeiros que possam comprometer a operação do sistema.

Além do setor de transporte, é fundamental que entidades municipais ligadas à indústria, energia, saúde e meio ambiente estejam envolvidas na implementação de projetos de mobilidade. É imprescindível identificar todas as entidades mencionadas a fim de compreender a dinâmica de interação entre elas.

A constituição de garantias e a estruturação de um fundo garantidor são medidas importantes para proporcionar segurança financeira aos concessionários de serviços de eletromobilidade. Esse fundo pode ser utilizado para cobrir eventuais inadimplências ou falhas operacionais, garantindo a continuidade dos serviços. A administração pública deve definir as regras e condições para a utilização do fundo, assegurando que ele seja gerido de maneira transparente e eficiente.

A programação de recursos orçamentários deve contemplar os subsídios necessários para sustentar a operação do sistema de eletromobilidade a curto, médio e longo prazo. Isso inclui a amortização dos investimentos iniciais, o custeio das operações de leasing de baterias e outros componentes e a cobertura dos custos operacionais contínuos. A administração pública deve planejar e reservar esses recursos de modo estratégico, garantindo a sustentabilidade financeira do projeto ao longo do tempo.

3.4 Bancos públicos, bancos privados e organismos multilaterais de crédito

A transição para a eletromobilidade envolve altos custos iniciais, tanto na aquisição de ônibus elétricos quanto na implantação da infraestrutura de recarga. Dada a magnitude desses investimentos, os bancos públicos, privados e organismos multilaterais de crédito desempenham um papel-chave no financiamento e na viabilização desses projetos. A criação de estímulos financeiros eficazes é crucial para atrair a participação dessas instituições, ajudando a mitigar as limitações fiscais dos municípios e fornecendo melhores condições de garantia aos operadores de transporte.

Nesse sentido é preciso avaliar: **Como as políticas públicas podem ser estruturadas para maximizar os incentivos financeiros e reduzir os riscos para os bancos que financiam projetos de eletromobilidade? Quais são as melhores práticas internacionais em financiamento de mobilidade elétrica que poderiam ser adaptadas para o contexto brasileiro? Como os bancos podem colaborar com governos e empresas para criar modelos de financiamento que sejam sustentáveis e acessíveis a longo prazo? De que maneira os bancos internacionais podem contribuir para a transição energética no Brasil e quais parcerias estratégicas poderiam ser adotadas?**

Para que a transição para a mobilidade elétrica seja bem-sucedida, é necessário estruturar estímulos que tornem os projetos atraentes para os bancos. Isso pode incluir subsídios, garantias de empréstimos e incentivos fiscais que reduzam os riscos percebidos pelos investidores. A participação ativa dos bancos públicos, privados e organismos multilaterais é crucial para fornecer os recursos necessários e promover a confiança no mercado de eletromobilidade.

As instituições financeiras têm uma capacidade única de alavancar projetos que mitiguem os impactos das mudanças climáticas nas cidades. Bancos de desenvolvimento, como o BNDES no Brasil, oferecem linhas de financiamento com condições mais favoráveis para projetos verdes, incluindo taxas de juros mais baixas e períodos de carência mais longos em comparação com os dos bancos comerciais tradicionais. Esses termos facilitam a implementação de projetos de eletromobilidade, tornando-os mais acessíveis e financeiramente viáveis para os municípios.

Muitos bancos comerciais dependem dos recursos liberados pelo BNDES para oferecer empréstimos de alto porte. Mas as condições favoráveis do Brasil como país produtor de veículos automotores e o crescente interesse das cidades pela transição energética têm atraído bancos comerciais a desenvolver novas linhas de financiamento específicas para a eletromobilidade. Essa tendência é um indicativo positivo de que o mercado está se ajustando para suportar a demanda por veículos elétricos e infraestrutura de recarga.

Simultaneamente, bancos internacionais estão olhando para o Brasil como uma oportunidade de oferecer financiamento, aproveitando o crescente compromisso do país com a sustentabilidade e a redução de emissões de carbono. Esse interesse internacional pode trazer novos fluxos de capital e expertise para apoiar a transição energética no setor de transporte.

Além do BNDES, organismos multilaterais como o Banco de Desenvolvimento da América Latina (CAF) e o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) também oferecem financiamentos vantajosos para iniciativas sustentáveis. Esses financiamentos promovem investimentos em infraestrutura verde, energia renovável e transporte público sustentável, essenciais para a transição para a eletromobilidade.

O Banco Mundial, o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e o Banco de Desenvolvimento da América Latina (CAF) vêm desempenhando um papel crucial no fomento da eletromobilidade na América Latina, oferecendo financiamento e assistência técnica e promovendo políticas públicas favoráveis.

O Banco Mundial tem sido um ator importante no financiamento de projetos de eletromobilidade em diversas nações. Em 2019, a instituição lançou a iniciativa “Accelerating Battery Storage for Development”²⁰, com um fundo inicial de US\$ 1 bilhão para apoiar o armazenamento de energia em países em desenvolvimento, o que é fundamental para a infraestrutura de recarga de veículos elétricos. Além disso, o Banco Mundial tem colaborado com cidades como São Paulo e Santiago para integrar ônibus elétricos em suas frotas de transporte público, fornecendo tanto financiamento quanto suporte técnico para a implementação desses projetos.

Os investimentos serão feitos nas seguintes áreas:

Usinas híbridas de energia solar fotovoltaica (PV) + armazenamento para fornecimento confiável de eletricidade e deslocamento de diesel/óleo combustível pesado, transferindo parte da energia produzida durante o dia para o pico de uso noturno;

20-Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/topic/energy/brief/battery-storage-program-brief>.

Serviços de rede para concessionárias verticalmente integradas (serviços auxiliares, incluindo controle de frequência, controle de tensão ou capacidade de black start²¹) por meio de baterias autônomas que podem atuar como ativos da rede elétrica;

Minirredes em áreas de baixo acesso, incluindo pequenos estados insulares.

O BID tem sido um promotor ativo da eletromobilidade na região. Em 2020, lançou a Green Bond Transparency Platform²² para aumentar a transparência e a eficiência dos investimentos em projetos verdes, incluindo eletromobilidade. Em 2021, o banco aprovou um empréstimo de R\$ 400 milhões para o Brasil, destinado a melhorar a sustentabilidade do transporte público, incluindo a aquisição de ônibus elétricos. O BID também vem apoiando projetos semelhantes em outros países, com recursos para cidades latino-americanas como Buenos Aires e Bogotá, ajudando na transição para frotas de transporte público mais sustentáveis.

O CAF tem se concentrado em financiar e apoiar projetos de eletromobilidade que contribuam para a descarbonização do transporte urbano. Em 2021, aprovou um financiamento de R\$ 200 milhões para o Chile, especificamente para a expansão de sua frota de ônibus elétricos em Santiago, uma das cidades líderes em eletromobilidade na região. Além disso, o CAF tem promovido a criação de políticas públicas favoráveis à eletromobilidade, oferecendo consultoria técnica e apoio na elaboração de regulamentos e incentivos fiscais para veículos elétricos.

3.5 Fabricantes de ônibus elétricos

A ainda incipiente, entretanto, em ascensão, quantidade de fabricantes nacionais de ônibus elétricos e baterias no Brasil resulta em uma significativa dependência de produtos importados. Isso cria uma competição intensa entre os fabricantes internacionais e os poucos nacionais, na qual os primeiros muitas vezes podem contar com economias de escala e experiência tecnológica que lhes conferem uma vantagem competitiva. A falta de um robusto setor nacional de fabricação não apenas limita as opções disponíveis no mercado como também afeta a capacidade do país de desenvolver uma cadeia de valor local para a eletromobilidade.

Promover a produção em larga escala através de contratos governamentais para renovação de frotas de transporte público pode ajudar os fabricantes nacionais a alcançarem economias de escala, reduzindo os custos unitários dos ônibus elétricos.

Ressalte-se também que a influência dos fabricantes sobre os modelos de financiamento é alta devido ao fato de que eles podem participar do modelo de negócio, a depender do modelo de ajuste estabelecido pelo poder concedente, atuando como financiadores do ônibus e/ou da bateria, ou, ainda, oferecer um leasing da bateria ao operador ou ao poder público concedente (prefeitura).

21 - A capacidade de black start refere-se à habilidade de uma usina elétrica de iniciar a geração de energia independentemente, sem precisar de uma fonte externa de energia elétrica. Essa capacidade é essencial para a recuperação de uma rede elétrica após um apagão completo.

22 - Disponível em: <<https://www.greenbondtransparency.com/pt/>>.

Os fabricantes de ônibus elétricos desempenham um papel-chave na promoção da eletromobidade no Brasil e em outros países da América Latina, contribuindo significativamente para a transição para um transporte público mais sustentável e eficiente.

No continente latino-americano atuam:

BYD

A empresa chinesa é uma das maiores fabricantes de ônibus elétricos na América Latina. Em 2021, tinha mais de 1.000 ônibus elétricos operando em diversas cidades da região, incluindo Santiago, Bogotá, e São Paulo. A BYD também estabeleceu fábricas locais, como a de Campinas (SP), para atender à crescente demanda regional;

Yutong

Esse outro importante fabricante chinês forneceu ônibus elétricos para várias cidades latino-americanas. Em 2021, entregou 100 ônibus elétricos para Santiago, como parte de um projeto maior para eletrificar o transporte público na cidade;

Trolebuses de Quito

A capital equatoriana tem uma longa história de uso de trólebus elétricos. A modernização e a expansão da frota de trólebus, com a aquisição de novos modelos elétricos, têm sido uma prioridade para a cidade;

Eletra

A empresa brasileira é uma das principais fabricantes de ônibus elétricos no país. Em 2021, a Eletra anunciou planos para expandir sua linha de produção de ônibus elétricos e híbridos. A empresa tem fornecido ônibus elétricos para várias cidades brasileiras, incluindo São Paulo, que conta com uma crescente frota de ônibus elétricos;

Marcopolo

A tradicional fabricante brasileira de ônibus também entrou no mercado de ônibus elétricos. Em parceria com empresas de tecnologia, a Marcopolo tem desenvolvido e comercializado modelos de ônibus elétricos para o mercado interno;

Volare

Essa outra importante fabricante nacional lançou seu primeiro modelo de ônibus elétrico em 2020, visando atender a demanda crescente por veículos sustentáveis no transporte público;

Volvo

Empresa sueca já atuante no mercado brasileiro de ônibus para transporte público, tem fornecido veículos do tipo padron para testes em cidades como São Paulo e Curitiba;

SHC Ankai

Empresa chinesa especializada em produção de ônibus elétrico, chegou ao Brasil em 2024 trazendo diversidade nas tipologias de veículos disponíveis;

Higer Bus

Fabricante chinesa e exportadora de ônibus, alcançou market share de 10% em seu país de origem transacionando veículos com 136 nações. Dentre os modelos disponibilizados para transporte público, encontram-se veículos articulados, padron e miniônibus.

3.6 Observações gerais sobre os agentes promotores da eletromobilidade

A eletrificação da frota de ônibus no Brasil tem sido impulsionada pela colaboração de diversos agentes, incluindo governos, fabricantes, financiadores e sociedade civil. O governo federal, através de políticas públicas e incentivos fiscais, vem criando um ambiente favorável para a transição. Programas como já citado Rota 2030 oferecem incentivos para o desenvolvimento de tecnologias limpas.

Fabricantes nacionais e internacionais estão investindo em produção local e inovação tecnológica para atender à crescente demanda por ônibus elétricos. Bancos de desenvolvimento, como o BNDES, disponibilizam linhas de financiamento com condições favoráveis para a aquisição de veículos elétricos e infraestrutura de recarga, promovendo ainda incentivos para desenvolvimento do parque industrial brasileiro.

Além disso, a sociedade civil e organizações não governamentais desempenham um papel essencial ao pressionar por políticas mais verdes e promover a conscientização sobre os benefícios ambientais e de saúde pública da eletrificação.

Esses esforços conjuntos estão criando um ecossistema robusto que facilita a transição para um transporte público mais sustentável e eficiente no Brasil. Com relação a esse aspecto, falta ainda uma articulação comercial e estatal que favoreça o financiamento da frota elétrica e da infraestrutura de recarga, sobretudo com condições preferenciais e alocação eficiente dos riscos e responsabilidades.

Em 2013, o já mencionado *Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras* (Ministério das Cidades, 2013) apontou que a maioria das cidades brasileiras depende fortemente de subsídios para superar os custos adicionais associados à aquisição de ônibus elétricos, os quais podem ser provenientes de fontes locais, nacionais ou internacionais. Esses subsídios podem assumir diferentes formatos, como recursos financeiros diretos, doações de bens (por exemplo, terrenos) ou isenções fiscais. A dependência excessiva de tais subsídios, porém, revela uma fragilidade estrutural na capacidade de financiamento dos municípios e na sustentabilidade econômica das iniciativas de eletromobilidade.

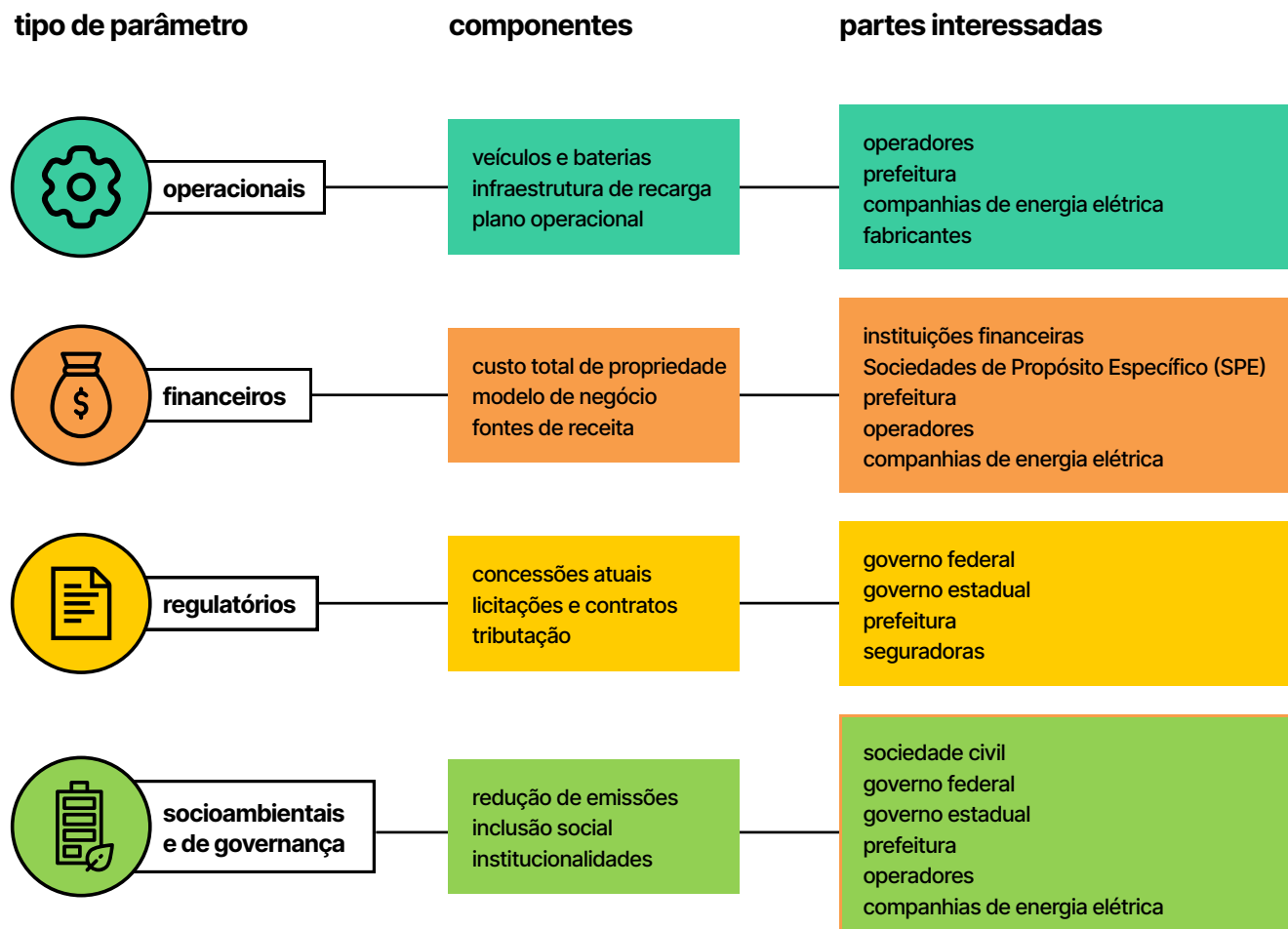
Ademais, é importante destacar que, de acordo com as características específicas de alguns municípios, contribuições na forma de terrenos e medidas fiscais preferenciais poderiam ser particularmente úteis. Essas abordagens alternativas não apenas mitigariam a necessidade de desembolsos elevados em dinheiro como também promoveriam uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis. Todavia, a implementação dessas medidas exige uma coordenação robusta entre diferentes níveis de governo e uma análise criteriosa das necessidades e capacidades locais para evitar a perpetuação de desigualdades e garantir uma transição equitativa para uma mobilidade sustentável.

As empresas de energia possuem o potencial para fornecer serviços de recarga de ônibus elétricos para os operadores de transporte. Contudo, as regulamentações atuais impedem, ou dificultam, que as companhias de distribuição integrem os carregadores em seus balanços. Essa limitação regulatória cria um obstáculo significativo para o desenvolvimento de uma infraestrutura de recarga eficiente e abrangente, necessária para suportar a expansão da frota de ônibus elétricos.

A fim de que a transição para a eletromobilidade seja eficaz, é imprescindível que as instituições governamentais não se limitem apenas ao desenvolvimento de incentivos fiscais para a aquisição de veículos elétricos. Se as empresas de energia não forem capacitadas para implementar a infraestrutura de recarga, esses incentivos terão um impacto limitado. A falta de uma rede de recarga robusta compromete a operabilidade dos veículos elétricos e, conseqüentemente, a eficácia dos incentivos fiscais.

Na figura abaixo, podemos verificar as necessidades que devem ser atendidas considerando cada perfil de problemas ou questões, como as regulatórias, as técnicas e operacionais, as financeiras e institucionais.

FIGURA 15



Fonte: Elaborado a partir de Ministério das Cidades, 2013.

Desse modo, à luz das considerações apresentadas, é fundamental refletir criticamente sobre os elementos essenciais para fomentar investimentos no sistema de transmissão de eletricidade. Esse sistema desempenha um papel vital na entrega eficiente e segura de energia elétrica das fontes de geração aos consumidores finais. Entretanto, enfrenta desafios significativos, como a necessidade de modernização da infraestrutura, a integração de fontes de energia renovável e a resiliência a eventos climáticos extremos.

A isenção de impostos de importação pode ser vista como uma estratégia para reduzir custos e incentivar a adoção de novas tecnologias, mas é necessário ponderar os impactos sobre a indústria local e a dependência externa de componentes, por exemplo. A redução de impostos operacionais visa aliviar a carga financeira sobre as empresas, porém pode implicar perda de receita para o governo, exigindo uma análise cuidadosa sobre o equilíbrio fiscal.

Além disso, a definição de incentivos para que os operadores mantenham percentuais mínimos da frota elétrica é uma medida que, apesar de promover a sustentabilidade, deve ser discutida quanto à sua viabilidade prática e aos desafios de implementação. As garantias de pagamento são fundamentais para atrair investidores, todavia necessitam de um compromisso sólido por parte do governo para assegurar a confiança do mercado.

Essas medidas exigem uma articulação eficaz por parte do governo federal, que deve atuar como mediador e facilitador, impulsionando o consenso entre os diversos agentes do mercado de energia e transmissão. Contudo, é imperativo que esse consenso não se limite aos interesses econômicos imediatos; ele deve considerar também os impactos sociais e ambientais a longo prazo, assegurando um desenvolvimento sustentável e inclusivo para o setor energético.

4

Aspectos técnicos da eletromobilidade

Muitos organismos multilaterais oferecem assistência técnica para apoiar a preparação e execução de projetos. Essa assistência pode incluir a elaboração de estudos de viabilidade, capacitação de funcionários municipais e suporte na estruturação de projetos que atendam aos requisitos dos financiadores internacionais.

A promoção de sustentabilidade no transporte público é uma questão que envolve, dentre diversos eixos de atuação, a escolha de uma tecnologia que alinhe as condições de operação às metas de impacto ambiental determinadas pelo poder público. Tratando-se da substituição de ônibus de combustão interna, diversas opções baseadas no consumo de energia elétrica são atualmente operacionalizáveis (Verbrugge et al., 2021).

A introdução de ônibus elétricos a bateria corresponde a uma alternativa que atende plenamente aos objetivos de descarbonização do transporte público, uma vez que são zero emissão durante a operação. Embora sejam com frequência tratados como escolha tecnológica alternativa, os veículos híbridos não são capazes de reduzir significativamente a produção de GEE e deveriam ser adotados como um passo intermediário para alcançar um cenário de descarbonização completa (Mahmoud et al., 2016).

Já os trólebus, veículos rodoviários de tração puramente elétrica, são considerados uma alternativa livre da emissão de gases de efeito estufa durante a operação, recebendo energia continuamente por meio de cabos aéreos energizados (catenária). No entanto, fatores como alto custo de implantação/manutenção da rede elétrica aérea, além da intrusão visual na paisagem, são desvantagens quando se compara a operação de trólebus com outras tecnologias (Brunton, 2000). Outro fator relevante na questão operacional consiste na limitação imposta à circulação de um trólebus, considerando sua impossibilidade de se mover fora da rede elétrica aérea instalada.

Diante disso, tomamos para análise, neste *Guia*, o ônibus elétrico a bateria (BEB) como alternativa para proporcionar uma transição energética efetiva. Assim, a eletrificação do transporte público

sobre rodas constitui uma mudança de paradigma no ambiente urbano por demandar novos elementos na rede de transporte. Tais elementos, que correspondem aos veículos elétricos em si e à infraestrutura de recarga que os suporta, também introduzem uma nova dinâmica na operação do transporte público, aumentando a complexidade de um processo de transição energética no setor. Nesse contexto, um planejamento técnico-operacional é fundamental para garantir que a modelagem da rede seja adequada às características previstas para os serviços de transporte, viabilizando os investimentos necessários e garantindo a resiliência do sistema na nova conjuntura operacional.

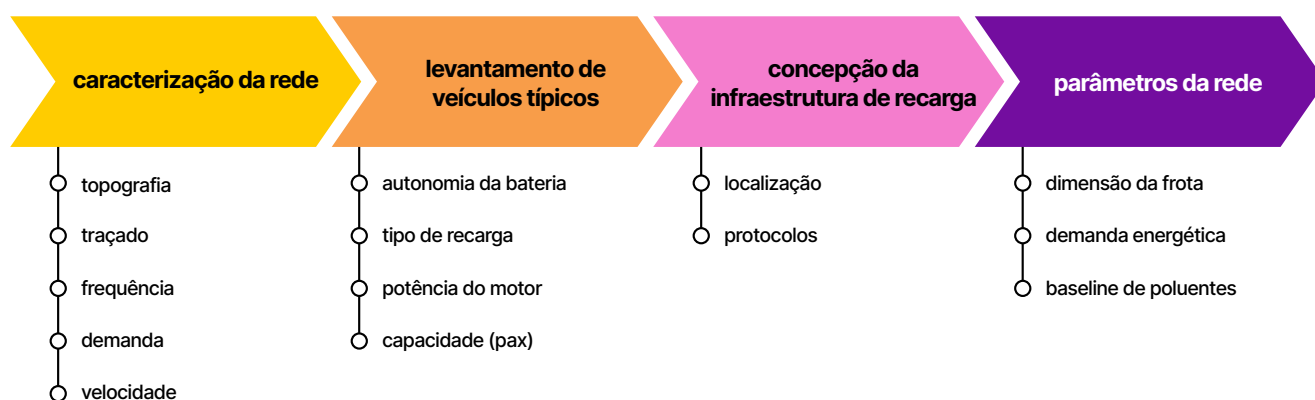
Deve-se abordar também a tomada de decisão sobre os novos elementos da rede de transporte quando são implementados veículos elétricos a bateria, considerando as implicações que essa escolha traz em relação aos parâmetros do sistema e, conseqüentemente, sobre os contratos de concessão de serviços que o operacionalizam. Dessa maneira, constitui-se uma visão sequencial e integrada sobre a implementação – ainda que faseada – de frotas de ônibus elétricos a bateria, considerando a amplitude e as complexidades de redes de transporte urbanas.

Diante das complexidades associadas à descarbonização de frotas de ônibus, é importante que o planejamento da rede no novo cenário seja embasado em circunstâncias locais, fazendo com que decisões a respeito do processo de transição energética e envolvimento de novos atores sejam tomadas considerando custos, riscos e impactos (potenciais) da intervenção.

Recomenda-se que os conjuntos de dados (requisitos mínimos) a serem utilizados nessa etapa descrevam os serviços de ônibus já existentes, topografia das vias, histórico da operação e infraestrutura disponível para suporte da operação de ônibus.

FIGURA 16

Estruturação técnico-operacional da eletromobilidade



4.1 Caracterização da rede de transporte

Nos últimos 80 anos, o planejamento urbano focou predominantemente a mobilidade de veículos particulares, relegando a segundo plano as necessidades de mobilidade humana e a qualidade de vida. A infraestrutura urbana foi amplamente moldada para acomodar carros, com a

construção de largas avenidas, vastos estacionamentos e a expansão das áreas suburbanas.

A priorização dos automóveis levou à criação de espaços urbanos fragmentados e desconectados, nos quais os pedestres e ciclistas têm pouca prioridade. Isso dificulta a mobilidade ativa e a utilização do transporte público. O uso intensivo de veículos particulares contribui significativamente para a poluição do ar, aumentando a emissão de GEE e de poluentes nocivos à saúde humana. A qualidade do ar em muitas cidades tornou-se crítica, afetando a saúde pública e a qualidade de vida dos moradores.

O aumento do número de carros nas ruas resultou em congestionamentos crônicos, tornando o transporte urbano ineficiente e aumentando o tempo de deslocamento para todos, incluindo usuários de transporte público. A necessidade de espaço para estradas e estacionamentos reduziu significativamente as áreas verdes e espaços públicos, essenciais para o lazer, recreação e bem-estar mental dos cidadãos.

A dependência do automóvel exacerbou a desigualdade de acesso aos serviços urbanos. As pessoas que não possuem carro, incluindo muitas das classes mais baixas, enfrentam dificuldades de mobilidade, que limitam suas oportunidades de emprego, educação e lazer.

A promoção do transporte público sustentável é frequentemente construída sobre um sistema de transporte já existente no âmbito urbano. Mas é evidente que essa rede há de passar por algumas reformulações a fim de operar livre das tecnologias baseadas em combustão. A implantação das tecnologias necessárias para descarbonizar o transporte público rodoviário demanda, assim, investimentos estratégicos para equilibrar um novo paradigma ao contexto presente. O uso de dados, nesse cenário, é particularmente relevante, pois pode proporcionar embasamento (empírico) às decisões em nível de planejamento e operação (UITP, 2022).

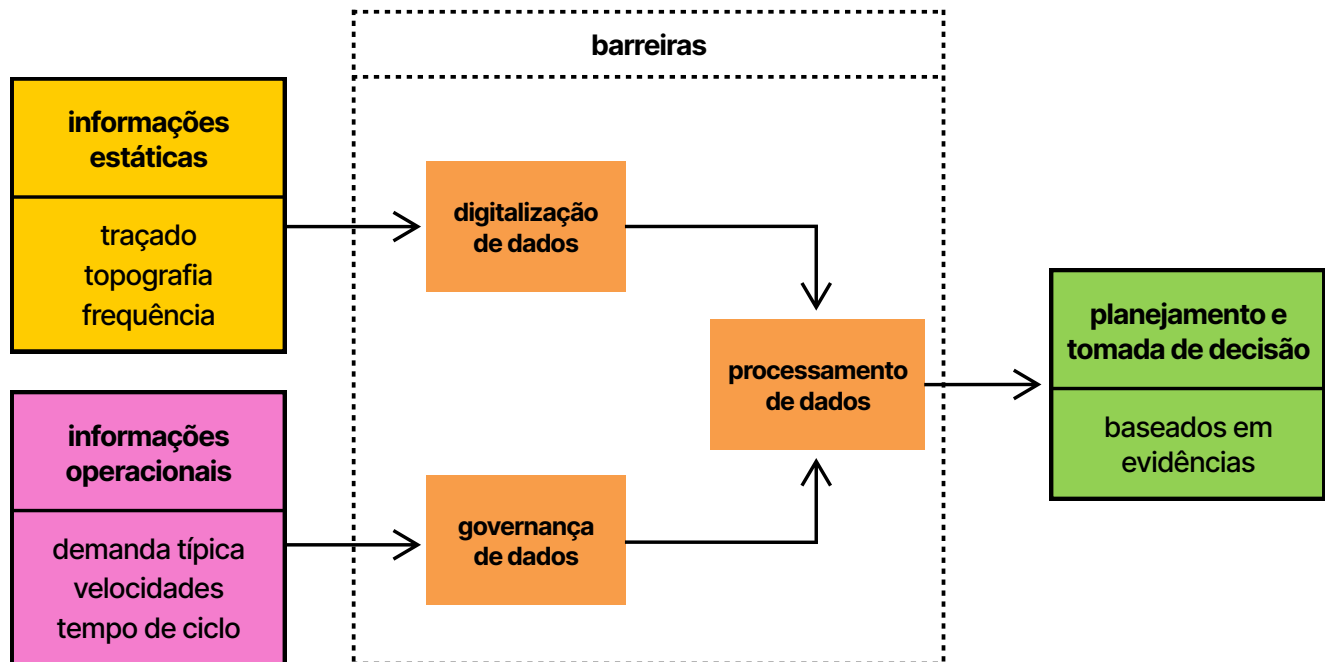
As redes de transporte público, principalmente os ônibus, devem ser expandidas e modernizadas. Isso inclui a criação de faixas exclusivas para ônibus, sistemas de ônibus rápidos (BRT) e a integração com outros modos de transporte, como trens e bicicletas. Investir em infraestrutura para pedestres e ciclistas, como calçadas largas, ciclovias e áreas de pedestres, é crucial para promover meios de transporte mais saudáveis e sustentáveis.

A digitalização do planejamento e da operação do transporte público configura-se como um fator relevante para impulsionar serviços de maior eficiência e otimizados, o que se reflete diretamente no custo do sistema e na redução nas emissões (diretas e indiretas) de poluentes (Davidsson et al., 2016). Aplicações de grandes volumes de dados (big data), principalmente quando são georreferenciados, podem ser observadas em diversas etapas da constituição de uma política pública, incluindo sua formulação até avaliação (Liu e Dijk, 2022). Análises que subsidiam formulação e tomada de decisão dos gestores são particularmente importantes por permitirem comparação de cenários considerando diferentes arranjos de investimento e operação (Soomauroo, Blechinger e Creutzig, 2023).

Para tanto, é adequado que as práticas de planejamento e operação de transportes estejam apoiadas sobre os recursos digitais atualmente disponíveis. Nesse sentido, documentações que incluem informações geográficas (em especial topografia da região, traçados de linhas, garagens e paradas) e operacionais (sobretudo horários de partida e frequências esperadas) da

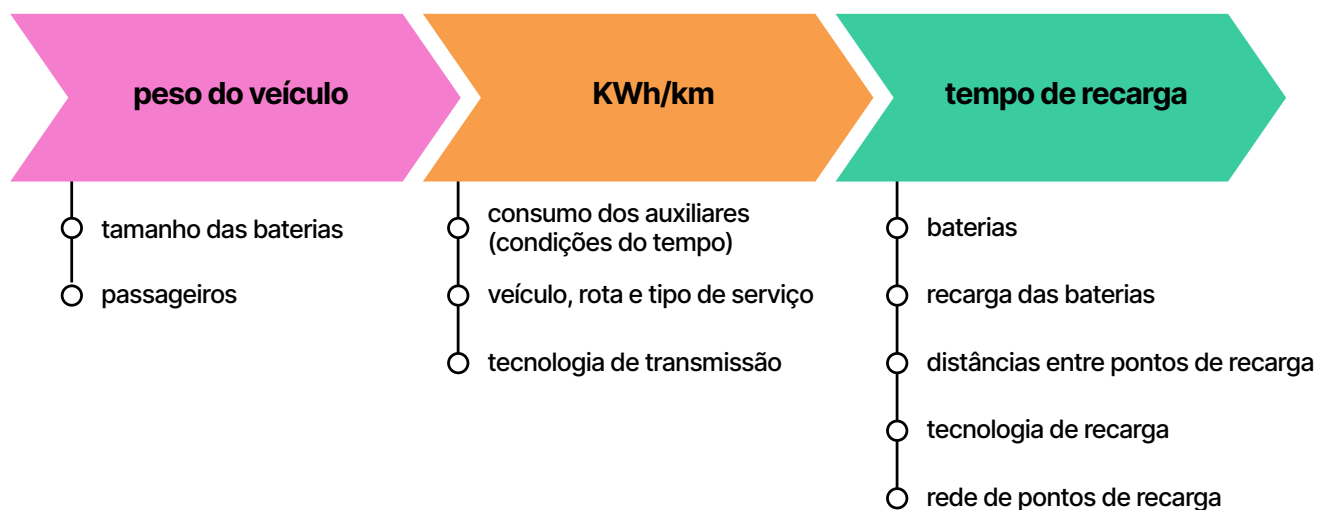
rede são relevantes para dimensionar adequadamente o sistema. Tendo em vista a existência de telemetria em veículos operantes no transporte público, a coleta e o processamento de informações relativas à operação dos veículos podem ser facilitados considerando estruturas adequadas de recursos computacionais e governança de dados.

FIGURA 17



Fonte: Os autores.

FIGURA 18



Fonte: Os autores.

A requalificação dos espaços urbanos é essencial para criar cidades mais habitáveis e sustentáveis. Adotar um pensamento holístico para a rede de mobilidade, que integre diferentes meios de transporte, é fundamental para essa transformação. Priorizar o transporte ativo, como caminhar e andar de bicicleta, e o transporte coletivo, como ônibus e trens, é um passo essencial para melhorar a qualidade de vida urbana.

Essa abordagem integrada deve focar a criação de infraestrutura que facilite a transição entre modos de transporte, promovendo a conectividade e a eficiência. Por exemplo, pontos de recarga para veículos elétricos podem ser estrategicamente localizados próximos a estações de transporte coletivo, incentivando o uso combinado de bicicletas elétricas, ônibus elétricos e trens.

A tecnologia dos veículos elétricos desempenha um papel vital nessa nova configuração. A adoção de ônibus elétricos e outros veículos de baixo carbono reduz significativamente as emissões de poluentes, contribuindo para um ambiente urbano mais limpo e saudável. Além disso, a requalificação de espaços públicos para incluir mais áreas verdes e parques não apenas promove a interação social como também suporta a infraestrutura necessária para uma mobilidade sustentável.

Em suma, a integração de diferentes meios de transporte, com ênfase no transporte ativo e coletivo, junto com o avanço da tecnologia elétrica, conduz a uma mobilidade urbana de baixo carbono. Essa abordagem holística não só melhora a qualidade do ar e reduz o congestionamento como também promove o bem-estar dos cidadãos, criando cidades mais verdes e conectadas.

4.1.1 Programação operacional

Considerando as limitações próprias das baterias, é relevante que a programação operacional das linhas seja bem descrita para que a alocação dos veículos resulte adequada à autonomia prevista para cada um deles. Assim, a caracterização da quantidade de viagens por linha e suas extensões contribui para a concepção de um planejamento operacional eficiente. Essas informações podem ser estruturadas de diversas maneiras, incluindo planilhas e outros tipos de documento.

Para realização dessa análise, destaca-se o uso da Especificação Geral sobre Feeds de Transporte Público (GTFS, na sigla em inglês) como fonte de informação a respeito dos serviços já existentes e operantes. Isso facilita a sistematização de análises e o controle sobre alterações na rede de transportes ao longo do tempo. O GTFS é uma forma padronizada de descrever redes de transporte público, incluindo detalhes como trajetos, pontos de parada e horários programados para diversos modais presentes em uma cidade, incluindo ônibus.

Tal estrutura foi proposta pelo Google e tem se consolidado nos últimos anos como o formato aberto mais utilizado para documentação e versionamento de serviços de transporte. O objetivo fundamental desse padrão é estabelecer uma linguagem comum que permita a interoperabilidade entre diferentes sistemas de transporte. Além disso, os feeds GTFS podem ser utilizados pelas agências de transporte público para compartilharem suas informações em um formato acessível, promovendo a transparência e a abertura de dados a respeito do transporte público urbano.

4.1.2 Topografia

No contexto do planejamento de redes de transporte, é importante considerar, em nível de projeto, que existem diferenças relevantes a respeito da performance de veículos usuais, movidos a partir da combustão de diesel, e de elétricos a bateria. No primeiro caso, sabe-se que não existem grandes restrições para circulação quando se analisa a topografia como barreira a ser transposta no trajeto. Entretanto, as especificações (mecânicas) dos veículos elétricos indicam que o conjunto motor/bateria ainda enfrenta um desafio tecnológico importante, pois a menor tração gerada e a maior massa em circulação podem inviabilizar a circulação do veículo em trechos de auge expressivo.

Embora o GTFS seja uma fonte sistematizada de dados sobre a rede de transporte, incluindo informações espaciais e operacionais dos serviços em seu conteúdo, não há qualquer indicativo em sua especificação que contemple também a documentação de topografia das rotas. Nesse sentido, é relevante que, em especial nas localidades nas quais a geografia é particularmente irregular e acidentada, seja levantado o perfil topográfico das vias. Levantamentos de dados como sensoriamento remoto ou mensurações obtidas via satélite (disponibilizados em formato aberto pelo projeto OpenTopography²³) são fontes úteis para compor análises de viabilidade e de condições operacionais dos veículos frente à topografia.

Em áreas com topografia desafiadora, a capacidade de carga dos ônibus pode ser afetada. Por exemplo, subir colinas íngremes com um ônibus cheio de passageiros pode ser mais difícil, exigindo mais potência e resultando em maior consumo de energia. A topografia desempenha um papel significativo no desempenho de ônibus elétricos, influenciando diretamente vários aspectos operacionais e técnicos:

Subidas

Em terrenos montanhosos ou inclinados, os ônibus elétricos precisam de mais energia para subir, o que pode resultar em um maior consumo de bateria. Isso reduz a autonomia do veículo, exigindo recargas mais frequentes ou baterias de maior capacidade;

Descidas

Embora descidas possam facilitar a regeneração de energia através do sistema de frenagem regenerativa, a quantidade recuperada raramente compensa na totalidade o consumo extra necessário para as subidas.

As baterias podem sofrer mais desgaste em terrenos acidentados devido ao esforço adicional exigido durante as subidas. Isso pode levar a uma redução na vida útil das baterias e na eficiência geral do veículo.

A topografia influencia ainda diretamente o planejamento das rotas. Quando elas têm muitas elevações ou declives, pode ser preciso revalidá-las para garantir que os ônibus elétricos tenham condições de operar eficientemente. Isso pode incluir a necessidade de estações de

23 - Disponível em: <<https://opentopography.org/>>.

recarga adicionais em pontos estratégicos ao longo da rota.

Em terrenos acidentados, o sistema de frenagem dos ônibus elétricos é mais exigido, sobretudo em descidas longas e íngremes. A frenagem regenerativa pode ajudar a reduzir o desgaste dos freios tradicionais, mas pode não ser suficiente para lidar com descidas extremas.

4.1.3 Condições de tráfego

Dados relativos à operação dos veículos podem ser encarados como ponto de partida para caracterizar como o sistema funciona na prática. Além da demanda, um parâmetro influente sobre o dimensionamento da oferta em linhas de ônibus consiste no tempo de ciclo praticado em uma rota, isto é, o tempo de percurso do veículo no trajeto programado. Embora esse parâmetro possa ser estimado em função da extensão total da linha, sua mensuração informa com mais assertividade as condições reais de circulação, o que produz dimensionamentos e alocações de frota mais racionalizados ao contexto operacional da rota.

Ademais, a análise da dinâmica de velocidades dos veículos é relevante para identificar ineficiências que o tráfego pode gerar à operação do veículo. Conforme destacam Vepsäläinen et al. (2019) e Wang et al. (2020), a taxa de consumo de energia do veículo é afetada não só por características do veículo e da rota como também pela eficiência de condução. Na prática, isso significa que o consumo de energia do veículo está vinculado ao tempo que ele passa em aceleração, que é especialmente representativo quando se observam tráfego misto (sem priorização do transporte público) e baixas velocidades operacionais.

Nesse contexto, análises podem ser desenvolvidas a partir da Localização Automática de Veículos (AVL, na sigla em inglês), que se refere a sistemas nos quais a tecnologia GPS é utilizada para monitorar a localização de veículos. Esse sistema consiste em um hardware embarcado e conectado a um sistema central de consolidação dos dados da frota, responsável por gerar o histórico de deslocamento dos veículos monitorados. Dessa maneira, a AVL fornece informações em tempo real dos veículos, podendo também incluir dados adicionais, como velocidade (instantânea), status do motor e consumo de combustível, entre outros.

Essas informações podem, pois, ser utilizadas tanto em uma etapa inicial de planejamento da substituição de frota (caracterizando e dimensionando a operação a partir dos dados coletados), quanto em estágio de monitoramento operacional, sendo relevante para identificar disrupções na dinâmica dos veículos e aumentar a eficiência das alocações propostas para a frota.

4.1.4 Garagens

As garagens de ônibus são imóveis cujo propósito contempla administração, abastecimento, manutenção e estacionamento da frota de veículos que opera em uma rede de transporte. O mapeamento desses locais é relevante para entender em maior profundidade a dinâmica de circulação dos veículos na cidade, que é composta (primariamente) do serviço especificado em contrato, entretanto também envolve a execução de deslocamentos fora de serviço (em geral denominada de quilometragem “morta” ou “ociosa”). Considerando as restrições de autonomia que a capacidade da bateria de um veículo elétrico impõe, analisar a dinâmica total

da frota é um fator de peso para garantir a operação do sistema conforme planejado.

É importante destacar que os modelos usuais de concessão de operação de transportes tratam a garagem como um passivo do concessionário. Na prática, isso implica que a posse do imóvel está sob responsabilidade de quem executa o serviço, removendo o ente público de sua gestão desse tópico. No contexto da eletromobilidade, as propostas de modelo de negócio indicam que as garagens também podem ser objeto de contratação por parte do concessionário, fazendo com que essas localidades se transformem, por exemplo, em um investimento para entes que proveem infraestrutura e/ou serviços de recarga. Outro mecanismo para viabilizar a infraestrutura de recarga consiste na disponibilização pelo próprio poder público das instalações necessárias para tanto, que tendem a funcionar de modo compartilhado entre os operadores (como mostram as experiências de Salvador e São José dos Campos, por exemplo).

Tendo em vista que a implantação de serviços de recarga pode ser feita sob diversos modelos de contratação, é relevante mapear os locais já utilizados na operação (e aqueles que podem vir a ser), calculando principalmente a dimensão de cada terreno. A partir de então, é possível estimar a disposição e a capacidade (máxima) de instalação de infraestrutura de recarga em diversos pontos da rede.

A localização da garagem de ônibus é decisiva para a eficiência do carregamento dos ônibus elétricos, e deve ser cuidadosamente planejada em relação à disponibilidade e à capacidade da infraestrutura elétrica.

Garagens localizadas próximas a subestações elétricas podem se beneficiar de maior disponibilidade de energia e de uma infraestrutura de distribuição mais robusta. Isso pode facilitar a instalação de estações de carregamento com capacidade suficiente para atender a toda a frota. A capacidade da rede elétrica local deve ser suficiente para suportar a demanda adicional gerada pelo carregamento simultâneo de vários ônibus elétricos. Em áreas onde a infraestrutura elétrica é limitada, pode ser necessário investir em atualizações ou melhorias na rede.

Em lugares nos quais a capacidade da rede elétrica seja insuficiente, a instalação de sistemas de armazenamento de energia, como baterias de grande escala, pode ser uma solução. Esses sistemas podem armazenar energia durante períodos de baixa demanda e fornecê-la para o carregamento dos ônibus durante a noite ou em horários de pico. É importante considerar os horários de pico de consumo de energia na área da garagem. Carregar ônibus durante esses períodos pode ser mais caro devido às tarifas de eletricidade mais altas, e é possível ainda que sobrecarregue a rede. Planejar o carregamento durante horários de menor demanda pode reduzir custos e aliviar a pressão sobre a infraestrutura elétrica.

A instalação de uma infraestrutura de carregamento eficiente é essencial. Isso inclui escolher o tipo certo de carregadores (rápidos ou lentos) e garantir que haja pontos de carregamento suficientes para atender à demanda da frota. Integrar fontes de energia renovável, como painéis solares instalados na garagem, pode complementar a disponibilidade de energia e reduzir a dependência da rede elétrica. Essa providência também contribui para a sustentabilidade ambiental da operação.

A localização da garagem deve ser integrada ao planejamento urbano para minimizar a distância entre ela e as rotas operacionais. Isso reduz o tempo e a energia gastos em viagens vazias (sem passageiros) entre a garagem e o início das rotas. A garagem, por sua vez, deve ser projetada com flexibilidade para permitir expansões futuras da infraestrutura de carregamento, à medida que a frota de ônibus elétricos cresça. Isso inclui considerar a capacidade elétrica necessária para suportar um aumento na quantidade de ônibus.

4.2 Ônibus para transporte de passageiros

Os novos elementos na rede de transporte, baseados em veículos de tração elétrica destinados ao sistema de transporte e classificados como ônibus pelo Código de Trânsito Brasileiro – CTB são caracterizados pelos tipos definidos a seguir:

TABELA 11

Tipo de ônibus	PBT mín. (t)	Comprimento total (m)	Portas (qtde.)	Passageiros sentados (média)	Área reservada para cadeira de rodas	Área de passageiros em pé (m ²)	Capacidade total (média)
Miniônibus	9	8,6 a 9,0	2	20 (ref 8,6m)	01	3,40	35
Midiônibus	14	9,6 a 11,5	3	25 (ref 9,6m) 33 (ref 11,2m)	01 01	4,70 5,70	54 68
Básico	16	11,5 a 12,5	3	35 (ref 12,5m)	01	6,40	74
Padron	16	12,5 a 15,0	4 5	32 (13,2m) 38 (15,0m)	01 01	9,40 11,80	87 110
Articulado	26	18,2 a 23,0	6	37 (ref 18,5m) 54 (ref 23,0m)	01 01	15,20 19,80	129 174
Biarticulado	36	≤27,0	6	53 (ref 27,1m)	01	24,00	198

Os níveis máximos de ruído emitidos, medidos externamente conforme procedimentos definidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – Conama, devem ser: i) 75 decibéis (dB) para o veículo estacionado com todos os equipamentos auxiliares em funcionamento e ii) 80 dB para o veículo em movimento.

Os níveis máximos que serão permitidos, medidos a uma altura de 1.200 mm acima do centro da face superior de qualquer assento, com as portas e janelas fechadas, são: i) 70 dB para o veículo estacionado com todos os equipamentos auxiliares em funcionamento e ii) 75 dB para o veículo com máxima aceleração do repouso à velocidade máxima, em pavimento de asfalto de boa qualidade.

Os critérios estabelecidos pelas normas devem ser seguidos rigorosamente em todos os momentos. Tanto as estruturas da carroceria quanto as do chassi ou do monobloco devem ser projetadas de acordo com as especificações tais como as prescritas na ABNT NBR 9079 e na ABNT NBR 15570. Os veículos devem ser dimensionados para suportar também as seguintes cargas e solicitações:

- a) Cargas dinâmicas advindas do sistema coletor corrente;
- b) Carga estática do conjunto de baterias do sistema autônomo;
- c) Carga estática do conjunto de baterias de tração;
- d) Carga estática do conjunto de ar-condicionado.

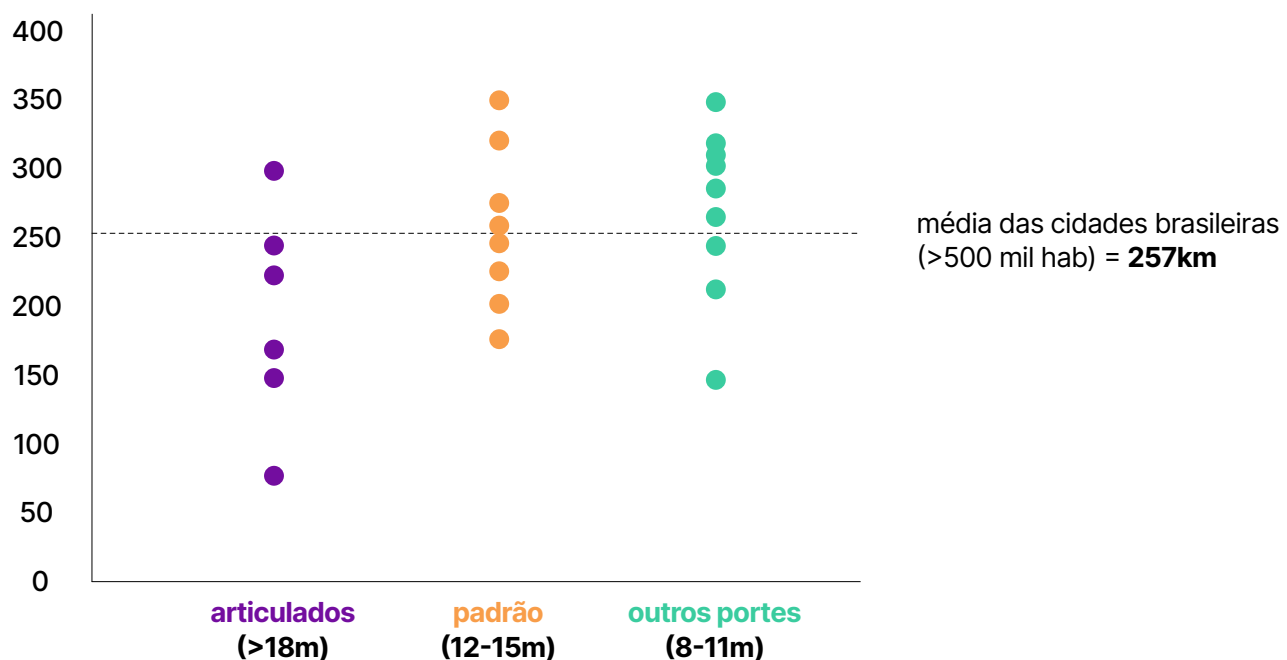
Quanto à dimensão da frota, tradicionalmente é calculada em função da demanda (considerando em especial a dos períodos de pico) e do tempo de ciclo em uma linha (que, por sua vez, deve levar em conta seu comprimento e as velocidades ao longo do trecho). No contexto da eletromobilidade, é necessário incluir uma nova condição no dimensionamento: a autonomia da bateria na rota sob análise.

A capacidade da bateria e o tempo necessário para recarga fazem com que a dinâmica e os procedimentos de operação dos veículos elétricos sejam diferentes do que se pratica hoje. Os protocolos de recarga definidos a priori e a localização da infraestrutura para isso são também informações relevantes quando se estima o tempo necessário para reabastecer o veículo. Dessa forma, é possível planejar e estruturar de maneira mais eficiente os blocos e despachos de veículos em serviço.

FIGURA 19

Autonomia dos ônibus (com A/C) em comparação ao percurso médio diário

Nota: considera 27 dos 32 modelos ofertados no levantamento



Fonte: Adaptado de WRI (2023).

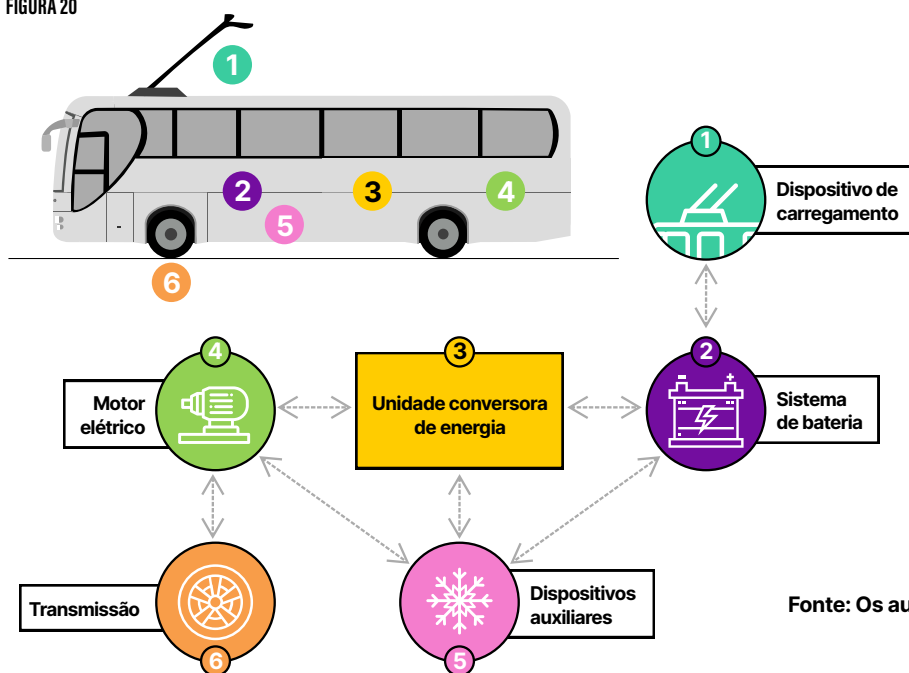
Destaca-se ainda que outras condições operacionais são passíveis de consideração no dimensionamento de uma frota eletrificada, como a tentativa de minimizar quilometragem fora de serviço ou maximizar o compartilhamento entre serviços geridos por um mesmo concessionário. A estratégia de dimensionamento da frota deve ser pautada, portanto, pelo contexto do concessionário e pelas especificações de contrato.

4.2.1 Ônibus elétrico a bateria

Esse veículo caracteriza-se por ser totalmente operado com tração elétrica, gerada a partir da carga armazenada na bateria para impulsionar o motor. Para tanto, tem-se os seguintes componentes (Verbrugge et al., 2021):

- * Sistema de bateria;
- * Motor elétrico (EM), que converte a energia elétrica em energia mecânica para movimentar as rodas;
- * Conversor eletrônico de potência (PEC), que regula o fluxo de energia do sistema de bateria para o EM, e vice-versa (no caso de frenagem regenerativa);
- * Sistema de transmissão, que envia a energia para as rodas com o propósito de movimentar o ônibus elétrico;
- * Interface de carregamento, que pode ser conectada à infraestrutura de recarga apropriada e, então, carregar a bateria com energia da rede elétrica;
- * Sistemas auxiliares, responsáveis pela operação de dispositivos eletrônicos (portas, luzes e limpadores, entre outros), pelo conforto térmico dos passageiros (sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado) e pela regulação térmica dos componentes do veículo.

FIGURA 20



Fonte: Os autores.

4.2.2 Bateria

As baterias de íon lítio são vistas como as principais soluções para a operação do setor de transporte em geral, considerando a alta densidade de energia, a longa retenção de carga e o baixo custo de manutenção (Zeng et al., 2019).

As baterias dos veículos possuem o potencial de servir como um banco de armazenamento energético compensatório, possibilitado por meio de controles de automação entre o sistema e o Battery Management System (BMS) das baterias. O BMS, ou Sistema de Gerenciamento de Baterias, é um componente (eletrônico) que monitora e regula o desempenho das baterias, garantindo sua operação eficiente e segura. Assim, é possível fomentar a adoção de sistemas de geração off grid (como os fotovoltaicos) e permitir o uso exclusivo de fontes renováveis, promovendo eficiência energética e sustentabilidade ambiental (Zhuang; World Bank, 2020; Tran et al., 2019).

Diante dos avanços tecnológicos nesse campo, sobretudo no que tange ao aumento de densidade de energia e às melhorias nos padrões de modularização, espera-se que o preço praticado em mercado se reduza e a eficiência dos equipamentos se eleve (Saw, Ye e Tay, 2016), mantendo um panorama favorável para a adoção dessa tipologia de baterias em sistemas de transporte.

Os tipos de bateria usualmente encontrados em ônibus elétricos incluem compostos de fosfato de ferro e lítio (LFP), óxido de titânio e lítio (LTO) e óxido de lítio, níquel, manganês e cobalto (NMC), que possuem diferentes propriedades operacionais e, por isso, determinam os modos de carregamento possíveis (Verbrugge et al., 2021).

4.2.2.1 Modularização das baterias

O módulo de bateria é uma unidade que compõe o Sistema de Gerenciamento de Bateria (BMS, da sigla em inglês) de um veículo elétrico. Cada módulo é uma unidade independente que contém células de bateria individuais, além de seus respectivos circuitos de gerenciamento. Projetam-se esses módulos para serem conectados em série ou em paralelo, dependendo do design do sistema de baterias do veículo, a fim de fornecer a capacidade de energia necessária para a operação.

Quanto ao posicionamento dos módulos, devem ser considerados locais vazios no veículo que minimizem a incidência de estresses mecânicos, promovam dissipação adequada de calor e mantenham o centro de gravidade baixo (Arora, Shen e Kapoor, 2018). Nesse sentido, uma disposição possível para as baterias consiste em colocá-las ao longo do eixo do veículo (juntamente ao piso da carroceria), embora a sobrecarga de seu sistema possa restringir a quantidade de passageiros permitidos no veículo (Arora e Kapoor, 2018).

O dimensionamento adequado do sistema de baterias é uma variável crítica para a autonomia do veículo e os custos associados a ele, o que requer caracterização acerca dos padrões de operação do serviço. O equacionamento entre o peso do veículo e o alcance da bateria também representa um desafio no mercado de BEBs para o transporte público (Mahmoud et al., 2016; Manzolli, 2020). De forma genérica, espera-se que linhas mais extensas (como serviços intermunicipais) sejam providas de veículos com maior capacidade de armazenamento de

energia, enquanto serviços urbanos (frequentemente com extensão reduzida) apresentem a possibilidade de se recarregarem mais vezes durante o dia e, por isso, circularem com menos baterias (Basma et al., 2022).

Há, portanto, um importante trade-off entre dimensionamento de baterias e a capacidade de passageiros:

- * Grandes conjuntos de baterias reduzem a capacidade de passageiros. Isso é crítico quando o número de passageiros atinge a capacidade máxima legal dos ônibus a diesel;
- * Menores conjuntos de baterias requerem infraestrutura de recarga de oportunidade. Dessa maneira, também requerem recarga lenta à noite para balanceamento das células;
- * A química da bateria é degenerativa – ou seja, a limitação da profundidade de descarga (DoD) reduz a autonomia, porém aumenta o tempo de vida da bateria.

4.2.3 Demanda energética e consumo de bateria

As diferenças de consumo de energia entre o ônibus elétrico e o de tecnologia convencional são inúmeras, o que exige planejamento detalhado antes do início da transição tecnológica. A partir de estudos empíricos, sabe-se que diversos fatores influenciam o consumo de bateria, como características do veículo, dinâmica de condução, tráfego e condições ambientais (Al-Ogaili et al., 2021).

Indica-se que velocidades de condução entre 11 e 18 km/h maximizam a eficiência da bateria, principalmente quando ocorrem em vias exclusivas para tráfego de transporte público (Wang et al., 2020). Além disso, o uso de equipamentos para aquecimento ou resfriamento do ambiente interno do veículo também promove variabilidade no consumo de energia (Perugu et al., 2023), especialmente quando se verificam eventos de temperaturas extremas no ambiente externo.

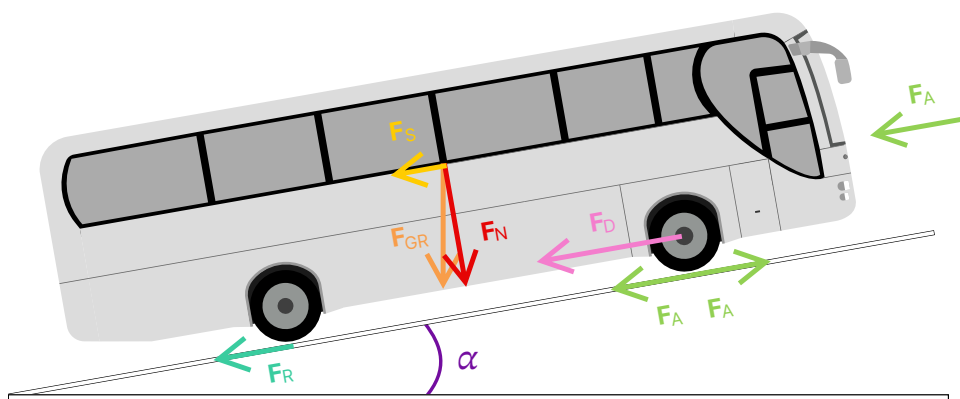
Nessa situação, a demanda energética associada à operação de uma rede consiste em uma estimativa da energia necessária para vencer deslocamentos com características específicas. Assim, podem ser aplicados modelos físicos baseados na segunda lei de Newton do movimento – “A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida e é produzida na direção de linha reta na qual aquela força é aplicada” – para modelar o consumo de eletricidade de ônibus elétricos justamente como os modelos dinâmicos longitudinais (Dougier et al., 2023). A partir de validações e estudos empíricos, esse método apresenta resultados convergentes com o consumo da bateria mensurado durante a operação de redes de transporte (Gao et al., 2017; Hjelkrem et al., 2021).

Analisando as vias que compõem a rede (em nível individual), é possível entender a sensibilidade e a magnitude que fatores como topografia, velocidade e tipologia do veículo têm sobre sua performance operacional. Essa análise é fundamental para que, posteriormente, os custos operacionais do sistema sejam aferidos considerando particularidades do município. Ademais, é também uma informação influente sobre procedimentos de dimensionamento e locação da infraestrutura de recarga.

De modo geral, a análise consiste em verificar a demanda energética da rede sob uma perspectiva granular, isto é, analisa-se a energia requerida para um veículo típico trafegar sob uma determinada velocidade em cada trecho do município, que por sua vez é caracterizado por seu comprimento e sua topografia. Assim, tem-se uma visão longitudinal sobre o uso do motor do veículo.

Esse cálculo é realizado a partir do equilíbrio dinâmico entre forças dissipativas (atrito do pavimento; resistência aerodinâmica) e tratativas (força motriz durante aceleração; força motriz requerida para mover a massa total) incidentes sobre o veículo em deslocamento, assim como a frenagem regenerativa. O componente vetorial resultante desse equilíbrio pode ser analisado em termos de potência e energia, incluindo ainda o uso de equipamentos para climatização (refrigeração, especificamente) do ambiente.

FIGURA 21



Fonte: Os autores

Além de se relacionar ao custo de funcionamento do sistema, a demanda energética é um parâmetro relevante por trazer implicações da maior importância a respeito de sua operação:

- * Considerando os limites (nominal e máximo) de potência catalogados pelo fabricante, analisar o padrão de uso do motor informa se é (ou não) viável a operação de veículos elétricos a bateria em uma determinada rota da rede;
- * Considerando a capacidade catalogada pelo fabricante, é possível estimar a autonomia da bateria em termos de número de viagens, quilometragem percorrida ou tempo em serviço tendo em vista a especificidade de cada rota da rede.

4.2.4 Monitoramento dos ônibus na rede

A informatização recente dos sistemas de transporte permitiu a digitalização de transações como o uso de bilhetes e o posicionamento de ônibus, que podem ser acessadas em tempo real e armazenadas por longos períodos a um custo mínimo (Monteiro, Pons e Speicys, 2015). Assim, aplicações de diversas fontes de dados foram desenvolvidas para o planejamento de

transporte público, provendo análises de padrões de viagem e de desempenho operacional (Zannat e Choudhury, 2019). No contexto da mobilidade elétrica, que é fortemente condicionada pelas características técnico-operacionais da bateria, torna-se crucial coletar ainda informações sobre o consumo energético dos veículos. Destaca-se a relevância de dois parâmetros, em particular.

O primeiro deles consiste no estado de carga (SoC, do termo em inglês *State of Charge*), referindo-se à quantidade de energia armazenada atualmente na bateria em relação à sua capacidade máxima de armazenamento, isto é, a porcentagem de carga restante. Analisar o SoC, sobretudo em tempo real, é essencial para determinar quando uma recarga é necessária e para planejar eficientemente o uso da infraestrutura de recarga.

O outro parâmetro relevante no monitoramento de veículos elétricos consiste no estado de saúde da bateria (SoH, de *State of Health*), que indica a condição geral da bateria em termos de sua capacidade de armazenamento em comparação com sua capacidade original quando nova. Com o tempo e o uso contínuo, as baterias sofrem degradação, o que reduz sua capacidade de armazenamento. Assim, o SoH expressa a degradação como uma porcentagem da capacidade original da bateria. Esse parâmetro é importante para estimar a vida útil restante da bateria e ainda para planejar a sua substituição (se necessário).

Para tanto, o monitoramento da bateria, que se constitui sobre um BMS, deve transmitir continuamente dados acerca do estado de seus componentes. Esses dados, sendo processados por algoritmos de diagnóstico, fornecem informações sobre o nível de carga e envelhecimento de cada módulo de bateria presente no sistema (Li et al., 2020). Desse modo, garante-se uma operação segura e eficiente de baterias embarcadas nos veículos ao computar principalmente informações sobre os parâmetros representativos do estado da bateria (Kassim, Jamil e Sabri, 2021).

A produção de dados em alto volume e alta frequência caracteriza o monitoramento do transporte público como uma fonte de big data. As aplicações de mensurações como SoC e SoH tornam-se uma fonte de dados fiel à operação praticada pelos veículos, revelando comportamentos detalhados sobre o consumo de energia dos veículos em uso. Métodos de processamento e tratamento dos dados produzidos em tempo real podem prover informações relevantes para ajustar programação de recarga dos veículos, considerando autonomia e possíveis interrupções que acontecem durante viagens. Além disso, o monitoramento dos veículos e de seus atributos relacionados à bateria também pode fornecer informações em tempo real a respeito da sobrecarga da infraestrutura de recarga disponível e da formação de filas para utilização dos carregadores.

Compondo os dados produzidos em um histórico de operação, o conjunto de informações provenientes do monitoramento dos veículos pode também ser utilizado para estudar padrões de operação dos veículos e sua influência sobre a autonomia da bateria, por exemplo. Em períodos mais extensos, é possível verificar inclusive a longevidade da bateria em função das condições de deslocamento a que o veículo foi submetido durante sua vida útil.

Nesse sentido, o monitoramento de veículos elétricos pode ser considerado como mecanismo de avaliação da operação em termos de eficiência, quando os dados são utilizados para otimizar a operação da rede em tempo real e a partir de desafios técnicos revelados pela observação contínua dos parâmetros mensurados.

4.2.5 Gerenciamento e disposição de resíduos

No contexto brasileiro, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é o instrumento que estabelece obrigações e concebe instrumentos para gerenciamento de resíduos, considerando seu ciclo de vida completo. Estabelece-se, no artigo 33, inciso II da Lei nº 12.305/10, que é obrigatória a estruturação e implementação de sistemas de logística reversa independentes do serviço público de limpeza. Considera-se que essa responsabilidade pode ser compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de baterias.

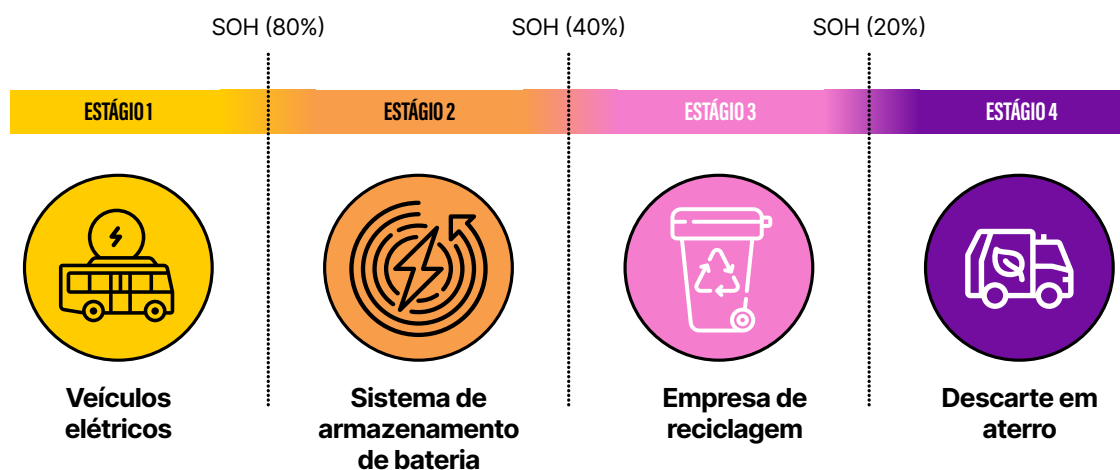
A PNRS entende que a logística reversa é um mecanismo de desenvolvimento socioeconômico que viabiliza o reaproveitamento de resíduos sólidos em seu ciclo, em outros ciclos produtivos ou em outra destinação final ambientalmente adequada. Todavia, em âmbito global, são verificadas barreiras importantes para estruturar processos de circularidade e sustentabilidade ao longo da vida útil das baterias.

Dentre os diversos desafios na temática, destacam-se a necessidade de aprofundamento sobre motivações dos interessados em estratégias de modelos de negócios circulares relacionados às baterias de íon lítio e a necessidade também de exploração de alternativas como reutilização e remanufatura (Islam e Iyer-Raniga, 2022).

O armazenamento de energia em baterias é decisivo para impulsionar a adoção de veículos elétricos. Ao mesmo tempo, considerar a disponibilidade limitada de compostos de lítio para a fabricação de baterias aumenta a necessidade de fabricantes de promover reúso e reciclagem (Pagliaro e Meneguzzo, 2019). Tendo em vista o estado de saúde da bateria, é possível identificar destinações e usos mais adequados para seus compostos.

FIGURA 22

Categorias de ciclo de vida de LIBs

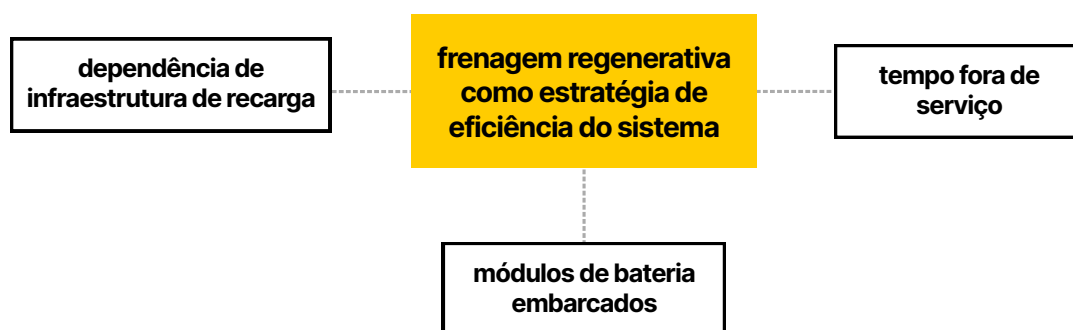


Fonte: Os autores.

4.2.6 Frenagem regenerativa

A frenagem regenerativa em ônibus elétricos consiste em um mecanismo que converte a energia cinética gerada durante a desaceleração ou freada do veículo em energia elétrica. Em vez de usar apenas os freios mecânicos para diminuir a velocidade do ônibus, a frenagem regenerativa utiliza o motor elétrico do veículo como um gerador, transformando a energia cinética das rodas em eletricidade. Essa eletricidade é então armazenada nas baterias do ônibus, podendo ser reutilizada posteriormente para alimentar o veículo e seus sistemas auxiliares.

FIGURA 23



Fonte: Os autores.

Com recuperação parcial da energia demandada ao longo dos deslocamentos, o uso da frenagem regenerativa contribui para aumentar a eficiência no uso de veículos elétricos, já que reduz a necessidade de módulos de bateria embarcados, a recorrência de recarga e o tempo do veículo fora de serviço. Esse dispositivo mostra-se particularmente útil em veículos que circulam sob condições intensas de tráfego urbano (Islameka, Leksono e Yuliarto, 2019) e que possuem distâncias curtas entre os pontos de parada (Vuchic, 2007).

Sabe-se que a frenagem regenerativa pode aumentar a eficiência energética do veículo em até 14% e também prolongar a vida útil da bateria (Perrotta et al., 2014; Mueller et al., 2017). Contudo, cabe destacar que o (re)aproveitamento de energia a partir da frenagem regenerativa também é influenciado por outros aspectos operacionais. De forma geral, ambientes caracterizados por maiores temperaturas e baixa umidade do ar tendem a favorecer a recuperação de energia pela frenagem regenerativa.

4.3 Infraestrutura de recarga

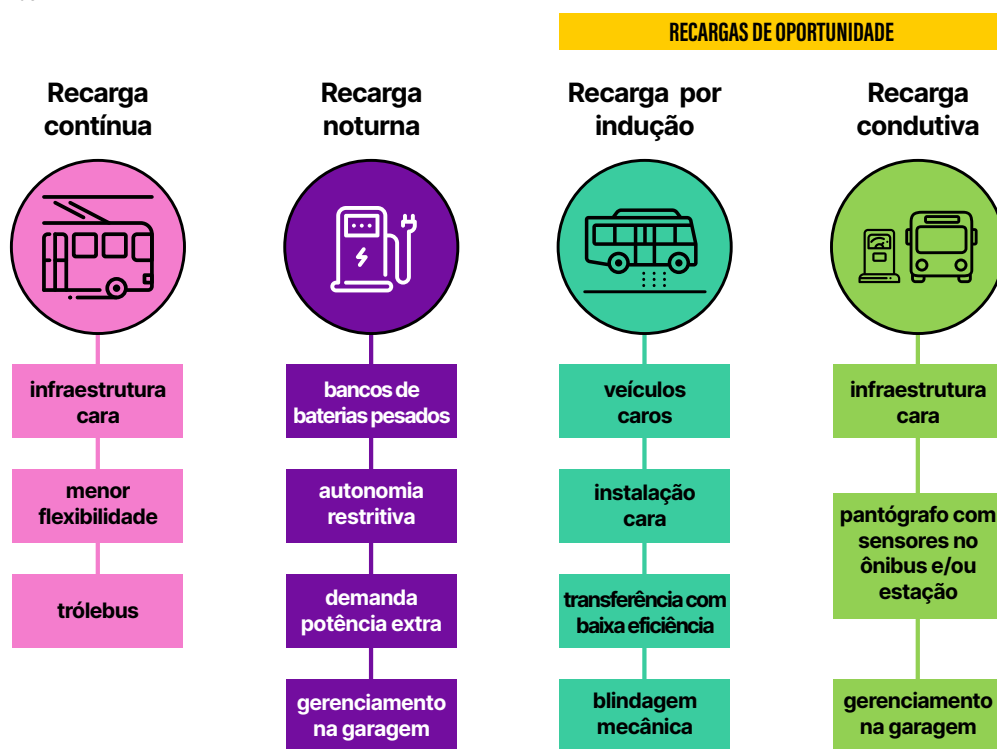
A implementação de infraestrutura de recarga para ônibus elétricos requer uma estratégia que considere os diversos componentes da rede, o que envolve não apenas a definição de carregadores como também a definição de onde e de que modo esses carregadores serão utilizados ao longo do dia em função da frota especificada. Definir a energia necessária para operar e gerenciar a recarga se tornou um desafio emergente.

Considerações como a capacidade da bateria, os tipos de rota a serem percorridas e a frequência de viagens são alguns dos fatores que determinarão os requisitos para estabelecer procedimentos de recarga de cada veículo (Basma et al., 2022). Além disso, avaliar a rede elétrica, tendo em vista a regulação do setor no Brasil, é também um requisito fundamental para a implantação de infraestruturas de recarga.

4.3.1 Tipologias

É intrínseco ao processo da transição energética definir a tipologia de infraestrutura de recarga. Essa atividade está diretamente relacionada à escolha dos veículos elétricos. Considerações sobre a compatibilidade entre a infraestrutura de carregamento e os veículos disponíveis no mercado são cruciais para garantir uma transição suave para a eletrificação do transporte público.

FIGURA 24



Fonte: Os autores.

Isso ocorre porque cada fabricante e cada modelo de ônibus implementam determinadas interfaces para recarga, o que pode limitar as opções do planejador da rede durante a estruturação de uma estratégia de recarga para a frota. Ademais, é importante analisar as especificações da bateria, que podem indicar a potência máxima suportada na recarga e, portanto, influenciar as definições de potência instalada nos carregadores.

De maneira geral, os carregadores são definidos em função da potência instalada em cada um, o que determina a velocidade da recarga. Assim, tem-se uma relação inversa entre potência instalada e duração da recarga: quanto maior a potência instalada, menor é a duração da recarga.

As quatro principais tecnologias de carregadores para ônibus elétricos são:

4.3.1.1 Plug-in

Os carregadores do tipo plug-in, dentre as tecnologias atualmente disponíveis, correspondem à tecnologia mais popular e consolidada na operação de redes de transporte, pois podem ser instalados em diversas potências e utilizados em diferentes estratégias de recarga. O carregamento ocorre por meio de conexão física entre o ônibus e o carregador, utilizando um cabo capaz de conduzir energia elétrica em corrente alternada ou contínua. Uma limitação desse tipo de recarga é a falta de padronização dos conectores, o que dificulta a compatibilidade entre diferentes marcas de ônibus em grandes frotas (López et al., 2022).

Amplamente disponível e fácil de usar, requer tempo e espaço para conectar cada veículo.

4.3.1.2 Pantógrafo

A recarga com pantógrafo, de contato fixo a catenária, ocorre a partir de uma conexão física entre o carregador e o ônibus. Esses carregadores possibilitam a automação da recarga e podem fornecer maior capacidade de carga (alcançando até 600 kW), embora tenham custo de instalação mais alto (López et al., 2022). Tal modalidade de recarga pode assumir duas configurações:

- * O pantógrafo tradicional, que é fixo na parte superior do veículo e se ergue até alcançar o receptor (externo ao veículo);
- * O pantógrafo invertido, que é fixo em uma estrutura externa ao veículo e se abaixa em direção ao ônibus quando ele está na posição de carregamento.

Utiliza um dispositivo mecânico – exatamente o pantógrafo – que se estende do teto do ônibus ou da estação de carregamento para fazer contato elétrico. Ideal para carregamento rápido, principalmente em estações de fim de linha ou paradas de ônibus. Sua infraestrutura é mais cara e complexa.

4.3.1.3 Indução

A recarga indutiva é um método de carregamento que fornece energia elétrica a um ônibus por meio de um campo magnético, dispensando a necessidade de uma conexão física entre veículo e carregador. Usualmente, a potência de cada carregador varia de 50 kW a 200 kW, o que reduz o tempo de recarga.

Com recargas mais rápidas, é possível compor uma estratégia de eletrificação de frota que reduz a necessidade de veículos com sistemas de bateria de alta capacidade, o que colabora para a constituição de uma frota mais eficiente (Wu et al., 2011). Esse procedimento pode ocorrer de maneira estática (em locais de estacionamento dos veículos ou em pontos de parada) ou dinamicamente (ao longo de rotas), embora não existam experiências em larga escala que atestem eficiência e viabilidade operacional dessas modalidades (López et al., 2022).

Utiliza campos magnéticos para transferir energia entre uma base de carregamento no solo e um receptor no ônibus, sem necessidade de conexão física. Conveniente, reduz desgaste mecânico, sem necessidade de conectores físicos. Tem menor eficiência energética e custos mais altos de implementação.

4.3.1.4 Carregamento em rota

Os ônibus com carregamento em rota (ou em trânsito) utilizam tecnologias específicas com infraestrutura instalada ao longo da rota do ônibus, como trilhos elétricos ou cabos aéreos que permitem a recarga com carregamento contínuo das baterias enquanto o veículo está em movimento ou durante paradas curtas ao longo de sua rota. Permite carregamento contínuo, reduzindo a necessidade de grandes baterias, contudo exige infraestrutura inicial altamente custosa e complexa de implementar.

O Carregamento via Trilhos Elétricos no Solo (Ground-Based Power Supply) utiliza trilhos eletrificados instalados no solo que fornecem energia diretamente ao ônibus. O trilho de contato fica eletrificado apenas quando o ônibus está sobre ele, para garantir a segurança. Os trilhos são embutidos nas vias e conectados a uma fonte de energia. O Carregamento via Catenárias (Overhead Wires) utiliza fios suspensos acima da via, com pantógrafos instalados nos ônibus que fazem contato com esses fios. É similar ao utilizado nos pantógrafos, no entanto é ajustável e tem seu acionamento apenas em pontos de recarga, momento em que o pantógrafo toca a catenária.

O Carregamento por Indução Dinâmica (Dynamic Wireless Charging) utiliza bobinas embutidas na estrada para transferir energia sem utilizar fio para bobinas receptoras no ônibus, com menor desgaste de componentes. Campos magnéticos criados pelas bobinas no solo induzem corrente elétrica nas bobinas do ônibus. Bobinas de carregamento são instaladas em pontos estratégicos ao longo da rota e permitem carregamento sem contato físico, com menor desgaste de componentes.

Analisando estrategicamente as quatro diferentes tecnologias em termos de quatro perspectivas – financeira, operacional, de processos de eficiência e de desenvolvimento industrial, é possível destacar:

TABELAS 12, 13, 14 e 15

Perspectiva financeira	Investimento inicial	Custo operacional	Manutenção
Plug-in	Moderado	Baixo	Baixa
Pantógrafo	Alto	Moderado	Moderada
Indução	Muito alto	Moderado	Alta
Carregamento em rota	Muito alto	Moderado a alto	Alta

Perspectiva operacional		Facilidade de uso	Disponibilidade
Plug-in		Alta requer intervenção manual	Alta com muitas estações de carregamento
Pantógrafo		Alta totalmente automatizado	Moderada dependente de infraestrutura dedicada
Indução		Muito alta completamente sem fio	Baixa tecnologia emergente
Carregamento em rota		Muito alta carregamento contínuo	Baixa requer infraestrutura extensa
Perspectiva de eficiência	Tempo de carregamento	Eficácia energética	Flexibilidade
Plug-in	Moderado	Alta	Alta
Pantógrafo	Rápido	Muito alta	Moderada
Indução	Moderado	Moderada	Alta entretanto, depende da instalação
Carregamento em rota	Contínuo	Alta	Baixa restrito à rota
Perspectiva de desenvolvimento industrial		Inovação	Desenvolvimento tecnológico
Plug-in		Baixa tecnologia madura	Estável
Pantógrafo		Moderada melhorias contínuas	Dinâmico
Indução		Alta tecnologia emergente	Muito dinâmico
Carregamento em rota		Muito alta requer avanços contínuos	Muito dinâmico

4.3.2 Estratégias de recarga

A operacionalização de frotas elétrica exige intrinsecamente o estabelecimento de práticas sincronizadas à alocação dos veículos para garantir que a programação proposta a cada um deles possa ser atendida ao se considerar o estoque de energia em suas baterias. Sob esse aspecto, a definição de como se dará a operação das infraestruturas de recarga é particularmente relevante, influenciando tanto características dos veículos em si quanto dos aspectos relativos ao consumo de energia elétrica.

4.3.2.1 Recarga de oportunidade

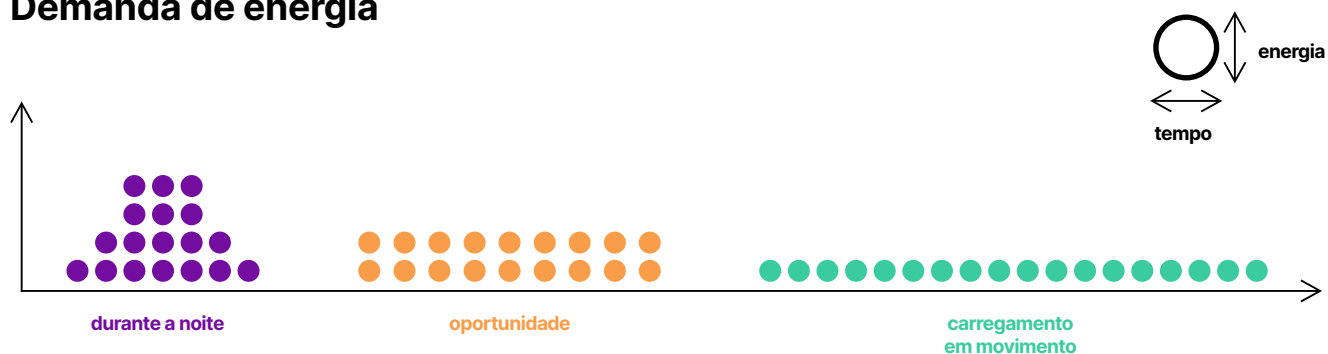
O ônibus é recarregado ao longo da rota ou no final da rota. Portanto, é necessária uma bateria menor do que no caso dos veículos de recarga noturna (variando de 80 kWh a 150 kWh). Essa é uma alternativa implementada em sistemas que já têm experiência e avanços na infraestrutura, instalando-se pontos estratégicos de recarga em função da rede de transporte operante. Dessa forma, tende-se a minimizar a quilometragem percorrida fora de serviço e o uso da infraestrutura é planejado para atender os veículos de modo contínuo. Quanto aos veículos, admite-se menor quantidade de módulos de bateria instalados, considerando a maior disponibilidade do sistema de recarga para apoio operacional ao longo do dia.

4.3.2.2 Recarga na garagem

Nesse caso, o ônibus tem um pacote maior de baterias do que o verificado na modalidade de recarga de oportunidade (variando entre 150 kWh e 550 kWh). Isso se deve ao fato de que a recarga é feita em períodos específicos do dia, com destaque para horários em que a demanda sobre o sistema é menor e os veículos naturalmente não operam. Nesse sentido, o modelo de recarga denominado overnight, que consiste em recarregar as baterias ao longo da noite, é particularmente viável em tal protocolo. O sistema é ideal para se conhecer a tecnologia e avançar na transição. Considerando as características do veículo, esse protocolo usualmente demanda maiores quantidades de módulos instalados nos veículos, a fim de suprir a necessidade de deslocamento de grandes distâncias sem a possibilidade de recarga.

FIGURA 25

Demanda de energia



Fonte: Os autores.

4.3.2.3 Tipologias de carregamento alternativo

As tecnologias estão associadas a diferentes padrões e fabricantes, cada um com suas próprias considerações geopolíticas e estratégias de mercado. A interoperabilidade entre essas tecnologias é um desafio importante que as autoridades e empresas estão tentando resolver.

Além das quatro principais tecnologias de carregamento para ônibus elétricos mencionadas anteriormente – Plug-in, Pantógrafo, Indução e Carregamento em rota –, existem outras, emergentes, e também métodos inovadores que estão sendo explorados. Aqui estão alguns exemplos:

Carregamento rápido em corrente contínua (DC Fast Charging)

Utiliza alta potência para carregar rapidamente as baterias dos ônibus em estações específicas.

Vantagens: Reduz significativamente o tempo de carregamento em comparação com o carregamento AC convencional.

Desvantagens: Requer infraestrutura robusta e pode ser caro.

Troca de baterias (Battery Swapping)

Substituição rápida das baterias descarregadas por baterias totalmente carregadas em estações de troca.

Vantagens: Minimiza o tempo de inatividade dos ônibus, pois a troca pode ser feita em minutos.

Desvantagens: Necessita de um grande estoque de baterias e uma infraestrutura dedicada.

Carregamento solar

Uso de painéis solares instalados em garagens, estações de ônibus ou até mesmo nos próprios veículos para fornecer energia.

Vantagens: Fonte de energia renovável e sustentável.

Desvantagens: Depende da disponibilidade de luz solar e pode não fornecer energia suficiente para cargas completas.

Carregamento de alta tensão (High Voltage Charging)

Utiliza sistemas de alta tensão para carregar rapidamente veículos elétricos pesados.

Vantagens: Permite o carregamento muito rápido de veículos elétricos de grande porte.

Desvantagens: A infraestrutura de alta tensão pode ser complexa e cara de implementar.

Carregamento através de Smart Grids

Integra ônibus elétricos em redes inteligentes de energia, permitindo a otimização da carga com base na demanda e na disponibilidade de energia.

Vantagens: Otimiza o uso de energia, podendo reduzir custos operacionais e melhorar a efici-

ência energética.

Desvantagens: Requer desenvolvimento e integração de tecnologias de rede inteligente.

Carregamento por hidrogênio (células de combustível)

Utiliza hidrogênio para gerar eletricidade a bordo através de células de combustível.

Vantagens: Alta autonomia e rápido reabastecimento.

Desvantagens: A infraestrutura de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio é cara e complexa.

4.3.3 Governança e gestão

A definição das responsabilidades de operação e manutenção da infraestrutura de recarga deve ser cuidadosamente considerada desde o início do projeto de eletromobilidade. O modelo de negócio escolhido influenciará diretamente quem será o responsável por esses processos. Em um modelo tradicional, o próprio operador de transporte pode assumir a responsabilidade pela recarga dos veículos. Porém, dependendo da estrutura do projeto, essa responsabilidade pode recair sobre a subsidiária de energia, o fornecedor de baterias ou o fornecedor da infraestrutura de recarga.

Considerando o papel das Concessionárias de Energia Elétrica, a implantação de tecnologia elétrica em frotas de ônibus requer a incorporação de um ator essencial: a concessionária de energia. Diferentemente do que ocorre nas frotas a diesel, em que os operadores gerenciam o abastecimento de combustível, a infraestrutura de recarga elétrica exige a construção de redes especiais até as garagens e uma expertise técnica que em geral se concentra nas empresas de energia.

Quando os carregadores são instalados ao longo das rotas, a necessidade de coordenação com a empresa distribuidora de energia elétrica aumenta. Essa coordenação é fundamental para garantir a cobertura correta e a disponibilidade de energia nos pontos de recarga, evitando interrupções que poderiam prejudicar a operação dos serviços de transporte.

A entrada de novos atores no processo de eletromobilidade implica uma necessidade maior de coordenação para assegurar que a prestação de serviços não seja afetada. As companhias de energia elétrica, que têm demonstrado um crescente interesse em participar desses modelos de negócio na América Latina, trazem consigo uma vasta experiência na transmissão e distribuição. Esse conhecimento é vital para prever e evitar problemas, como quedas de força e complicações com a infraestrutura de recarga, minimizando impactos negativos na operação e na remuneração dos operadores de transporte.

A gestão do sistema de recarga deve ser tratada com prioridade desde o início do projeto. Fortalecer institucionalmente o regulador é algo precípuo para estabelecer diretrizes claras de mitigação de riscos e resolução de conflitos. A antecipação desses desafios e a criação de um framework robusto de governança podem assegurar uma transição mais suave para a mobilidade elétrica, promovendo eficiência e sustentabilidade no transporte público.

4.3.4 Monitoramento dos ônibus e da recarga

Uma rede inteligente pode evitar blecautes ou sobrecarga no caso de uma frota de ônibus ser carregada em horários de pico ou mesmo fora dele, todavia com um sistema de provimento de energia que não suporta a demanda total consumida. Obtendo informações sobre quantidade de ônibus a serem carregados, nível da bateria, tempo de carregamento, a ordem de carregamento (fila) a ser enfrentada, o custo da energia no horário demandado, o local dos pontos de recarga, a trajetória ou percurso a ser feito, dentre outras variáveis, o operador poderá gerenciá-las para tornar mais lucrativa e eficiente a sua operação.

Outras questões, como a da regulação do Protocolo OCPP (Open Charge Point Protocol) e a da comunicação dos carregadores com os sistemas de gerenciamento de carregamento – que possibilitariam a comunicação irrestrita, isto é, com acesso de qualquer usuário e sem custo, evitando que só um determinado provedor do serviço de recarga pudesse ter acesso às informações da rede de carregamento, bem como da comunicação do CPO (operador de recarga) e do DSO (distribuidor de energia) – também necessitam de regulação para otimizar o serviço da recarga elétrica²⁴. As duas regulações são peças-chave para o aprimoramento do que se denomina de smart charging.

4.4 Rede de distribuição elétrica

Está claro que, diante da quantidade crescente de veículos elétricos em circulação, a transição para a eletromobilidade traz desafios importantes no que diz respeito à compatibilização entre infraestrutura de recarga (demanda) e rede elétrica existente (oferta). No contexto brasileiro, no qual o setor de energia elétrica é fortemente regulado, torna-se mandatório projetar essa infraestrutura à luz das normativas federais estabelecidas, que promovem a segurança, a eficiência e a interoperabilidade dos sistemas.

Nesse sentido, qualificar o padrão de uso de energia para recarga dos veículos fornece parâmetros relevantes para analisar os instrumentos de contratação e consumo. Com um olhar racionalizado sobre a infraestrutura de recarga (em planejamento) e de distribuição de energia (à disposição), assegura-se resiliência na operação dos dois sistemas ao garantir que a rede elétrica esteja adequada para fornecer energia em quantidade e qualidade necessárias.

No Brasil, o mercado de energia elétrica é dividido em dois tipos: o Mercado Cativo (MC), também chamado de ambiente de Contratação Regulada, e o Mercado Livre de Energia (MLE), ou

24 - A comunicação dos operadores das estações de recarga e a dos operadores do sistema de distribuição de energia são veiculadas pelos protocolos Open ADR, OCSP e IEE (Barassa e Cruz, 2022).

O Open ADR (Open Automated Demand Response) é um protocolo de comunicação aberto que padroniza o formato de troca de informação da rede elétrica inteligente e os sistemas de carregadores de veículos elétricos, possibilitando tarifas dinâmicas e interoperáveis entre os operadores de recarga. O OCSP (Online Certificate Status Protocol) confere aos eletropostos um contrato de segurança de rede e o IEEE (Standard for Smart Energy Profile Application Protocol) possibilita o uso da internet para conectar o eletroposto ao usuário do carro elétrico, controlando a recarga e a geração distribuída.

Ambiente de Contratação Livre. Cada um desses ambientes possui especificidades operacionais que, embora relevantes, excedem o escopo deste documento.

Conforme dispõe a Resolução Normativa Aneel nº 414/2010, unidades consumidoras com demanda contratada igual ou superior a 500 kW são elegíveis para negociar contratos de energia no MLE.

No âmbito da mobilidade elétrica, esse quantitativo corresponde à instalação de cerca de 10 pontos de recarga lenta, considerando, claro, 50 kW de potência instalada em cada um deles (Pelletier, 2019). Para recargas mais rápidas, em que a potência instalada em cada carregador é maior, quantidades de carregadores menores que 10 são suficientes para permitir a migração do consumidor para o MLE.

Assim, é crucial compreender os modelos de mercado de energia para fazer escolhas adequadas a respeito da contratação de eletricidade e, dessa maneira, evitar prejuízos financeiros e operacionais (Burin, Siluk e Rosa, 2022).

4.4.1 Padrões de consumo de energia

Com o aumento na demanda por energia devido à recarga da frota elétrica, podem emergir desafios significativos para a operação da rede de distribuição. A eletrificação de uma frota de ônibus exige adaptações estruturais que assegurem o suprimento adequado de todos os insumos necessários para a operação eficiente. Inicialmente, a matriz energética precisa ser ajustada para suportar o novo modelo de transporte. Em 2022, o consumo de energia elétrica no Brasil aumentou em 4,1%, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), refletindo a necessidade de uma infraestrutura robusta para atender a essa crescente demanda.

O polo gerador de energia elétrica deve prever uma expansão significativa para suportar a maior demanda imposta pela frota elétrica. A Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) destaca que a integração de fontes renováveis, como solar e eólica, será essencial para dar conta desse aumento de demanda de forma sustentável. Além disso, a implementação de sistemas de gerenciamento de energia avançados e a modernização das redes de distribuição são essenciais, com a inserção de smart grids e estações de recarga ultrarrápidas que podem reduzir a carga na rede durante horários de pico.

Essas adaptações estruturais, incluindo a expansão da capacidade de geração e a modernização da rede de distribuição, são fundamentais para garantir que a transição para uma frota de ônibus elétricos seja bem-sucedida e sustentável. Ademais, os sistemas de transmissão e distribuição devem se adaptar à nova carga. Segundo Dubey e Santoso (2015), um planejamento inadequado da infraestrutura de recarga em um cenário de adoção generalizada de veículos elétricos e instalação em massa de infraestrutura de recarga traz riscos como:

- * Aumento significativo da demanda na subestação elétrica;
- * Sobrecarga dos transformadores de serviço;

- * Sobretensão secundária sustentada e violação dos limites de subtensão;
- * Deterioração da qualidade do fornecimento de energia elétrica;
- * Possível necessidade de expansão da capacidade de geração da rede de distribuição.

Esses desafios podem ser mais facilmente superados com um planejamento adequado que contemple não apenas a frota como também a infraestrutura de recarga. Tal planejamento deve considerar a localização estratégica das garagens, a proximidade de subestações elétricas, a capacidade da rede elétrica local, a utilização de sistemas de armazenamento de energia e a integração de fontes de energia renovável. Com uma abordagem integrada e bem planejada, é possível mitigar os riscos.

Compreender a relação entre as estratégias de recarga e os padrões de consumo de energia é fundamental para estruturar a transição energética para eletromobilidade em termos técnicos e operacionais.

A maneira como as garagens e as centrais de controle dos ônibus elétricos são planejadas e geridas é de suma importância, no que diz respeito tanto à inteligência dos carregadores e sua integração com a central de controle quanto à capacidade energética necessária para abastecimento e projeções de crescimento da mobilidade elétrica. Considerar esses aspectos é crucial, pois futuras expansões na demanda energética podem encarecer e complicar o processo de instalação de novos carregadores (Carniatto Silva, 2022).

As demandas energéticas para o carregamento de ônibus elétricos geralmente superam as de outras construções, exigindo uma infraestrutura robusta e bem planejada. O número de carregadores e a capacidade de potência de uma garagem dependem da capacidade da rede local. Assim, a implementação de um sistema de carregamento inteligente é essencial para equilibrar a demanda energética, intercalando os horários de carregamento dos ônibus e otimizando o uso da rede elétrica.

Desse modo, uma gestão estratégica e previsível da infraestrutura de carregamento não apenas facilita a operação atual como também prepara o terreno para futuras expansões, garantindo a sustentabilidade e a eficiência do sistema de mobilidade elétrica.

A adaptação das garagens de ônibus visando a transição para a eletrificação envolve mais do que a mera instalação de carregadores de alta ou baixa potência; é imperativo assegurar sua conexão eficaz à rede elétrica, com ou sem a necessidade de subestações específicas. Também é crucial considerar os aspectos operacionais de cada linha. Trajetos excessivamente longos podem exceder a autonomia dos ônibus elétricos, tornando necessário ponderar sobre a viabilidade de recargas intermediárias ao longo da jornada diária. Essas recargas podem ser realizadas tanto mediante retornos à garagem quanto pela instalação de carregadores em pontos estratégicos ao longo das rotas, conforme já assinalado neste *Guia*.

Essas adaptações e visão estratégica para a mobilidade elétrica não apenas transformam a infraestrutura urbana como também criam um ambiente de interação dinâmica entre operadores de ônibus e agentes do setor de energia elétrica. Tal realidade exige que ambos os setores colaborem estreitamente, compreendendo e integrando as necessidades e capacidades uns dos outros. Essa inter-

dependência, sublinhe-se, torna imperativa a capacitação de profissionais, desenvolvendo competências específicas que permitam uma sinergia eficaz entre as tecnologias de transporte e energia.

O sistema elétrico brasileiro, regulamentado, como foi dito antes, pela Aneel, está integrado a uma rede de distribuição elétrica nacional, permitindo que grandes consumidores, como os gestores públicos do município de São Paulo, negociem a compra de energia diretamente com geradores de outras regiões do país através de contratos específicos. Os contratos no MLE/ACL possibilitam a obtenção de preços diferenciados em relação aos oferecidos aos consumidores cativos do MC/ACR, proporcionando maior flexibilidade e potencial redução de custos. Essa estrutura facilita a implementação de projetos de eletrificação de frotas de ônibus, uma vez que os gestores públicos podem otimizar os custos energéticos por meio de negociações mais vantajosas no mercado livre.

As companhias de energia poderiam fornecer serviços aos operadores para a recarga dos ônibus, contudo as regulamentações atuais não permitem que as empresas de distribuição incluam os carregadores em seus balanços. Para a transição à eletromobilidade, não é útil para as instituições governamentais o desenvolvimento de incentivos fiscais destinados à aquisição de veículos se as empresas de energia não forem capazes de realizar os trabalhos necessários para a implantação da rede.

Nesse setor, os esforços para o desenvolvimento da mobilidade elétrica são particularmente justificados pelo investimento compulsório em pesquisa e desenvolvimento por meio do citado Programa de P&D da Aneel (Lei nº 9991/2000). Vale ressaltar que o custo da infraestrutura de recarga terá um impacto ao longo do prazo de amortização. Dessa maneira, recomenda-se avaliar as necessidades operativas antes de qualquer definição.

4.4.2 Projetos de implantação de infraestrutura de recarga

A estruturação de um projeto que implante infraestrutura de recarga para introdução de ônibus elétricos no transporte público requer, como já antecipado, decisões relativas aos aspectos tecnológicos (especialmente o tipo e a respectiva potência dos carregadores) e operacionais (protocolos e faixas horárias de uso, considerando frota dimensionada para o sistema de transporte) da infraestrutura de recarga.

No entanto, fatores como a rede de distribuição elétrica instalada são de grande influência sobre a viabilidade de implantação dessa infraestrutura. A princípio, um anteprojeto de instalações para recarga requer, conforme mencionado de maneira breve no início do presente *Guia*:

- * Definir locais potenciais para instalação de infraestrutura de recarga, o que pode considerar tanto localidades já operantes na rede de transporte (como terminais públicos e garagens privadas) quanto terrenos (especialmente aqueles em posse do poder público) cujo potencial construtivo ainda não foi explorado;
- * Estimar a área em cada local identificado para também calcular a quantidade de carregadores a serem implantados e, portanto, a potência total instalada;
- * Verificar, em conjunto com a concessionária de distribuição de energia, a disponibilidade

de redes de média ou alta tensão nos locais selecionados, descartando aqueles que inicialmente exigem investimentos de expansão ou adaptação da rede elétrica de distribuição e alinhando os investimentos necessários para a expansão dela, considerando a demanda energética do sistema de transporte a médio e longo prazo;

* Dentre as alternativas restantes, alinhar o atendimento de cada localidade aos serviços que já operam com veículos elétricos ou têm previsão de operar em fases iniciais de uma transição energética no sistema de transporte, a fim de minimizar ineficiências operacionais associadas à quilometragem percorrida fora de serviço para realização da recarga.

4.5 Responsabilidade pela infraestrutura de recarga

A disponibilidade de infraestrutura de recarga pode exigir obras adicionais, o que deve impactar os custos tanto para o operador quanto para a cidade, dependendo de quem assumir essa responsabilidade no projeto. Caso o operador tenha que alugar um novo local de modo provisório ou não tenha espaço suficiente para manter sua frota, os custos adicionais recairão sobre ele. Por outro lado, se os locais atuais forem considerados impróprios e a responsabilidade recair sobre a cidade, os custos e as obras necessárias para adaptar ou encontrar novos espaços impactarão os cofres públicos. Em ambos os cenários, uma coordenação e um planejamento adequados entre todas as partes envolvidas são essenciais para minimizar os impactos financeiros e operacionais, e pode ter impacto no modelo operacional e nos custos financeiros ao longo do projeto. Em relação a todas essas variáveis, é da maior importância observar que temos as seguintes relações jurídico-normativas que permeiam a infraestrutura de recarga.

Há uma relação jurídica de direito privado entre o titular do veículo/ônibus e a estação de recarga e uma relação jurídica de direito público entre a distribuidora de energia (concessionária de serviços públicos) e o titular da infraestrutura de recarga, sendo a última fiscalizada pela agência reguladora (Aneel).

A relação jurídica privada não é regulada pela Aneel, que emitiu a Nota Técnica nº 0063/2028-SRD/Aneel, segundo a qual o fornecimento de energia para um veículo elétrico pode ser caracterizado como um serviço que não se confunde com o fornecimento de energia elétrica.

As estações de recarga exploradas por terceiros como atividades acessórias complementares são uma atividade não regulada, cuja prestação está relacionada com a utilização do serviço público de distribuição de energia elétrica e que pode ser oferecida tanto pela distribuidora quanto por terceiros²⁵.

Conforme Junqueira e Machado (2022), o serviço de recarga não é um monopólio natural nem um serviço essencial, e por isso não é objeto de regulação. A recarga é um bem móvel, como são os carregadores de celulares.

²⁵ - Artigo 628, I, “b”, da REN 1.000/2021, da Aneel.

As duas situações, entretanto, são decorrentes da existência de uma Resolução da Aneel (REN 819/18, atualmente incorporada pela REN 1.000/21) que possibilitou a qualquer interessado a exploração do serviço de recarga de veículos elétricos em geral – ou seja, o grande impulsionador do avanço da mobilidade elétrica, mais especificamente, da infraestrutura de recarga veio com a publicação de tal ato normativo.

REN 1.000/21, art. 554:

É permitida a recarga de veículos elétricos de propriedade distinta do titular da unidade consumidora, inclusive para fins de exploração comercial a preços livremente negociados.

A partir da edição dessa normativa, passa-se a considerar a recarga do veículo elétrico como um serviço – no caso, serviço público autorizado, que necessita de registro na agência reguladora para ser prestado pelo interessado, mas que deixa livre o preço ou tarifas, que serão regulados pelo mercado.

Porém, a despeito de haver essa sinalização regulatória (Wady, 2021), ainda temos barreiras que impedem o desenvolvimento de tal mercado, sendo elas situadas na relação jurídica protagonizada, em especial pelas leis 9.074/95, 9.427/96 e 10.848/2004, que dispõem a respeito das autorizações para operações de venda de energia elétrica.

Essas três leis federais determinam que a venda de energia elétrica só pode ser efetivada através de geradores e distribuidores de energia elétrica, que podem ou não ser definidas como comercializadoras de energia elétrica, fazendo essa atividade sob o regime livre ou regulado (ACL ou ACR). Fora essas companhias, ninguém mais pode comercializar energia elétrica no país.

Também a Portaria 50/2022 do Ministério de Minas e Energia (MME), que dispõe sobre a possibilidade dos consumidores de alta tensão e dos que consumirem até 500 kW, que antes só poderiam fazer a aquisição de energia no mercado regulado (ACR), se sujeitarem às regras do mercado livre (ACL).

Todavia, em relação aos eletropostos, ainda não há definição sobre se poderão ou não se enquadrar nesse novo modelo. Outro fator de insegurança para o desenvolvimento da infraestrutura de recarga é o aspecto tributário que a envolve, pois prossegue a indefinição quanto à natureza da recarga ser um serviço ou uma mercadoria (venda de energia).

Se a recarga elétrica é um serviço, então sobre ele incide o Imposto sobre Serviço de Qualquer Natureza (ISS), de competência municipal (art. 156 da Constituição Federal), que possibilitará maior orçamento para as cidades, sempre atentando para o fato de que no contrato de compra de energia incide o ICMS (Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços), de competência estadual (art. 155 da Constituição); contudo, na venda para o usuário (titular da frota de ônibus), será comercializado um serviço. Esse vem sendo o modelo usualmente adotado, tendo em vista nosso atual arcabouço regulatório.

A barreira existente nesse modelo de negócio é que não há, para o titular da infraestrutura de recarga (CPO – Charging Point Operator) e o prestador do serviço de venda da energia (CSO – Charging Service Operator), uma grande vantagem econômica, se considerarmos que o que ele compra (energia) não é exatamente o que vende (serviço).

A barreira econômica, juntamente com a regulatória, acaba prejudicando o mercado da recarga, fazendo com que os concessionários de transporte público fiquem restritos a poucos ou alguns prestadores desse serviço de mobilidade elétrica ou operadores de recarga. Mais ainda: os operadores de frotas de ônibus precisam lidar com outras partes desse sistema, que são os Provedores de Serviço de Mobilidade (MSP – Mobility Service Provider) e os operadores de marketplace (operador de mercado), sendo estes os que atuam na celebração de negócios baseados na oferta de serviços de mobilidade elétrica acessíveis pela internet e que ficam hospedados na nuvem.

O que se tem notado é que a cobrança é feita pelo tempo que o veículo permanece carregando (kW/h) e que, para que exista lucro, os titulares de eletropostos estão atrelando outros serviços às estações de recarga. E, no caso dos transportes públicos, podem ou não estar presentes todas as partes citadas. O mais usual é ter o titular do ponto de recarga (CSO+CPO) e o provedor de serviços como um aplicativo. Nele, o motorista poderá verificar onde estão as estações de recarga para utilizá-las durante o seu trajeto.

Note-se que, sendo a recarga um serviço prestado por terceiros, as concessionárias de energia terão que trabalhar com os estados e municípios, entendendo como poderão se organizar em torno da venda de energia e dos pontos de carregamento. A regulação do setor é premente, considerando a falta de segurança jurídica²⁶ proporcionada pela ausência de normas que estabeleçam se a recarga é um serviço ou venda de mercadoria – e ainda para que possa haver definição de cada papel dos agentes envolvidos nessa atividade.

No modelo atual de prestação de serviços de transporte coletivo, os operadores das frotas de ônibus são os que estão se responsabilizando pela contratação dos serviços de recarga dos elétricos. Sobre eles é que recairá essa preocupação de entender todo o mecanismo regulatório citado anteriormente, para que possam tomar decisões mais assertivas em relação à escolha do operador do sistema de recarga e do prestador de serviços de mobilidade elétrica (como o uso do aplicativo com conectividade à rede elétrica, no qual seja possível obter dados desde o quantum da bateria até a localização dos eletropostos e dos pontos de carregamentos nas garagens).

Os atores responsáveis pela disponibilização da infraestrutura de recarga ainda se deparam com a falta de regulação que assegure maior previsibilidade da própria rede de energia elétrica e de parâmetros que garantam a eficiência e a continuidade do fornecimento de energia, sobretudo em situações em que os ônibus estejam carregando ao mesmo tempo.

26 - No julgamento da ADI 3.142, o STF decidiu, em 2020, ser legítima a cobrança de ISS para os casos de compartilhamento de infraestrutura, como postes, cabos, tubos e condutos de qualquer natureza, esclarecendo que existem relações complexas nas quais não é possível haver uma separação entre o que é obrigação de dar e de fazer, sendo a incidência do ISS apenas para obrigações de fazer (ADI 651.703 e ADI 603.136).

Também como solução para toda essa problemática ainda em fase de evolução sobre a regulação e como pode ser construída a infraestrutura para uso de frotas pelo poder público, temos o que se está denominando de Hub de Recarga.

Trata-se de um grande eletroposto onde seriam disponibilizados vários pontos de recarga rápida e lenta, sendo possível delegar toda essa atividade ao setor privado. Um exemplo disso é o que vem sendo feito pela empresa Go Electric em Santa Maria do Passa Quatro (SP), na rodovia Anhanguera.

Tal solução pode aliviar os operadores do sistema de transportes públicos de ter que gerenciar mais esse quesito que se encontra atrelado ao “pacote da eletrificação” e que pode alterar, em muito, o equilíbrio econômico-financeiro dos contratos de concessão de transportes públicos.

Como fica claro, a mobilidade elétrica está demonstrando que os modelos contratuais ora em vigor – mais especificamente os de direito público, em que de um lado fica o concessionário e do outro o poder concedente, em que a garagem entra como um encargo do operador – não são mais uma opção única de escolha para esse serviço público.

Os contratos de Parcerias Público-Privadas parecem ser uma boa opção para aumentar a flexibilização da contratação de frotas elétricas. Afinal, eles possibilitam a partilha de riscos, inclusive com a possibilidade de que as garagens possam ser objeto de contraprestação pelo parceiro público, tendo em vista que o artigo 6 da Lei nº 11.079/04²⁷ possibilita que bens sejam dados como contraprestação. Os Hubs de Infraestrutura de Recarga ou Hubs de Recarga poderiam ser a solução para o abastecimento da frota: o poder público fornece a garagem, no entanto ela não precisa ser utilizada para o carregamento das baterias, podendo ser usados os Hubs de Recarga para esse fim.

A partir dessas discussões, pode-se notar que há importantes gargalos que a infraestrutura de recarga representa para o desenvolvimento da mobilidade elétrica nos transportes públicos.

Como foi visto, também no âmbito regulatório ainda temos diversas barreiras, como a ausência de regulação padronizada dos equipamentos e protocolos que sejam condizentes com o que determinam os padrões internacionais – a preparação da rede elétrica e sua interação com a internet e também dos medidores inteligentes.

No caso da plataforma de gestão (OCPI – Open Charge Point Interface), trata-se de um protocolo definidor da conexão entre os Provedores de Serviço de Mobilidade (eMSP), os usuários e o titular operador do eletroposto (CPO – Charge Point Operator).

Assim, temos dois sistemas de gerenciamento da infraestrutura de recarga: um dos Provedores de Serviço de Mobilidade e o outro dos Gerenciadores dos Postos de Recarga; para unificá-los seria necessária uma plataforma única, a fim de acompanhar a operação dos postos de recarga e monitorar a comunicação com dados de localização e tempo de carregamento.

27 - Esses fazem a comunicação com os seus clientes ou contratantes, com os titulares de veículos elétricos e operadores dos postos de recarga (CPO).

Para um ônibus elétrico isso é fundamental, considerando a necessidade de manutenção da circularidade do veículo e do atendimento ao cliente – lembrando sempre que o tempo mínimo de recarga seria de 30 minutos, o que é um grande obstáculo para o titular da frota pública.

Sob o ponto de vista normativo-regulatório, temos também a ISO 15118, bem como a ISO 15118-20. A primeira diz respeito à autorização para que o veículo possa se conectar e automaticamente ser carregado sob a autenticação dele com a estação; a segunda permite a autenticação do veículo com a rede de energia, com possibilidade bidirecional (Barassa e Cruz, 2022).

Na prática, o responsável pela operação de recarga nos contratos de concessão de transporte público irá perceber esses gargalos na ausência de oferta de eletropostos ou de estações ou pontos de recarga, assim como na falta ou dificuldade de encontrar serviços que ofereçam medições e gestão da recarga inteligentes, além da demora da instalação, quando contratada, dentre outros problemas. Todos eles são reflexos da insegurança jurídica que o mercado da recarga enfrenta, e por isso ele não consegue se desenvolver a contento.

5

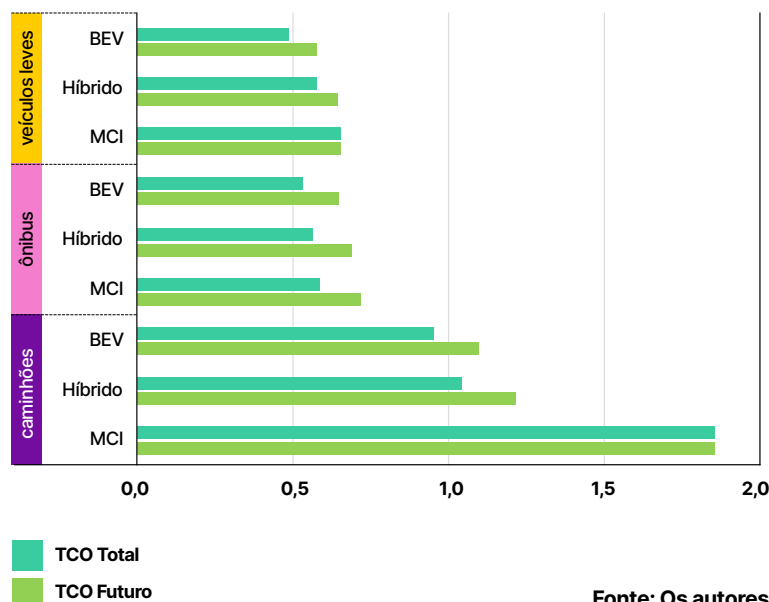
Aspectos financeiros e econômicos

Os aspectos econômico-financeiros da operação de ônibus elétricos a bateria são fundamentais para tornar possível a descarbonização do transporte público. Nesse sentido, é relevante que sejam quantificados os diversos investimentos necessários, incluindo aqueles para adquirir o veículo, conceber a infraestrutura de recarga e todos os outros associados ao ciclo de vida de tais componentes.

Abaixo, temos uma amostra comparativa do custo total de propriedade de veículos elétricos e a combustão, por tipo de modal, sendo este impactante para os investimentos iniciais da eletrificação, considerando que o capital investido será absorvido pela economia futura.

FIGURA 26

Custo total de propriedade das tecnologias de transporte (dólares/km)

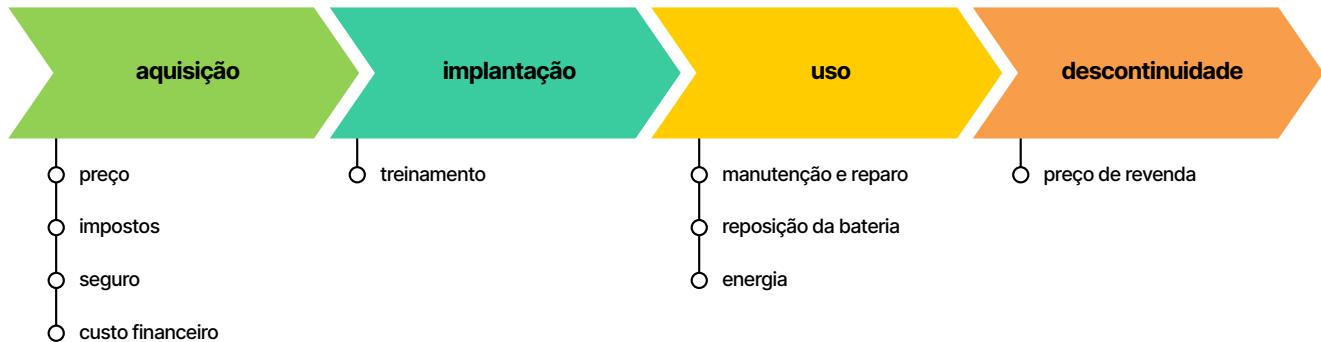


Fonte: Os autores.

Tendo em vista a natureza das concessões no âmbito do transporte público urbano, é importante que as modelagens financeiras sejam fundamentadas a partir de contextos particulares de operação das cidades e construam, portanto, contratos cujos dimensionamentos de obrigações, investimentos e pagamentos sejam aderentes à realidade.

FIGURA 27

Ciclo de vida do veículo Aspectos financeiros



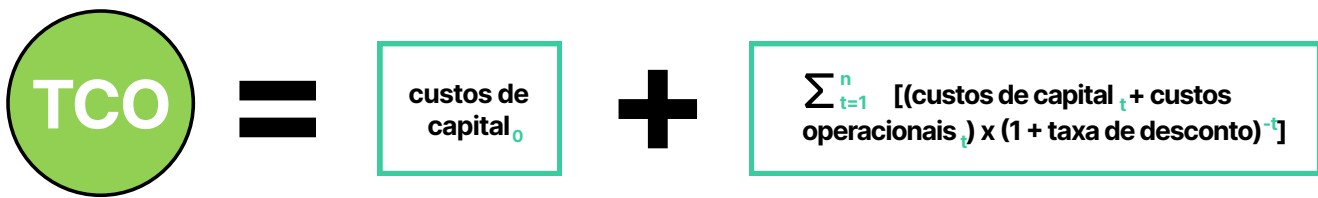
Nesta seção, serão abordados mecanismos para quantificar recursos envolvidos na introdução de ônibus elétricos a bateria em frotas de transporte público. Na sequência, trataremos de formas de financiamento da transição energética, considerando recursos do governo federal e de implementações locais. Por fim, apresenta-se o balanço social como instrumento de transparência e avaliação de custo-efetividade da eletrificação do transporte público.

5.1 Custo total de propriedade

O custo total de propriedade (TCO, da sigla em inglês, como visto antes) consiste em uma verificação contábil que quantifica o custo de possuir um recurso (no caso, os ônibus), considerando toda a sua vida útil. A aquisição, a operação, a manutenção e o valor residual do veículo (após sua depreciação) são, portanto, analisados a valor presente para indicar o volume de investimentos necessários para sua implantação.

Dessa maneira, pode-se considerar que o TCO é uma medida utilizada internamente pelos entes privados para estimar a rentabilidade e determinar a viabilidade de investir na proposta concebida pelo poder público. Sabendo que o transporte público é um serviço usualmente provido via concessões ao setor privado, o cálculo do TCO é crucial para representar a dimensão dos contratos, uma vez que o custo total do sistema depende do volume estimado de veículos em circulação. Para o cálculo do TCO utiliza-se a seguinte expressão:

FIGURA 28



O diagrama apresenta a equação para o Custo Total da Operação (TCO). À esquerda, um círculo verde contém o texto "TCO". À direita, a equação é representada por uma barra de igualdade, seguida por um retângulo contendo "custos de capital₀", um símbolo de adição (+), e outro retângulo contendo a soma de uma série: $\sum_{t=1}^n [(\text{custos de capital}_t + \text{custos operacionais}_t) \times (1 + \text{taxa de desconto})^{-t}]$.

Conforme dito antes, o dimensionamento da frota é um dos principais parâmetros utilizados para quantificar o custo total da rede. Além disso, devem ser considerados um período temporal representativo da vida útil do veículo (ou de vigência do contrato) e uma taxa de desconto, utilizada para compatibilizar os valores projetados de despesa ao longo do tempo em que o ônibus puder ser utilizado a contento em condição de desempenho adequado e as condições atuais de levantamento de custos.

Tendo em vista as modelagens que podem apoiar a transição energética do transporte público, entende-se que os altos custos do sistema, previstos no TCO, devem ser compartilhados entre diversos entes (privados). Isso implica que, na estrutura de uma concessão, o grau de especialização de cada agente envolvido é maior, determinando com mais assertividade a alocação de riscos e direitos de propriedade.

TABELA 16

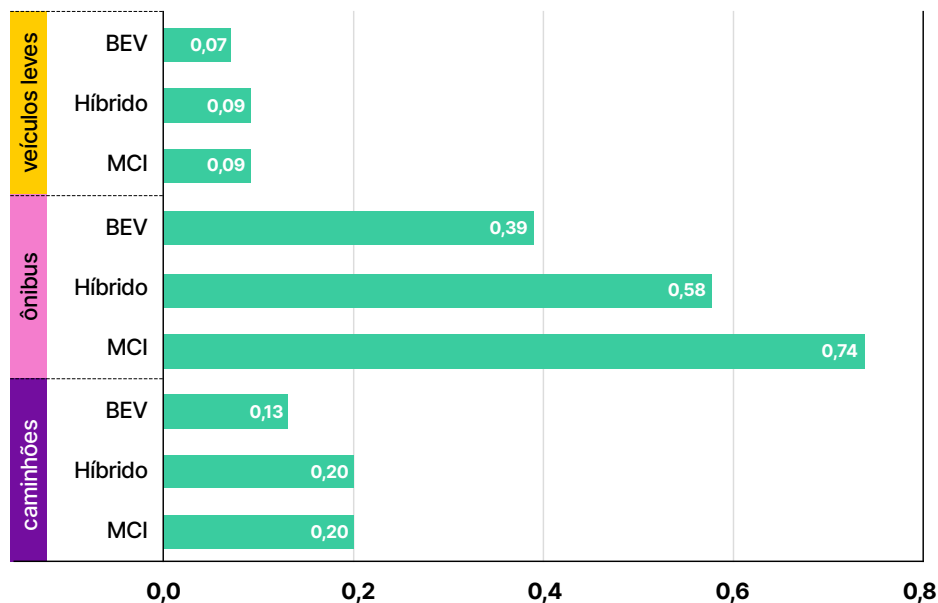
Categoria	Aspecto	Descrição
Aquisição (ônibus e componentes)	Pagamento inicial/financiamento de capital	Pagamento inicial, que pode vir de fundos ou subsídios existentes. Não inclui o financiamento que precisa ser desenvolvido.
	Pagamento(s) de empréstimos e financiamento de dívida	Pagamento(s) de empréstimos e juros correspondentes ao longo do cronograma especificado.
	Valor de revenda	Aplicável apenas quando a vida útil do veículo ultrapassar o prazo de operação do sistema, quando a opção é de aquisição.
Custos de operação (operações e manutenção)	Abastecimento com eletricidade	Despesa anual com tarifas de energia elétrica para recarregar as baterias.
	Outras operações	Custo anual de materiais adicionais necessários para as operações, como ar condicionado.
	Manutenção dos ônibus	Custo anual de manutenção.
	Manutenção das infraestruturas	Custo anual de manutenção da infraestrutura de carregamento (tanto na rota quanto nas garagens).
	Revisão dos ônibus	Custos de revisão dos ônibus e baterias, por exemplo, substituição de baterias em caso de falha antes do fim da vida útil programada.

Categoria	Aspecto	Descrição
Custos de destinação final	Destinação dos ônibus e componentes de recarga	Se a vida útil dos ônibus não ultrapassar o prazo de operação de sistema, deve ser previsto o custo de destinação dos veículos e componentes.
	Destinação de bateria	Custo de destinação da bateria. Se estiver sob garantia ou sob um sistema de descarte designado por contrato, os fabricantes podem ser responsáveis pela destinação.

A inclusão de projetos de eletromobilidade em planos mais amplos de desenvolvimento urbano e de transporte pode aumentar sua atratividade. Quando os projetos são vistos como parte de uma estratégia abrangente de desenvolvimento sustentável, eles tendem a receber mais apoio e financiamento.

FIGURA 29

OPEX das tecnologias de transporte (dólares/km)



Fonte: Adaptado de GRAMKOW e OLIVEIRA (2023).

5.2 Energia

No Brasil, há dois mercados principais de energia, que proporcionam diferentes opções e estratégias para os consumidores.

O setor energético nacional é um dos mais diversificados e importantes do mundo, caracterizado por uma matriz energética predominantemente renovável. O Brasil possui uma vasta riqueza de recursos naturais, que lhe permitem gerar energia a partir de diversas fontes, como hidrelétricas, eólicas, solares e biomassa. A energia hidrelétrica representa a maior parcela da geração de eletricidade no país, aproveitando os abundantes rios para produzir energia limpa e renovável. Nos últimos anos, o Brasil também tem se destacado na expansão das fontes eólica e solar, consolidando-se como um líder global em energia renovável.

A política energética brasileira busca equilibrar a oferta e a demanda, garantir a segurança energética e promover a sustentabilidade ambiental. Para isso, o país investe em inovação tecnológica e infraestrutura, além de incentivar a participação do setor privado na expansão e na modernização do sistema elétrico. Mas o setor de energia nacional enfrenta desafios significativos, como a necessidade de diversificar ainda mais a matriz energética, melhorar a eficiência do sistema de distribuição e ampliar o acesso à energia em regiões remotas.

Nesse contexto, a eletrificação da frota de ônibus urbanos surge como uma estratégia promissora para promover a sustentabilidade e a eficiência no setor de transporte público. A transição para ônibus elétricos, insista-se, pode reduzir significativamente as emissões de gases poluentes, melhorar a qualidade do ar nas cidades e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a eletrificação da frota pode impulsionar a inovação tecnológica e criar oportunidades de negócios e empregos no país.

Para que essa transição seja exitosa, é fundamental um planejamento cuidadoso e integrado que contemple não apenas a aquisição dos veículos, mas também o desenvolvimento de uma infraestrutura de recarga adequada. A localização estratégica das garagens, a proximidade de subestações elétricas, a capacidade da rede elétrica local e a utilização de sistemas de armazenamento de energia são aspectos essenciais que devem ser considerados. Além disso, a integração de fontes de energia renovável para o carregamento dos ônibus pode aumentar ainda mais a sustentabilidade dessa iniciativa.

O Brasil, com sua matriz energética diversificada e seu compromisso com a sustentabilidade, está bem posicionado para liderar a eletrificação do transporte público. Entretanto, essa transição exige a colaboração de governos, empresas e sociedade para superar os desafios e garantir um futuro energético mais limpo e eficiente. Ao investir na eletrificação da frota de ônibus, o Brasil pode não apenas melhorar a qualidade de vida nas cidades como também reafirmar seu papel de destaque no cenário global de energia sustentável.

5.2.1 Mercado Cativo

No Mercado Cativo – como se pontuou antes, uma das modalidades do setor elétrico no Brasil – os consumidores são atendidos por uma única empresa, a distribuidora local, que é responsável por transporte e fornecimento de energia elétrica. As tarifas cobradas dos consumidores são definidas pela Aneel para a área de atuação da concessionária, sendo estabelecidas anualmente e admitindo oscilações de preço em função de condições de geração de energia e do risco de escassez hídrica no período.

Quando o consumo de energia requer fornecimento de eletricidade em alta tensão, a contratação de energia pode ocorrer por meio das tarifas verde ou azul, ambas pertencentes ao grupo A de tensão (formado por consumidores de alta e média tensão, como indústrias, hospitais e shoppings). Nessas modalidades, o custo total com energia elétrica se dá a partir da potência (taxa ou “velocidade” de consumo) e do volume de energia efetivamente consumido. Além disso, quando a demanda ultrapassa os parâmetros contratados, considera-se ainda um custo adicional, representando uma penalidade a respeito da sobrecarga imposta à rede de distribuição de energia.

Em geral, estratégias de recarga planejadas para consumir energia de modo constante e homogêneo ao longo do dia (exceto durante horário de ponta, isto é, de pico na demanda) tendem a ter custos menores. Isso ocorre devido à maior faixa horária disponível para consumir o volume de energia requisitado pelos serviços. Destaca-se que, no caso da tarifa azul, o custo da potência contratada varia em função do horário do dia, produzindo tarifas mais altas durante a faixa horária de ponta.

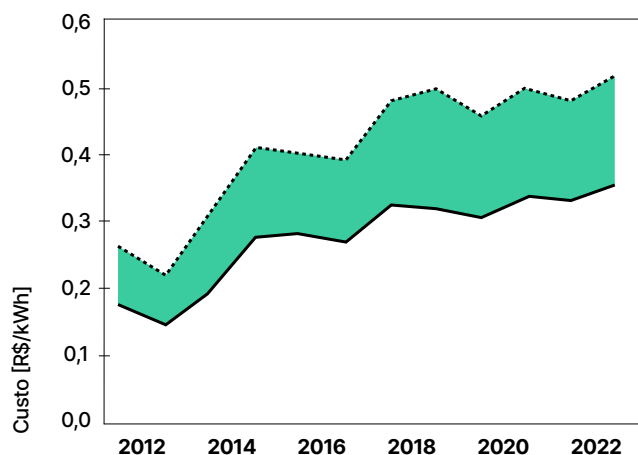
A parcela de consumo diz respeito ao volume total de energia requisitado para operar a rede de transporte. Sua precificação é feita em função do horário do consumo (atribuindo tarifas mais altas para consumo durante horários de ponta) e da bandeira tarifária vigente, que sinaliza os custos de geração de energia e está diretamente associada às circunstâncias climáticas e sazonais brasileiras. Enquanto o horário de consumo é um fator dependente da estratégia de recarga estabelecida para operação da rede, a oscilação de preço da energia a partir das bandeiras tarifárias representa uma incerteza sobre a estrutura de custos do sistema.

Considerando as tarifas de consumo vigentes nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília, Fortaleza, Salvador, Belo Horizonte, Curitiba, Recife e Goiânia, tem-se o seguinte histórico para custo de energia (por kWh) consumida:

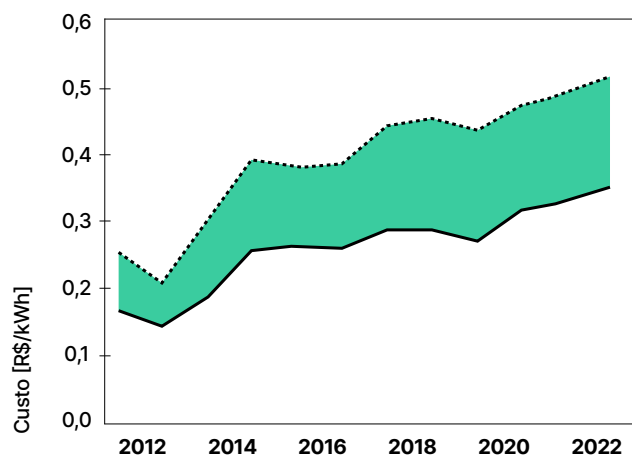
FIGURAS 30 a 35

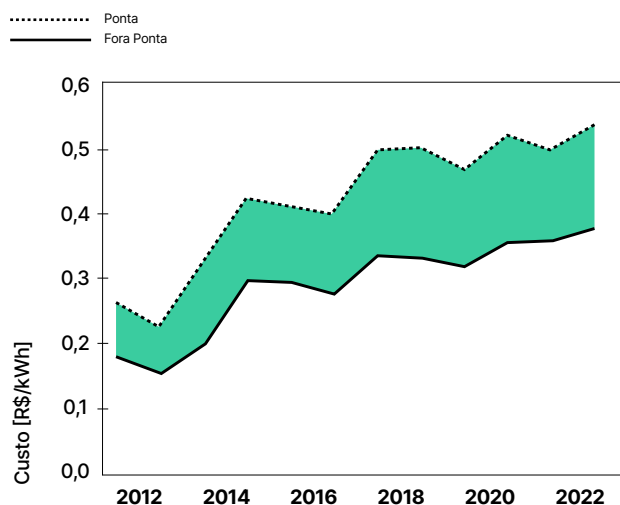
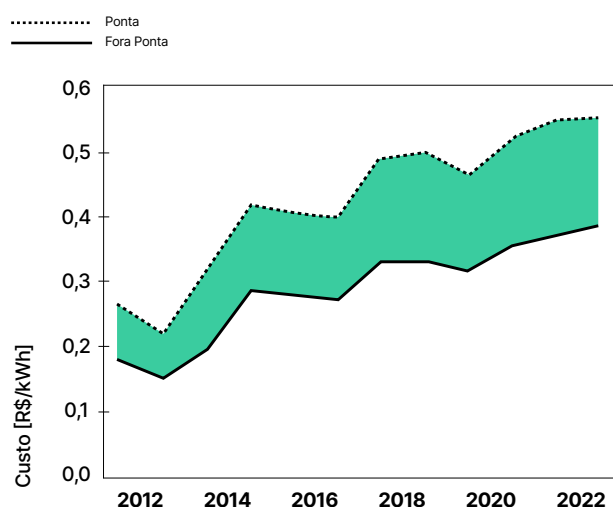
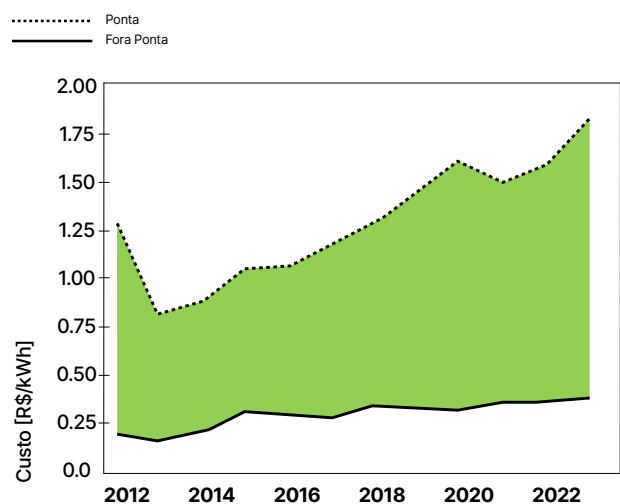
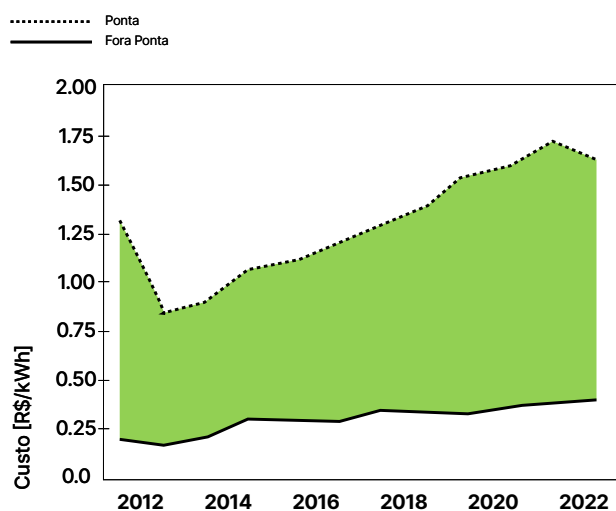
Tarifa Azul - A2

..... Ponta
 — Fora Ponta

**Tarifa Azul - A3**

..... Ponta
 — Fora Ponta



Tarifa Azul - A3a**Tarifa Azul - A4****Tarifa Verde - A3a****Tarifa Verde - A4**

Fonte: Elaboração própria a partir de conjunto de dados disponibilizado pela Aneel.

Comparando os subgrupos entre si, quanto maior é a tensão de abastecimento associada a um subgrupo, menores são suas tarifas. Isto é, de forma geral, o subgrupo A2 fornece tarifas mais baixas do que o subgrupo A4. Comparando as modalidades de tarifa, nota-se que a tarifa azul incorre em menores custos quando é necessário consumir energia durante horários de ponta. Em contrapartida, a tarifa verde oferece menores custos quando o consumo ocorre estritamente fora dos horários de ponta, sendo este o caso da já mencionada estratégia de recarga overnight, por exemplo.

De maneira prática, o custo médio do consumo de energia será uma ponderação entre o consumo durante e fora do horário de ponta, resultando em um valor intermediário frente às tarifas vigentes. Conforme metodologia apresentada no Projeto de financiamento de ônibus elétricos em Belo Horizonte (ITDP e Logit, 2022), recomenda-se que o custo médio do consumo energético

seja determinado a partir de uma ponderação entre custos nos diversos regimes admissíveis para a tarifa (bandeiras verde, amarela, vermelha e de escassez).

Portanto, diante da variabilidade nos custos de consumo energético, a contratação de uma tarifa de energia deve estar alinhada à estratégia de recarga proposta. Desse modo, garante-se que as características operacionais da rede de transporte serão exploradas de forma otimizada, produzindo uma estrutura de custos racionalizada e eficiente.

5.2.2 Mercado Livre

Em contrapartida, no ML, a segunda modalidade do mercado brasileiro de energia elétrica, ocorrem negociações sobre o preço da geração de energia. A rede elétrica de distribuição continua sendo provida pela concessionária local, porém há flexibilidade para contratação de energia a partir de diversos geradores, como hidrelétricas, usinas térmicas, usinas fotovoltaicas e eólicas. Os contratos podem ter duração curta ou longa, sendo estabelecidos a partir de parâmetros técnicos relativos à demanda de energia do consumidor.

A precificação da tarifa no ML é dada em contrato considerando a demanda energética exigida pelo consumidor e pelo Preço de Liquidação das Diferenças (PLD), definido pela Aneel. Ele corresponde ao valor estipulado em reais por megawatt-hora (R\$/MWh) que se utiliza na totalização das transações de energia no ML, com limites impostos pela tarifa mínima e pela máxima definidos anualmente pela Aneel. Sublinhe-se que, nos contratos de longo prazo – principalmente naqueles que negociam grandes volumes de energia –, é possível chegar a custos mais vantajosos, promovendo maior previsibilidade nos gastos estabelecidos ao longo do contrato.

Essa modalidade, também conhecida como Tarifação Horo-Sazonal (THS), constitui um conjunto de tarifas aplicadas ao consumo de energia e à demanda contratada para clientes pertencentes ao grupo A, que geralmente é atendido por subestações com tensão elevada e envolve consumidores com grande uso de energia.

É importante destacar que os consumidores cujas instalações são alimentadas em alta tensão têm sua precificação baseada nas tarifas horo-sazonais. Esse mecanismo tarifário permite que o preço da energia seja estipulado de acordo com o horário e a estação do ano em que o consumo ocorre. Por exemplo, indústrias que operam em períodos de alta demanda, como durante o verão ou em horários de pico, podem enfrentar tarifas mais elevadas, enquanto aquelas que conseguem deslocar parte de seu consumo para períodos de menor demanda podem beneficiar-se de tarifas reduzidas.

Tal estrutura tarifária não só incentiva um uso mais eficiente e racional da energia como também permite aos grandes consumidores, como os gestores de redes de transporte público, planejar e otimizar seus custos operacionais. Por exemplo, uma grande rede de ônibus elétricos em São Paulo pode aproveitar tarifas mais baixas durante a madrugada para recarregar suas frotas, reduzindo significativamente os custos com energia elétrica.

5.3 Custos de manutenção

Os ônibus elétricos, em geral, têm menos necessidades de manutenção e reparo. O motor elétrico, a transmissão de engrenagem redutora e o controlador do motor dos ônibus elétricos possuem uma estrutura mecânica mais simples e oferecem maior eficiência de transmissão.

Embora o chassi e o eixo dos ônibus elétricos não variem muito em relação aos dos ônibus convencionais, a maioria dos ônibus elétricos usa sistemas de suspensão a ar, que são mais leves, mais eficientes em termos de energia e menos ruidosos do que a suspensão de molas. O sistema de suspensão a ar também é superior em termos de redução nas necessidades de manutenção e reparo. O desgaste dos pneus é maior para os ônibus elétricos devido ao peso adicional das baterias. Os ônibus elétricos também utilizam freios a disco, que requerem menos manutenção do que os freios a tambor.

Comparando as verificações de manutenção e a carga de trabalho de reparo nos ônibus elétricos e nos convencionais tem-se o seguinte panorama para a frota eletrificada:

Inspeção regular, inspeção diária e manutenção de nível I (a cada 4.000-5.000 km)

Permanecem as mesmas, com maior ênfase na inspeção de segurança;

Baixa necessidade de manutenção, incluindo a de nível II (a cada 20.000 km) e reparos na oficina

Reduzida especialmente em defeitos mecânicos. Todavia, o trabalho em partes eletrônicas aumenta;

Manutenção de revisão e reparos de componentes inteiros

Sobretudo no motor e na carroceria, são significativamente reduzidos para o ônibus elétrico;

Necessidade de armazenamento de peças e componentes

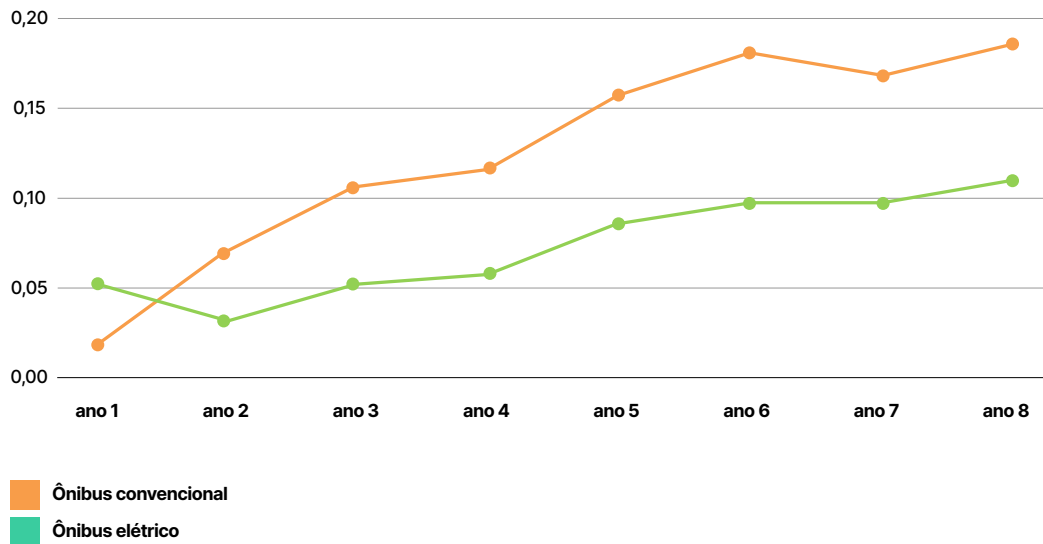
Significativamente reduzida, pois os tipos e o estoque de materiais e componentes de reparo são menores.

O número de defeitos dos ônibus elétricos, em relação aos do ônibus a diesel, gera uma necessidade de cerca de 10 manutenções elétricas para cada 14 manutenções do ônibus a diesel.

Os ônibus elétricos, em geral, têm uma taxa de defeitos maior no primeiro ano devido a modificações técnicas e ajustes feitos no modelo do veículo na fase inicial de implantação. Cerca de metade de todos os defeitos nos ônibus elétricos no estágio de dois anos estão sob garantia do fabricante.

FIGURA 36

Número de defeitos de ônibus convencionais e elétricos por mil quilômetros rodados

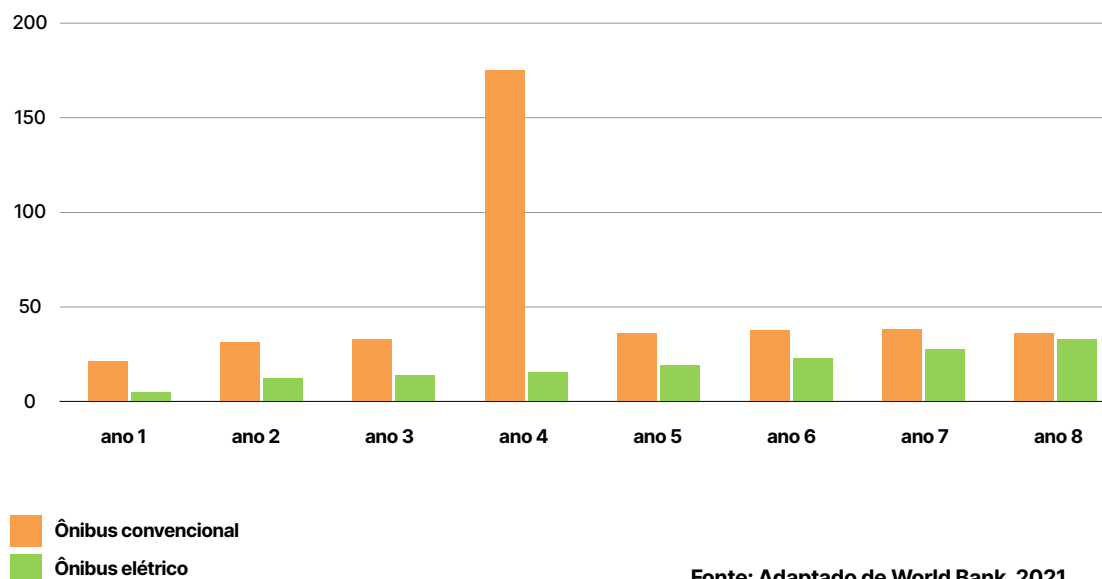


Fonte: Adaptado de World Bank, 2021.

Outros problemas de reparo incluem defeitos no compressor e degradação da bateria. Ônibus a diesel requerem manutenção de revisão a cada quatro anos, focando em especial o motor a diesel e as transmissões, que incorrem em um custo significativo. Embora o custo anual de manutenção dos pneus dos ônibus elétricos seja cerca de 30% maior do que o dos ônibus a diesel devido ao seu peso, como dito antes, estima-se que os custos totais de manutenção ao longo da vida útil do ônibus elétrico sejam cerca de 30-40% dos verificados nos ônibus a diesel tradicionais.

FIGURA 37

Custos de manutenção (mil yuans por ônibus) com distância percorrida anual de 66 mil km



Fonte: Adaptado de World Bank, 2021.

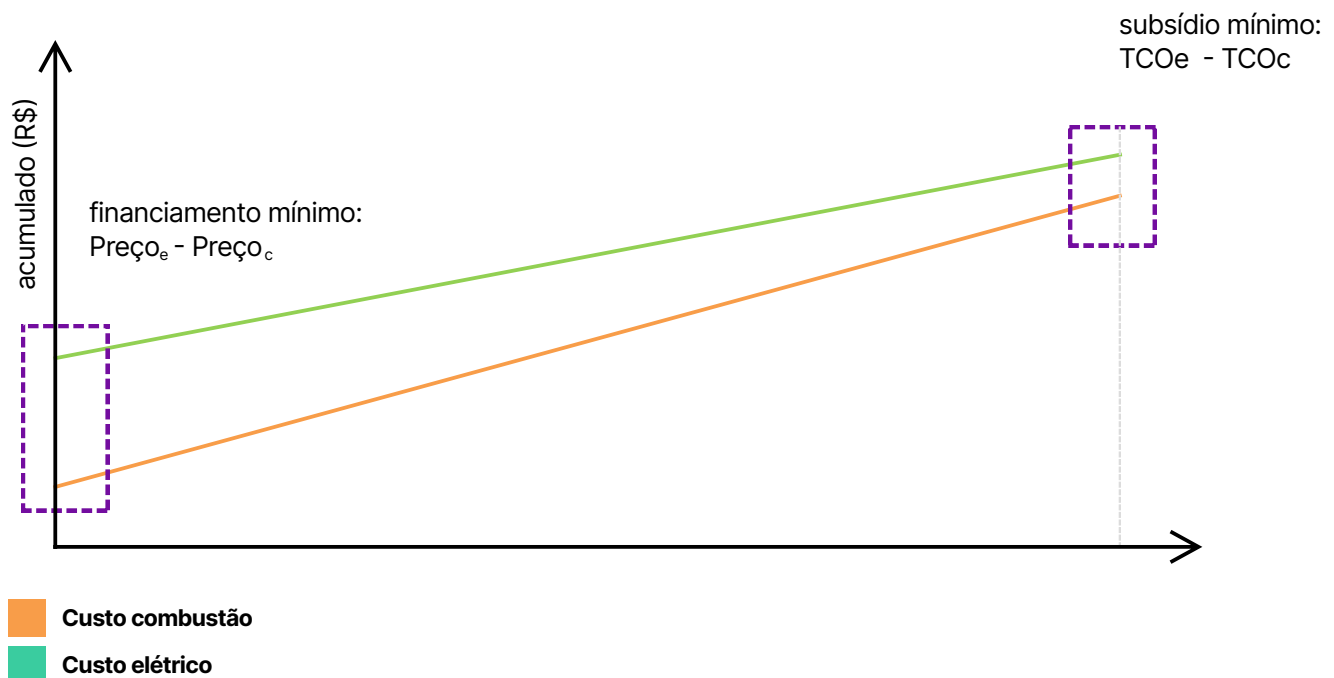
5.4 Incentivos em âmbito federal

Na teoria econômica tradicional, entende-se que incentivos econômicos sejam formas de indução de comportamentos, uma vez que alteram a relação diferencial de custos entre dois bens. Nessa direção, contabilizando toda a vida útil de dois ativos, é possível que as dinâmicas de custos (envolvendo principalmente o investimento inicial e custos associados à operação) apresentem padrões diferentes. Entende-se que, quando um bem possui custo menor do que seu par, o consumo dele se torna preferível. No caso dos ônibus elétricos, sabe-se que os custos iniciais (para adquirir um veículo) superam em grande volume aqueles requeridos na compra de um veículo de mesmo porte movido a diesel. Sabe-se também que sua operação tem um custo muito inferior à operação baseada em combustíveis fósseis, o que, no longo prazo, tende a equiparar ou até gerar custos inferiores para os veículos elétricos.

Contudo, o alto volume investido inicialmente pode se configurar como barreira para adoção da tecnologia do ônibus elétrico em massa. Por isso, instrumentos financeiros que induzem esse comportamento são especialmente aplicáveis nesse contexto, podendo ser estruturadas a partir de linhas de crédito e financiamentos com baixo custo financeiro, por exemplo. Ao se verificar discrepância entre os custos totais, faz-se necessário ainda subsidiar o diferencial, quando o objetivo é fomentar investimento na tecnologia que se apresenta mais cara.

FIGURA 38

Subsídio e financiamento mínimos



Considerando os grandes volumes de investimentos requeridos para operacionalização de frotas elétricas, o governo federal desempenha um papel central no incentivo à descarbonização do transporte público, que é usualmente operacionalizado em jurisdições municipais. Por meio de transferência de recursos, é possível orientar de maneira estratégica projetos de transição

energética e, assim, mitigar o impacto ambiental do transporte no ambiente urbano. Como nos exemplos apresentados a seguir.

5.4.1 Renovação de Frota do Transporte Público Coletivo Urbano (Refrota)

O programa federal Renovação de Frota do Transporte Público Coletivo Urbano (Refrota) objetiva aumentar a eficiência dos prestadores de serviços de mobilidade em cidades. Ele busca financiar iniciativas tanto do setor público quanto no privado para implementar e aprimorar sistemas e infraestruturas de mobilidade, visando promover o desenvolvimento urbano, econômico e social, além de contribuir para a preservação ambiental.

A estrutura do programa, coordenado pelo Ministério das Cidades, inclui uma taxa anual de juros de 6%, com um prazo de amortização de até 20 anos e uma contrapartida mínima de 5% do investimento proposto. O financiamento é direcionado para veículos do sistema de transporte por ônibus, abrangendo os de menor porte (denominados tipo I e englobando micro-ônibus, miniônibus, midiônibus e ônibus básico) e maior porte (denominados tipo II e englobando ônibus padron, ônibus articulado e ônibus biarticulado).

Podem pleitear recursos:

- * Companhias privadas, participantes de consórcios e sociedades de propósito específico que detenham a concessão ou a permissão do transporte público coletivo urbano ou de serviços associados;
- * Empresas privadas que possuam projetos ou investimentos em mobilidade urbana, em desenvolvimento urbano ou em modernização tecnológica urbana, desde que autorizadas pelo poder público respectivo;
- * Companhias participantes de consórcios e sociedades de propósito específico que detenham a concessão ou autorização para a exploração de infraestruturas de transportes para a realização de intervenções que contribuam para a mobilidade urbana da região.

5.4.2 Novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC)

O Novo Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) é uma iniciativa que tem o propósito de impulsionar o crescimento econômico e promover a inclusão, criando empregos, reduzindo desigualdades sociais e regionais. O programa fomenta obras em diversas áreas estratégicas como saúde, educação e mobilidade.

Destacam-se o eixo “Cidades sustentáveis e resilientes” e o subeixo “Mobilidade urbana sustentável”, incentivando o desenvolvimento de novas práticas em gestão, regulamentação e tecnologia no setor de transporte urbano, incluindo a adoção de energias renováveis para mitigar as emissões de gases de efeito estufa. A carteira de projetos de mobilidade urbana do PAC engloba investimentos provenientes de recursos públicos e privados e abre possibilidades para modelos baseados em PPPs.

Na seleção de projetos de renovação de frota, o orçamento contempla tanto iniciativas de aquisição de ônibus elétricos (e respectivos equipamentos eletrônicos embarcados) quanto a necessária instalação de equipamentos de recarga. A participação está aberta a estados, municípios, consórcios e operadores privados, desde que o município alvo da intervenção tenha mais de 150 mil habitantes (Brasil, 2023b). A especificação do projeto deve conter minimamente (Brasil, 2023a):

- * Carta-consulta eletrônica (disponível na plataforma TransfereGov);
- * Especificação de modelo dos veículos (micro-ônibus, básico, padron, articulado);
- * Comprovação de bilhetagem eletrônica ou implantação concomitante;
- * Situação do contrato de operação (regulação por concessão ou permissão para o setor privado).

5.5 Mecanismos alternativos de financiamento

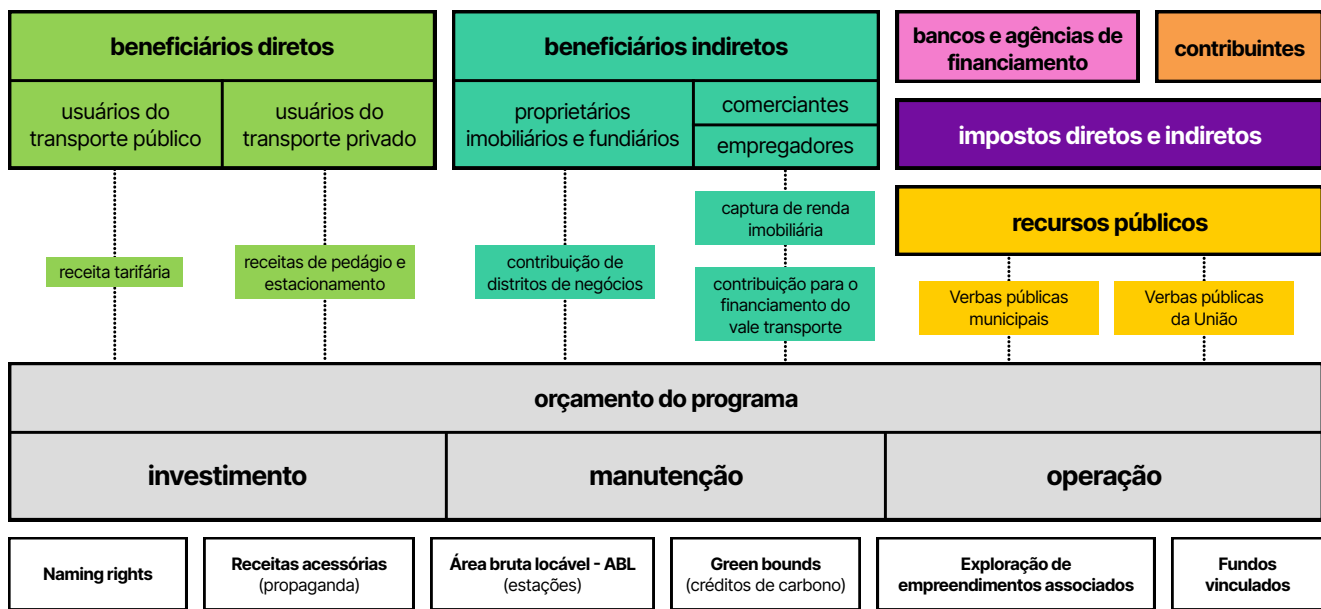
No atual cenário de emergência climática, as políticas públicas dedicadas à mobilidade podem direcionar esforços para a promoção de sustentabilidade e saúde pública no ambiente urbano. Políticas públicas, nesse contexto, referem-se às ações, diretrizes e medidas governamentais voltadas para a promoção e o incentivo da adoção de veículos elétricos no transporte público. Tais iniciativas visam criar um ambiente propício para a transição para a eletromobilidade, podendo ser operacionalizadas direta ou indiretamente por meio de incentivos fiscais, subsídios, regulamentações e investimentos.

Diante da complexidade de promover a sustentabilidade no contexto urbano, frequentemente se propõe uma estratégia que integra diversas ações para minimizar a emissão de poluentes e, portanto, impactos ambientais. Tendo em vista os investimentos volumosos para incorporação da frota e da infraestrutura de recarga necessária, é de grande valia estruturar políticas de desincentivo ao transporte individual e combustíveis fósseis que são capazes de financiar a transição energética.

Modelos de financiamento inovadores, como empréstimos condicionais ao desempenho, em que o reembolso é atrelado ao sucesso e ao impacto do projeto, têm sido explorados. Além disso, o uso de green bonds tem se mostrado uma ferramenta eficaz para atrair investidores interessados em projetos sustentáveis.

Sob a perspectiva microeconômica, externalidade é uma consequência não intencional de uma transação, afetando terceiros que não estão envolvidos na transação original. No contexto da mobilidade urbana, externalidades negativas comuns são a poluição do ar, as emissões de GEE e o congestionamento do tráfego, gerados primariamente por deslocamentos que consomem combustíveis fósseis em veículos privados/individuais. Como consequência, tais externalidades negativas produzem custos compartilhados na sociedade, que se materializam em danos à saúde pública, degradação ambiental e agravamento dos efeitos provocados pelo aquecimento global.

FIGURA 39



Considerando o desafio de viabilizar investimentos para incorporação da nova frota e implantação de infraestrutura de recarga, o financiamento da transição energética pode ser concebido como um modo de neutralizar ou reduzir externalidades negativas geradas por outros meios de transporte. Medidas que se apoiam nessa lógica são, por exemplo, taxaço de congestionamento, de estacionamento em espaços públicos e do consumo de combustíveis fósseis.

TABELA 17

Medida	O que é	Aplicação
Congestion Pricing	O congestionamento urbano não apenas aumenta o tempo de viagem como também contribui para emissões adicionais de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa. Implementar um sistema de preços de congestionamento, pelo qual os motoristas são cobrados para entrar em áreas urbanas congestionadas durante horários de pico, reduz o tráfego e melhora a fluidez do trânsito.	Nova York, Londres
Parking Fee	Cobrar taxas de estacionamento em áreas urbanas movimentadas desincentiva o uso do automóvel particular, estimulando as pessoas a optarem pelo transporte público, compartilhamento de carros ou modos mais sustentáveis de locomoção, como caminhadas e ciclismo. Além disso, o espaço público cujo uso anteriormente era restrito aos veículos privados pode ser reformulado para servir a propósitos mais interessantes.	São José dos Campos (SP)
Fuel Tax	Estabelecendo um imposto sobre o combustível fóssil utilizado pelos veículos, o governo pode internalizar os custos externos associados à poluição do ar e às mudanças climáticas. Ao se tornar o combustível mais caro, os consumidores são incentivados a buscar outros meios de transporte, o que pode se associar a um aumento na demanda pelo transporte público.	Bogotá (financiamento da construção do BRT TransMilenio)

5.6 Externalidades e avaliações socioeconômicas

Em um contexto de transição energética e eletrificação do transporte público, um balanço social robusto é essencial para estimar o impacto das políticas públicas e promover a sustentabilidade socioambiental do processo. A partir dessa ferramenta, o governo demonstra compromisso com a administração responsável dos recursos financeiros, tornando visíveis os gastos e resultados alcançados. Isso não apenas aumenta a compreensão cidadã sobre as ações governamentais como também possibilita uma participação social maior no monitoramento e na avaliação das políticas implementadas.

Ademais, análises envolvendo investimentos e os diversos impactos esperados são fundamentais para promover decisões que contemplem o contexto social, normativo e econômico de um município. No que tange especificamente à comparação entre políticas públicas, comparar os benefícios de cada uma frente aos recursos solicitados é ainda mais relevante para garantir assertividade no planejamento de redes de transporte sustentáveis e eficientes.

Estudos recentes (World Bank, 2021) apontam benefícios econômicos estimados com a redução de emissões de GEE da frota de ônibus de que resultam aproximadamente R\$ 10.000/ônibus/ano incorporado à frota. O benefício monetizado das emissões de poluentes atmosféricos apoia os subsídios para incentivar a eletrificação do transporte público. A estimativa do benefício é conservadora, pois não inclui outros benefícios, como redução de ruído, melhoria do conforto dos passageiros e motoristas, melhoria da estabilidade da rede elétrica, coleta de dados mais fácil para melhorar a operação dos ônibus, gerenciamento da frota e monitoramento.

TABELA 18

Benefícios econômicos estimados da redução das emissões de gases de efeito estufa da frota de ônibus

Ano	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Baixo	1267	1301	1335	1370	1404	1438	1472	1506
Alto	2568	2636	2671	2739	2808	2876	2944	2979
Média (USD)	1917	1969	2003	2054	2106	2157	2208	2243
USD por 8 anos (e.g., ciclo de vida)*								14434

*(com taxa de desconto de 3%)

Fonte: Adaptado de World Bank, 2021.

Muitos governos, pelo planeta afora, oferecem incentivos financeiros, no entanto é possível estabelecer uma análise para além do TCO. A transição para a eletromobilidade oferece uma ampla gama de benefícios econômicos e financeiros, desde a redução de custos operacionais e incentivos governamentais até a criação de empregos e impactos positivos no mercado energético. Somem-se a isso os benefícios ambientais associados, que promovem uma economia mais sustentável e saudável. A utilização de métodos de análise de viabilidade como TCO, análise de retorno de investimento (ROI, na sigla em inglês), análise de input-output (I-O), modelagem de sistema energético e análise de custo-benefício (CBA) fornece uma visão abrangente dos impactos e benefícios da eletromobilidade, ajudando a tomar decisões informadas e estratégicas. Do TCO já falamos anteriormente; vejamos as outras métricas agora mencionadas.

Análise de Retorno sobre Investimento (ROI)

Esse método mede a rentabilidade dos incentivos governamentais, comparando os benefícios econômicos e ambientais gerados com os custos associados aos subsídios e incentivos fiscais;

Análise de Input-Output (I-O)

Avalia os efeitos econômicos indiretos e induzidos da adoção da frota elétrica, tais como a criação de empregos na cadeia de suprimentos e o impacto econômico local;

Modelagem de Sistema Energético

Utiliza simulações computacionais para prever o impacto da eletrificação de frotas na rede elétrica, incluindo a gestão de demanda e a estabilidade da rede;

Análise de Custo-Benefício (CBA)

Compara os custos e benefícios totais de projetos de eletromobilidade, incluindo benefícios intangíveis como a melhoria da saúde pública e a mitigação das mudanças climáticas.

6

Possibilidades de configuração dos contratos e parcerias para aumento das frotas de ônibus elétricos

Ao mesmo tempo que a entrada de novos atores pode aumentar o nível de complexidade dos processos decisórios relativos a gestão, operação e manutenção da frota, ela permite, por outro lado, que as cidades diluam as despesas iniciais com capacitação técnica, pois as partes envolvidas ficariam responsáveis pelas funções nas quais já tenham expertise real. A destinação das baterias ao término de sua vida útil, por exemplo, pode ficar a cargo de uma das partes (geralmente a fornecedora) com base em um arranjo de aluguel (leasing) de componentes.

O modelo de negócios focado no compartilhamento de riscos também pode servir de apoio a uma governança que responda a esses desafios de qualificação técnica. Dessa maneira, cada parte envolvida ficaria responsável por investir e capacitar seus próprios recursos humanos de modo otimizado e especializado – uma oportunidade para estimular a formação e a consolidação de novos nichos de mercado e empregos. Além disso, o modelo permite a reinserção no mercado de trabalho de profissionais que já atuavam no setor de transporte de passageiros urbanos e que tenham sido atingidos por crises dos anos anteriores.

Nos sistemas de transporte público contemporâneos, os contratos de concessão são essenciais, sobretudo na adoção de frotas de ônibus elétricos para alinhar as operações com os objetivos ambientais e de sustentabilidade urbana. Nesse contexto, é crucial ressaltar a importância da separação de contratos para provisão e operação, uma vez que tal divisão permite uma atribuição mais clara de responsabilidades, resultando em serviços mais eficientes. Um exemplo brasileiro é a concessão do metrô da capital paulista, que separou a operação dos serviços da manutenção e da ampliação da rede, melhorando a eficiência operacional.

Elementos de modelos de negócios para mobilidade elétrica

1. Modelo de contratação ou aquisição (se aluguel ou compra)

- * alto custo de investimento inicial é barreira para modelo tradicional de compra pelas operadoras ou Ente Público
- * aluguel está sendo uma opção a ser considerada (caso SIC)

2. Custo total de propriedade (TCO)

- * o TCO se torna mais acurado quando o modelo de negócios é incluído (definição do período de aquisição, pe)

3. Fontes de recursos não reembolsáveis

- * subsídios, incentivos fiscais, tarifas dos usuários

4. Fontes de recursos reembolsáveis

- * financiamentos

5. Modelos de contratação (licitação e contratos)

- * Licitação ainda é uma grande barreira regulatória (falta de agilidade na contratação conflita com a rapidez da adoção de uma nova tecnologia)

Clareza também sobre o prazo de vigência contratual dessas delegações de serviços públicos é imprescindível. A ideia que tem sido mais aceita é de um período de 15 anos para a provisão de ônibus elétricos, salientando-se a relevância desse prazo para a viabilidade econômica do investimento. Pode-se mencionar como benefícios de prazos de operação mais curtos o incentivo à adoção de inovações, citando o caso do sistema BRT (Bus Rapid Transit) de Curitiba, no qual contratos dinâmicos facilitaram a atualização tecnológica da frota.

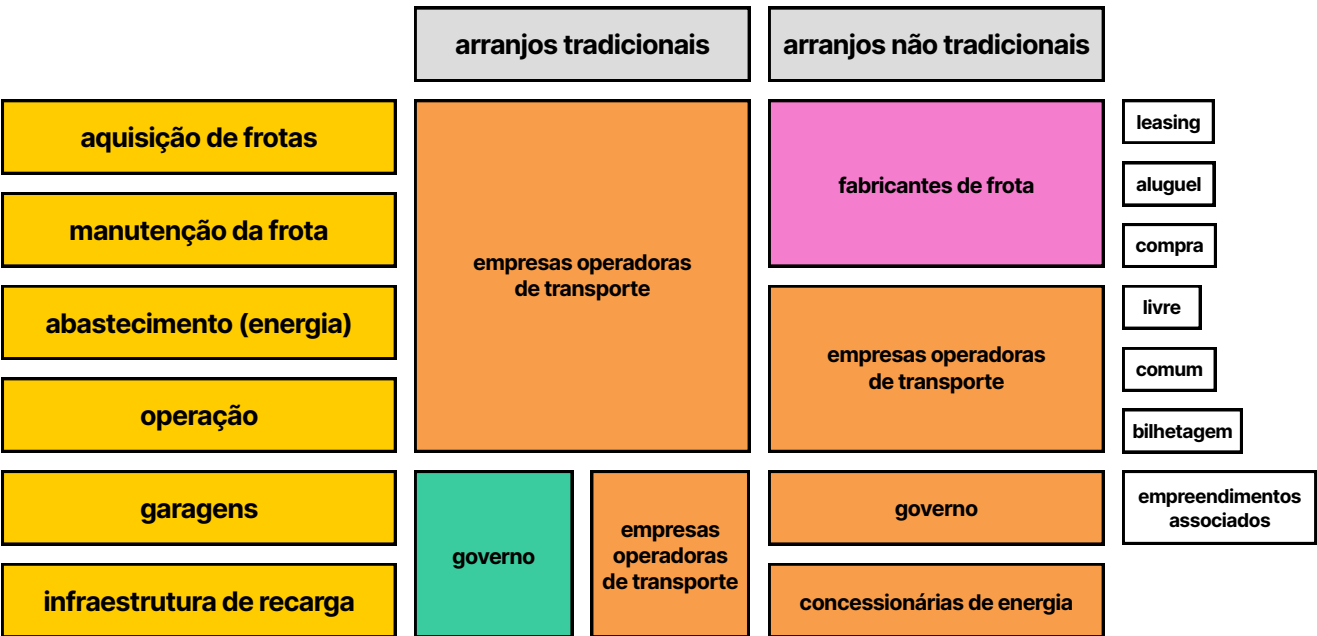
Outro elemento importante é o relativo ao edital de licitação, que deve ser detalhado quanto às especificações técnicas, evitando dúvidas ou alargamento de possibilidades ensejadoras de impugnações, questionamentos ou anulações. Um caso exemplar é o da licitação dos ônibus elétricos para a capital paulista, na qual os requisitos de desempenho foram rigorosamente definidos, com determinação cristalina de multa e sanções vinculadas à entrega de um serviço de qualidade.

6.1 Possíveis contratos públicos efetivados para implementação da mobilidade elétrica nos transportes públicos

Destaque-se, quanto à eletrificação das frotas, a importância da previsão, em contrato, de infraestruturas adequadas para ônibus elétricos. Devem-se considerar desde o planejamento das garagens até o dimensionamento da rede elétrica e da infraestrutura de recarga.

FIGURA 40

Arranjos licitatórios

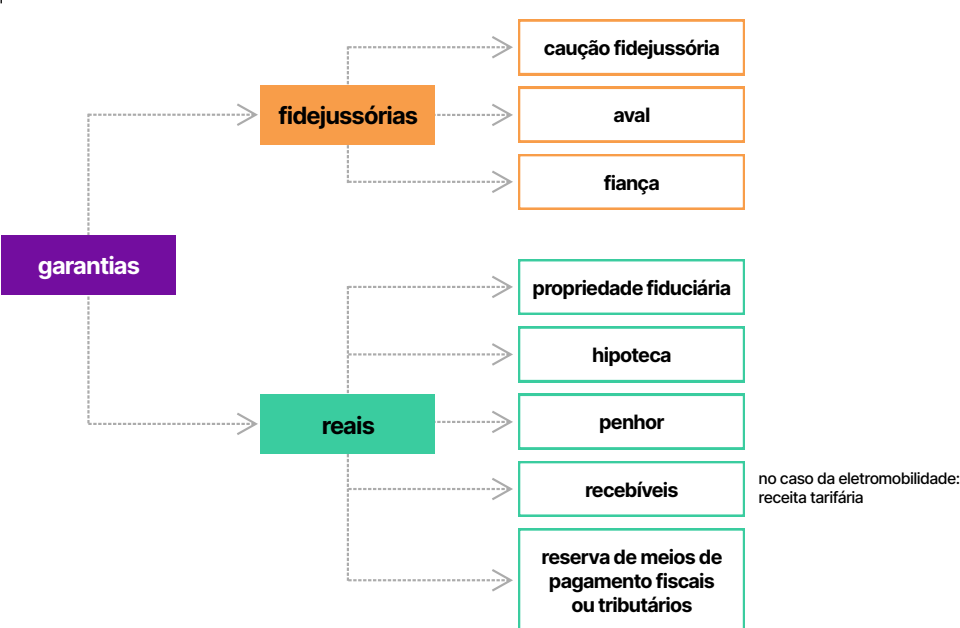


Fonte: Adaptado de "Adapting Procurement Models for Electric Buses in Latin America" (Orbea et al., 2019).

Finalmente, a questão de seguros e garantias para ônibus elétricos é abordada por diversos autores. Diferentes modelos podem ser adaptados para atender às necessidades específicas de cidades brasileiras – um exemplo é a abordagem adotada em Belo Horizonte para a cobertura de sua frota de ônibus elétricos.

Na figura a seguir estão citadas algumas possibilidades de modelos de garantias a serem dadas pelos contratos de concessão e que aumentam a segurança jurídica entre as partes envolvidas.

FIGURA 41



Na sequência, vejamos os modelos de contrato atualmente utilizados.

*** Contratos baseados na compra do veículo pelo operador com recursos orçamentários (fundos ou concessões existentes) ou com recursos de financiamentos externos (empréstimos concessionais e títulos verdes).**

Primeiramente, os empréstimos concessionais são financiamentos oferecidos sob condições mais favoráveis do que as encontradas no mercado, em geral por instituições financeiras internacionais ou governos, com juros menores e maiores prazos para amortização. Já os títulos verdes são instrumentos de dívida emitidos para financiar projetos com benefícios ambientais definidos, a exemplo das energias renováveis, eficiência energética, transporte sustentável, gestão sustentável de água e resíduos, entre outros, com o objetivo de atrair maior número de interessados.

Essas definições podem ser usadas em contextos técnicos e financeiros para explicar de forma objetiva o propósito e a natureza desses instrumentos.

Nesse caso, o operador de transporte público é responsável pelos gastos iniciais de implantação, como a compra dos veículos e custos para a aquisição de baterias com orçamento próprio, sendo o padrão de contrato atualmente existente e que exige grande investimento para a sua celebração, demandando necessidade de obtenção de financiamentos.

O operador do sistema de transporte público obtém empréstimos concessionais, que são mais baratos e com ausência de juros ou juros muito mais baixos do que os oferecidos no mercado, no entanto geralmente envolvem créditos menores, tendo em vista que os empréstimos concessionais são feitos para quantias inferiores em relação aos tradicionais, com prazos mais estendidos.

*** Contratos baseados no aluguel dos veículos pelo operador, seja com aluguel do ônibus e/ou da bateria, com aluguel operacional ou aluguel com acordo de financiamento.**

No caso de aluguel do ônibus e/ou da bateria, o operador possui maior fôlego, pois não tem o custo inicial do investimento, que impacta também o TCO, possibilitando uma substituição em maior número de veículos e envolvendo mais interessados nesse modelo de negócio.

Já com aluguel operacional, o operador do sistema de transporte público faz parceria com uma outra empresa (um terceiro no contrato) para que ela adquira os veículos e forneça a infraestrutura, enquanto o operador somente fica com a operação em si, ou, ainda, um fica com a propriedade dos veículos e o outro com a da infraestrutura, havendo divisão de investimentos e de responsabilidades.

Por fim, no aluguel com acordo de financiamento, o operador possui capital para pagar o aluguel à parte que adquirirá os ônibus e/ou baterias, sendo o restante igual ao contrato anterior.

A partir dessas modalidades, podemos vislumbrar o design contratual, que faz surgir novos modelos de negócios, fundamentados nos tipos e possibilidades de contratos de concessão ou PPPs. Um ponto parece indiscutível: os modelos atuais não são viáveis para a efetivação de compras grandes ou substituição de grandes frotas.

6.2 Modelos de negócios possíveis decorrentes da adoção de contratos de concessão comum ou patrocinada

Os modelos contratuais BT (Build-and-Transfer), BOT (Build-Operate-and-Transfer), BOOT (Build-Own-Operate-and-Transfer), BOO (Build-Own-Operate), BLT (Build-Lease-and-Transfer) e DBFO (Design-Build-Finance-Operate)²⁸ são ferramentas flexíveis que podem ser adaptadas para atender às necessidades específicas de diferentes tipos de projetos e contratos de concessões comuns ou patrocinadas e Parcerias Público-Privadas. A escolha do modelo dependerá dos objetivos do projeto, dos requisitos de financiamento, das capacidades das partes envolvidas e do ambiente regulatório.

Veja-se a adaptação dos modelos de negócios para implementação de infraestrutura ao transporte público elétrico:

BT (Build-and-Transfer)

Nesse modelo, a montadora pode ser contratada para projetar e construir uma frota de ônibus elétricos e, após a conclusão, transferir a propriedade para a operadora ou entidade pública. O pagamento pode ser feito em prestações ou à vista após a transferência;

BOT (Build-Operate-and-Transfer)

A montadora ou consórcio de empresas pode ser responsável não apenas pela produção dos ônibus como também por sua operação por um período determinado de tempo. Depois desse período, a operação e a propriedade dos ônibus são transferidas para a entidade pública ou operadora original;

BOOT (Build-Own-Operate-and-Transfer)

Semelhante ao BOT, mas a montadora ou consórcio de empresas tem a propriedade dos ônibus durante o período de operação. Após o término do contrato, os ônibus são transferidos para a entidade pública ou operadora;

BOO (Build-Own-Operate)

A montadora ou consórcio constrói, possui e opera os ônibus indefinidamente, sem intenção de transferência;

BLT (Build-Lease-and-Transfer)

A montadora ou consórcio de empresas fica responsável pela construção de um projeto de infraestrutura que, depois de concluído, é alugado para o poder público (prefeitura, por exemplo). Após um determinado período, são pagos o financiamento e os custos das montadoras e consórcios de empresas, transferindo-se, então, a propriedade da infraestrutura realizada para o poder público;

BDFO (Design-Build-Finance-Operate)

A montadora ou consórcio de empresas é responsável pela elaboração completa do projeto determinado, inclusive a implementação e a execução. Depois de pronto, o projeto será cus-

28 - Modelo inspirado em Iabs, 2019.

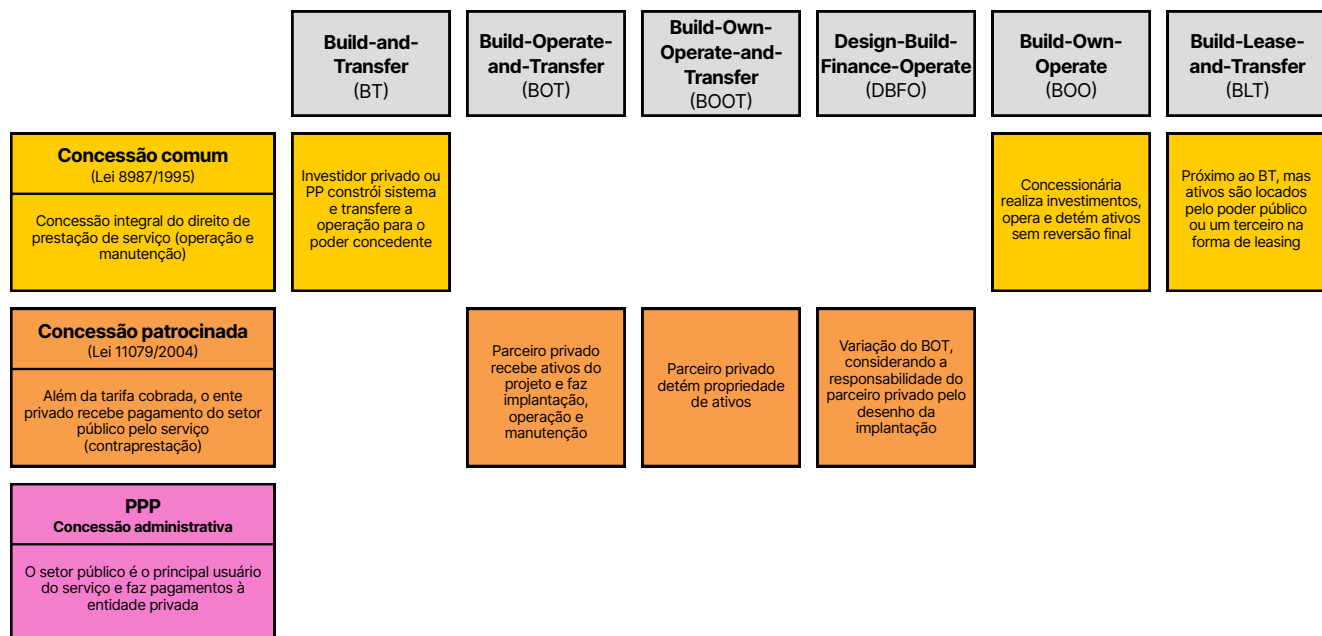
teado pelas receitas decorrentes da execução do contrato.

Ao adaptar e integrar esses modelos contratuais ao contexto dos ônibus elétricos, é possível criar uma estrutura flexível e robusta que atenda às necessidades das operadoras, montadoras e, mais importante, do público que depende do transporte público eficiente e sustentável. Os contratos devem claramente delinear os riscos associados a cada parte e as garantias necessárias, em termos seja de performance dos ônibus, seja da disponibilidade de infraestrutura de carregamento ou metas operacionais.

Vale ressaltar que há uma relação direta entre os contratos de concessão e de Parcerias Público-Privadas e os modelos contratuais que utilizam os conceitos de Build-and-Transfer (BT), Build-Operate-and-Transfer (BOT), Build-Own-Operate-and-Transfer (BOOT), Build-Own-Operate (BOO), Build-Lease-and-Transfer (BLT) e Design-Build-Finance-Operate (DBFO), o que poderíamos sintetizar da seguinte forma:

FIGURA 42

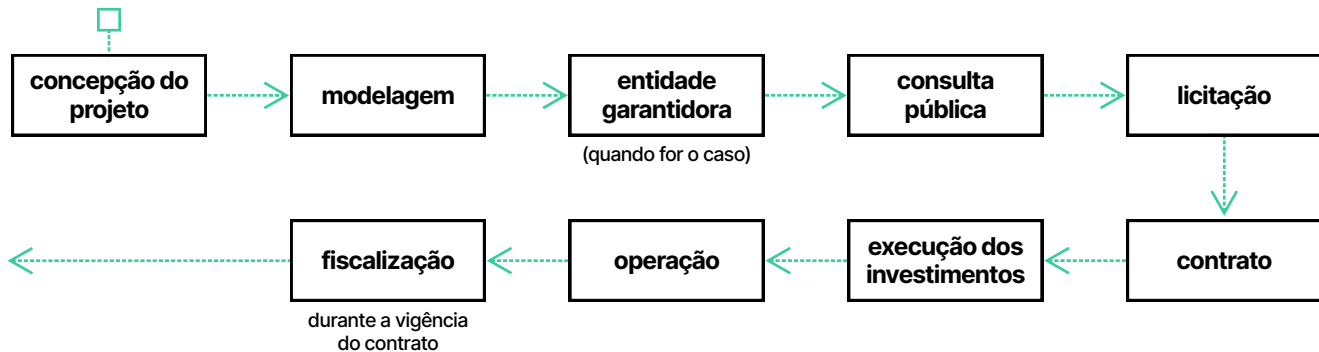
Arranjos contratuais para a mobilidade



Em todos os modelos acima citados, é possível perceber o compartilhamento de riscos, sendo que a participação do setor privado nesses contratos reduz, significativamente, o custo inicial da operação para o poder público e possibilita maior desenvolvimento do setor no que diz respeito à inovação (uso de novas tecnologias), além de aumentar a eficiência da implantação dos projetos de mobilidade.

FIGURA 43

Processo de delegação de serviços públicos



Fonte: labs, 2019.

Em regra, as delegações do serviço de transporte público ocorrem do seguinte modo:

Concessão comum

O setor público concede a uma entidade privada o direito de prestar serviços públicos, geralmente envolvendo a operação de infraestruturas existentes, sendo regida pela Lei nº 8.987/95;

Contrato do tipo BT

Pode ser aplicado quando uma nova infraestrutura é necessária. A entidade privada constrói a infraestrutura e, após a conclusão, a transfere para a entidade pública, que assume a operação e a manutenção;

Risco baixo

O risco é diminuto porque o poder público delegará totalmente a construção do projeto e a execução ao particular. O contrato de concessão é construído sob normas de direito público, que garantem a supremacia do poder público sobre a entidade privada e concedem privilégios a ele em diversas situações, como modificação de cláusulas e rescisão. Trata-se, entretanto, de um modelo pouco atrativo ao mercado, havendo o risco de perda de competitividade, quando adotado.

Concessão patrocinada

É um tipo de PPP, em que, além da tarifa cobrada dos usuários, a entidade privada recebe um pagamento do setor público (Lei nº 11.079/2004);

Contrato do tipo BOT

Esse modelo se alinha bem com a concessão patrocinada. A entidade privada constrói, financia e opera a infraestrutura por um período determinado e, então, a transfere para a entidade pública;

Contrato do tipo BOOT

Similar ao BOT, porém a entidade privada mantém a propriedade durante o período de operação antes da transferência;

Contrato do tipo DBFO

Também pode ser aplicado em uma concessão patrocinada, pois a entidade privada é responsável por todas as fases do projeto, incluindo financiamento;

Risco intermediário

Os riscos são compartilhados entre o poder público e o particular contratado. É possível dizer que, no caso de responsabilidades assumidas pelo governo, pode haver riscos na execução do contrato pelo parceiro privado, como o de não pagamento e imprevisibilidades, que deverão ser, todos, partilhados. No caso de erro de prospecção da demanda, por exemplo, a diferença ou a suplementação será arcada pelo parceiro público, até porque o objeto do contrato é um serviço essencial (transportes públicos), que deverá ser mantido, a despeito de imprevistos contratuais. A mitigação desses riscos sempre pode ocorrer por meio de um contrato bem-feito, com previsão de cláusulas ajustáveis e boas políticas de enforcement. Tal contrato deve considerar adequadamente as responsabilidades, otimizar a alocação de riscos, criar incentivos adequados, mitigar riscos e melhorar a transparência e a governança, visando eficiência, eficácia e sustentabilidade dos projetos de Parcerias Público-Privadas. A sua implementação cuidadosa é fundamental para maximizar os benefícios das PPPs e assegurar que os objetivos de ambas as partes sejam alcançados de maneira equilibrada e justa.

Concessão administrativa (tipo de Parceria Público-Privada)²⁹

O setor público é o principal usuário do serviço e faz pagamentos à entidade privada;

Contrato do tipo BOO

A entidade privada constrói, possui e opera a infraestrutura, tendo o setor público como principal cliente;

29 - Na concessão administrativa o poder público é o cliente final da operação. Na concessão patrocinada o cliente final é o usuário do serviço público.

Contrato do tipo BLT

A entidade privada constrói a infraestrutura, depois a aluga para a entidade pública por um período determinado e, na sequência, a transfere para ela;

Risco intermediário

Os riscos são partilhados, tendo em vista que se trata de contratos de PPP. A execução da operação, todavia, é integralmente privada, o que aumenta o risco de intercorrências na execução, diminuindo o controle público sobre a operação. O risco se torna alto, no caso do BLT, uma vez que há um contrato de leasing além dos acordos de operação e execução, ou seja, existe um “plus” em relação ao locatário, que deve honrar a execução do projeto e ainda pagar o aluguel de uso da infraestrutura construída (por exemplo, as garagens ou estações de recarga). Há também a preocupação com a execução da transferência da infraestrutura no final do tempo acordado. É importante ressaltar que esse risco também pode aumentar, tendo em vista que o parceiro privado será remunerado pelo aluguel da estrutura fornecida, ou seja, a contraprestação a ele vertida advém das tarifas ou preços públicos decorrentes do uso do serviço público, como também desse aluguel.

6.3 Perspectiva dos modelos de negócios sob a ótica da partilha de responsabilidade entre as partes

Em relação à base de usuários (labs, 2019), os projetos de concessão podem ser: green (concedidos ainda na fase de concepção do sistema) e brownfield (projetos de concessão de sistemas já consolidados). Essa nomenclatura é proveniente dos contratos financeiros e pode ser utilizada nesse cenário da delegação e Parcerias Público-Privadas, enriquecendo as nuances de participação do setor privado nos serviços públicos.

A criação de contratos de concessão bem definidos pode ajudar a estabelecer claramente as responsabilidades e as obrigações de todas as partes envolvidas e fornecer uma estrutura legal para a operação e a expansão dos serviços de mobilidade elétrica. Cada um desses modelos pode ser adaptado conforme as necessidades locais e a estratégia de mobilidade elétrica adotada pelas autoridades públicas³⁰.

Importante ressaltar que é crucial entender o cenário atual do transporte público e a necessidade de transição para um transporte público elétrico, levando-se em consideração a quantidade de veículos, as rotas que serão disponibilizadas, a infraestrutura de recarga disponível, o tempo de carregamento e quais são os parceiros privados que podem integrar todo esse processo. Abaixo podemos vislumbrar alguns modelos de negócio e seus arranjos contratuais disponíveis ao poder público.

30 - São Paulo representa uma mistura de modelos de negócios de partilha de responsabilidades, tendo em vista que a prefeitura está financiando a compra dos ônibus pelas empresas que irão operar e manterá, também, subsídios ao longo do contrato de concessão.

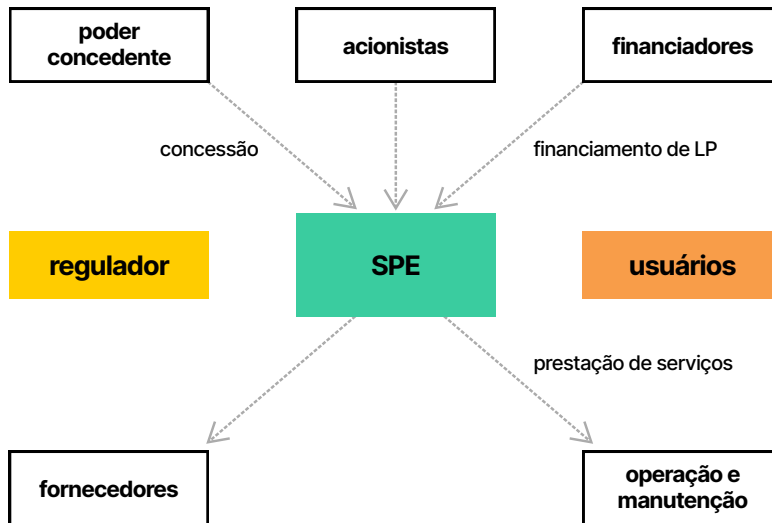
a) Modelo de negócio com responsabilidade totalmente pública

Aqui, o poder público é responsável por toda a operação e manutenção dos serviços de mobilidade elétrica. Exemplo: A prefeitura pode instalar e operar estações de recarga, fornecer veículos elétricos para transporte público e gerenciar a infraestrutura necessária;

b) Modelo de negócio com responsabilidade integralmente privada

Tanto a aquisição como a implantação, a integração de sistemas, a operação e a manutenção serão de responsabilidade do poder concedido, quer dizer, da empresa privada.

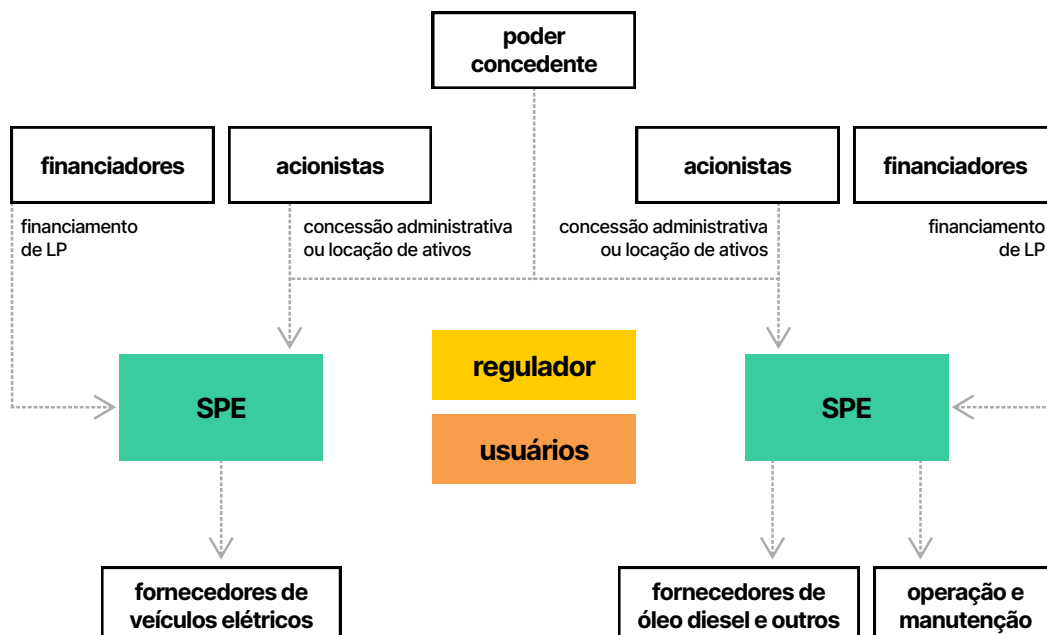
FIGURA 44



Fonte: labs, 2019.

Nesse modelo, há dois contratos distintos: um para implantação e operação dos veículos e infraestrutura de recarga e o outro para construção de garagens, terminais, sistemas de arrecadação e manutenção, controle, monitoramento e gestão.

FIGURA 45

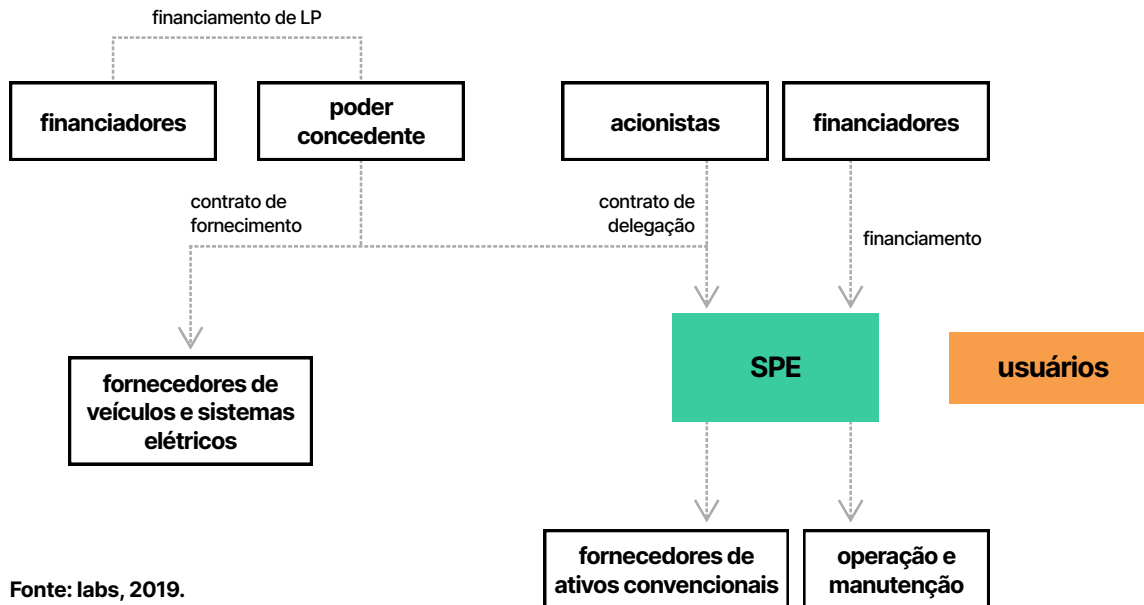


Fonte: labs, 2019.

c) Modelo de negócio com partilha de responsabilidades

Aqui há uma divisão de responsabilidades entre o poder público e a iniciativa privada. Exemplo: A prefeitura pode estabelecer parcerias com empresas privadas para expandir a infraestrutura de recarga, em um formato no qual o governo fornece os locais e as companhias privadas operam as estações de recarga.

FIGURA 46



Fonte: labs, 2019.

Observação: o poder público pode criar uma Sociedade de Propósito Específico (SPE) para gerenciar a concessão dos serviços de mobilidade elétrica. Exemplo: Criação de uma SPE para gerenciar uma rede de estações de recarga, com a possibilidade de subcontratar partes da operação junto a empresas privadas.

Por fim, os arranjos contratuais complexos nos quais o setor público e o privado colaboram para a entrega de serviços ou infraestrutura devem considerar, efetivamente, um bom delineamento da natureza e da estrutura de uma “matriz de riscos”. Ela deve delinear objetivamente as responsabilidades de cada parte, mitigando ambiguidades que poderiam levar a disputas. Essa clarificação é imprescindível para garantir que tanto o setor público quanto o privado compreendam suas obrigações e estejam preparados para gerenciar seus respectivos riscos. A matriz permite a otimização dessa alocação, maximizando a eficiência e reduzindo os custos associados ao gerenciamento de riscos. O setor privado, por via de regra mais eficiente na gestão de riscos operacionais e financeiros, pode absorver esses riscos, enquanto o setor público pode assumir riscos políticos e regulatórios.

A matriz de riscos, dos modelos de negócios, deve incluir estratégias para mitigação como seguros, garantias e cláusulas de contingência, que são cruciais para reduzir a probabilidade e o impacto de eventos adversos. Esses mecanismos de mitigação fortalecem a resiliência do projeto e aumentam a confiança dos investidores e stakeholders. A transparência na alocação e na mitigação de riscos, conforme delineada na matriz, melhora a governança do projeto. Fa-

cilita a monitoração e o controle efetivo, permitindo uma melhor supervisão e responsabilização de ambas as partes. Isso é particularmente importante em projetos de longa duração, nos quais a confiança e a cooperação são essenciais para o sucesso.

7

Considerações finais

A transição para o transporte público elétrico representa uma oportunidade significativa, acompanhada de desafios, no esforço das cidades para adotar as melhores práticas na modernização dos serviços de transporte coletivo. Essa mudança não se justifica apenas pelo fato de os ônibus elétricos serem mais silenciosos e não emitirem gases de efeito estufa; há também a necessidade de refletirmos sobre como podemos transformar a mobilidade urbana em algo mais eficiente, sustentável e inclusivo. São questões do tipo: Como as cidades podem utilizar essa transição para redefinir o futuro do transporte público? Que outras inovações podem surgir dessa transformação? Que a eletromobilidade para o transporte público pode responder. Não resta dúvida de que a eletrificação das frotas de ônibus está emergindo como uma resposta a tais demandas contemporâneas.

Na América Latina, em especial no Chile e na Colômbia, esse movimento ganha força a partir de estratégias nacionais, enquanto no Brasil, a despeito da ausência de uma diretiva nacional, a transição para a eletrificação do transporte público tem avançado para discussões envolvendo entes privados e governamentais de diversas instâncias, que estão corroborando para a promoção da construção de uma trajetória rumo à sustentabilidade.

Reconhece-se a necessidade de altos investimentos iniciais, entretanto essa transição pode ser viável através de uma cuidadosa estruturação das condições financeiras e das garantias contratuais. Revisar os contratos de concessão vigentes e aprimorar o arcabouço legislativo e regulatório de apoio são passos fundamentais para assegurar a segurança jurídica desse processo. A mudança do olhar para a comparação entre sistemas de mobilidade com um cálculo de TCO mais “inclusivo”, e de maior alcance, passa pela consideração da eficiência econômica a longo prazo, da sustentabilidade e da responsabilidade ambiental, do alinhamento com políticas públicas e incentivos à inovação e ao futuro das cidades.

Além de garantirem um ambiente estável e previsível para os investidores, essas medidas abrem inúmeras oportunidades para trabalhos vindouros. Profissionais especializados em direito con-

tratual, regulatório e financeiro encontrarão um campo fértil para desenvolver soluções inovadoras que facilitem a transição para a eletromobilidade. Além disso, gestores de projetos no setor público poderão explorar novas metodologias para otimizar a implementação de tais mudanças, garantindo a sustentabilidade e a eficiência do transporte público, ancorados em marcos regulatórios que incentivem esses cenários.

Para que os investimentos na eletrificação da frota de ônibus nas cidades sejam exitosos, é essencial compreender a tecnologia e a infraestrutura física, técnica e de recursos humanos envolvidas. As condições financeiras e as concessões de transporte atuais que possibilitam a transição para a eletromobilidade no transporte público no país podem ser significativamente aprimoradas por meio de uma revisão cuidadosa e profunda das melhores práticas na fase de estruturação de projetos. Adotar uma abordagem estratégica de gestão de projetos no setor público é crucial para viabilizar essa transição, incorporando subvenções e subsídios quando necessários.

Ao integrarem conhecimentos técnicos com uma sólida base de gestão de recursos e planejamento financeiro, os gestores públicos podem criar um ambiente propício para a inovação e a sustentabilidade. Isso não apenas facilitará a implementação de ônibus elétricos como também contribuirá para a modernização do transporte público, tornando-o mais eficiente e ambientalmente amigável.

Sob a perspectiva governamental, abre-se a possibilidade de discutir a concessão de licenças excepcionais e temporárias para a operação de ônibus que ainda não atendem aos requisitos vigentes para operação regular. Essas franquias podem ser particularmente úteis em casos que requeiram a importação de veículos estrangeiros e o uso de tecnologias emergentes.

A transição para a eletromobilidade, com sua visão de longo prazo e necessidade de escalabilidade, exige um gerenciamento cuidadoso das licitações. Esse gerenciamento deve permitir, insista-se, que as empresas operadoras ofereçam serviços de transporte público de maneira eficiente e sustentável.

Na maioria dos municípios, o serviço de transporte público é fornecido por meio de concessões às companhias privadas, supervisionadas pelo poder concedente. Qualquer transferência de serviços para uma empresa deve ser realizada com base em um processo de licitação pública que resulte em um contrato formal, que, conforme apresentado neste *Guia*, pode seguir inúmeros arranjos.

Para os gestores públicos, essas mudanças representam uma oportunidade de inovar e modernizar o setor de transporte público e as políticas públicas urbanas, ambientais e de mobilidade. Ao fomentar políticas flexíveis e adaptativas, e ao promover licitações inclusivas e competitivas, é possível pavimentar o caminho para uma mobilidade urbana mais sustentável, eficiente e preparada para os desafios futuros.

Até 2020, as concessões de transporte público eram marcadas por contratos de longa duração, abrangência em toda a área urbana ou em grandes áreas, e a integração entre aquisição e operação de ônibus pela mesma companhia. As fontes de renda e remuneração dos operadores eram limitadas pela demanda dos usuários, com rigidez na introdução de novas tecnologias e

escassos incentivos para a redução de emissões. Ademais, a provisão para treinamento de pessoal vinculado às novas tecnologias era insuficiente.

O futuro do transporte público, porém, oferece vastas oportunidades para reformular esses modelos. Poderíamos explorar concessões mais flexíveis e dinâmicas, adaptáveis às rápidas mudanças tecnológicas e às crescentes demandas ambientais. Estudos futuros poderiam focar estratégias inovadoras para diversificação das fontes de receita, a criação de incentivos robustos para a redução de emissões e o desenvolvimento de programas de capacitação contínua que preparem a força de trabalho para um cenário de mobilidade cada vez mais ambientalmente correto.

As novas concessões projetadas para favorecer a inclusão de ônibus elétricos podem ser reestruturadas para maximizar eficiência e sustentabilidade. Propõem-se contratos de menor duração e prestação de serviços em áreas menores, permitindo um foco mais preciso nas necessidades da população. A separação entre aquisição e operação dos ônibus reduzirá riscos e promoverá estabilidade dos operadores e concessionários.

Além disso, a diversificação das fontes de receita e remuneração aos operadores – que pode incluir demanda de usuários, quilômetros percorridos, estacionamento nas ruas e subsídios cruzados – proporcionará uma base financeira mais robusta. A flexibilidade para a introdução de novas tecnologias de baixa ou zero emissão será fundamental, acompanhada de incentivos claros para a redução de emissões durante a operação. Ademais, a capacitação e o treinamento contínuo do pessoal, com um forte componente de inclusão social, garantirão que tanto os atuais trabalhadores das oficinas quanto novos profissionais, inseridos na cadeia produtiva da indústria e da mobilidade, estejam preparados para atender às demandas da operação elétrica.

No que tange aos operadores de mobilidade, sugere-se que abram suas instalações e rotas para avaliar o desempenho e a produtividade dos ônibus em condições reais de operação. Essa abordagem não só permitirá uma análise mais precisa e prática como também proporcionará a oportunidade de treinar motoristas e equipes de manutenção para desempenharem tarefas específicas durante o período de testes-piloto. Desse modo, garantimos um ambiente mais preparado e adaptado às exigências contemporâneas do setor. Os interesses de todos os atores envolvidos nem sempre concordam entre si. Os objetivos e metas das partes interessadas precisam estar alinhados para facilitar a transição.

A fim de garantir a eficiência e a eficácia do serviço de recarga de veículos elétricos, é imprescindível estabelecer claramente a responsabilidade por esse serviço. Tal responsabilidade pode ser atribuída ao operador, às subsidiárias de energia, aos fornecedores de baterias ou àqueles que fornecem a infraestrutura de recarga. Alternativamente, é possível optar por um modelo de cobrança implementado pela distribuidora, pelo titular do eletroposto ou pelo operador do sistema de recarga. Essa decisão deve ser tomada à luz da Resolução Normativa 1000/21 da Aneel (que substitui a REN 819/2018), a qual abriu caminho para que a prestação do serviço de recarga seja disponibilizada a qualquer interessado.

Dessa forma, como desenvolvido ao longo do presente trabalho, a eletrificação da frota de ônibus oferece uma série de oportunidades transformadoras para melhorar o ambiente urbano e promover benefícios socioambientais.

Primeiramente, a redução das emissões de poluentes dos veículos movidos a combustíveis fósseis impacta de maneira direta a qualidade do ar das cidades, mitigando problemas de saúde pública relacionados à poluição atmosférica. Isso não apenas beneficia a saúde dos cidadãos como reduz os custos associados ao tratamento de doenças respiratórias e cardiovasculares.

A eletrificação da frota de ônibus pode ainda contribuir para a redução do ruído urbano, criando ambientes mais agradáveis e habitáveis para os residentes das áreas urbanas. Essa diminuição na poluição sonora não só melhora a qualidade de vida dos habitantes; ela também pode promover um ambiente urbano mais propício ao desenvolvimento econômico e social. Esses benefícios não podem ser negligenciados no cálculo das externalidades do modelo de negócio adotado.

Outro aspecto importante é a acessibilidade ao transporte público. A eletrificação dos ônibus pode tornar o transporte mais acessível para comunidades de baixa renda, na medida em que, reduzindo custos operacionais pode, potencialmente, diminuir as tarifas aos usuários. Isso pode melhorar a equidade no acesso ao transporte, proporcionando a otimização da mobilidade a grupos historicamente marginalizados, com ações de implementação de meios de transporte motorizados com compatibilidade ambiental, seja para frota de ônibus, de micro-ônibus ou até de embarcações no sistema público de transporte, compatíveis com as características ambientais das áreas mais sensíveis das cidades.

Todavia, esse conjunto de mudanças tecnológicas carrega consigo uma série de desafios que, conforme apontado neste *Guia*, podem ser assim resumidos:

Desafios técnicos

A gestão de dados e a digitalização são essenciais para otimizar a operação e a manutenção dos veículos elétricos, garantindo uma transição suave e eficaz. Além disso, a infraestrutura de recarga é um dos principais obstáculos técnicos associados à implementação dessa nova tecnologia. Os gestores precisam planejar e implementar sistemas de recarga eficientes e acessíveis, levando em consideração as necessidades operacionais dos ônibus e a capacidade da rede elétrica local, tendo em vista que ainda não temos uma rede de recarga suficientemente desenvolvida no Brasil, que possa atender, também, os pontos de recarga de oportunidade que forem necessários para a manutenção da qualidade da operação. A gestão da frota e sua manutenibilidade podem, na realidade, incrementar uma nova economia e o fortalecimento do setor industrial e de formação de recursos humanos;

Desafios operacionais

A autonomia da bateria, bem como o próprio funcionamento ou dinâmica dessa nova tecnologia são preocupações que também afetam a operação das frotas de ônibus, principalmente em condições de tráfego intenso e topografias acentuadas, demandando esforços para maximizar a eficiência e o desempenho operacional dos ônibus elétricos. Soma-se a isso a capacitação adequada dos operadores de transporte, que é fundamental para garantir a condução segura e eficaz dos veículos elétricos;

Desafios ambientais

A gestão adequada do ciclo de vida das baterias é chave para minimizar os impactos ambientais da eletrificação das frotas de ônibus. Isso inclui questões relacionadas à circularidade das baterias, como a reciclagem e a reutilização de materiais, bem como a disposição adequada de baterias no final de sua vida útil. Os arranjos associados à economia circular já são uma realidade para a cadeia produtiva das baterias;

Desafios econômicos

A transição para os ônibus elétricos envolve investimentos significativos e impactantes, tanto em termos de aquisição de veículos quanto de infraestrutura de recarga. São necessários modelos de financiamento e de negócios novos e sustentáveis para cobrir tais custos, considerando possíveis economias a longo prazo em termos de manutenção e operação para uma análise mais adequada da TCO. Os custos com baterias e material rodante, com a economia de escala, estão chegando a patamares menores. Ademais, a volatilidade dos preços da energia elétrica e a necessidade da efetivação de novos modelos de contratos de fornecimento são fatores ainda pouco conhecidos e que precisam ser considerados no planejamento financeiro da eletromobilidade;

Desafios jurídicos

Sob esse aspecto, a eletrificação ainda levanta questões importantes, como a necessidade da construção de um arcabouço legislativo que unifique o animus governamental de mudar a rota tecnológica para a elétrica, bem como das próprias cidades de agirem no sentido de operacionalização dessa decisão. Mais ainda, afora a parte legislativa, que é, sem dúvida, da maior importância para a construção de políticas públicas nacionais e municipais, há questões como novos modelos de contratação e delegação do serviço de transportes públicos que necessitariam ser revistos, diante dos novos arranjos contratuais que a mobilidade elétrica apresenta para viabilizar, também, os novos modelos de negócios que se apresentam. Isso tudo, considerando os altos investimentos iniciais exigidos pelos elevados custos da inovação, que ainda não foram absorvidos pelo desenvolvimento do mercado dos veículos elétricos em âmbito nacional. Além disso, ainda existe a relevante questão da regulação da infraestrutura de recarga, que não está equalizada, a qual inclui desde aspectos sobre a estruturação do setor elétrico (quem pode vender e comprar energia elétrica) até aspectos mais burocráticos, a respeito da qualificação jurídica dos eletropostos. O cenário de insegurança existente dificulta a atração de investimentos que são imprescindíveis e vitais para a transição da mobilidade elétrica.

Por fim, deve-se ressaltar que a eletrificação da frota de ônibus representa uma inadiável oportunidade para o mercado nacional de ônibus, tendo em vista que o Brasil poderá alcançar maiores níveis industriais por meio da promoção de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P, D&I), como também da manufatura daqueles veículos. Acrescente-se, ainda, que a eletrificação promove a transformação positiva e sustentável nas cidades brasileiras, não apenas reduzindo os impactos ambientais do transporte público como também abordando os desafios de modo integrado e colaborativo, não deixando de lado questões como a equidade social, o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida dos cidadãos.

Referências

AL-OGAILI, A.S.; AL-SHETWI, A.Q.; AL-MASRI, H.M.K.; BABU, T.S.; HOON, Y.; ALZAAREER, K.; BABU, N.V.P. Review of the estimation methods of energy consumption for battery electric buses. *Energies*, v. 14, p. 7578, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en14227578>>.

AHN, K.; RAKHA, H.; TRANI, A.; VAN AERDE, M. Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. *Journal of Transportation Engineering*, 128(2), p. 182–190, 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)-0733-947X\(2002\)128:2\(182\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)-0733-947X(2002)128:2(182))>.

ALI, Hayder; KHAN, Hassan A.; PECHT, Michael G. Circular economy of Li batteries: Technologies and trends. *Journal of Energy Storage*, v. 40, p. 102690, 2021.

ALOGDIANAKIS, F.; DIMITRIOU, L. Optimal mechanism design of public policies for promoting electromobility: A dynamic programming formulation. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, v. 19, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100807>>.

_____. “Mechanical design and packaging of battery packs for electric vehicles”. In: KALHAMMER, F.R. *Behaviour of lithium-ion batteries in electric vehicles: battery health, performance, safety, and cost*. Springer, 2018, p. 175-200.

ARORA, Shashank; SHEN, Weixiang; KAPOOR, Ajay. Review of mechanical design and strategic placement technique of a robust battery pack for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 1319-1331, 2016.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (NTU). *Anuário NTU: 2019-2020*. Brasília: NTU, 2020. Disponível em: <<https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub637375719747836003.pdf>>.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Públicos – Simob/ANTP. *Relatório geral 2016*. Maio de 2018. Disponível em: <<https://files.antp.org.br/simob/simob-2016-v6.pdf>>.

AUVINEN, H.; JÄRVI, T.; KLOETZKE, M.; KUGLER, U.; BÜHNE, J.; HEINL, F.; KURTE, J.; ESSER, K. Electromobility scenarios: Research findings to inform policy. *Transportation Research Procedia*, v. 14, p. 2564-2573, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.346>>.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID) E ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO (OIT). *O emprego em um futuro de zero emissões líquidas na América Latina e Caribe*. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/arquivos/caderno-tecnico-de-referencia-para-eletromobilidade-nas-cidades-brasileiras-2013-volume-i-portugues.pdf>>.

_____. *O emprego em um futuro de zero emissões líquidas na América Latina e Caribe*. Relatório desenvolvido pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) e Organização Internacional do

Trabalho (OIT). 2020. Disponível em: <https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@americas/@ro-lima/documents/publication/wcms_752078.pdf>.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID). *Guia de eletromobilidade: Orientações para estruturação de projetos no transporte coletivo por ônibus*. [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/Guia_Eleto-mobilidade.pdf>.

BAKKER, Sjoerd; KONINGS, Rob. The transition to zero-emission buses in public transport – The need for institutional innovation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 64, p. 204-215, 2018.

BARASSA, L.S.; CRUZ, M.E. *Oferta de ônibus elétrico no Brasil em um cenário de recuperação econômica de baixo carbono*. Santiago: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (Cepal), 2022. Disponível em: <<https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/3852/S2011938.pdf>>.

BASMA, H.; MANSOUR, C.; HADDAD, M.; NEMER, M.; STABAT, P.; Energy consumption and battery sizing for different types of electric bus service. *Energy*, v. 239, p. 122454, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221027031>>.

BELO HORIZONTE. PlanMob-BH – Plano de mobilidade urbana de Belo Horizonte. Relatório final. 2017. Disponível em: <<https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/planmob-bh/documentos>>.

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE (BloombergNEF). *Electric buses in cities - driving towards cleaner air and lower CO₂*. 2018. Disponível em: <<https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/2018/05/Electric-Buses-in-Cities-Report-BNEF-C40-Citi.pdf>>.

_____. *Electric vehicle outlook 2020*. Disponível em: <<https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook-2020/>>.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, 1988. Disponível em: <https://www2.senado.leg.br/bdsf/bitstream/handle/id/518231/CF88_Livro_EC91_2016.pdf>.

_____. Decreto nº 9.442, de 5 de julho de 2018. Reduz a alíquota do IPI para veículos elétricos, conforme eficiência energética e massa. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 6 jul. 2018.

_____. Decreto nº 40.245, de 10 de setembro de 2019. Diretrizes e incentivos para eletrificação das frotas distritais. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 set. 2019.

_____. Decreto nº 18.350, de 22 de novembro de 2019. Dispõe sobre a exploração de serviços de compartilhamento de veículos sem condutor vinculado. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 23 nov. 2019.

_____. Decreto nº 18.350, de 22 de novembro de 2019. Dispõe sobre a exploração de serviços de compartilhamento de veículos sem condutor vinculado. *Diário Oficial do Município de São José dos Campos*, São José dos Campos, 25 nov. 2019. Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. Dis-

põe sobre o regime de concessão e permissão da prestação de serviços públicos. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 1995.

_____. Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000. Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 25 jul. 2000. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9991.htm>.

_____. Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, institui a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 6 jun. 2001. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l10233.htm>.

_____. Lei nº 10.257 de 10 de julho de 2001. Institui o Estatuto da Cidade. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2001.

_____. Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004. Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 3 dez. 2004. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10973.htm>.

_____. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm>.

_____. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República, Departamento da Casa Civil. Brasília, 2010

_____. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 4 jan. 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm>.

_____. Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015. Institui o Estatuto da Metrópole e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 13 jan. 2015. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13089.htm>.

_____. Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018. Institui o Rota 2030 – Mobilidade e Logística e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 dez. 2018. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13755.htm>.

_____. Lei nº 14.933, de 5 de junho de 2009. Institui a Política Municipal de Mudança do Clima na cidade de São Paulo. *Diário Oficial do Município de São Paulo*, São Paulo, 8 jun. 2009. Lei Complementar nº 101, de 4 de maio de 2000. Estabelece normas de finanças públicas voltadas para a responsabilidade na gestão fiscal e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 5 maio 2000. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LCP/Lcp101.htm>.

_____. Lei Complementar nº 612, de 30 de novembro de 2018. Institui a Política Municipal de Mobilidade Urbana, contemplando como diretriz a promoção do desenvolvimento sustentável,

o estímulo ao desenvolvimento científico e tecnológico e uso de energias renováveis e menos poluentes. *Diário Oficial do Município de São José dos Campos*, São José dos Campos, 1 dez. 2018.

_____. Resolução normativa nº 1000, de 7 de dezembro de 2021. Altera a resolução 819/2018. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 8 dez. 2021.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Mobilidade Urbana. Manual para cadastramento, enquadramento e seleção de propostas no âmbito do Novo Programa de Aceleração do Crescimento – PAC na área de mobilidade urbana, para os subeixos Mobilidade médias e grandes cidades e Renovação de frota. Brasília, DF, 9 out. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. *Guia de Eletromobilidade: Orientações para estruturação de projetos no transporte coletivo por ônibus*. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama). Resolução Conama nº 01, de 8/03/1990. Dispõe sobre níveis excessivos de ruído incluídos os sujeitos ao controle da poluição de meio ambiente.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil* (Nota Técnica). 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-480/topico-527/NT%20SEE-SDB%20-%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20T%C3%A9cnico-Econ%C3%B4mica%20de%20%C3%94nibus%20El%C3%A9trico%20no%20Brasil.pdf>>.

BROWNE, David; RYAN, Lisa. Comparative analysis of evaluation techniques for transport policies. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 31, n. 3, p. 226-233, 2011.

BRUNTON, L.J. “Why not the trolleybus?” In: IEE Seminar Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles (Ref. nº 2000/050). IET, 2000. p. 5/1-5/7.

C40 CITIES. *Pipeline of electric bus projects in Latin America*. 2023. Disponível em: <<https://www.c40.org/wp-content/uploads/2023/10/Pipeline-of-Electric-Bus-Projects-in-Latin-America>>.

_____. *Guide to structuring and writing a climate action plan*. 2021. Disponível em: <<https://c40.my.salesforce.com/sfc/p/#36000001Enhz/a/1Q000000A8zu/Zinh44XiF.0exPdFit2oZRfKO-rW239Of0YBUyEBB3GE>>.

CAF – BANCO DE DESENVOLVIMENTO DA AMÉRICA LATINA. *Agenda de energia*. 2013. Disponível em: <https://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/605/caf_agenda_energia_vision.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

CÂMARA DE COMÉRCIO EXTERIOR (CAMEX). Resolução Camex nº 27, de 26 de abril de 2016. Dispõe sobre a isenção de imposto de importação para veículos elétricos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27 abr. 2016. Resolução Camex nº 86, de 13 de novembro de 2014. Estabelece redução do imposto de importação para veículos elétricos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 14 nov. 2014.

_____. Resolução Camex nº 97, de 8 de dezembro de 2015. Isenção de imposto de importação para veículos elétricos. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 dez. 2015.

CARNIATTO SILVA, Evelyn Tânica. Ônibus Elétrico – Caminhos para um transporte sustentável e mais eficiente. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia na Agricultura, 2022.

CEBRAP (Centro Brasileiro de Análise e Planejamento). *Desafio: mobilidade urbana e mudanças climáticas*. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://cebrap.org.br/wp-content/uploads/2023/07/DESAFIO-6_Final.pdf>.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Emissões veiculares no estado de São Paulo*: 2016. São Paulo: Cetesb, 2017. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/>>.

CHILE. Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (2017, actualizada en 2021). Ministerio de Energía, Santiago, 2021. Disponível em: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_movilidad_electrica.pdf>.

CHINORACKY, R.; STALMASEKOVA, N.; COREJOVA, T. Trends in the field of electromobility – From the perspective of market characteristics and value-added services: Literature review. *Energies*, v. 15, p. 6144, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15176144>>.

CNT (Confederação Nacional dos Transportes). Anuário CNT do Transporte 2022. Disponível em: <<https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/File/PrincipaisDados.pdf>>.

COLOMBIA. Conpes 3918, de 23 de octubre de 2018. Estrategia para la Implementación de los Objetivos del Desarrollo Sostenible en Colombia. Consejo Nacional de Política Económica y Social, Bogotá, 24 oct. 2018. Disponível em: <<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf>>.

_____. Decreto nº 1.564, de 30 de noviembre de 2017. Establece directrices para la regulación del uso de energéticos de bajas emisiones. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, 1 dic. 2017. Disponível em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=84021>>.

_____. Decreto nº 2.143, de 30 de noviembre de 2017. Establece directrices para la regulación del uso de energéticos de bajas emisiones. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, 1 dic. 2017. Disponível em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=84023>>.

_____. Decreto nº 2.205, de 30 de noviembre de 2017. Establece directrices para la regulación del uso de energéticos de bajas emisiones. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, 1 dic. 2017. Disponível em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=84022>>.

_____. Decreto nº 2.051, de 9 de septiembre de 2019. Establece directrices para el desarrollo de nuevas tecnologías. Ministerio de Ciencia, Innovación y Tecnología, Bogotá, 10 sep. 2019. Disponível em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=105722>>.

_____. Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (2018-2022), fundamentada en la Ley nº 1964 de 2019. Disponible em: <<https://www.mintransporte.gov.co/documentos/descargar.php?id=21534>>.

_____. Ley nº 1083, de 31 de julio de 2006. Establece las directrices para la gestión del cambio climático. *Diario Oficial de Colombia*, Bogotá, 1 ago. 2006. Disponible em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=21721>>.

_____. Ley nº 1931, de 29 de julio de 2018. Establece directrices para la gestión del cambio climático. *Diario Oficial de Colombia*, Bogotá, 30 jul. 2018. Disponible em: <<https://dapre.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%201931%20DEL%202018.pdf>>.

_____. Ley nº 1955, de 6 de junio de 2019. Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022. *Diario Oficial de Colombia*, Bogotá, 7 jun. 2019. Disponible em: <<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/PND.pdf>>.

_____. Ley nº 1964, de 11 de julio de 2019. Promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y dicta otras disposiciones. *Diario Oficial de Colombia*, Bogotá, 12 jul. 2019. Disponible em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=97703>>.

_____. Resolución nº 1988, de 15 de diciembre de 2000. Establece directrices para la política ambiental. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, 16 dic. 2000. Disponible em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2238>>.

_____. Resolución nº 41286, de 27 de diciembre de 2016. Establece directrices para la política de movilidad sostenible. Ministerio de Transporte, Bogotá, 28 dic. 2016. Disponible em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=71466>>.

_____. Resolución nº 182.087, de 17 de diciembre de 2017. Establece directrices para la Política Nacional sobre Cambio Climático. Ministerio de Minas y Energía y Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, 18 dic. 2017. Disponible em: <<https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/cb031-res182087-2017.pdf>>.

_____. Resolución nº 2.254, de 17 de diciembre de 2017. Establece directrices para la política de cambios climáticos. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, 18 dic. 2017. Disponible em: <<https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/cb032-res2254-2017.pdf>>.

Resolución nº 463, de 18 de diciembre de 2018. Establece límites de emisión de contaminantes atmosféricos para vehículos automotores. Ministerio del Medio Ambiente, Bogotá, 19 dic. 2018. Disponible em: <<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=90263>>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 18, de 6 de maio de 1986. Estabelece as diretrizes para o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 19 jun. 1986. Disponible em: <<https://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res1886.html>>.

_____. Resolução nº 463, de 18 de dezembro de 2018. Dispõe sobre limites de emissão de poluentes atmosféricos para veículos automotores novos leves. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 19 dez. 2018.

CONSONI, F.L.; OLIVEIRA, A.; BARASSA, E.; MARTÍNEZ, J.; MARQUES, M.C.; BERMÚDEZ, T. Estudo de governança e políticas públicas para veículos elétricos. Brasília D.F: Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços – MDIC, 2018. Disponível em: <<https://pnme.org.br/wp-content/uploads/2020/02/PROMOB-e-Estudo-de-Governanca.compressed.pdf>>.

DAVIDSSON, P.; HAJINASAB, B.; HOLMGREN, J.; JEVINGER, Å.; PERSSON, J.A. The fourth wave of digitalization and public transport: Opportunities and challenges. *Sustainability*, v. 8, n. 12, p. 1248, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su8121248>>.

DESAFIO: Mobilidade urbana e mudanças climáticas 6. [CALLIL, Victor; COSTANZO, Daniela (org.) / PORCIUNCULA E BARROS, C.P. et al. / Motta, G. (ilustrações)]. São Paulo: Centro Brasileiro de Análise e Planejamento – Cebap, 2023.

DOUGIER, N.; CELIK, B.; CHABI-SIKA, S.-K.; SECHILARIU, M.; LOCMET, F.; EMERY, J. Modelling of electric bus operation and charging process: Potential Contribution of local photovoltaic production. *Appl. Sci.*, v. 13, p. 4372, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/app13074372>>.

DU, J.; OUYANG, D. Progress of Chinese electric vehicles industrialization in 2015: A review. *Applied Energy*, v. 188, p. 529-546 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.129>>.

DUBEY, A.; SANTOSO, S. Electric Vehicle charging on residential distribution systems: Impacts and mitigations. *IEEE Access*, v. 3, pp. 1871-1893, 2015. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2476996.

ELECTRIVE. Market analysis: Electric buses keep booming in Europe. *Electrive*, 1, mar. 2022. Disponível em: <<https://www.electrive.com/2022/03/01/market-analysis-electric-buses-keep-booming-in-europe/>>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanco energético nacional 2019: Ano-base 2018*. Rio de Janeiro: EPE, 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2019>>.

_____. *Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil* – Nota técnica EPE/DEA-DPG/SE-E-SDB/001/2020. Rio de Janeiro: EPE, 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-480/topico-527/NT%20SEE-SDB%20-%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20T%C3%A9cnico-Econ%C3%B4mica%20de%20C3%94nibus%20El%C3%A9trico%20no%20Brasil.pdf>>.

_____. *Gráficos do Plano Decenal de Energia 2027*. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-332/topico-424/Cap02_Gr%C3%A1ficos.pdf>.

EUFRÁSIO, A.B.R., DELGADO, O.; ROZENFELD, T. Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo. International Council on Clean Transportation. 2022 Disponível em: <<https://theicct.org/publication/ze-hvs-sao-paulo-brazil-mar22/>>.

FENG, W.; FIGLIOZZI, M.; An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. *Trans-*

portation Research: Emerging Technologies, v. 26, p. 135-145, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.06.007>>.

GAO, Zhiming; LIN, Zhenhong; LACLAIR, Tim J.; LIU, Changzheng; LI, Jan-Mou; BIRKY, Alicia K.; WARD, Jacob. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, v. 122, p. 588-600, 2017. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>>.

GLOBAL CO₂ emissions from trucks and buses in the Net Zero Scenario, 2000-2030. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-co2-emissions-from-trucks-and-buses-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>>.

GOLUB, A.; BALASSIANO, R.; ARAÚJO, A.; FERREIRA, E. Regulation of the informal transport sector in Rio de Janeiro, Brazil: Welfare impacts and policy analysis. *Transportation*, v. 36, p. 601-616, 2009.

GRAMKOW, C.; OLIVEIRA, G. *Impulsionando investimentos em ônibus elétricos no Brasil: Uma agenda de trabalho*. Documentos de Projetos (LC/TS.2023/5), Santiago, Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (Cepal), 2023. Disponível em: <<https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/63558728-5555-420e-b7ae-e8689af01d57/content>>.

HELLGREN, J.; JONASSON, E.; Maximisation of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*, v. 1, n. 1, 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1504/IJEHV.2007.014449>>.

HENSHER, D. A. Future bus transport contracts under a mobility as a service (MaaS) regime in the digital age: Are they likely to change? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 98, p. 86-96, 2017.

HJELKREM, Odd André et al. A Battery Electric Bus Energy Consumption Model for Strategic Purposes: Validation of a Proposed Model Structure with Data from Bus Fleets in China and Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 94, p. 102804, 2021.

HO, G.A.T; XAVIER, G.F; PEREIRA, R.S. Ônibus Elétrico: um estudo, à luz da Teoria da legitimidade, sobre a tomada de decisão de uma empresa multinacional em fabricar esse veículo no Brasil. XXIII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais – SIMPOI 2022. Disponível em: <<https://anpad.com.br/uploads/articles/118/approved/b4df9f494056d-51f86c7f1a89850c467.pdf>>.

ICS (Instituto Clima e Sociedade). *Relatório Anual*. 2020. Disponível em: <<https://climaesociedade.org/wp-content/uploads/2022/03/RelatorioAnual2020.pdf>>.

IEA (Internacional Energy Agency). *Global EV outlook 2023: Catching up with climate ambitions*. Paris, 2023a. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>>.

_____. *Latin America energy outlook 2023*, 2023b. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/1055131a-8dc4-488b-9e9e-7eb4f72bf7ad/LatinAmericaEnergyOutlook.pdf>>.

_____. *Latin America energy outlook 2023*. Executive summary. 2023c. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/latin-america-energy-outlook-2023/executive-summary#abstract>>.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). *Nota Técnica nº 66: Desafios para o planejamento da eletromobilidade urbana no Brasil*. Brasília: IPEA, 2021. Disponível em: <https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/nota_tecnica/200<521_n_66_diset.pdf>.

_____. Entrada de meios alternativos de transporte urbano: Histórico e perspectivas. Nota Técnica nº 66 da Diretoria de Estudos e Políticas Setoriais de Inovação e Infraestrutura. Brasília: IPEA, 2020. Disponível em: <https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/nota_tecnica/200521_n_66_diset.pdf>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO E SUSTENTABILIDADE. *Caderno técnico de referência*. Brasília: IABS, 2019. Disponível em: <<http://www.iabs.org.br/publicacoes/caderno-tecnico-de-referencia>>.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). *Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida de carros de passeio a combustão e elétricos no Brasil*. 2023. Disponível em: <<https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/10/Brazil-LDV-LCA-report-A-4-PORT-v4.pdf>>.

_____. *Financing the transition to soot-free urban bus fleets in 20 megacities*. 2017. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Soot-Free-Bus-Financing_ICCT-Report_11102017_vF.pdf>.

_____. *Benefícios de tecnologias de ônibus em termos de emissões de poluentes do ar e do clima em São Paulo*. Relatório Técnico. Tim Dallmann. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Emissions_benefits_bus_sao_paulo_Port_20190201.pdf>.

_____. *Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo*. 2022. Disponível em: <<https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/ze-hvs-sao-paulo-brazil-eletrificacao-frota-onibus-e-custo-efetiva-jun22.pdf>>.

_____. *Análise operacional de ônibus elétricos em São Paulo: Projeto ZEBRA*. Washington, DC: ICCT, 2022. Disponível em: <<https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/brazil-hvs-ZEBRA-analise-operacion-onibus-eletricos-Sao-Paulo-nov22-1.pdf>>.

ISLAM, Md Tasbirul; IYER-RANIGA, Usha. Lithium-ion battery recycling in the circular economy: A review. *Recycling*, v. 7, n. 3, p. 33, 2022.

ISLAMEKA, M.; LEKSONO, E.; YULIARTO, B. Modelling of regenerative braking system for electric bus. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019. p. 044054.

ITDP (INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO). *From Santiago to Shenzhen: How electric buses are moving cities*. Relatório. 2021. Disponível em: <<https://www.itdp.org/publication/from-santiago-to-shenzhen-how-electric-buses-are-moving-cities/>>.

_____. Ferramenta para avaliação do potencial de Desenvolvimento Orientado ao Transporte

Sustentável (DOTS) em corredores de transporte. 2016. Disponível em: <<https://itdpbrasil.org.br/wp-content/uploads/2016/11/2016-11-itdp-ferramenta-dots.pdf>>.

_____. Padrão de Qualidade BRT edição 2016. Disponível em: <<https://itdpbrasil.org.br/wp-content/uploads/2016/11/2016-11-ITDP-BRT-standard.pdf>>.

ITDP (INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO); LOGIT. Projeto de Financiamento de Ônibus Elétricos em Belo Horizonte. Ministério do Desenvolvimento Regional – MDR e Banco Mundial. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/arquivos/projeto-de-financiamento-de-onibus-eletrico-em-belo-horizonte-portugues.pdf>>.

JUNQUEIRA, E.; MACHADO, B. A tributação da atividade dos eletropostos: ICMS ou ISS? Disponível em: <<https://www.jota.info/artigos/a-tributacao-da-atividade-dos-eletropostos-icms-ou-iss-08072022?non-beta=1>>.

KAMARGIANNI, M.; LI, Weibo; MATYAS, M.; SCHÄFER, A. A critical review of new mobility services for urban transport. *Transportation Research Procedia*, v. 14, p. 3294-3330, 2016.

KASSIM, Mohamed Rawidean Mohd; JAMIL, Wan Adil Wan; SABRI, Roslee Mohd. State-of-charge (soc) and state-of-health (soh) estimation methods in battery management systems for electric vehicles. In: 2021 IEEE International Conference on Computing (ICOCO). IEEE, 2021. p. 91-96.

LAJUNEN, ANTTI. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 38, p. 1-15, 2014.

LEE, J.; SHON, H.; PAPAKONSTANTINOU, I.; SON, S. Optimal fleet, battery, and charging infrastructure planning for reliable electric bus operations. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 100, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103066>>.

LI, Weihang; RENTEMEISTER, Monika; BADEDA, Julia; JÖST, Dominik; SCHULTE, Dominik; SAUER, Dirk Uwe. Digital twin for battery systems: Cloud battery management system with online state-of-charge and state-of-health estimation. *Journal of Energy Storage*, v. 30, 2020. 101557. ISSN 2352-152X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101557>>.

LIU, Xu; DIJK, Marc. The role of data in sustainability assessment of urban mobility policies. *Data & Policy*, v. 4, p. e2, 2022. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/data-and-policy/article/role-of-data-in-sustainability-assessment-of-urban-mobility-policies/DD2BD-F921114A35F8A2AAAEF41B7D418?utm_campaign=shareaholic&utm_medium=copy_link&utm_source=bookmark>.

LÓPEZ, I.; CALVO, P.L.; FERNÁNDEZ-SÁNCHEZ, G.; SIERRA, C.; CORCHERO, R.; CHACÓN, C.O.; JUAN, C.D.; ROSAS, D.; BURGOS, F. Different approaches for a goal: The electrical bus-EMT Madrid as a successful case study. *Energies*, 2022, 15, 6107. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en15176107>>.

MAHMOUD, M.; GARNETT, R.; FERGUSON, M.; KANAROGLOU, P. Electric buses: A review of alternative powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 62, p. 673-684, 2016. ISSN

1364-0321. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019>>.

MANZOLLI, J.A. Decision support for planning a bus rapid transit charging infrastructure. Dissertation in the context of the Master in Energy for Sustainability. Department of Mechanical Engineering of the University of Coimbra. 2020. Disponível em: <<https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/90179/1/Jonatas%20Manzolini%20MSc%20BRT%20charging%20infrastructure.pdf>>.

MATYAS, M.; KAMARGIANNI, M. The potential of mobility as a service bundles as a mobility management tool. *Transportation*, v. 46, p. 1-18, 2018.

MELO, R.R.; ANDRADE, M.O.; BRASILEIRO, A. Mobility as a Service: Necessidade de regulação e papel dos atores relevantes no contexto. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da Anpet, 2018.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Mobilidade Urbana. *Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras 2013 – Volume I*. Brasília: Ministério das Cidades, 2013a. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/arquivos/caderno-tecnico-de-referencia-para-eletromobilidade-nas-cidades-brasileiras-2013-volume-i-portugues.pdf>>.

_____. *Caderno técnico de referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras 2013 – Volume II*. Brasília: Ministério das Cidades, 2013b. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/arquivos/caderno-tecnico-de-referencia-para-eletromobilidade-nas-cidades-brasileiras-2013-volume-ii-portugues.pdf>>.

_____. *Guia de eletromobilidade: Orientações para estruturação de projetos no transporte coletivo por ônibus*. Brasília: Ministério das Cidades, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/Guia_Eletromobilidade.pdf>.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Resolução nº 182.087, de 17 de novembro de 2000. Estabelece as condições gerais para a prestação dos serviços de distribuição de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional – SIN. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 20 nov. 2000.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). *Estratégia nacional da mobilidade elétrica (2018-2022)*. Brasília, DF, 2018.

MONTEIRO, Julian; PONS, Ivo; SPEICYS, Roberto. *Big Data para análise de métricas de qualidade de transporte: Metodologia e aplicação*. São Paulo: ANTP, 2015. Disponível em: <http://filesserver.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2016/02/24/100EEC5A-680E-4190-BF-90-16042435FEBE.pdf>.

MORDOR INTELLIGENCE. *Latin America Electric Bus Market*. [s.d.]. Disponível em: <<https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/latin-america-electric-bus-market>>.

MUELLER, S.; ROHR, S.; SCHMID, W.; LIENKAMP, M. Analysing the influence of driver behaviour and tuning measures on battery aging and residual value of electric vehicles. EVS30 Symposium, Stuttgart, 2017.

OLIVEIRA, M.H.S.; ARAÚJO, T.O.F.; BASTOS, V.H.C. O começo de um novo ciclo de regulamentação dos transportes na transição para o paradigma da Mobility as a Service (MaaS). Trabalho Apresentado no 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da Anpet, 2019.

ORRICO FILHO, R.D.; SANTOS, E.M. Transporte coletivo urbano por ônibus: Regulamentação e competição. In: ORRICO FILHO, R. D.; SANTOS, E. M. *Ônibus urbano: regulamentação e mercados*. Brasília: LGE, 1996.

_____. Urban bus transport in Brazil: Regulations and competition. *The Asian Journal*, v. 9, p. 39-61, 2002.

PAGLIARO, Mario; MENEGUZZO, Francesco. Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight. *Heliyon*, v. 5, n. 6, 2019.

PAPA, Gregor; SANTO ZARNIK, Marina; VUKAŠINOVIĆ, Vida. Electric-bus routes in hilly urban areas: Overview and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 165, p. 112555, 2022.

PEREIRA, R. H. M.; SCHWANEN, T. Tempo de deslocamento casa-trabalho no Brasil (1992-2009): Diferenças entre regiões metropolitanas, níveis de renda e sexo. Brasília: Ipea, 2013 (Texto para Discussão, n. 1813).

PERROTTA, D.; MACEDO, J.L.; ROSSETTI, R.J.F.; AFONSO, J.L.; KOKKINOGENIS, Z.; RIBEIRO, B. Driver attitude and its influence on the energy waste of electric buses. In: BEHRISCH, M.; KRAJEWICZ, D.; WEBER, M. (Ed.). *Simulation of urban mobility. Sumo 2013. Lecture notes in computer science*. Berlim, Heidelberg: Springer, 2014. p. 99-108.

PERUGU, H.; COLLIER, S.; TAN, Y.; YOON, S.; HERNER, J. Characterization of battery electric transit bus energy consumption by temporal and speed variation. *Energy*, v. 263, p. 125914, 2023. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/eee/energy/v263y2023ipcs0360544222028006.html>>.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS. Decreto nº 18.350, de 22 de novembro de 2019. Prevê incorporação de novas tecnologias aos serviços de compartilhamento de veículos sem condutor vinculado. *Diário Oficial do Município de Campinas*, Campinas, 25 nov. 2019.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Decreto nº 1.244, de 5 de julho de 2015. Estabelece diretrizes para mobilidade sustentável no Município de Curitiba. *Diário Oficial do Município de Curitiba*, Curitiba, 6 jul. 2015.

_____. Lei nº 12.597, de 28 de dezembro de 2008. Institui o Plano diretor de mobilidade urbana sustentável de Curitiba. *Diário Oficial do Município de Curitiba*, Curitiba, 29 dez. 2008.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MANAUS. Plano de mobilidade urbana, 2015. Disponível em: <<https://www.manaus.am.gov.br/planmob/>>.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. Plano de mobilidade urbana, 2019. Disponível em: <<https://www.portoalegre.rs.gov.br/planmob/>>.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SALVADOR. Plano de mobilidade urbana sustentável, 2018. Disponível em: <<https://www.salvador.ba.gov.br/planmob/>>.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. Decreto nº 18.350, de 22 de novembro de 2019. Dispõe sobre a exploração de serviços de compartilhamento de veículos sem condutor vinculado. *Diário Oficial do Município de São José dos Campos*, São José dos Campos, 25 nov. 2019.

_____. Lei nº 9.684, de 28 de março de 2018. Estabelece a política municipal de incentivo ao uso de carros elétricos e híbridos. *Diário Oficial do Município de São José dos Campos*, São José dos Campos, 29 mar. 2018.

_____. Lei complementar nº 576, de 15 de março de 2016. Institui a Política municipal de mobilidade urbana, contemplando como diretriz a promoção do desenvolvimento sustentável, o estímulo ao desenvolvimento científico e tecnológico e uso de energias renováveis e menos poluentes. *Diário Oficial do Município de São José dos Campos*, São José dos Campos, 16 mar. 2016.

_____. Lei complementar nº 620, de 11 de julho de 2019. Institui a Linha Verde no Município de São José dos Campos, sendo um corredor sustentável destinado a interligar as regiões da cidade. *Diário Oficial do Município de São José dos Campos*, São José dos Campos, 12 jul. 2019.

QUARLES, N.; KOCKELMAN, K.M.; MOHAMED, M. Costs and benefits of electrifying and automating bus transit fleets. *Sustainability*, v. 12, n. 10, p. 3977, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su12103977>>.

RIO DE JANEIRO (Município). Lei nº 6.620, de 9 de setembro de 2020. Institui a Política municipal de incentivo ao uso de veículos elétricos e híbridos. *Diário Oficial do Município do Rio de Janeiro*, Rio de Janeiro, 10 set. 2020.

_____. Plano de desenvolvimento sustentável e ação climática da cidade do Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/plano_desenvolvimento_climatico/>.

_____. Plano de mobilidade urbana sustentável, 2019. Disponível em: <<https://www.rio.rj.gov.br/planmob/>>.

_____. Programa de eliminação de emissões de gases poluentes, 2021. Disponível em: <https://www.rio.rj.gov.br/programa_eliminacao_emissoes/>.

SALVADOR (Município). Plano de mobilidade urbana sustentável, 2018. Disponível em: <<https://www.salvador.ba.gov.br/planmob/>>.

SANTOS, E.M.; ORRICO FILHO, R.D. Regulamentação do transporte urbano por ônibus: Elementos do debate teórico. In: ORRICO FILHO, R.D.; SANTOS, E.M. *Ônibus urbano: Regulamentação e mercados*. Brasília: LGE, 1996.

SÃO PAULO (Município). Decreto nº 17.462, de 19 de maio de 2017. Regulamenta a Lei municipal nº 12.587, de 2012, que disciplina o uso do sistema viário urbano de São Paulo. *Diário Oficial do Município de São Paulo*, São Paulo, 20 maio 2017.

_____. Lei nº 14.933, de 5 de junho de 2009. Institui a Política de mudança do clima no Município de São Paulo. *Diário Oficial do Município de São Paulo*, São Paulo, 8 jun. 2009.

_____. Lei nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018. Estabelece diretrizes para a política de mobilidade urbana sustentável. *Diário Oficial do Município de São Paulo*, São Paulo, 18 jan. 2018. Lei nº 17.376, de 14 de janeiro de 2020. Inclui no Calendário de eventos da cidade o Dia da Mobilidade Elétrica. *Diário Oficial do Município de São Paulo*, São Paulo, 15 jan. 2020.

_____. Lei nº 17.563, de 5 de fevereiro de 2021. Permite aos compradores de veículos elétricos descontar créditos de IPVA a quem tem débitos de IPTU. *Diário Oficial do Município de São Paulo*, São Paulo, 6 fev. 2021.

_____. Plano de ação climática do Município de São Paulo 2020-2050, 2018. Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/plano_climatico/>.

_____. Plano de Mobilidade Urbana, 2015. Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/planmob/>>. SAW, Lip Huat; YE, Yonghuang; TAY, Andrew A.O. Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack. *Journal of Cleaner Production*, v. 113, p. 1032-1045, 2016.

SILVA, R.C.; MARCHI NETO, I. de; SEIFERT, S.S. Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 59, p. 328-341, jun. 2016. Elsevier BV. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.001>>.

SMITH, G.; SOCHOR, J.; KARLSSON, I.C.M.A. Mobility as a Service: Development scenarios and implications for public transport. *Research in Transportation Economics*, v. 69, p. 592-599, 2018.

SOOMAUROO, Zakia; BLECHINGER, Philipp; CREUTZIG, Felix. Electrifying public transit benefits public finances in small island developing states. *Transport Policy*, v. 138, p. 45-59, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.04.017>>.

TERRAZA, H.; BLANCO, D.R.; VERA, F. *De ciudades emergentes a ciudades sostenibles*. [s.l.]: Banco Interamericano de Desarrollo, 2016. Disponível em: <<https://www.idom.com/wp-content/uploads/2019/05/De-Ciudades-Emergentes-a-Ciudades-Sostenibles.pdf>>.

TOMASEVICIUS FILHO, E. A regulação dos transportes coletivos por ônibus no Município de São Paulo. *Revista da Faculdade de Direito, Universidade de São Paulo*, v. 97, p. 287, 2014.

UBER. Fatos e dados sobre a Uber. Disponível em: <<https://www.uber.com/pt-br/newsroom/fatos-e-dados-sobre-uber>>.

UITP (International Association of Public Transport). *Large-scale bus electrification: New challenges for IT systems*. 2022. Disponível em: <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2023/08/Report_July2022-Large-scale-bus-electrification-challenges-IT-systems.pdf>.

_____. The road to sustainability: Transition to renewable energy in public transport. Report. Janeiro, 2023.

_____. World metro figures. 2022. Disponível em: <<https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2022/05/Statistics-Brief-Metro-Figures-2021-web.pdf>>.

UNIÃO. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política nacional de mobilidade urbana. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 jan. 2012. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm>.

_____. Lei nº 13.755, de 10 de dezembro de 2018. Institui o Rota 2030 – Mobilidade e Logística e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 dez. 2018. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/L13755.htm>.

UNITED NATIONS. *World urbanization prospects 2018*. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/>>.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Cities and climate change*. 2017. Disponível em: <<http://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/cities-and-climate-change>>.

_____. *The sixth global environment outlook*. 2019. Disponível em: <<https://www.unep.org/resources/global-environment-outlook-6>>.

UTRIAINEN, R.; PÖLLÄNEN, M. Review on Mobility as a Service in scientific publications. *Research in transportation business and management*, v. 27, p. 15-23, 2018.

VERBRUGGE, B.; HASAN, M.M.; RASOOL, H.; GEURY, T.; EL BAGHDADI, M.; HEGAZY, O. Smart integration of electric buses in cities: A technological review. *Sustainability*, 2021, 13, 12189. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su132112189>>.

VEPSÄLÄINEN, Jari; OTTO, Kevin; LAJUNEN, Antti; TAMMI, Kari. Computationally efficient model for energy demand prediction of electric city bus in varying operating conditions. *Energy*, v. 169, p. 433-443, 2019. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.064>>.

VIEIRA, João Pedro Bazzo; PEREIRA, Rafael H.M.; ANDRADE, Pedro R. Estimating public transport emissions from General Transit Feed Specification data. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 119, p. 103757, 2023.

VUCHIC, V. R. *Urban transit: Systems and technology*. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

WADY, A.F. Os sinais regulatórios necessários para o desenvolvimento da mobilidade elétrica na cidade: uma abordagem com foco na infraestrutura de recarga. 2021. Dissertação (Mestrado). Repositório Unicamp.

WANG, JIN; YU, LIANG-CHIH; LAI, K. ROBERT; ZHANG, XUEJIE. “Dimensional sentiment analysis using a regional CNN-LSTM model”. In: *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (volume 2: Short Papers), Berlim: Association for Computational Linguistics, 2016. p. 225-230. Disponível em: <<https://aclanthology.org/P16-2037>>.

WANG, S.; LU, C.; LIU, C.; ZHOU, Y.; BI, J.; ZHAO, X. Understanding the energy consumption of battery electric buses in urban public transport systems. *Sustainability*, 2020, 12, 10007. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su122310007>>.

WENZ, KLAUS-PETER et al. Route prioritization of urban public transportation from conventional to electric buses: A new methodology and a study of case in an intermediate city of Ecuador. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 148, p. 111215, 2021.

WORLD BANK. *Electrification of public transport: A case study of Shenzhen Bus Group*. Washington, DC: World Bank, 2021. Disponível em: <<https://documents1.worldbank.org/curated/en/708531625052490238/pdf/Electrification-of-Public-Transport-A-Case-Study-of-the-Shenzhen-Bus-Group.pdf>>.

_____. *Global Economic Prospects*. 2024. Disponível em: <https://www.worldbank.org/en/publication/global-economic-prospects?intcid=ecr_hp_headerA_2024-06-11-GEPRReport>.

_____. *Strategic guidance for country system assessments*. Guideline. 2023. Disponível em: <<https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/e-bus-deployment-model-erp>>.

WRI BRASIL Cidades Sustentáveis. Compromisso global por ônibus mais verdes. Disponível em: <<https://wricidades.org/noticia/compromisso-global-por-%C3%B4nibus-mais-verdes>>.

WU, Hunter H.; GILCHRIST, Aaron; SEALY, Kylee D.; ISRAELSEN, Paul D.; MUHS, Jeffrey D. “A review on inductive charging for electric vehicles”. 2011. IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) (2011): 143-147. Disponível em : <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5994820>>.

YALE CLIMATE CONNECTIONS. Electrifying transportation reduces emissions and saves massive amounts of energy. 2022. Disponível em: <<https://yaleclimateconnections.org>>.

ZANNAT, Khatun E.; CHOUDHURY, Charisma F. Emerging big data sources for public transport planning: A systematic review on current state of art and future research directions. *Journal of the Indian Institute of Science*, v. 99, n. 4, p. 601-619, 2019.

ZEBRA (Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator). *Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo*. 2022. Disponível em: <<https://pnme.org.br/wp-content/uploads/2022/03/Sao-Paulo-ZEBRA-A4-v6.pdf>>.

ZENG, Xiaoqiao; LI, Matthew; ABD EL-HADY, Deia; ALSHITARI, Wael; AL-BOGAMI, Abdullah S.; LU, Jun; AMINE, Khalil. Commercialization of lithium battery technologies for electric vehicles. *Advanced Energy Materials*, v. 9, n. 27, 2019. doi:10.1002/aenm.201900161.

ZHOU, J.L.W.; WOLFSON, O. Electric vehicle routing problem. *Transportation Research Procedia*, v. 12, p. 508-521, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.007>>.

ZHOU, M.; JIN, H.; WANG, W. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 49, p. 203-218, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.Trd.2016.09.008>>.

Insper

CENTRO DE ESTUDOS
DAS CIDADES
Laboratório Arq.Futuro



OBSERVATÓRIO DE
MOBILIDADE URBANA
SUSTENTÁVEL

Insper
Arq.Futuro

CENTRO DE
ESTUDOS
DAS CIDADES



Rua Quatá 300 • Vila Olímpia • São Paulo • SP • Brasil • CEP 04546-042 • Tel (11) 4504-2400



insper



insperedu



insper



insper-edu



insperedu