



# Ônibus Elétricos: Guia de Baterias e Recarga



 SMART Mob

# AUTORES E AGRADECIMENTOS

## AUTORA

Beatriz G. Rodrigues, ITDP Global

## AUTORES COLABORADORES

Stanford Turner, Departamento de Transporte dos EUA

Alyssa Wieggers, NYC Urban Fellow

Swati Suman

## EDIÇÃO, REVISÃO E SUPORTE ADICIONAL DA EQUIPE DO ITDP

Heather Thompson, CEO do ITDP

Aimee Gauthier, ITDP Global

Jacob Mason, ITDP Global

## COLEGAS DE ESCRITÓRIOS REGIONAIS DO ITDP QUE CONTRIBUÍRAM COM OS ESTUDOS DE CASOS, DADOS, INFORMAÇÕES DE APOIO E REVISÃO INTERNA

Aditya Rane, ITDP Índia

Alfisahr Ferdian, ITDP Indonésia

Bernardo Serra, ITDP Brasil

César Hernández, ITDP México

Chris Kost, ITDP África

Claire Birungi, ITDP África

Clarisse Linke, ITDP Brasil

Li Shansha, ITDP China

Lu Qiuyang, ITDP China

Víctor Medel, ITDP México

## APOIADORES



Este trabalho está licenciado sob licença Creative Commons Atribuição-Compartilha Igual 3.0 Brasil. Para visualizar uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/br/> ou mande uma carta para Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, EUA.

PUBLICADO EM AGOSTO DE 2025



**IMAGEM DA CAPA:** O sistema de transporte público de Jakarta inova com ônibus elétricos ecológicos como forma de cumprir os objetivos do Programa Blue Sky. **FONTE:** wibisono.ari via Shutterstock



### ***Algumas palavras de Heather Thompson, CEO do ITDP***

Nós, do ITDP, sabemos que, para que as cidades e governos do mundo todo consigam atingir suas metas climáticas, econômicas e de equidade social no menor prazo possível, é essencial que invistam em sistemas de transporte público que priorizem os ônibus elétricos. As iniciativas atuais de eletrificação do transporte urbano já estão preparando o terreno para cidades mais habitáveis com níveis mais baixos de emissões de carbono, melhor qualidade do ar, redução de custos para a população e aumento da acessibilidade para todas as pessoas. Atualmente, mais de 670 mil ônibus elétricos se encontram em circulação no mundo todo, e não há dúvida de que esses veículos representam a chave para a superação dos desafios de transporte enfrentados por muitas cidades.

A participação de ônibus elétricos no mercado continua crescendo. Para que essa tendência se mantenha e seja bem-sucedida, os planejadores e tomadores de decisão precisam, de maneira consciente e intencional, tratar as baterias e a infraestrutura de recarga como partes de políticas de transporte mais amplas. Atualmente, muitos governos se concentram apenas na aquisição e utilização dos veículos e frotas. No entanto, para garantir o sucesso duradouro desses sistemas e de suas operações, a transição elétrica precisa ir além da mera substituição das frotas de ônibus tradicionais.

Os governos também precisam dar a mesma ênfase à avaliação de oportunidades e desafios relacionados a tecnologias de baterias, infraestruturas de recarga, capacidade da rede elétrica e planejamento operacional. Isso ajudará a garantir que as frotas de ônibus elétricos se tornem resilientes e confiáveis no longo prazo. Por outro lado, se as cidades não planejarem adequadamente as capacidades de suas redes elétricas e infraestruturas de recarga, o resultado pode ser ineficiente e caro, o que prejudicaria — em vez de promover — a mobilidade elétrica.

É por isso que nossa equipe tem o prazer de compartilhar esta publicação, que enfatiza a importância de integrar a eletrificação veicular a estratégias de recarga bem planejadas por meio de cinco etapas práticas. A liderança e experiência do ITDP em transporte público, especialmente em sistemas de ônibus, coloca-nos numa posição privilegiada para desenvolver e consolidar boas práticas e inovações no setor. Esperamos que todos os atores do setor de transportes aproveitem o marco proposto aqui para tomar decisões mais bem embasadas sobre a evolução dos sistemas de ônibus elétricos, o que nos ajudará a garantir que o futuro do transporte público beneficie tanto as pessoas quanto o planeta.

Boa leitura,  
**Heather Thompson**  
CEO do ITDP

# SUMÁRIO

## ÔNIBUS ELÉTRICOS: GUIA DE BATERIAS E RECARGA

<b>LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS</b>	<b>5</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
O GUIA	8
<b>2. OPÇÕES DE BATERIAS</b>	<b>11</b>
2.1. MATERIAL, COMPOSIÇÃO E TAMANHO DAS BATERIAS	11
2.2. VIDA ÚTIL E AUTONOMIA DAS BATERIAS	17
2.3. FIM DA VIDA DAS BATERIAS	20
2.3.1. RECICLAGEM	21
2.3.2. REUTILIZAÇÃO	21
<b>3. OPÇÕES DE INFRAESTRUTURAS DE RECARGA</b>	<b>23</b>
3.1. LOCAIS E TIPOS DE INFRAESTRUTURAS DE RECARGA	23
3.2. ESTRATÉGIAS PARA O PLANEJAMENTO DA RECARGA	30
3.2.1. RECARGA EM GARAGEM	31
3.2.2. RECARGA DE OPORTUNIDADE	35
3.2.3. RECARGA COMBINADA/MISTA	38
3.3. TAMANHO IDEAL DA BATERIA PARA CADA PLANO ESTRATÉGICO DE RECARGA	40
3.4. PADRÕES E INTEROPERABILIDADE DE CARREGADORES	42
3.5. IMPACTO POTENCIAL NA REDE DE ENERGIA	43
<b>4. PROCESSO DECISÓRIO</b>	<b>47</b>
4.1. MAPEAMENTO DO MARCO DE POLÍTICAS PÚBLICAS E DAS PRINCIPAIS PARTES INTERESSADAS	51
4.2. SELEÇÃO DAS ROTAS E COMPREENSÃO DAS NECESSIDADES DE RECARGA	56
4.3. AVALIAÇÃO DO MERCADO DE BATERIAS E INFRAESTRUTURAS DE RECARGA	60
4.4. SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA DE RECARGA PARA AS ROTAS PRIORIZADAS	63
4.4.1. POSICIONAMENTO POTENCIAL DA INFRAESTRUTURA DE RECARGA	63
4.4.2. AVALIAÇÃO DA REDE PARA CADA CARREGADOR INSTALADO	64
4.4.3. ANÁLISE, CONSIDERAÇÕES E USO IDEAL DAS DIVERSAS ESTRATÉGIAS DE RECARGA	66
4.5. IMPLEMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DA ESTRATÉGIA	69
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE. MODELOS DE CARREGADORES <i>PLUG-IN</i></b>	<b>79</b>

# LISTA DE ACRÔNIMOS E SIGLAS

CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCG (sigla em inglês)	Contrato de remuneração indireta ( <i>gross cost contract</i> )
CCS (sigla em inglês)	Sistema de recarga combinada ( <i>combined charging system</i> )
FAME (sigla em inglês)	Adoção e Fabricação Aceleradas de Veículos Elétricos ( <i>Faster adoption and manufacturing of electric vehicles</i> )
IMC (sigla em inglês)	Recarga em movimento ( <i>in-motion charging</i> )
LFP (sigla em inglês)	Fosfato de ferro-lítio ( <i>lithium iron phosphate</i> )
MCI	Motor de combustão interna
NCM	Níquel-cobalto-manganês
NEMMP (sigla em inglês)	Plano da Missão Nacional de Mobilidade Elétrica ( <i>National electric mobility mission plan</i> )
OEB	Ônibus elétrico a bateria
SoC (sigla em inglês)	Estado de carga ( <i>state of charge</i> )



# 1

## INTRODUÇÃO

A implementação eficaz de um sistema de ônibus elétricos a bateria (OEBs) exige um plano abrangente para selecionar baterias e tecnologias de recarga capazes de atender às necessidades específicas das rotas de ônibus. Para que isso seja possível, os tomadores de decisão devem adotar os passos a seguir: (1) mapear o contexto político; (2) priorizar rotas de ônibus elétricos e entender suas necessidades de recarga; (3) avaliar o mercado de baterias e estruturas de recarga; (4) elaborar uma estratégia de recarga para as rotas priorizadas; e, por fim, (5) implementar e monitorar a estratégia. Este estudo apresenta uma visão geral das diversas tecnologias de baterias e recarga disponíveis e importantes considerações referentes a cada uma, de forma que possa ser usado como um guia prático por governos e planejadores.

Certas inovações tecnológicas no setor de transportes — especialmente as tecnologias de eletrificação e de baterias — são capazes de reduzir significativamente as emissões globais de carbono e a poluição do ar, melhorando, assim, a saúde pública e a qualidade de vida. Em termos globais, o setor de transportes contribui com quase um quarto das emissões de dióxido de carbono dos setores de uso final (transporte, indústria, residências e comércio). Em 2020, os veículos poluentes<sup>1</sup> foram responsáveis por até 61% do material particulado encontrado em cidades ao redor do mundo. Segundo estimativas, a exposição a material particulado pode ter contribuído para 4,2 milhões de mortes prematuras em 2019, com cerca de 89% dessas mortes ocorrendo em países de renda baixa e média<sup>2</sup>. A adoção de tecnologias limpas no transporte é fundamental para garantir vidas mais saudáveis e uma mobilidade climaticamente correta, tanto local quanto globalmente.

No âmbito do setor de transportes, o transporte público tem, mais especificamente, a capacidade de gerar impactos sociais, econômicos e ambientais positivos. Os ônibus elétricos apresentam vantagens claras sobre os ônibus com motor de combustão interna (MCI), propondo soluções para problemas urbanos urgentes. Eles oferecem alternativas limpas e silenciosas que reduzem as emissões gerais, mesmo em cidades com redes elétricas não totalmente descarbonizadas. Segundo previsões, o número de ônibus elétricos deve chegar a 175 milhões até 2030: isso significa que essa tecnologia está se tornando mais acessível e adaptável a diversos cenários urbanos<sup>3</sup>. A transição também melhora a segurança, por meio de um melhor controle da condução e da redução da poluição sonora, ao mesmo tempo que apresenta oportunidades para promover a equidade. Ela dá a comunidades vulnerabilizadas acesso a opções de transporte limpas e confiáveis, que se tornam uma escolha melhor para o transporte urbano sustentável.

Muitas cidades ao redor do mundo já se comprometeram a descarbonizar seus sistemas de transporte público adquirindo ônibus elétricos. No entanto, um processo bem-sucedido de eletrificação requer mais que apenas a substituição veicular: é necessária uma abordagem holística que considere as implicações mais amplas da infraestrutura de recarga no ambiente urbano e na rede elétrica. O posicionamento estratégico da infraestrutura de recarga é crucial para que haja eficiência, permitindo, assim, uma substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos mais paritária em termos de investimento e desempenho.

**PÁGINA AO LADO:**  
A Índia ampliou sua frota de ônibus elétricos com a entrada de empresas locais no mercado.  
**FONTE:** ITDP Índia

1 Heydari, S. et al. (2020). Estimating traffic contribution to particulate matter concentration in urban areas. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7273192/>.

2 WHO (2022). Ambient (outdoor) air pollution. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).

3 ITDP; UC Davis (2021a). O Cenário de Cidades Compactas Eletrificadas: O único caminho para uma redução de 1,5 °C. [O Cenário de Cidades Compactas Eletrificadas - ITDP Brasil](https://www.itdp.org.br/pt-br/publicacoes/2021/05/01/ocenario-de-cidades-compactas-eletrificadas).



A seleção dos tipos de baterias e tecnologias de recarga é um passo fundamental para os tomadores de decisão e planejadores de transporte que estiverem dando os primeiros passos rumo à eletrificação — geralmente iniciando com um projeto-piloto antes de investirem na transição de toda a frota. A decisão dependerá de muitos fatores, tais como contexto local, disponibilidade no mercado, estratégias operacionais, custos gerais e estudos e testes baseados em evidências. A infraestrutura de recarga pode ter um grande impacto na confiabilidade e no conforto do sistema, bem como no entorno da área onde a infraestrutura for instalada. Este estudo pretende orientar as partes interessadas para que tomem decisões bem-fundamentadas, de forma a garantir que a eletrificação tenha uma boa relação custo-benefício e se integre perfeitamente à paisagem urbana.

## O GUIA

Este guia pretende auxiliar tomadores de decisão e planejadores de transporte na implementação eficaz de sistemas de ônibus elétricos, enfatizando a importância de as tecnologias de baterias e recarga serem adequadas e se adaptem bem a contextos urbanos específicos. Ele se concentra especificamente em opções de baterias e estruturas de recarga para ônibus elétricos a bateria (OEBs), incluindo aqueles que são alimentados parcialmente por linhas elétricas aéreas. Uma compreensão abrangente dessas opções é um passo importante que as cidades devem tomar ao determinarem qual intervenção é a mais apropriada para cada caso. As tecnologias estão em constante evolução; portanto, um guia detalhado sobre as últimas estimativas de custos e tecnologias pode ser muito útil para a implementação de sistemas de ônibus elétricos.

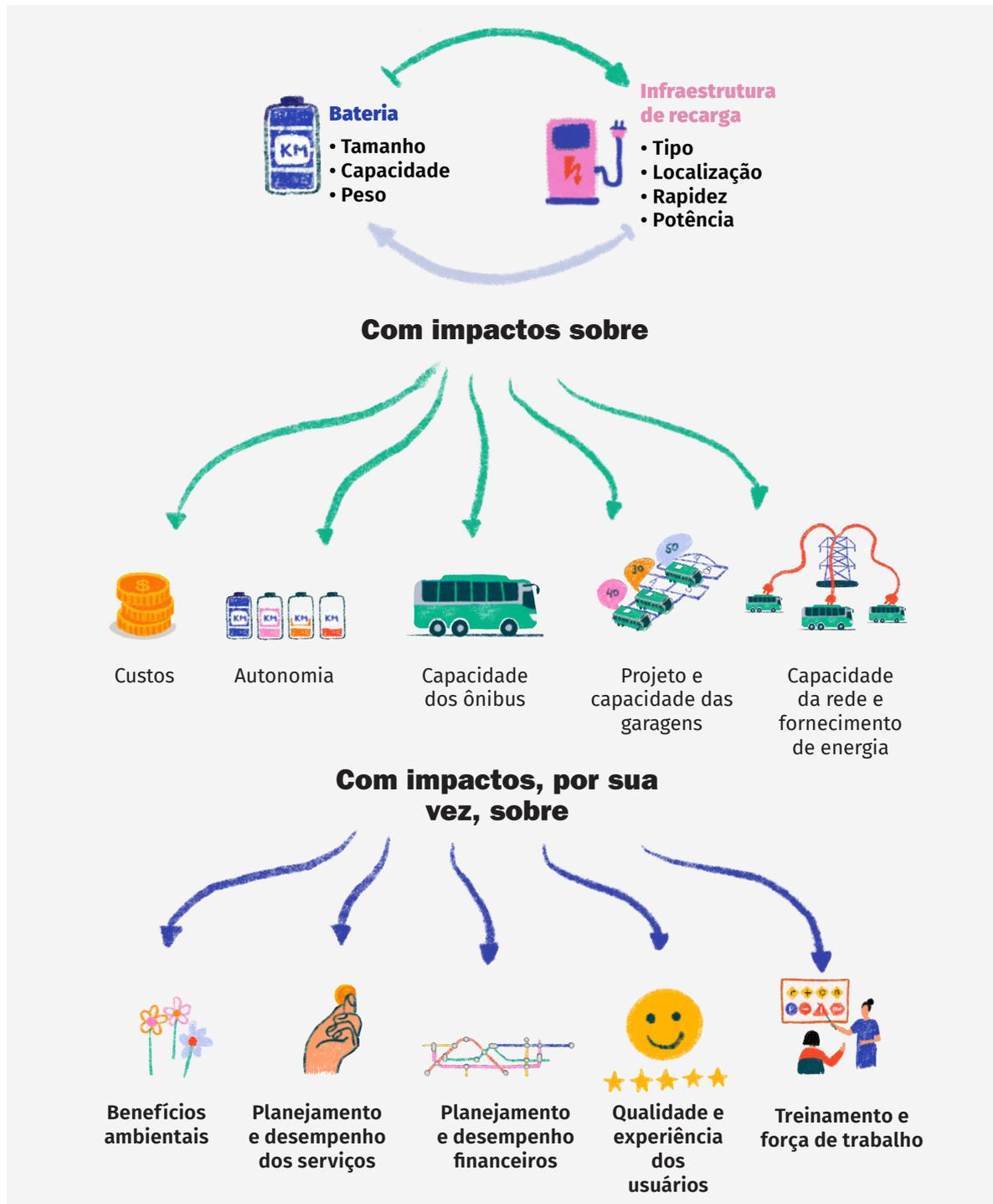
A identificação das opções de baterias e estruturas de recarga mais adequadas para cada contexto é uma barreira encontrada por muitas cidades. Diversos fatores econômicos, sociais e operacionais ajudam a garantir que cada cidade possa entender completamente as melhores opções de eletrificação a seu dispor. Este guia oferece um panorama abrangente com considerações e recomendações sobre os métodos e tecnologias atuais relacionados a baterias e recarga de ônibus elétricos. Ele também compartilha boas práticas internacionais de planejamento, implementação, monitoramento e outras considerações de infraestrutura e estratégias de recarga de ônibus elétricos. Uma análise holística desses elementos oferecerá às principais partes interessadas um método para fundamentar suas decisões sobre a descarbonização das frotas.

A **Seção 2** apresenta uma visão geral dos diferentes tipos e materiais de baterias, bem como sua saúde e ciclo de vida; além disso, examina as maneiras como o tamanho da bateria se relaciona com diferentes métodos de recarga. A **Seção 3** contém uma visão geral e uma análise de cada modelo de recarga e as principais opções para o desenvolvimento de uma estratégia para o planejamento da recarga. Ademais, aborda os custos mais comuns, os cenários mais apropriados para a recarga e os possíveis impactos na rede elétrica. Por fim, a **Seção 4** apresenta um método para apoiar a tomada de decisões, incluindo os fatores que precisam

ser considerados, como qualidade, meio ambiente, equidade social, eficiência e economia. Vale observar que a adoção de ônibus elétricos continua evoluindo rapidamente. Portanto, embora os números e dados fornecidos sejam atuais no momento do lançamento desta publicação, o foco principal é o marco mais amplo que deve nortear a tomada de decisões para a adoção de ônibus elétricos a bateria.

O ITDP examinou e estudou 60 documentos, incluindo relatórios, artigos, materiais educacionais, recursos de apoio e literatura relevante (acadêmica, cinzenta ou revisada por pares) relacionados a ônibus elétricos, eletrificação de frotas, baterias de ônibus elétricos e tecnologias de recarga. As tecnologias de ônibus elétricos estão sempre evoluindo e, como resultado, novas boas práticas também surgem. Em cada tópico, o ITDP revisou os avanços mais recentes da literatura e as contribuições de renomados especialistas internacionais. Além disso, o guia baseia-se em informações reais sobre projetos-piloto e frotas que incluem, entre outros, projetos envolvendo escritórios regionais do ITDP, nos quais a pesquisa se beneficia de experiências diretas em vários estágios da implementação de sistemas de ônibus elétricos.

**FIGURA 1. ELEMENTOS INTERCONECTADOS DO PLANEJAMENTO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS: BATERIAS, ESTRUTURAS DE RECARGA E SEUS IMPACTOS**



# 2

## OPÇÕES DE BATERIAS

As baterias costumam ser o elemento mais caro dos sistemas dos OEBs: estão entre os componentes mais pesados e têm grandes repercussões nas operações (juntamente com os equipamentos de recarga). Isso significa que é fundamental analisar as características das baterias, sua saúde, os métodos de recarga e a frequência de substituição para que possamos selecionar as opções mais econômicas e com melhor eficiência energética. Alguns tipos de bateria podem ser usados para vários cenários de recarga, e a escolha pode ser afetada pela disponibilidade de fornecimento local pelos fabricantes.

Esta seção apresentará uma visão geral abrangente das várias considerações pertinentes à seleção de baterias para ônibus elétricos, tais como custos, materiais, composição, tamanho, integridade, ciclo de vida, conectividade com métodos de recarga e opções de infraestrutura de recarga.

### 2.1. MATERIAL, COMPOSIÇÃO E TAMANHO DAS BATERIAS

A escolha dos materiais das baterias de ônibus elétricos pode afetar a autonomia, o desempenho, o custo, a demanda e até mesmo os processos a serem realizados quando a bateria chegar ao fim de sua vida útil. Cada composição tem suas vantagens e desvantagens, e a química selecionada pode variar dependendo da oferta de matérias-primas, da produção e dos requisitos de cada módulo de baterias. As células das baterias são compostas por cinco subcomponentes: ânodo, cátodo, eletrólito, separador e invólucro. O ânodo e o cátodo constituem os eletrodos da bateria — isto é, os polos condutores de corrente elétrica.

Atualmente, as baterias mais frequentemente usadas em veículos elétricos são de íons de lítio, de hidreto de níquel metálico e de ácido de chumbo. As baterias de hidreto de níquel metálico e de ácido de chumbo têm menos representação no mercado devido a certas limitações, como densidade de energia<sup>4</sup>, custos de produção, vida útil e quantidade de calor gerada em altas temperaturas<sup>5</sup>. No caso das baterias de ácido de chumbo, algumas vantagens são os custos mais baixos, a confiabilidade e o fato de usarem uma tecnologia bastante difundida; contudo, elas apresentam baixa densidade de energia, são pesadas, têm vida útil curta, não podem ser recicladas e exigem muita manutenção<sup>6</sup>.

As baterias de hidreto de níquel metálico e de ácido de chumbo são usadas principalmente em veículos híbridos. As baterias de hidreto de níquel metálico oferecem um bom ciclo de vida e são robustas em temperaturas variadas, mas têm menor densidade de energia e são mais pesadas que as baterias de íons de lítio.

**PÁGINA AO LADO:**  
Ônibus elétricos durante uma operação de recarga em garagem em Bandung, Indonésia.  
**FONTE:** Algi Febri Sugita via Shutterstock

<sup>4</sup> A densidade de energia da bateria se refere à quantidade de energia armazenada na bateria em relação a seu peso ou volume. Uma densidade mais alta indica que a bateria pode fornecer mais energia por um período maior considerando seu tamanho. Portanto, baterias com alta densidade de energia são particularmente vantajosas quando o espaço for limitado e houver uma demanda significativa de energia.

<sup>5</sup> Garche et al. (2015). *Lead-acid batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09781782423775000054>.

<sup>6</sup> Garche et al. (2015).



As baterias usadas em ônibus elétricos costumam ser compostas de íons de lítio, um elemento químico com boa eficiência energética e alta densidade de voltagem que está se tornando cada vez mais popular em muitos tipos de tecnologias ao redor do mundo. Essas baterias também têm baixas taxas de autodescarga<sup>7</sup>, longa vida útil e alta capacidade de carga e descarga<sup>8,9</sup>. As baterias de íons de lítio podem variar conforme a composição do material do cátodo. Em alguns casos, o cátodo corresponde a até 20% da massa total da bateria, e a maioria deles usa cobalto<sup>10</sup>.

As baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP) são, de longe, as mais predominantemente usadas em ônibus elétricos, totalizando 98,9% das unidades de baterias para ônibus elétricos vendidas no mundo todo<sup>11</sup>. As baterias LFP oferecem muitos benefícios em comparação com aquelas de níquel-cobalto-manganês (NCM): apresentam um nível mais alto de segurança e estabilidade térmica; têm um ciclo de vida mais longo, o que resultará em custos operacionais mais baixos; e são mais confiáveis para projetos de longo prazo. Em termos de desempenho, a tecnologia NCM é mais interessante devido à densidade de energia um pouco maior. No entanto, os preços do níquel e do cobalto são altos e extremamente voláteis, o que leva a custos de produção muito maiores para baterias NCM que para baterias LFP.

A China, por exemplo, como líder global na fabricação de ônibus elétricos, usa baterias LFP devido a seu custo mais baixo e ao fato de serem produzidas internamente<sup>12</sup>. Nos primeiros seis meses de 2023, as baterias LFP responderam por 66% da produção total de baterias da China, ao passo que as baterias NCM representaram 33,91%<sup>13</sup>. No entanto, como as baterias LFP não são feitas com materiais caros como o níquel, elas tendem a ser menos lucrativas no momento da reciclagem.

A América do Norte e a Europa usam mais baterias NCM, mas esses mercados representam uma porcentagem significativamente menor da frota mundial de ônibus elétricos<sup>14</sup>. O mercado dos EUA prefere baterias NCM devido a sua capacidade maior e sua melhor adequação às necessidades de transporte de cidades pouco povoadas. Com base nos padrões atuais, a previsão para as próximas décadas é que as economias emergentes da América Latina, da região da Ásia-Pacífico e da África observarão um grande aumento no uso de baterias LFP, ao passo que os mercados norte-americano e europeu terão mais baterias NCM<sup>15</sup>.

## EMISSÕES DAS BATERIAS AO LONGO DE SEU CICLO DE VIDA

Os diferentes elementos químicos usados em cada bateria contribuem para suas emissões ao longo de todo o ciclo de vida. O lítio e o cobalto são classificados como minerais essenciais por vários governos ao redor do mundo, e há muitas preocupações ambientais e sociais sobre sua sustentabilidade e equidade. Devido à importância econômica e aos riscos relacionados à oferta de cobalto, os fabricantes vêm tentando reduzir a quantidade desse metal na composição das baterias de íons de lítio.

7 Uma baixa taxa de autodescarga refere-se à capacidade da bateria de reter sua carga ao longo do tempo quando não estiver em uso. As baterias com baixa taxa de autodescarga perdem a energia armazenada muito lentamente, o que significa que podem manter a carga por longos períodos sem uma perda significativa de energia. Essa característica é particularmente benéfica para situações em que a bateria não for usada com frequência, garantindo que ela permaneça pronta para uso quando necessário.

8 Uma alta capacidade de carga e descarga refere-se à capacidade de uma bateria de fornecer uma grande quantidade de corrente num curto período. As baterias com alta capacidade de carga e descarga podem fornecer um volume substancial de energia rapidamente, o que é essencial para situações que exigem explosões intensas de energia.

9 Bloomberg New Energy Finance (2018). *Electric buses in cities: Driving towards cleaner air and lower CO<sub>2</sub>*. <https://www.c40knowledgehub.org/#!/article/Electric-Buses-in-Cities-Driving-Toward-Cleaner-Air-and-Lower-CO2?language=en-US>.

10 Kara, O. N. (2019). *Environmental and economic sustainability of zero-emission bus transport*. <http://essay.utwente.nl/78088>.

11 UC Davis (2023). *Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries in Lower- and Middle-income Countries: Life Cycle Impacts and Issues*. <https://www.unep.org/resources/report/electric-vehicle-lithium-ion-batteries-lower-and-middle-income-countries>.

12 Nikkei Asia (2023). *BYD challenges CATL's EV battery crown in China*. <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Electric-cars-in-China/BYD-challenges-CATL-s-EV-battery-crown-in-China>.

13 Fastmarkets (2023). *LFP batteries extend dominance over NCM batteries in China*. <https://www.fastmarkets.com/insights/lfp-batteries-extend-dominance-over-ncm-batteries-china/>.

14 Congressional Research Service (2022). *Critical Minerals in Electric Vehicle Batteries*. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R47272>.

15 UC Davis (2023).

Embora a tecnologia veicular usada para alimentar veículos elétricos não gere emissões, sua cadeia produtiva pode ser intensiva em emissões de carbono — especialmente para a produção de baterias e a geração de energia elétrica para a recarga. As emissões de veículos elétricos ao longo de seu ciclo de vida dependem dos minerais da bateria e da matriz energética, mas podem variar de 18 a 30 toneladas de CO<sub>2</sub>, ao passo que os veículos MCI emitem aproximadamente 45 toneladas de CO<sub>2</sub><sup>16</sup>. Em outras palavras, sem um planejamento cuidadoso e abrangente, a poluição que deixa de ser emitida nas ruas é transferida para usinas de energia ou para a mineração e processamento das matérias-primas (como lítio, níquel e cobalto) necessárias para a fabricação das baterias. Além de ser um desafio ambiental, isso também se manifesta como uma questão geopolítica que envolve disputas territoriais relacionadas à extração desses materiais, denúncias de trabalho infantil e escravo e ameaças à preservação dos povos indígenas<sup>17</sup> — incluindo suas terras, sua cultura e suas próprias vidas.



Mineração artesanal de cobalto na República Democrática do Congo.  
**FONTE:**  
Wikimedia Commons

A sustentabilidade das baterias de íons de lítio é outro fator ambiental a ser analisado, já que sua produção e reciclagem fazem um uso mais intensivo de matérias-primas que a produção de motores de combustão tradicionais. Até 2022, a maior parte do lítio era extraída de minas de rocha dura ou de reservatórios subterrâneos de salmoura, predominantemente na região conhecida como o Triângulo do Lítio da América do Sul, que abrange terras na Argentina, no Chile e na Bolívia. Parte da energia usada para extrair e processar o lítio ainda vem de combustíveis fósseis: para cada tonelada de lítio extraída, são emitidas 15 toneladas de CO<sub>2</sub>. Para efeito de comparação, cada tonelada de CO<sub>2</sub> equivale ao que um automóvel movido a gasolina emitiria ao percorrer cerca de 4.025 km. Além disso, a produção de baterias de íons de lítio utiliza grandes volumes de água e corre o risco de contaminar e esgotar reservatórios naturais. A produção de uma tonelada de lítio requer aproximadamente 2 milhões de toneladas de água, o que torna a produção de baterias muito intensiva em uso da água<sup>18</sup>. O Triângulo do Lítio da América do Sul vem sofrendo um esgotamento significativo de seus recursos hídricos devido à extração de lítio. Sozinho, o Chile detém cerca de 58% das reservas totais de lítio do mundo<sup>19</sup>.

<sup>16</sup> IEA (2021). *Comparative life-cycle greenhouse gas emissions of a mid-size BEV and ICE vehicle*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparative-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-a-mid-size-bev-and-ice-vehicle>.

<sup>17</sup> MIT CLIMATE PORTAL (2022). *How much CO<sub>2</sub> is emitted by manufacturing batteries?* <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-co-2-emitted-manufacturing-batteries>.

<sup>18</sup> Earth.org (2023). *The Environmental Impact of Battery Production for Electric Vehicles*. <https://earth.org/environmental-impact-of-battery-production/>.

<sup>19</sup> United Nations (2020). *Commodities at glance. Special issue on strategic battery raw materials*. [https://unctad.org/system/files/official-document/ditccom2019d5\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ditccom2019d5_en.pdf).

Muitos pesquisadores, fabricantes e outras organizações têm priorizado avaliações que cubram todo o ciclo de vida para monitorar e entender melhor o impacto ambiental geral dos ônibus elétricos e suas baterias. A avaliação do ciclo de vida é um método padronizado que pode ajudar a quantificar os impactos totais, pois abrange produção, uso e fim de vida útil. Os fabricantes têm estabelecido parcerias com organizações globais para definir padrões para essas avaliações de ciclo de vida, de forma que possam ser usadas em negociações e debates com autoridades e operadores municipais do mundo todo<sup>20</sup>. Embora a produção de baterias seja um processo que demanda muitos recursos, há esforços e métodos de avaliação que visam a diminuir seus impactos ambientais.

Com a crescente difusão de ônibus elétricos ao redor do mundo, o dimensionamento das baterias tornou-se um fator crucial para os operadores de ônibus, porque isso tem um impacto determinante na autonomia (a distância que um ônibus consegue percorrer antes de precisar reabastecer/recarregar) e nos custos dos serviços. A autonomia dos ônibus elétricos pode variar de acordo com o tamanho e a capacidade da bateria, ao passo que a frequência de recargas dependerá da potência da infraestrutura de recarga. Como a bateria é a única fonte de energia instalada a bordo dos ônibus elétricos, ela precisa ser dimensionada adequadamente para garantir que atenda às necessidades desses veículos.

Atualmente, há diversos tipos de baterias disponíveis, e seu uso varia de acordo com a disponibilidade em cada mercado regional. Elas podem ser menores ou maiores, dependendo da frequência e dos métodos pelos quais a energia é fornecida às baterias. Os módulos de baterias menores costumam ter uma autonomia de 50 kWh a 250 kWh<sup>21</sup>, ao passo que um módulo maior pode alcançar de 250 kWh a 500 kWh<sup>22</sup>. Os ônibus atingem a autonomia ideal quando as baterias estão com a carga completa<sup>23</sup>.

O custo das baterias é uma das principais considerações a serem feitas durante a transição para ônibus elétricos, pois representa aproximadamente 40% do custo de aquisição dos veículos<sup>24</sup>. A bateria é um componente que pode reduzir significativamente os custos de capital dos ônibus elétricos, o que resulta em vantagens de escala. Normalmente, quanto maior a bateria, mais caro é o projeto como um todo. Tanto o custo inicial da bateria quanto o custo de substituição são despesas importantes que toda cidade deve considerar.

À medida que crescem a demanda e a produção de ônibus elétricos, o aumento da fabricação de baterias levará à redução de custos. Em 2016, uma bateria de íons de lítio custava cerca de US\$ 150 mil, mas, em 2021, o preço já havia caído para quase a metade disso<sup>25</sup>. Considerando o contexto atual, prevê-se que, entre 2026 e 2030, os custos de capital possam se tornar competitivos com os dos ônibus a diesel. A **Tabela 1** resume as diferentes características dos tipos de baterias com base em pesquisas de artigos acadêmicos, relatórios de organizações semelhantes e outros.

20 Volvo Buses (2023). *How LCA helps to understand the true environmental impact of electric buses*. <https://www.volvobuses.com/en/news-stories/insights/lca-for-electric-buses.html>.

21 Olsson, O. et al. (2016). *Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems*. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1159796&dswid=6239>.

22 Olsson, O. et al. (2016).

23 Huang, D. (2023). *A robust coordinated charging scheduling approach for hybrid electric bus charging systems*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920923003528>.

24 UITP (2019). *The impact of electric buses in urban life*. <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/UITP-policybrief-June2019-V6-WEB-OK.pdf>.

25 Bloomberg New Energy Finance (2021). *Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite*. <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>.

**TABELA 1. TIPOS DE BATERIAS E SUAS CARACTERÍSTICAS**

<b>Característica</b>	<b>Fosfato de ferro-lítio (LFP)</b>	<b>Níquel-cobalto-manganês (NCM)</b>	<b>Hidreto de níquel metálico (NiMH)</b>	<b>Ácido de chumbo</b>
<b>Densidade de energia (Wh/kg)</b>	85-146	150-230	70	30-50
<b>Capacidade (kWh)</b>	50-250 (pequena), 250-500 (grande)	50-250 (pequena), 250-500 (grande)	50-100	50-100
<b>Autonomia máxima informada pelo fabricante (km)</b>	Até 300	Até 400	Até 150	Até 100
<b>Custos (US\$/kWh)</b>	100-300	150-500	200-400	100-200
<b>Ciclo de vida com 100% de profundidade de descarga</b>	3.000	1.000-5.000	500	200-300
<b>Prós</b>	▲ Custo mais baixo, alto nível de segurança, muitos ciclos de recarga, alta estabilidade térmica, química estável, menor toxicidade que as baterias NCM	▲ Maior densidade de energia, maior autonomia, adequadas para situações que demandam alto desempenho, maior valor de reciclagem devido à presença de cobalto	▲ Número adequado de ciclos de recarga, desempenho robusto em temperaturas variadas	▲ Tecnologia de baixo custo, confiável e bem estabelecida
<b>Contras</b>	▼ Menor densidade de energia em comparação com as baterias NCM, ciclo de vida curto, reciclagem menos rentável	▼ Custo mais alto, poucos ciclos de recarga, preços voláteis de matérias-primas, preocupações com a segurança (risco de vazamento tóxico e inflamável em caso de acidente)	▼ Menor densidade de energia, peso maior, custo mais alto que as baterias de ácido de chumbo	▼ Densidade de energia muito baixa, baterias pesadas, vida útil curta, altos custos de manutenção
<b>Países e regiões</b>	China, mercados emergentes na América Latina, região da Ásia-Pacífico e África	América do Norte, Europa	Veículos híbridos	Veículos híbridos
<b>Fabricantes</b>	CATL, BYD, CALB, Nova Bus, Volvo	LG Chem, Samsung SDI, Panasonic, Proterra, New Flyer	Panasonic, Primearth EV Energy	Exide, Trojan, Enersys

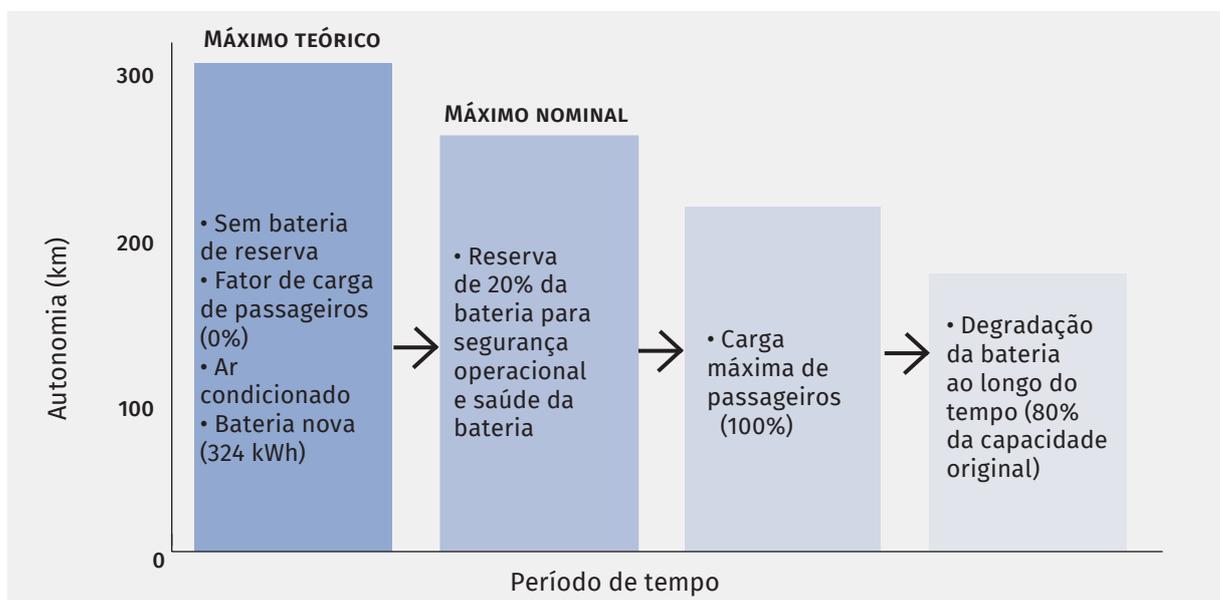
## 2.2. VIDA ÚTIL E AUTONOMIA DAS BATERIAS

A vida útil de uma bateria geralmente é medida pelo número de anos de sua durabilidade, sendo determinada pelas contínuas reações químicas que ocorrem dentro de seus componentes. Essas reações ocorrem independentemente do uso, mas podem se intensificar em situações desfavoráveis, como, por exemplo, quando as baterias são submetidas a altas temperaturas. Normalmente, a vida útil da bateria de um ônibus elétrico varia de 6 a 12 anos, e vários fabricantes oferecem garantias de até 12 anos<sup>26</sup>. O ITDP China observou uma tendência de as baterias durarem aproximadamente quatro a cinco anos, em contraste com a vida útil de oito a dez anos — geralmente aceita e prevista pelos fabricantes de ônibus elétricos e baterias. Isso se deveu principalmente à falta de maturidade e experiência sobre o desempenho real das baterias quando os primeiros ônibus elétricos começaram a circular no país. Portanto, em média, a vida útil das baterias de ônibus elétricos na China demonstrou-se relativamente menor que a previsão. Vale ressaltar que poucos OEBs concluíram seu ciclo de vida até agora, e, à medida que essa tecnologia avança, os ciclos de vida das baterias provavelmente se tornarão mais longos.

Um ônibus a diesel pode alcançar uma autonomia de 600 km a 900 km com o tanque cheio. No caso dos ônibus elétricos, diferentes fatores podem afetar sua autonomia, e o tamanho da bateria tem um papel importante nisso, conforme menciona a seção anterior<sup>27</sup>. O dimensionamento correto da bateria pode ser uma tarefa desafiadora, já que as necessidades de energia dos veículos podem variar: sistemas diferentes apresentam diversas condições climáticas, topografias e necessidades de autonomia. Segundo os fabricantes, os OEBs têm uma autonomia média de 250 km a 300 km com uma carga completa<sup>28</sup>. No entanto, muitas cidades relatam que a autonomia pode ser significativamente menor — de 200 km a 225 km<sup>29</sup>. A disparidade entre as alegações dos fabricantes e o desempenho no mundo real ressalta a importância de se planejar e considerar cada elemento da infraestrutura de recarga, levando em conta as condições locais antes da implantação de ônibus elétricos.

Uma série de fatores e condições locais podem afetar a autonomia e a vida útil das baterias, tais como qualidade das vias de circulação, condições climáticas, sistemas auxiliares (ar condicionado, ventilação e aquecimento), topografia, variações de velocidade e número de passageiros.

**FIGURA 2.** FATORES QUE PODEM AFETAR O DESEMPENHO DOS ÔNIBUS ELÉTRICOS AO LONGO DO TEMPO



FONTE: Adaptada de ZEBRA, 2022a.

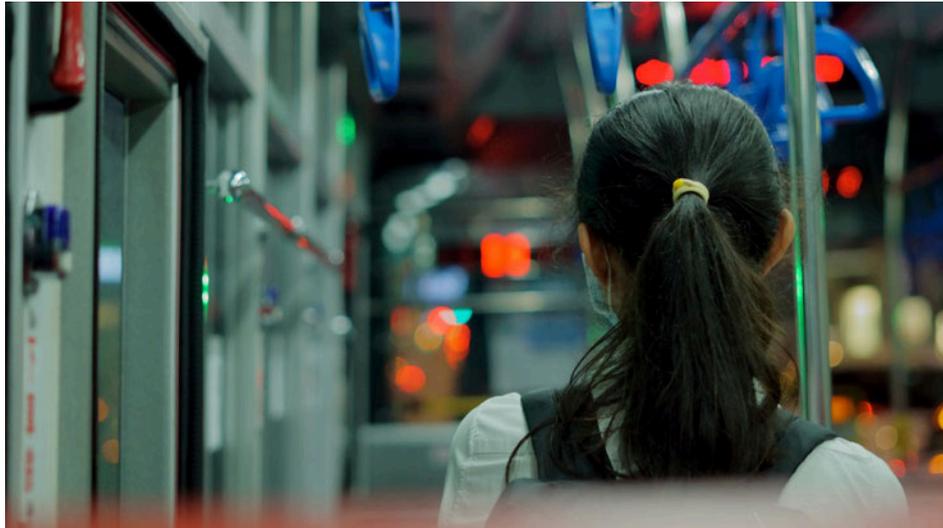
26 Johnson et al. (2019). *Financial Analysis of Battery Electric Transit Buses*. <https://www.worldtransitresearch.info/research/8100/>.

27 Thomas Built Buses (2019). *Determining fuel costs*. <https://thomasbuiltbuses.com/resources/articles/determining-fuel-costs/>.

28 WRI (2023). *Overcoming the operational challenges of electric buses: lessons learnt from China*. [https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2023/06/TUMIVolt\\_Charging-Station\\_Webinar9\\_Monitoring-EBus-Operations.pdf](https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2023/06/TUMIVolt_Charging-Station_Webinar9_Monitoring-EBus-Operations.pdf).

29 ZEBRA (2022a). *Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador da cidade de São Paulo*. <https://theict.org/publication/ze-hvs-sao-paulo-brazil-mar22/>.

O uso de sistemas de ar condicionado, ventilação e aquecimento também influencia a autonomia dos ônibus elétricos. O impacto é mais significativo em regiões com temperaturas extremas, como invernos rigorosos ou verões muito quentes. Para aumentar a autonomia, os operadores podem optar por precondicionar os ônibus (ou seja, aquecê-los ou resfriá-los nos meses de inverno ou de verão, respectivamente) enquanto eles estiverem conectados à infraestrutura de recarga<sup>30</sup>. O uso de sistemas de ar condicionado, aquecimento e ventilação, pode reduzir a autonomia de um veículo elétrico de 40% a 60%. Segundo um estudo baseado em testes operacionais, os sistemas de aquecimento auxiliares consumiam de 20% a 25% da energia total usada pelos ônibus elétricos<sup>31 32 33</sup>.



O ar condicionado oferece mais conforto aos passageiros.  
**FONTE:**  
Erekutoo98 via Shutterstock

As diferentes condições de conforto térmico necessárias para um número maior de passageiros podem aumentar o consumo de energia de um ônibus elétrico, bem como o peso adicional<sup>34</sup>. À medida que aumenta a massa dos veículos, também cresce proporcionalmente o consumo de energia. Isso se aplica tanto aos ônibus convencionais a diesel quanto aos ônibus elétricos<sup>35</sup>.

As condições topográficas são outro fator importante a ser considerado. Em rotas mais íngremes ou com muitas colinas, as baterias se esgotam mais rapidamente. Além disso, segundo muitos fabricantes e com base em testes-piloto realizados em diversas cidades, os ônibus elétricos não conseguem subir colinas com inclinações superiores a 18%<sup>36 37</sup> devido à quantidade de energia necessária para superar a força vertical.

A constância da velocidade de um ônibus elétrico pode ter grandes impactos no consumo energético da bateria, bem como em sua vida útil e autonomia. A demanda de energia aumenta quando há muitas acelerações e desacelerações abruptas. Portanto, velocidades mais uniformes — alcançadas por meio da redução do volume de tráfego e dos congestionamentos, da implantação de faixas exclusivas para ônibus, da redução de incidentes nas vias e de uma condução mais suave dos veículos — resultam num aumento da autonomia e permitem que a bateria ofereça mais eficiência. A transição para ônibus elétricos pode ser usada como uma oportunidade para implementar faixas exclusivas para ônibus. É possível planejar a criação de áreas de recarga ao longo das rotas sem causar congestionamentos e garantir que os serviços de ônibus funcionem de forma rápida e eficaz, aumentando, assim, a eficiência e a confiabilidade das baterias.

30 Wu (APTA) (n.d.). *Lessons Learned From Operating Battery Electric Buses in the Real World* (presentation). [https://www.apta.com/wp-content/uploads/SMW10\\_Lessons-Learned-from-BEB\\_Tina\\_Wu.pdf](https://www.apta.com/wp-content/uploads/SMW10_Lessons-Learned-from-BEB_Tina_Wu.pdf).

31 Suh, I-S. et al. (2015). *Design and experimental analysis of an efficient HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system on an electric bus with dynamic on-road wireless charging*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214014054>.

32 Eudy, Jeffers (2017). *Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results: Second Report*. <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67698.pdf>.

33 Wu (APTA) (n.d.). *Lessons Learned From Operating Battery Electric Buses in the Real World* (presentation). [https://www.apta.com/wp-content/uploads/SMW10\\_Lessons-Learned-from-BEB\\_Tina\\_Wu.pdf](https://www.apta.com/wp-content/uploads/SMW10_Lessons-Learned-from-BEB_Tina_Wu.pdf).

34 Basma, H. et al. (2022). *Energy consumption and battery sizing for different types of electric bus service*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221027031>.

35 Liu, L. et al. (2019). *Impact of Time-Varying Passenger Loading on Conventional and Electrified Transit Bus Energy Consumption*. [https://afdc.energy.gov/files/u/publication/time-varying\\_passenger\\_loading\\_impact.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/time-varying_passenger_loading_impact.pdf).

36 Build Your Dreams (2024). *12m e-bus model*. <https://bydeurope.com/pdp-bus-model-12>.

37 ITDP Brasil; Logit (2022a). *Projeto de Financiamento de Ônibus Elétricos em Belo Horizonte*. <https://projeto-de-financiamento-de-onibus-eletrico-em-belo-horizonte-portugues.pdf>.

O mesmo se aplica à oferta de treinamento adequado aos condutores a fim de melhorar o desempenho dos ônibus elétricos e estender sua autonomia diária. Para que os condutores estejam cientes de como otimizar a longevidade das baterias, eles devem ser instruídos sobre os benefícios de acelerações e frenagens suaves, sobre o funcionamento do sistema de propulsão elétrica e sobre o uso eficiente da energia da bateria<sup>38</sup>.

A vida útil das baterias é prolongada quando elas são recarregadas e mantidas adequadamente. O estado de carga (SoC) é um indicador crucial disso: ele representa a porcentagem de energia armazenada numa bateria em relação a sua capacidade total. Os operadores devem tentar manter o SoC entre 20% e 80% durante a recarga<sup>39 40 41</sup>. Ficar abaixo ou acima desses limiares pode afetar negativamente a vida útil e a saúde da bateria, pois uma maior resistência interna para produzir energia gera calor, o que acelera sua degradação. Vale notar que carregar de 80% a 100% leva o mesmo tempo que carregar de 20% a 80%; em outras palavras, os retornos são decrescentes e constituem um uso ineficiente dos recursos de recarga.

Além disso, também é possível ampliar a autonomia por meio de outras medidas. Técnicas de condução adequadas e sistemas de frenagem regenerativa podem prolongar a vida útil da bateria e levar a ganhos de energia de até 14%<sup>42</sup>. Com uma desaceleração mais suave, a energia usada no processo de frenagem regenerativa tem um potencial maior de ser revertida para carregar a bateria. A frenagem regenerativa captura a energia cinética da frenagem e a converte em eletricidade, que pode ser usada para carregar a bateria<sup>43</sup>.

A coleta de dados e o monitoramento de baterias e veículos serão essenciais para avaliar seu desempenho no contexto local, verificar se atendem às necessidades e expectativas da cidade e embasar o planejamento para a aquisição de novos veículos e infraestruturas de recargas. Essas informações atendem a vários propósitos, inclusive garantir que os condutores estejam cientes da autonomia para garantir que tenham carga suficiente para retornar às garagens. Os dados coletados podem orientar decisões relacionadas ao desempenho de ônibus e baterias, transição de frotas, otimização de rotas e implementação de boas práticas de manutenção e operações, entre outras considerações. Contudo, não é possível prever todas as condições operacionais e locais. Logo, os projetos-piloto oferecem uma boa solução para testar diferentes possibilidades e identificar o que é melhor para cada realidade. É recomendável que todos os dados e informações sejam coletados e monitorados para ambos os tipos de tecnologia: a nova tecnologia elétrica e a tecnologia-padrão (geralmente ônibus movidos a diesel), que continuará a ser usada no restante do sistema de transporte.



Os mecânicos precisam passar por treinamentos regulares sobre manutenção de ônibus e substituição de baterias.  
**FONTE:** Entre Acto

38 Li, J. (2016). *Battery-Electric Bus Developments and Operations: A Review*. <https://doi.org/10.1080/15568318.2013.872737>.

39 Bloomberg New Energy Finance (2018). *Electric buses in cities—driving towards cleaner air and lower CO<sub>2</sub>*. [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Electric-Buses-in-Cities-Driving-Toward-Cleaner-Air-and-Lower-CO2?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Electric-Buses-in-Cities-Driving-Toward-Cleaner-Air-and-Lower-CO2?language=en_US).

40 Kostopoulos, E. et al. (2020). *Real-world study for the optimal charging of electric vehicles*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719310911>.

41 Charge Sim (2024). *What does the State of Charge really mean?* <https://www.chargesim.com/blog/what-does-the-state-of-charge-really-mean>.

42 Mueller, S. et al. (2017). *Analysing the influence of driver behaviour and tuning measures on battery aging and residual value of electric vehicles*. <https://pdfs.semanticscholar.org/>.

43 Istameka, M. et al., 2019. *Modelling of regenerative braking system for electric bus*. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/14/02/4/044054>.

As incertezas sobre o ciclo de vida e o desempenho das baterias fazem com que as garantias se tornem um aspecto crucial a ser considerado. No entanto, as garantias dependem do fabricante e dos termos contratuais, sendo baseadas em sua durabilidade<sup>44</sup>. Para compensar esse risco, é essencial garantir uma cobertura de garantia abrangente que atenda tanto às demandas operacionais exclusivas dos ônibus elétricos quanto às incertezas associadas à longevidade das baterias. As garantias devem cobrir a vida útil prevista para os ônibus, que é normalmente de 8 a 12 anos. Com os constantes avanços tecnológicos e a coleta contínua de informações sobre as operações de ônibus elétricos, a expectativa é que a vigência e a estrutura das garantias se tornem mais padronizadas, uma vez que as baterias continuarão a se tornar cada vez mais acessíveis, e seu desempenho, mais assertivo.

Além disso, as garantias devem incluir disposições relativas à degradação de capacidade, garantindo que a bateria mantenha um nível mínimo de desempenho. Também é recomendado que as garantias incorporem cláusulas que determinem verificações regulares de desempenho e manutenção, bem como procedimentos claros para a substituição ou o reparo das baterias. Ao adotar essas recomendações abrangentes sobre garantias, os órgãos responsáveis pelo transporte público podem mitigar os riscos associados ao desempenho das baterias e garantir a viabilidade e a relação custo-benefício de suas frotas de ônibus elétricos no longo prazo.

### 2.3. FIM DA VIDA DAS BATERIAS

Após o fim da vida útil da bateria de um ônibus elétrico, é importante considerar o que acontecerá em seguida. Atualmente, não há uma política padronizada para o descarte de baterias: a política em vigor foi estabelecida antes do surgimento do mercado de veículos elétricos e não aborda adequadamente as baterias de ônibus elétricos. O descarte inadequado aumenta as emissões totais ao longo do ciclo de vida e pode impactar negativamente o meio ambiente local devido a uma maior necessidade de processos de mineração e refino, além de aumentar as emissões de GEEs<sup>45</sup>.

O setor precisa aprender a lidar com isso, e os governos podem desempenhar um papel importante nesse processo definindo os requisitos para o descarte seguro de baterias. A regulamentação pode minimizar as incertezas dos projetos e promover uma adoção mais ampla das novas tecnologias, especialmente no setor privado. Quando uma bateria atinge o fim de sua vida útil na operação de ônibus elétricos, são três as opções: reciclagem, reutilização ou descarte.



Unidade de reciclagem de baterias.  
FONTE: Saubermacher

<sup>44</sup> Bloomberg New Energy Finance (2018).

<sup>45</sup> Geuss (2019). *Electric Car Batteries Might Be Worth Recycling, but Bus Batteries Aren't Yet*. <https://arstechnica.com/science/2019/02/electric-car-batteries-might-be-worth-recycling-but-bus-batteries-arent-yet/>.

### 2.3.1. RECICLAGEM

Quando as baterias de ônibus elétricos são recicladas, os materiais recuperados das baterias antigas podem ser usados para fabricar novas peças. Alguns processos de reciclagem de baterias alegam que conseguem recuperar até 95% dos minerais essenciais usados nessas baterias<sup>46</sup>. Mesmo assim, os processos precisam ser formalizados e padronizados para garantir que sejam adotados os métodos mais ambientalmente sustentáveis. Fabricantes de várias partes do mundo se oferecem para reciclar ou descartar as baterias ao final de sua vida útil. Portanto, é importante que as aquisições e/ou contratos definam qual parte será responsável, tanto financeira quanto logisticamente, pela reciclagem ou descarte ao final da vida útil das baterias.

### 2.3.2. REUTILIZAÇÃO

À medida que o setor de reciclagem de baterias e os marcos regulatórios evoluírem para acompanhar o progresso do mercado, a reutilização de baterias para aplicações de segunda ou terceira vida se tornará cada vez mais importante, sendo vista como uma opção viável em muitos países. Ao final da vida útil inicial de uma bateria e antes de sua reciclagem, é possível reaproveitar as baterias para o armazenamento estacionário de energia. Considerando que as baterias retêm aproximadamente 80% de sua capacidade de armazenamento após sua vida útil inicial, elas podem ser reaproveitadas para gerenciar picos elétricos e para armazenar energia.

As baterias podem ser usadas num segundo ciclo de vida, como, por exemplo, para o armazenamento de energia solar ou eólica. No Brasil, um fabricante já está comercializando painéis solares que incluem pacotes para essa finalidade<sup>47</sup>. O uso de baterias para armazenamento de energia pode dar suporte à implementação de conceitos de rede inteligente.

Muitos países ao redor do mundo, como a China e algumas nações da União Europeia, têm considerado a reutilização como uma solução viável para reaproveitar baterias de ônibus elétricos<sup>48</sup>. Na verdade, a China costumava impedir a exportação de veículos elétricos usados para reter materiais para reciclagem e recuperação internamente. No entanto, isso já mudou, e países do mundo todo continuam explorando maneiras de desenvolver usos primários e secundários para as baterias. A Europa e a América do Norte estão trabalhando para criar sua própria forma de reciclagem e reutilização de baterias e veículos.

As baterias de segunda vida oferecem vários benefícios. À medida que a transição energética avança no mundo todo, a demanda por soluções de armazenamento aumenta constantemente. Como a eletricidade gerada por fontes renováveis (por exemplo, solar e eólica) está sujeita a flutuações resultantes de condições naturais, é essencial pensar numa solução de armazenamento de energia capaz de equilibrar essa flutuação. Prolongar o uso da bateria também ajuda a reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>.

Após o segundo ciclo de vida, estimado em 30 anos, as baterias devem ser submetidas à reciclagem, e os íons de lítio e outros componentes químicos podem ser usados para produzir novas unidades. Adiar o processo de reciclagem das baterias por meio da reutilização pode ser muito útil, especialmente enquanto ainda não houver um padrão definido. Utilizar as baterias como armazenamento nesse meio tempo pode garantir que, quando elas chegarem ao final de sua segunda vida útil, já tenham sido adotados padrões de reciclagem mais conscientes em termos ambientais e sociais.

<sup>46</sup> Argonne National Laboratory (2021). *Breakthrough research makes battery recycling more economical*. <https://www.anl.gov/article/breakthrough-research-makes-battery-recycling-more-economical>.

<sup>47</sup> World Bank (2019). *Green Your Bus Ride: Clean Buses in Latin America*. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/410331548180859451/pdf/133929-WP-PUBLIC-P-164403-Summary-Report-Green-Your-Bus-Ride.pdf>.

<sup>48</sup> ICCT (2023). *Scaling up reuse and recycling of electric vehicle batteries: assessing challenges and policy approaches*. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/recycling-electric-vehicle-batteries-feb-23.pdf>.

Para monitorar a saúde e a vida útil de uma bateria, uma boa solução consiste na padronização e compartilhamento de dados sobre seu funcionamento. Essas informações podem ser coletados enquanto a bateria estiver a bordo dos veículos, e os condutores podem ser instruídos sobre formas de garantir que os dados sejam coletados e salvos (embora esse processo normalmente seja automatizado).

Os dados desempenham um papel importante no monitoramento de baterias, e a previsão é que isso continuará a acontecer. A União Europeia está desenvolvendo um passaporte digital para baterias, que fornecerá informações avançadas sobre a cadeia de valor das baterias e acesso a informações sobre sua saúde em tempo real. O incentivo é grande: produzir baterias para ônibus elétricos é extremamente custoso; logo, fabricantes, governos e outras partes interessadas são motivados a buscar e financiar soluções de reciclagem<sup>49</sup>.

<sup>49</sup> The Verge (2022). Toyota will recycle electric vehicle batteries with Tesla co-founder's project. <https://www.theverge.com/2022/6/21/23177039/toyota-redwood-materials-ev-battery-recycling-partnership-prius>.

# 3

## OPÇÕES DE INFRAESTRUTURAS DE RECARGA

No processo de eletrificação de suas frotas, as cidades estão substituindo sistemas de ônibus que sempre usaram postos de combustível e passando a instalar novas infraestruturas elétricas. Essa diferença fundamental tem muitas ramificações. O planejamento de operações e manutenção precisará se adaptar à transição. Haverá mudanças no planejamento das rotas, na infraestrutura, nas estratégias e cronogramas de reabastecimento/recarga e nas práticas de manutenção. Como a autonomia das baterias é inferior à dos motores a diesel, o modelo tradicional, que previa a circulação dos ônibus o dia todo antes do reabastecimento, pode não funcionar para os veículos elétricos. Essa é a principal razão para essas mudanças, mas também há oportunidades que surgem disso e que serão descritas nesta seção.

O projeto da infraestrutura e a elaboração de um plano operacional de recarga para a operação de ônibus elétricos constituem a chave para melhorar a eficiência, dar suporte à saúde da bateria e gerar mais impactos positivos na vida das pessoas e na eficiência dos corredores. Os planejadores precisam avaliar os tipos de infraestrutura de recarga, a quantidade de carregadores e estações para cada tipo, o espaço disponível para as estações de recarga e a capacidade da rede para que os projetos-piloto e os planos de expansão sejam bem-sucedidos. Em termos de espaço para a infraestrutura, o local designado para a recarga deve incluir instalações de manutenção e sistemas elétricos, com transformadores para equiparar os níveis de tensão da rede elétrica e das estações de recarga. É possível que a infraestrutura de recarga ocupe mais espaço nas garagens que os postos de reabastecimento de diesel, o que pode exigir uma revisão de como é usado o local.

Esta seção examina as principais estratégias de recarga e seus componentes, bem como seus pontos fortes e desafios em potencial. Além disso, para cada estratégia de recarga, é apresentada uma visão geral das considerações fundamentais necessárias para definir a estratégia e os cenários mais apropriados, considerando o ambiente local e as necessidades de cada projeto. Por fim, são examinadas a capacidade da rede elétrica e as principais considerações que podem influenciar a decisão.

### 3.1. LOCAIS E TIPOS DE INFRAESTRUTURAS DE RECARGA

O primeiro passo para a elaboração de um plano de recarga é compreender dois importantes aspectos desse plano: os tipos de infraestrutura de recarga e o local de sua instalação. Os locais e tipos de recarga, incluindo a velocidade de cada tipo, terão ramificações importantes na operação de determinados sistemas de ônibus. A definição de uma estratégia de recarga adequada ao contexto local é crucial para o sucesso do projeto.

**PÁGINA AO LADO:**

Passageiros entrando num ônibus da Rede Metropolitana de Mobilidade de Santiago, Chile.

**FONTE:** Claudio Olivares



Red Metropolitana de Movilidad

1391

Red



Chile

GC-BD-46  
TRANSANTIAGO

As operações de recarga podem demandar muito espaço, dependendo do número de ônibus elétricos; logo, a localização da infraestrutura de recarga pode gerar impactos para a comunidade ao redor. Se a decisão for reformar as garagens atuais de veículos MCI, os planejadores devem considerar a distância entre elas e o início das rotas, levando em conta a autonomia dos ônibus elétricos e as necessidades de energia armazenada em baterias para cumprir a distância percorrida. É importante pensar sobre a localização das garagens atuais e futuras, buscando maneiras de maximizar o acesso em toda a cidade. As cidades devem ter cuidado ao avaliar os impactos sociais de um projeto como esse, explorando como a transição pode ser aproveitada como uma ferramenta de mudança social<sup>50</sup>.

As infraestruturas de recarga costumam ser instaladas nas garagens, onde os ônibus podem recarregar as baterias durante a noite; ou ao longo das rotas, onde a recarga pode ser feita durante as operações. Cada opção oferece benefícios e apresenta desafios específicos no que diz respeito ao plano de recarga e como ele interage com o plano operacional. A instalação de infraestruturas de recarga em bairros de renda baixa pode gerar benefícios significativos para a população, como, por exemplo, a melhoria da qualidade do ar e a redução da poluição sonora, contribuindo, assim, para melhorar a saúde pública e a qualidade de vida em geral. No entanto, é essencial considerar o potencial de injustiça ambiental. A instalação de estruturas de recarga não deve gerar desconfortos adicionais para essas comunidades, como o aumento do tráfego ou ruídos durante a instalação e a manutenção. Para garantir resultados equitativos, as cidades devem interagir com os moradores, avaliar os impactos sociais de forma abrangente e explorar como essa transição para ônibus elétricos pode ser aproveitada como uma ferramenta de mudança social, melhorando o bem-estar e a resiliência de todas as comunidades urbanas. Abaixo, são apresentadas visões gerais dos possíveis locais para a instalação de infraestruturas de recarga.

**AO LONGO DAS ROTAS.** Algumas estruturas de recarga — como pantógrafos, recarga em movimento e recarga sem fio — podem ser localizadas ao longo das rotas e dependerão da infraestrutura da rede elétrica. Geralmente, são instaladas em terminais rodoviários, pontos finais das rotas de ônibus ou estações ou paradas com interseção de várias linhas. Um fator-chave para a decisão é a disponibilidade (ou não) de espaços adequados para a infraestrutura de recarga. Dependendo do plano estratégico de recarga, os passageiros podem inclusive permanecer a bordo durante a recarga.

**GARAGENS.** Independentemente do tipo de recarga, será necessário construir ou adaptar garagens de ônibus para a infraestrutura de OEBs. As garagens devem acomodar e fornecer acesso conveniente à infraestrutura de recarga, o que provavelmente exigirá de 15% a 30% mais espaço que numa garagem comum<sup>51</sup> (o espaço necessário dependerá da estratégia de recarga, que será examinada na próxima seção). Como as baterias podem se degradar mais rapidamente em altas temperaturas ou apresentar um desempenho pior em climas mais frios (e os ônibus precisam de mais energia para seu aquecimento ou resfriamento), os planejadores devem garantir que a recarga das baterias ocorra num local adequadamente coberto e ventilado e que haja instalações suficientes para aquecimento ou resfriamento de equipamentos elétricos, levando em consideração a sensibilidade ao clima local e às flutuações sazonais.

<sup>50</sup> López, C. et al. (2019). *On the Environmental and Social Sustainability of Technological Innovations in Urban Bus Transport: The EU Case*. <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/5/1413>.

<sup>51</sup> UITP (2019a). *The impact of electric buses in urban life*. <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/UITP-policybrief-June2019-V6-WEB-OK.pdf>



**IMAGEM À ESQUERDA:** Ônibus elétricos sendo recarregados numa garagem em Wola Duchacka, em Cracóvia, Polônia.  
**FONTE:** Longfin Media via Shutterstock

**IMAGEM À DIREITA:** Garagem de ônibus elétricos em Glasgow, Escócia.  
**FONTE:** richardjohnson via Shutterstock

O planejamento e a modelagem dos serviços dependerão do tipo de carregador que o órgão de transporte público decidir utilizar e do que for mais viável, dadas as restrições geográficas e a disponibilidade no mercado local. Os carregadores podem exigir diferentes tipos de infraestrutura e áreas diversas.

Há cinco modelos principais de recarga de OEBs: recarga tradicional *plug-in*, recarga pantográfica, recarga instantânea (*flash*), recarga em movimento e recarga sem fio. Alguns tipos podem ser combinados dependendo do plano estratégico de recarga em vigor.

## REVITALIZAÇÃO DOS TRÔLEBUS COM RECARGA EM MOVIMENTO: A REPAGINAÇÃO DE UMA SOLUÇÃO CLÁSSICA

A reintrodução de trólebus usando baterias (além das tradicionais linhas aéreas) oferece uma vantagem estratégica ao aliar a infraestrutura existente (instalada por muitas cidades durante as crises energéticas da década de 1970) à flexibilidade que as baterias oferecem. A recarga em movimento (IMC) é um método que combina OEBs comuns com as linhas aéreas tradicionais de um sistema-padrão de trólebus. Nos sistemas tradicionais de trólebus, os ônibus não tinham baterias e eram alimentados por linhas aéreas — logo, não podiam sair dos corredores predefinidos, onde as linhas estavam localizadas. Com a recarga em movimento, o ônibus pode circular livremente usando sua bateria de bordo e, quando necessário, usar as linhas aéreas para recarregar as baterias durante as operações. Essa solução reduz a necessidade de instalar linhas aéreas ao longo de todo o trajeto<sup>52</sup>.

A recarga em movimento alia a flexibilidade dos ônibus elétricos ao fornecimento de energia por meio de linhas aéreas. As pesquisas mais recentes indicam que, dependendo do tipo de bateria, apenas uma pequena parte de cada rota precisaria ser cabeada (de 20% a 30%)<sup>53</sup>. Com um sistema que use IMC, as linhas aéreas podem ser colocadas estrategicamente nos trechos mais longos e retos das rotas. Historicamente, as áreas onde a manutenção das linhas aéreas é mais cara são aquelas que incluem curvas ou cruzamentos complexos. Evitar esses locais pode ajudar a aumentar a eficiência e reduzir os custos de operação dos ônibus elétricos com recarga IMC. Os ônibus elétricos que se alimentam de linhas aéreas também são ideais para regiões com ladeiras, pois têm acesso a um fluxo constante de energia. Muitas cidades que usavam trólebus no passado reintroduziram sistemas IMC nos últimos anos:

- Talin, na Estônia, está investindo em 40 trólebus movidos a bateria e na modernização da rede de pontos de contato<sup>54</sup>;
- Em San Francisco, nos Estados Unidos, há um processo em desenvolvimento para uma grande modernização com baterias de forma a melhorar a capacidade de recarga IMC em trólebus elétricos<sup>55</sup>;
- Em Jinan, na China, os trólebus elétricos de fonte dupla estão contribuindo para aumentar a flexibilidade das operações. Aproveitando a recarga em tempo real, esses ônibus podem operar *offline* por mais de 20 km com o ar condicionado ligado<sup>56</sup>;
- Até 2019, a Cidade do México, no México, operava uma rede de trólebus de nove linhas com baixa frequência, usando unidades antigas que datavam de 1975. A partir de setembro de 2019, começou a renovar toda a frota de trólebus com novos OEBs, o que permitiu a extensão das rotas para áreas sem linhas aéreas. Em maio de 2023, a frota total já era de 310 novos trólebus, incluindo veículos articulados<sup>57 58 59</sup>;

52 Bartłomiejczyk, M.; Potom, M. (2021). Sustainable Use of the Catenary by Trolleybuses with Auxiliary Power Sources on the Example of Gdynia. <https://www.mdpi.com/2412-3811/6/4/61>.

53 UITP (2019b). In motion charging. Innovative Trolleybus. <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2021/01/Knowledge-Brief-Infrastructure-May-2019-FINAL.pdf>.

54 EU Urban Mobility Observatory (2024). Tallinn investing in electrifying its trolleybus network as part of its SUMP. [https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/news-events/news/tallinn-investing-electrifying-its-trolleybus-network-part-its-sump-2024-03-01\\_en](https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/news-events/news/tallinn-investing-electrifying-its-trolleybus-network-part-its-sump-2024-03-01_en).

55 Kiepe Electric (2023). San Francisco to prototype a major battery upgrade for enhanced in motion charging capability on electric trolley buses. <https://kiepe.knorr-bremse.com/en/us/company/media/press-releases/san-francisco-to-prototype-a-major-battery-upgrade-for-enhanced-in-motion-charging-capability-on-electric-trolley-buses.json>.

56 China Buses (2015). Zhongtong double-source electric trolley bus highly welcomed in Jinan. <https://m.chinabuses.org/news/7841.html>.

57 Voragine (2019). Gobierno capitalino anuncia compra de 63 trolebuses eficientes de energía con inversión de 453 mdp. <https://voragine.com.mx/2019/09/13/gobierno-capitalino-anuncia-compra-de-63-trolebuses-eficientes-de-energia-con-inversion-de-453-mdp/>.

58 Jefatura de Gobierno de la Ciudad de México (2020). Encabeza Jefa de Gobierno salida de pruebas preoperativas de 80 nuevos trolebuses. <https://jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/encabeza-jefa-de-gobierno-salida-de-pruebas-preoperativas-de-80-nuevos-trolebuses>.

59 Gobierno de la Ciudad de México. (2022). Nuevas unidades de Trolébus y RTP. <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/nuevos-trolebuses-y-rtp/>.

- Praga, na República Tcheca, encerrou as operações de sua última linha de trólebus em 1972, mas desde então incorporou um sistema que combina IMC e recarga de oportunidade. Em 2017, a cidade lançou um projeto-piloto com dois trechos de linhas aéreas que cobrem 15% de um percurso de 5 km. Essas rotas foram escolhidas devido a uma série de fatores, tais como terreno com inclinações, proximidade de uma garagem e possibilidade de usar a rede elétrica da linha de bondes. Isso permitiu que o projeto pudesse ser ampliado e aproveitasse as subestações que já eram usadas para as linhas de bondes<sup>61</sup>.

Ao revitalizar essas redes inativas, as cidades podem reduzir significativamente os custos associados à transição para o transporte público eletrificado. Embora essa abordagem exija acesso a um fornecimento de energia adequado, o que representa um desafio, o uso de trólebus não apenas capitaliza recursos investidos no passado, mas também se alinha a metas modernas de sustentabilidade. Os trólebus, com sua conexão contínua às linhas de energia aéreas, fornecem um modo de transporte confiável e eficiente que pode se integrar perfeitamente aos atuais planos de mobilidade urbana. O uso dessa infraestrutura pode acelerar a transição para um transporte público mais ecologicamente correto, minimizando os desafios financeiros e logísticos.



**IMAGEM ACIMA:**  
O sistema de trólebus da Cidade do México, México, foi expandido para 12 linhas em 2024.  
**FONTE:** Bruno\_Doinel via Shutterstock

**IMAGEM ABAIXO:**  
Trólebus da linha 58 de Praga, República Tcheca.  
**FONTE:** Martyn Jandula via Shutterstock

60 UITP (2019b). In motion charging. *Innovative Trolleybus*. <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2021/01/Knowledge-Brief-Infrastructure-May-2019-FINAL.pdf>.

61 Sustainable Bus (2019). *Trolleybuses return to Prague 47 years later*. <https://www.sustainable-bus.com/trolleybus-tramway/trolleybuses-return-to-prague-47-years-later/>.

Cada tipo de recarga requer uma infraestrutura específica e tem diferentes requisitos de: espaço; tempo para atingir a carga completa (também conhecido como carga rápida *versus* lenta); energia para o carregador; e custos. A **Tabela 2** resume vários aspectos desses tipos de infraestrutura de recarga, com base em pesquisas de artigos acadêmicos, relatórios de organizações semelhantes e outros.

**TABELA 2. TIPOS E CARACTERÍSTICAS DE INFRAESTRUTURAS DE RECARGA**

	<b>Plug-In</b>	<b>Pantógrafo</b>	<b>Flash</b>	<b>Em movimento</b>	<b>Sem fio</b>
<b>Descrição</b>	 Também conhecida como estrutura de recarga noturna, exige que alguém conecte o veículo a uma estação de recarga, geralmente por meio de uma longa bobina ou cabo. É o método mais comum e acessível.	 Requer contato entre um carregador pantográfico e hastes instaladas no teto dos veículos, geralmente por meio de manobras do veículo.	 Requer contato entre um carregador pantográfico suspenso e um pequeno mecanismo de transmissão montado num braço móvel.	 Hastes instaladas no teto dos ônibus elétricos conectam-se às linhas aéreas.	 A recarga por indução cria um campo eletromagnético para transferir eletricidade.
<b>Velocidade de recarga</b>	Lenta: de 5 a 8 horas.	Rápida: de 5 a 20 minutos para atingir a carga completa	Rápida: de 15 a 20 segundos.	Aproximadamente 9 minutos.	Rápida e dinâmica: de 20 minutos a 1 hora para atingir a carga completa.
<b>Local de recarga</b>	Final/início das rotas, áreas públicas fechadas, ou garagens.	Final/início das rotas, garagens ou estações; possibilidade de recarga ao longo do percurso (no caso de trólebus).	Qualquer lugar, normalmente ao longo de uma rota.	Ao longo da rota, enquanto o ônibus elétrico estiver circulando, em trechos longos e retos.	Final/início das rotas, ao longo das rotas, ou em garagens.
<b>Requisitos de espaço</b>	Espaço suficiente na garagem para os ônibus estacionarem, bem como espaço para o carregador.	Espaço na garagem e potencialmente ao longo da rota.	Espaço necessário para instalação da infraestrutura perto da via para fazer a recarga ao longo da rota.	Espaço aéreo, bem como infraestrutura em certos pontos ao longo da via.	Espaço necessário sob a pista e transformador ao lado da plataforma de recarga.
<b>Custo (por carregador)<sup>62</sup></b>	Aproximadamente US\$ 230.000	Aproximadamente US\$ 1.120.000	Aproximadamente US\$ 1.230.000	Aproximadamente US\$ 750.000 por km	Aproximadamente US\$ 570.000
<b>Requisitos de energia dos carregadores (kW)</b>	40–125	125–500 (na rota)	Até 600	Até 500	200–300
<b>Tamanho sugerido de bateria (kWh)</b>	300–450+ (alguns modelos até 660)	60–250+ (possivelmente maior, se desejado)	50–250+	100–200+	60–125
<b>Países e regiões</b>	China, América Latina, Europa, EUA, Nova Zelândia	China (embora menos comum), Coreia do Sul, Europa, EUA, Canadá	Europa, China, Índia	Estados Unidos, Brasil, México, China, Europa	Europa, Coreia do Sul, EUA
<b>Fabricantes</b>	ABB, BYD, ChargePoint, Proterra, Siemens	ABB, Alstom, Heliiox, Schunk Carbon Technology, Siemens	ABB, ElectReon, Heliiox, Siemens	Alstom, Kiepe Electric, Schunk Carbon Technology, Siemens	Bombardier Primove, ElectReon, Proterra, Momentum Dynamics, WiTricity

FONTE: Elaboração própria.

62 Com base em informações do Canadá, da Suíça e dos Estados Unidos.

A avaliação dos modelos de recarga também deve ser feita no contexto do plano de serviços, que determina quantos ônibus são necessários em quais rotas e com quais serviços para atender à demanda dos passageiros. Essa avaliação também deve considerar as projeções de crescimento da demanda e extensão de rotas, já que a maioria das infraestruturas costuma ter um horizonte de planejamento de 10 a 20 anos, no mínimo. Os planejadores precisam entender qual será a demanda futura de passageiros para planejar adequadamente a instalação de um sistema elétrico no longo prazo.



**IMAGEM ACIMA À ESQUERDA:**  
Carregador pantográfico no Centro de Transporte Público de Sunset em Portland, Estados Unidos.  
**FONTE:** Steve Morgan via Wikimedia Commons

**IMAGEM ACIMA:**  
Carregador móvel de ônibus elétricos exposto na Cúpula da IAA de 2023 em Munique, Alemanha.  
**FONTE:** Matti Blume via Wikimedia Commons

**IMAGEM À ESQUERDA:**  
Carregador *plug-in*.  
**FONTE:** Ruslan Sitarchuk via Shutterstock

Ao planejar os custos de capital da infraestrutura de recarga, os operadores e outras partes interessadas no planejamento devem considerar: *hardware* das estações de recarga; construção e implementação das estações de recarga; espaço disponível e conexões de rede, inclusive custos de aquisição de terrenos; custos de mão de obra para a construção e implementação (inclusive os custos de pré-construção e contratação de pessoal para consultas no local); e custos de licenciamento municipal.

### 3.2. ESTRATÉGIAS PARA O PLANEJAMENTO DA RECARGA

A implementação inteligente da infraestrutura de recarga é fundamental para o sucesso do sistema. Isso afetará o planejamento dos serviços, pois terá impactos diretos no tempo que os ônibus ficarão parados para a recarga e no tempo que eles poderão circular antes de precisarem ser recarregados. Consequentemente, também afetará o número de ônibus necessários. Esse é um ponto essencial para cidades que desejem chegar o mais próximo possível de uma razão de 1:1 na substituição de ônibus a diesel por equivalentes elétricos.

Esta seção analisará as três principais opções de estratégias de recarga para ônibus elétricos: recarga em garagem; recarga de oportunidade; e recarga combinada/mista. Para cada plano estratégico de recarga, são apresentadas uma visão geral e uma análise de pontos fortes, potenciais desafios, cenários e considerações.

### 3.2.1. RECARGA EM GARAGEM

A recarga em garagem é o método mais comumente usado para a recarga de ônibus elétricos. Geralmente, a operação ocorre durante a noite e, por isso, o método também é conhecido como recarga noturna ou recarga lenta. A recarga em garagem também pode ser feita durante turnos prolongados ao longo do dia, quando os veículos não estiverem em serviço. O nome “recarga lenta” pode ser enganoso, já que é possível usar diferentes tipos de carregadores nas garagens, inclusive os mais rápidos. O nome veio do sistema *plug-in*, o mais comumente usado para esse método de recarga<sup>63</sup>. Os tempos de recarga dependerão do carregador usado e continuarão diminuindo à medida que a tecnologia melhorar — o que é a expectativa de todos<sup>64</sup>.



Ônibus elétricos do sistema Transantiago.  
**FONTE:** Cristian Silva Villalobos via Shutterstock

Em termos de planejamento dos serviços, com o sistema de recarga em garagem, é necessário estabelecer um cronograma mais consistente (com base na autonomia das baterias) para garantir que os ônibus possam retornar à garagem antes de ficarem sem energia. Para garantir que as rotas sejam cumpridas, os ônibus podem precisar retornar à garagem para recargas intermitentes durante o horário de serviço. Para tal, muitas vezes é necessário ter mais ônibus elétricos que ônibus MCI para manter a confiabilidade e garantir que haja disponibilidade de veículos com carga suficiente para manter os serviços<sup>65</sup>. Os ônibus podem ser recarregados estrategicamente e usados para acomodar o aumento da demanda durante os horários de pico. Quando se compara a recarga em garagem à recarga ao longo da rota, o tempo total de viagem pode diminuir, porque os ônibus não precisam parar para recarregar as baterias.

#### Locais mais apropriados para instalar os carregadores

Normalmente, os carregadores são posicionados no final das rotas e/ou nas garagens de ônibus, o que se deve, em parte, à exigência de espaço para esse tipo de infraestrutura de recarga. Dependendo da escala, dos recursos disponíveis e do orçamento do projeto, é possível construir novas instalações ou adaptar locais preexistentes. Este método é mais apropriado para sistemas de ônibus elétricos de longo alcance.

63 ITDP (2021b). *De Santiago a Shenzhen: Como os ônibus elétricos estão movendo as cidades*. [https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2022/05/De-Santiago-a-Shenzhen-como-os-ônibus-elétricos-estao-movendo-as-cidades\\_Completo.pdf](https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2022/05/De-Santiago-a-Shenzhen-como-os-ônibus-elétricos-estao-movendo-as-cidades_Completo.pdf).

64 ZeEUS (2017). *ZeEUS eBus Report #2: An Updated Overview of Electric Buses in Europe*. <https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-report2017-2018-final.pdf>.

65 Urban Transport Magazine (2021). *Bus Electrification: A comparison of capital costs*. <https://www.urban-transport-magazine.com/en/bus-electrification-a-comparison-of-capital-costs/>.

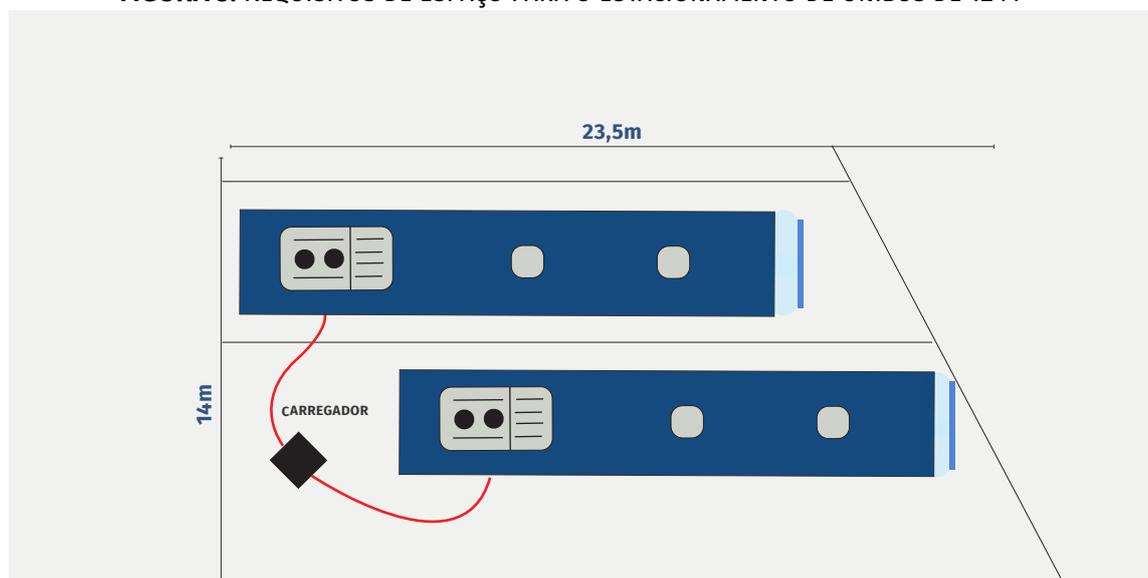
A localização também é um fator fundamental, principalmente considerando a escassez de espaço na maioria das cidades. Os aspectos mais importantes a serem avaliados são a proximidade das rotas selecionadas para garantir um uso mais eficiente do serviço; a proximidade da infraestrutura elétrica existente para mitigar potenciais desafios e custos; o espaço disponível; e os potenciais impactos à vizinhança.

### Necessidades e custos de infraestrutura

Em geral, a infraestrutura de recarga em garagem requer a instalação de estações de recarga e carregadores *plug-in* dentro das garagens, terminais ou outras áreas de recarga designadas. A infraestrutura adicional pode exigir áreas maiores que aquelas usadas para ônibus MCI (que, em geral, consistem num único posto de abastecimento para todos os ônibus; o restante do espaço é usado para estacionamento e manutenção veículos). Os requisitos adicionais de infraestrutura necessários para uma garagem eletrificada — incluindo carregadores, cabos e transformadores — podem reduzir a quantidade de espaço disponível para as operações. Isso pode ser mitigado por meio do planejamento e da seleção de um modelo de infraestrutura que ocupe o mínimo de espaço possível. Nas garagens que já enfrentam limitações de espaço, pode ser necessário reduzir o tamanho da frota. Vários outros fatores relacionados à configuração das garagens devem ser considerados na equação, tais como áreas para os funcionários, áreas de inspeção e áreas de manutenção e limpeza.

O tamanho mais apropriado para a garagem ou instalação das estruturas de recarga dependerá principalmente do número de ônibus de cada frota, do número de carregadores e do leiaute escolhido. O ideal é que os veículos estacionados possam se deslocar sem impactar os outros. Uma vaga de estacionamento com um ângulo de 45° e um espaço de conversão de 10 m mais 2 m para a infraestrutura de recarga permitiria estacionar e manobrar ônibus de médio porte (12 m) com facilidade, como pode ser visto na **Figura 3**<sup>66</sup>. Como a configuração mais comum prevê que dois ônibus usem a mesma unidade de recarga, a largura das vagas deve levar isso em consideração. Normalmente, cada ônibus elétrico requer cerca de 90 m<sup>2</sup> de espaço quando estacionado em uma vaga individual sem bloqueio (completamente acessível). No entanto, se os ônibus forem estacionados em configurações agrupadas ou em fila, bloqueando a saída de outros, apenas 64 m<sup>2</sup> por ônibus podem ser suficientes<sup>67</sup>. Vale ressaltar que, considerando que os veículos elétricos constituem uma tecnologia emergente, diversos leiautes de garagens foram avaliados por especialistas para o projeto das instalações necessárias.

**FIGURA 3. REQUISITOS DE ESPAÇO PARA O ESTACIONAMENTO DE ÔNIBUS DE 12 M**



FONTE: Adaptada de CFF (2022).

66 CFF (2022). *Depot electrification for zero-emission bus systems*. <https://cff-prod.s3.amazonaws.com/storage/files/ntxVux2cwtL1ktfVHHhAa3fR4GMmg627CjWJtM2O.pdf>.

67 ITDP India (2023). *E-Bus Basics. A Guide for Cities to Transition to Electric Buses*. <https://www.itdp.in/wp-content/uploads/2023/07/E-Bus-Basics.pdf>.

A seguir, são apresentados alguns exemplos de custos: em Jinan, na China, os custos de eletrificação, infraestrutura de recarga e outros itens (como, por exemplo, construção e aquisição de terras para a construção de uma garagem para 100 ônibus elétricos) atingiram cerca de US\$ 58,9 milhões. Em San Francisco, o custo desses componentes para acomodar uma frota de 38 ônibus elétricos e expandir o pátio da garagem totalizaram aproximadamente US\$ 54,3 milhões.

### Consumo e custos de energia

O número de ônibus em recarga simultânea, a tecnologia de recarga e a capacidade da rede elétrica têm impacto no consumo e no fornecimento de energia local<sup>68</sup>. Um plano estratégico de recarga em garagem requer capacidades de recarga que variam de cerca de 25 kW a 150 kW por carregador — mas, na maioria dos casos, essas capacidades variam entre 50 kW e 100 kW. Geralmente, isso exige tempos de recarga de três a seis horas, dependendo da potência do carregador e da capacidade de armazenamento da bateria<sup>69 70 71</sup>. Em alguns casos, o tempo de recarga pode chegar a oito horas, dependendo da potência do carregador. A estratégia prevê que a recarga ocorra durante a noite, quando os ônibus podem ficar fora de serviço pelo tempo necessário para carregar totalmente as baterias.

Comparativamente, a estratégia de recarga em garagem é uma das opções menos dispendiosas, porque a recarga fora do horário de pico se beneficia de tarifas elétricas mais baixas e custos reduzidos de infraestrutura. Um estudo canadense demonstrou que a recarga em garagem custa aproximadamente US\$ 37 milhões menos que a recarga de oportunidade<sup>72</sup>. Como a recarga é feita durante a noite, há um consumo de energia mais sustentado durante os horários de menor pico, o que exerce menos pressão na rede que outros métodos de recarga.

O número de carregadores necessários para cada frota dependerá da quilometragem média diária percorrida pelos ônibus, do tipo de carregador e do tamanho das baterias. Em geral, o sistema de recarga em garagem requer um carregador para cada um ou dois veículos<sup>73</sup>. Com as mais recentes inovações nas tecnologias de recarga, é possível que essa proporção se torne ainda menor.

A implementação dessa infraestrutura oferece benefícios. Como ela permite um período de recarga mais longo, a energia necessária para os carregadores pode ser menor, reduzindo a pressão sobre a rede elétrica e os custos de eletricidade. No entanto, dependendo do tamanho da frota, muitos veículos em recarga simultânea podem sobrecarregar a rede<sup>74</sup>. Para minimizar esse risco, devem ser instalados sistemas de recarga inteligentes para avaliar o estado de carga de cada veículo e alocar energia conforme a necessidade.

### ESTUDO DE CASO SOBRE A ESTRATÉGIA DE RECARGA EM GARAGEM DE JACARTA, INDONÉSIA

Para reduzir as emissões de carbono e melhorar a qualidade do ar, Jacarta se comprometeu a eletrificar 50% da frota do sistema Transjakarta até 2027 e atingir a eletrificação total até 2030, conforme definido num decreto assinado pelo governador<sup>75</sup>. Essa meta ambiciosa reflete a dedicação de Jacarta à mobilidade urbana sustentável e seu papel no combate às mudanças climáticas.

68 Spirii (2024). *Electric bus charging: Understanding sustainable public transport*. <https://www.spirii.com/en/resources/blog/electric-bus-charging>.  
69 ZEBRA (2020). *From pilots to scale—lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-buscase-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf>.  
70 Randhahn, A.; Knot, T. (2020). *Deployment of charging infrastructure for battery electric buses*. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38028-1\\_12](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38028-1_12).  
71 ZeEUS (2017). *ZeEUS eBus Report #2: An Updated Overview of Electric Buses in Europe*. <https://zeeus.eu/uploads/publications/documents/zeeus-report2017-2018-final.pdf>.  
72 Urban Transport Magazine (2021). *Bus electrification: A comparison of capital costs*. <https://www.urban-transport-magazine.com/en/bus-electrification-a-comparison-of-capital-costs/>.  
73 Guschinsky, N. et al. (2023). *Cost-minimizing decisions on equipment and charging schedule for electric buses in a single depot*. [https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554523003253\\_4](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554523003253_4).  
74 Bloomberg New Energy Finance (2018). *Electric buses in cities—driving towards cleaner air and lower CO2*. [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Electric-Buses-in-Cities-Driving-Toward-Cleaner-Air-and-Lower-CO2?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Electric-Buses-in-Cities-Driving-Toward-Cleaner-Air-and-Lower-CO2?language=en_US).  
75 DKI Jakarta Province Legal Documentation and Information Network (2022). *Governor's Decree Number 1053 of 2022*. [https://jdih-jakarta-go-id.translate.goog/dokumen/detail/5368?\\_x\\_tr\\_sl=id&\\_x\\_tr\\_tl=en&\\_x\\_tr\\_hl=en&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://jdih-jakarta-go-id.translate.goog/dokumen/detail/5368?_x_tr_sl=id&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=sc).

Para atingir essas metas, o Transjakarta iniciou um projeto-piloto em 2022, com 30 ônibus elétricos de piso baixo de 12 m equipados com baterias LFP de 324 kWh. Esses ônibus seriam operados em três rotas que não fazem parte do corredor de BRT. O projeto-piloto tinha como objetivo coletar dados importantes sobre a eficiência operacional e a autonomia dos ônibus elétricos no ambiente urbano específico de Jakarta. Foi selecionada a estratégia de recarga em garagem para a fase-piloto, porque cada ônibus percorria uma média de 230 km diários, o que consumia aproximadamente 70% da capacidade da bateria<sup>76</sup>. As estações de recarga foram instaladas numa garagem de ônibus privada, o que se alinhava ao modelo de negócios em vigor, que exige que o operador de ônibus elétricos forneça a infraestrutura de recarga necessária. As instalações eram de uso exclusivo dos ônibus elétricos do Transjakarta, não sendo acessíveis ao público ou a outros operadores.

O Transjakarta instalou carregadores rápidos para atender às suas necessidades operacionais. Cada estação de recarga foi equipada com carregadores *plug-in* CCS2 duplos (do tipo *dual gun*) de 100 kW, capazes de carregar completamente uma bateria de ônibus em apenas 90 minutos. A recarga normalmente é feita entre as 22h e as 4h, o que permite que cada estação recarregue três ônibus por noite. O uso de carregadores rápidos para a recarga em garagem demonstrou-se eficaz, garantindo que os ônibus estivessem prontos para as operações diárias<sup>77</sup>.

No entanto, os resultados do teste-piloto indicaram que a quilometragem morta superou as estimativas, o que afetou significativamente a autonomia e os padrões de recarga dos ônibus elétricos. O projeto-piloto de Jakarta demonstrou a viabilidade da recarga em garagem para os ônibus elétricos, destacando a importância de uma infraestrutura de recarga rápida para atender às demandas operacionais diárias. Um dos principais aprendizados foi a importância do posicionamento estratégico das garagens ou estações de recarga para minimizar a quilometragem morta. Quando a garagem estiver localizada longe das rotas de serviços, é importante avaliar uma combinação de recarga noturna e recarga de oportunidade para melhorar a eficiência e a flexibilidade geral, considerando a disponibilidade de espaço no terminal e a acessibilidade à rede<sup>78</sup>.



Ônibus do sistema Transjakarta sendo recarregado em Mayasari Bhakti. **FONTE:** Toto Santiko Budi via Shutterstock

<sup>76</sup> ITDP Indonesia; TUMI (2023). *TUMI E-Bus Mission: Supporting and Building the Capacity in Monitoring and Evaluating Pilot E-Bus Implementations*. [https://itdp-indonesia.org/wp-content/uploads/2023/07/Final\\_TUMI-E-bus-Mission-Jakarta-by-ITDP.pdf](https://itdp-indonesia.org/wp-content/uploads/2023/07/Final_TUMI-E-bus-Mission-Jakarta-by-ITDP.pdf).

<sup>77</sup> ITDP Indonesia; TUMI (2023). *TUMI E-bus Mission: Supporting and Building the Capacity in Monitoring and Evaluating Pilot E-Bus Implementations*. [https://itdp-indonesia.org/wp-content/uploads/2023/07/Final\\_TUMI-E-bus-Mission-Jakarta-by-ITDP.pdf](https://itdp-indonesia.org/wp-content/uploads/2023/07/Final_TUMI-E-bus-Mission-Jakarta-by-ITDP.pdf).

<sup>78</sup> UK Pact (2023). *Building a Regulatory and Financial Basis for Transjakarta First Phase E-Bus Deployment*. <https://itdp-indonesia.org/wp-content/uploads/2023/05/4.7-Transjakarta-First-Phase-E-Bus-Deployment-Business-Case.pdf>.

### 3.2.2. RECARGA DE OPORTUNIDADE

A recarga de oportunidade refere-se ao processo de recarga de um veículo enquanto ele ainda está em serviço, normalmente em locais predeterminados ao longo da rota, como terminais ou pontos de ônibus. Essa estratégia, também conhecida como recarga rápida ou recarga ao longo da rota, pode ter de usar uma tecnologia rápida devido ao pouco tempo disponível para a recarga durante a operação. Com a recarga de oportunidade, a autonomia de um ônibus elétrico pode ser estendida com base na disponibilidade de equipamentos de recarga ao longo da rota, reduzindo, assim, a necessidade de retorno à garagem. Essa autonomia expandida viabiliza rotas mais longas e permite atender mais passageiros sem comprometer a eficiência operacional.

A recarga de oportunidade pode ser feita com carregadores pantográficos, *plug-in, flash*, em movimento e sem fio. Entretanto, os mais comumente usados são os pantógrafos.



**IMAGEM ACIMA:**  
Console de carregador pantográfico.  
**FONTE:** Open Charge Alliance

**IMAGEM À ESQUERDA:**  
Carregador pantográfico ao longo da rota em Xangai, China.  
**FONTE:** helloabc via Shutterstock

#### Locais mais apropriados para instalar os carregadores

Geralmente, a infraestrutura para a recarga de oportunidade é instalada em diversos pontos ao longo das rotas. A instalação estratégica de estações de recarga em trechos com diversas linhas de ônibus permite aproveitar ao máximo a infraestrutura disponível.

A recarga rápida requer um planejamento mais complexo, que inclui uma avaliação dos espaços disponíveis com foco nos seguintes aspectos: onde se encontram em relação à rota; se há espaço disponível para acomodar carregadores rápidos ao longo da rota; e se o terreno é adequado para a infraestrutura de recarga. A decisão sobre onde instalar os carregadores será específica para cada cidade. O primeiro passo para definir a localização dessas estações de recarga é uma avaliação das necessidades da cidade para determinada rota: isso permite maximizar a autonomia dos ônibus. Baias de ônibus, áreas de parada ou áreas designadas e segregadas permitem a recarga em poucos minutos<sup>79</sup>. As áreas de conexões, onde os ônibus ficam estacionados entre viagens ao longo de uma rota, podem ser bons lugares para a instalação de carregadores rápidos, dependendo de sua localização. Normalmente, é recomendável instalar um posto de recarga a cada 10 km ao longo da rota<sup>80</sup>. Os passageiros podem embarcar com segurança e aguardar dentro do ônibus enquanto é feita a recarga.

<sup>79</sup> Rogge, M., Wollny, S.; Sauer D. U. (2015). *Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements*. <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/4587>.

<sup>80</sup> Lajunen, A. (2018). *Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617323594#tbl5a>.

Uma passageira paga sua passagem de ônibus com um cartão de transporte. Esse recurso faz parte do programa governamental de modernização dos serviços municipais de ônibus de Surakarta, Indonésia.

**FONTE:** wina soe via Shutterstock



### **Necessidades e custos de infraestrutura**

O tamanho dos carregadores de oportunidade pode variar de acordo com o método e o fabricante, e será importante observar as restrições de espaço de cada método. Por exemplo, alguns carregadores de oportunidade ficam acima da via, ao passo que outros se conectam à parte lateral dos ônibus. Os fabricantes de carregadores geralmente dispõem de materiais informativos que descrevem as especificações e dimensões dos sistemas de recarga de oportunidade.

Os equipamentos usados na recarga de oportunidade podem ser mais caros que aqueles usados em outros métodos. Os custos primários virão do equipamento de recarga e da aquisição de terras, dependendo da localização dos carregadores. Será necessário equilibrar o posicionamento estratégico dessas estações de recarga com os custos dos terrenos para que seja possível implementar essa tecnologia de maneira eficiente e econômica. Áreas de parada, baias de ônibus e outras formas de segregar os ônibus durante a recarga podem ajudar a aliviar esses problemas, mas pode haver obstáculos se as terras forem de propriedade privada.

### **Consumo e custos de energia**

A recarga de oportunidade geralmente exige a instalação de carregadores de alta potência (150 kW a 450 kW) em intervalos regulares ao longo da rota<sup>81</sup>. Os tempos de recarga dependem da potência da tecnologia usada, mas geralmente são mais curtos que os da recarga em garagem, podendo variar de alguns segundos a alguns minutos para uma carga parcial<sup>82</sup>.

Os carregadores de oportunidade podem demandar mais da rede elétrica durante os horários de pico dos serviços de transporte devido à necessidade de carregar rapidamente as baterias durante as operações.

A recarga de oportunidade funciona melhor quando uma conexão à rede de alta capacidade estiver disponível devido à energia necessária para produzir a potência exigida pela recarga de oportunidade<sup>83</sup>. Portanto, as cidades devem levar em

<sup>81</sup> ViriCiti (2021). *Opportunity charging for e-buses insights and tips for optimizing charging behavior*. <https://www.sustainable-bus.com/wp-content/uploads/2021/06/Opportunity-charging-report.pdf>

<sup>82</sup> ITDP (2021b). *De Santiago a Shenzhen: Como os ônibus elétricos estão movendo as cidades*. [https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2022/05/De-Santiago-a-Shenzhen-como-os-onibus-eletricos-estao-movendo-as-cidades\\_Completo.pdf](https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2022/05/De-Santiago-a-Shenzhen-como-os-onibus-eletricos-estao-movendo-as-cidades_Completo.pdf)

<sup>83</sup> ITDP India (2023). *E-Bus Basics. A Guide for Cities to Transition to Electric Buses*. <https://www.itdp.in/wp-content/uploads/2023/07/E-Bus-Basics.pdf>

consideração o custo mais alto da eletricidade para esse método e buscar uma articulação com as concessionárias de energia elétrica nos estágios iniciais de planejamento do projeto. A comunicação entre os líderes do projeto e as concessionárias no início do processo é essencial. Por exemplo, no Canadá, o custo de 100 carregadores rápidos de corrente contínua — cada um com transformadores de 500 kva — para uma frota de 280 ônibus elétricos foi de aproximadamente US\$ 112 milhões.

### ESTUDO DE CASO SOBRE A ESTRATÉGIA DE RECARGA RÁPIDA DE CHENGDU, CHINA

Em resposta à crescente necessidade de soluções eficientes e flexíveis para a recarga de ônibus elétricos, várias cidades chinesas começaram a testar o uso de carregadores pantográficos. Xangai e Chengdu adotaram essa tecnologia avançada de recarga para aumentar a eficiência operacional de suas frotas de ônibus elétricos. Carregadores pantográficos, conhecidos por sua alta potência e capacidade de recarga rápida, costumam ser instalados estrategicamente em estações de ônibus ou no início e término das rotas. O método oferece suporte à operação contínua e ininterrupta de ônibus elétricos, reduzindo o tempo de inatividade e maximizando a cobertura.

A Estação Central Chengdu Jinniu implementou uma abordagem inovadora, utilizando pantógrafos aéreos e estações de recarga *plug-in*. A estação tem 32 conjuntos de pantógrafos aéreos, cada um capaz de fornecer até 720 kW de potência. Esta fonte de alimentação de alta potência permite a recarga completa de um ônibus elétrico num período de 10 a 20 minutos. Essa eficiência é crucial para manter as saídas frequentes exigidas pelos serviços de ônibus urbanos. Cada conjunto de pantógrafos é capaz de recarregar de 10 a 20 ônibus elétricos por dia, superando, de forma eficaz, os desafios relacionados ao espaço limitado e às altas demandas operacionais enfrentadas pelas empresas de ônibus<sup>84</sup>.

O uso de carregadores pantográficos em Chengdu e outras cidades gerou vários benefícios notáveis. A recarga rápida reduz significativamente o tempo de inatividade dos ônibus elétricos, permitindo que eles passem mais tempo em operação e, assim, aumentando a eficiência geral. Além disso, a instalação de carregadores de alta potência em locais estratégicos (como estações centrais) otimiza o uso do espaço disponível, pois são necessárias menos estações de recarga para atender a um número maior de ônibus. Entretanto, o alto investimento inicial e a necessidade de uma integração cuidadosa com a rede elétrica são considerações importantes a serem feitas. Para maximizar os benefícios e superar esses desafios, é recomendável que as cidades conduzam estudos de viabilidade detalhados, realizem um planejamento cuidadoso e busquem uma colaboração estreita com os operadores da rede.



Estações de recarga de baterias numa rua de Chengdu, na província de Sichuan, China.  
**FONTE:** B. Zhou via Shutterstock

84 Todas as informações apresentadas neste quadro foram fornecidas pelo Chengdu Bus Group durante uma reunião com a equipe do ITDP China.

### 3.2.3. RECARGA COMBINADA/MISTA

A implementação de estratégias de recarga mistas ou combinadas para ônibus elétricos envolve a integração estratégica de vários métodos de recarga para otimizar a eficiência e a eficácia de toda a infraestrutura. Ao combinar diferentes abordagens de recarga, o planejamento dos serviços consegue mitigar as limitações de métodos individuais e garantir a operação contínua de suas frotas de ônibus elétricos. Muitas cidades optaram por uma combinação de métodos de recarga graças aos benefícios de flexibilidade, eficiência operacional e maior escalabilidade da frota.

Ao combinar diferentes tecnologias de recarga, os órgãos de transporte público podem adaptar suas abordagens de recarga aos requisitos específicos de cada rota, a suas necessidades operacionais e às restrições de infraestrutura, aumentando, assim, a flexibilidade do sistema. Essa flexibilidade permite a otimização dos cronogramas de recarga e garante que os ônibus permaneçam operacionais durante todo o dia sem períodos significativos de inatividade.



Ônibus elétrico do sistema de transporte público em Paris, França. **FONTE:** JeanLucchard via Shutterstock

Este método pode garantir um aumento da eficiência operacional ao posicionar estrategicamente as estações de recarga rápida em pontos-chave ao longo das rotas ou em *hubs* de transporte público. Os órgãos de transporte podem minimizar o tempo de inatividade, estender a autonomia dos veículos e minimizar interrupções operacionais, contribuindo, ao final, para a implantação e operação bem-sucedidas de sistemas de ônibus elétricos. Isso resulta num uso mais eficiente dos recursos da frota, na redução de desvios da rota para recarregar as baterias e no aumento da confiabilidade geral do serviço.

A implementação desse método também pode contribuir para a escalabilidade e a preparação para o futuro das operações de ônibus elétricos. Os órgãos de transporte público podem adaptar sua infraestrutura de recarga ao longo do tempo para incorporar mudanças no tamanho das frotas, expansões das rotas e avanços nas tecnologias de recarga. Essa escalabilidade garante que os investimentos em infraestrutura de recarga permaneçam relevantes e eficazes à medida que as frotas de ônibus elétricos crescerem e evoluírem.

Apesar de seus benefícios, a recarga combinada também apresenta alguns desafios devido à maior complexidade operacional associada ao gerenciamento de múltiplos métodos e cronogramas de recarga. Os operadores devem equilibrar cuidadosamente a necessidade de recarga rápida com a disponibilidade de equipamentos de recarga e os aspectos práticos dos horários dos ônibus, o que pode representar um desafio logístico.

Embora a adoção de estratégias de recarga mistas ou combinadas possa ajudar os órgãos de transporte público a otimizar os custos associados à implantação de ônibus elétricos e à infraestrutura de recarga graças à combinação da recarga ao longo da rota e da recarga em garagem, esse método pode acarretar custos iniciais mais altos em comparação a uma abordagem única. Isso inclui investimentos em infraestrutura de recarga diversificada, bem como equipamentos e sistemas de gerenciamento. Pode haver custos operacionais contínuos associados à manutenção e ao gerenciamento de várias estações de recarga, bem como despesas potenciais relacionadas ao treinamento de funcionários e à atualização da infraestrutura existente.

Outro desafio está relacionado à compatibilidade entre diferentes tecnologias e infraestruturas de recarga. Isso inclui a interoperabilidade entre vários padrões e protocolos de recarga e a integração de diferentes velocidades de recarga e níveis de potência. Sem a compatibilidade adequada, pode ser difícil gerenciar com eficiência as operações de recarga e otimizar o uso da infraestrutura. Este tópico será examinado na **Seção 3.4.**

### **ESTUDO DE CASO SOBRE A ESTRATÉGIA DE RECARGA COMBINADA PARA A FROTA DE ÔNIBUS ELÉTRICOS DE MÉRIDA, MÉXICO**

No início de 2023, o governo do estado de Yucatán lançou, em Mérida, o sistema IE-Tram: uma rede de BRT totalmente elétrica. O sistema conta com três corredores com 30 ônibus elétricos da empresa Irizar, que conectam o centro da cidade às zonas norte, sudeste e sudoeste da região metropolitana, além de oferecerem uma extensão para duas estações próximas do Trem Maia: Teya e Umán<sup>85</sup>. A iniciativa representou um passo significativo rumo ao transporte urbano sustentável, visando a reduzir emissões e melhorar a qualidade do ar na região.

Para a infraestrutura de recarga, Mérida adotou uma estratégia de recarga mista, combinando opções de recarga em garagem e recarga de oportunidade. Na estação central e no terminal de ônibus do parque La Plancha, de onde partem todas as linhas, foram instaladas 16 estações de recarga (ABB Terra 184 CC)<sup>86</sup>. Essa iniciativa permite a recarga noturna dos ônibus e a recarga de oportunidade durante o dia nos terminais, após a conclusão de cada rota.

A propriedade da infraestrutura de recarga é do governo estadual, o que proporciona maior controle e flexibilidade, dando suporte aos ônibus elétricos IE-Tram e permitindo o fornecimento de energia para outros veículos operados por diferentes entidades. Atualmente, com apoio da equipe do ITDP México, Mérida está testando vários tipos e tamanhos de ônibus elétricos para avaliar sua adequação a diferentes rotas, destacando a importância de uma infraestrutura de recarga adaptável e bem planejada para a implantação bem-sucedida de frotas de ônibus elétricos.

A abordagem de estratégia de recarga mista oferece o benefício de as recargas serem feitas durante a noite, garantindo que os ônibus estejam totalmente carregados e prontos para o serviço todos os dias; além disso, a recarga rápida durante o dia maximiza a eficiência operacional ao minimizar o tempo de inatividade. Essa flexibilidade garante que os ônibus possam manter sua programação sem longas interrupções para recarga, melhorando, assim, a confiabilidade e os níveis de serviço do sistema IE-Tram.

85 ATY (2024). *Agencia de Transporte de Yucatán*. <https://transporteyucatan.org.mx/ietram>.

86 ATY (2024). *IE-Tram Carga De Las Unidades*. <https://transporteyucatan.org.mx/ietram/carga-unidades>.



Ônibus do Sistema de Mobilidade Metropolitana Va y Ven de Yucatán, México.  
**FONTE:** Arlette López via Shutterstock

### 3.3. TAMANHO IDEAL DA BATERIA PARA CADA PLANO ESTRATÉGICO DE RECARGA

O tamanho das baterias é um fator importante a ser considerado, pois pode afetar o espaço interno e o leiaute dos veículos, o consumo de energia e o custo das baterias. Os ônibus elétricos equipados com baterias grandes se beneficiam de uma maior autonomia, mas os custos são mais altos. É importante destacar que as opções de tamanho das baterias dependerão do contexto local e da disponibilidade no mercado.

O planejamento da recarga em garagem deve garantir que os ônibus possam funcionar por um longo tempo. Para atender aos requisitos operacionais, essa abordagem requer baterias maiores (250 kWh a 500 kWh) que garantam a autonomia necessária aos veículos. Conforme mencionado anteriormente, baterias maiores aumentam o peso dos veículos e os custos de aquisição das baterias, além de poderem diminuir a eficiência energética.

Os ônibus elétricos que utilizam recarga de oportunidade podem usar baterias menores<sup>87</sup>. A capacidade de armazenamento das baterias pode variar de 30 kWh a 90 kWh, o que diminui os custos de aquisição<sup>88</sup>. No caso da recarga em movimento, a substituição das baterias ocorre com menos frequência, porque os ônibus recebem a energia para seu funcionamento e recarregam as baterias ao mesmo tempo (desde que estejam em contato com os cabos), o que coloca menos pressão nas baterias<sup>89</sup>.

Estratégias de recarga mistas ou combinadas oferecem uma abordagem promissora para as diversas possibilidades e baterias disponíveis. A combinação de diferentes métodos de recarga pode otimizar o uso das infraestruturas, equilibrar o consumo de energia e minimizar interrupções operacionais. Apesar dos desafios associados às estratégias de recarga mista, os benefícios potenciais em termos de maior flexibilidade, eficiência e custo-benefício as tornam uma opção atraente para a eletrificação de frotas de ônibus.

87 Lajunen, A. (2018). *Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617323594#tbl5a>.

88 Klein, E.; Lantz, M. (2019). *Evaluation of electric bus adoption in Sweden*. Chalmers University of Technology. <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/e826ef31-d5da-4f10-9d35-f43c95bc3b15/content>.

89 Pedestrian Observations (2018). *In-Motion Charging*. <https://pedestrianobservations.com/2018/12/09/in-motion-charging/>.

## A TROCA DE BATERIAS É UMA ESTRATÉGIA REALISTA PARA A RECARGA E OPERAÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS?

A troca de baterias é um método em que uma bateria descarregada é removida e substituída por outra com carga completa, em vez de recarregá-la enquanto ainda estiver no ônibus. Esse sistema requer estações especializadas de troca de baterias equipadas com braços automatizados (porque as baterias são muito pesadas) para efetuar a troca. Devido a isso, a instalação e manutenção dessa tecnologia torna-se muito cara<sup>90</sup>. Embora ofereça a vantagem de reduzir significativamente o tempo de inatividade em comparação aos métodos tradicionais de recarga, a implantação é cara porque são necessárias várias baterias e cada uma pode custar o mesmo que um ônibus a diesel. Há também a questão da complexidade da tecnologia automatizada. Além disso, a infraestrutura para as estações de troca de baterias exige espaço e investimento consideráveis.

Os principais benefícios da troca de baterias são minimizar o tempo de inatividade dos ônibus e, potencialmente, estender a vida útil das baterias, evitando o estresse potencial da recarga rápida<sup>91</sup>. Do ponto de vista operacional, oferece flexibilidade, pois as baterias podem ser recarregadas fora dos horários de pico, reduzindo os custos com energia elétrica e eventuais impactos significativos na rede elétrica. No entanto, também inclui desafios operacionais para manter um cronograma confiável para a troca de baterias e garantir a disponibilidade de baterias carregadas, o que exige planejamento e coordenação cuidadosos.

Essa abordagem foi explorada em algumas cidades chinesas, como Pequim, Tianjin e Qingdao, mas não em grande escala<sup>92</sup>.



Revisão e manutenção de um ônibus em Bogotá, Colômbia.  
**FONTE:**  
Entre Acto

90 An, K.; Jing, W.; Kim, I. (2020). Battery-swapping facility planning for electric buses with local charging systems. <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1573939>.

91 Zhang, L.; Wang, S.; Qu X. (2021). Optimal electric bus fleet scheduling considering battery degradation and non-linear charging profile. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136655452100209X#b0220>.

92 Solution 1 (2023). Battery-swapping technology: A comparison of different approaches and applications. <https://solution1.com.tw/battery-swapping-technology-a-comparison-of-different-approaches-and-applications/>.

### 3.4. PADRÕES E INTEROPERABILIDADE DE CARREGADORES

As conexões físicas de recarga, os *softwares* e as velocidades de recarga são componentes importantes dos sistemas de recarga. Eles são elementos-chave, pois podem afetar diretamente a operação dos serviços. As velocidades de recarga estão associadas ao tipo de corrente: corrente alternada (CA) ou corrente contínua (CC). Embora todos os ônibus elétricos armazenem eletricidade na forma de energia CC, a rede elétrica transmite e fornece eletricidade de corrente alternada. Com a CA, a forma mais comum de fornecimento de energia elétrica, o fluxo de carga elétrica alterna a direção do fluxo de eletricidade<sup>93</sup>. A energia CC, mais encontrada em células de combustível, células solares e baterias, é uma corrente que flui constantemente na mesma direção<sup>94</sup>. O uso da CA para a recarga de ônibus elétricos geralmente resulta em recargas mais lentas, além de exigir a instalação de equipamentos de bordo para a conversão para CC. Por outro lado, a recarga com energia CC é conhecido por suas velocidades maiores<sup>95</sup>.

A tecnologia de cada ônibus, seja CA ou CC, determinará a tecnologia da infraestrutura de recarga. As conexões físicas de recarga dependem muito do fabricante e podem representar um verdadeiro desafio se não estiverem alinhadas, uma vez que a interoperabilidade é um requisito fundamental. A **Tabela no Apêndice 1** apresenta uma visão geral dos modelos, recursos e regiões de uso predominante para os principais modelos de carregadores *plug-in*. Para mitigar os desafios de padronização, foi criado o sistema de recarga combinada (CCS) com base em padrões universais para veículos elétricos, o que ajuda a garantir a interoperabilidade entre veículos e componentes de diferentes fabricantes<sup>96</sup>. Na Europa, um regulamento exige que todas as novas estações públicas de recarga sejam equipadas com conectores CCS para garantir a compatibilidade entre diferentes marcas de veículos elétricos. O regulamento apoia a adoção generalizada do CCS como padrão. A maioria das redes públicas de recarga da Europa, como *Ionity* e *Fastned*, são equipadas com conectores CCS<sup>97</sup>.

Outra possibilidade que surgiu para dar suporte à conexão entre diferentes padrões é o uso de protocolos de *software*, como o *Open Charge Point Protocol*. Trata-se de um protocolo-padrão de comunicação que facilita a troca de informações entre estações de recarga de veículos elétricos e sistemas de gerenciamento de recarga, permitindo que diferentes carregadores operem facilmente entre diferentes padrões. As cidades devem exigir plugues e padrões de recarga interoperáveis ao adquirirem seus ônibus, baterias e equipamentos de recarga de forma a evitar que fiquem presas a um único fabricante.

Plugfest organizado pelo Laboratório de Interoperabilidade da Universidade de New Hampshire, Estados Unidos, em que os desenvolvedores puderam testar seus sistemas de gerenciamento de estações de recarga com equipamentos diversos.  
**FONTE:** Universidade de New Hampshire



93 Anker (2023). AC vs DC Power: The Ultimate Guide to Electrical Currents. <https://www.anker.com/blogs/ac-power/ac-vs-dc-power-the-ultimate-guide-to-electrical-currents>.

94 Anker (2023).

95 World Bank (2020). Latin America Clean Bus in LAC: Lessons from Chile's Experience with E-Mobility. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34435?show=full>.

96 ITDP Brasil; Logit (2022b). Caderno Técnico de Referência para Eletromobilidade nas Cidades Brasileiras. <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>.

97 European Union (2014). Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0094>.

Mesmo com os avanços previstos no que diz respeito à padronização, é recomendável que as cidades busquem treinamento contínuo para lidar com novas tecnologias e priorizar tecnologias de baterias e recarga que usem padrões universais. Isso pode ser feito considerando a padronização como um requisito nas licitações ou usando-a como critério para avaliá-las, reduzindo, assim, a dependência de fabricantes e fornecedores específicos. Ao mesmo tempo, os investimentos em capacitação contínua e desenvolvimento profissional ajudam a preparar as equipes para operar equipamentos de diferentes tamanhos e especificações.

### **3.5. IMPACTO POTENCIAL NA REDE DE ENERGIA**

Para a implementação de projetos-piloto e transições em grande escala, é necessário avaliar as fontes de energia que alimentam o sistema, a infraestrutura elétrica necessária e a capacidade da rede elétrica local. Isso pode representar um dilema ambiental em muitos países devido à dependência de combustíveis fósseis para a geração de energia; além disso, pode ter um impacto substancial na rede elétrica local. Portanto, é crucial avaliar a capacidade da rede para lidar com essa nova demanda e, ao mesmo tempo, continuar fornecendo energia para outros usuários.

A recarga de oportunidade pode ser vista como a mais exigente para a rede elétrica, já que exige potências elevadas num curto intervalo de tempo. Cada carregador precisa fornecer uma quantidade significativa de energia rapidamente, o que pode sobrecarregar a infraestrutura elétrica local. Por isso, é fundamental avaliar se a rede está preparada para atender a essa demanda sem comprometer a estabilidade para outros usuários.

No entanto, diferentemente da recarga em garagem (em que vários veículos podem ser carregados simultaneamente num único local), a recarga de oportunidade costuma ser distribuída entre diferentes pontos, como terminais e paradas de ônibus. Essa descentralização tende a reduzir a demanda concentrada de energia num único ponto, o que pode amenizar o impacto sobre a rede. Nesse sentido, a utilização de carregadores de menor potência por períodos mais longos, como ocorre na recarga em garagem, também pode ser vantajoso, pois reduz a pressão sobre a rede elétrica e contribui para a diminuição dos custos operacionais. A lógica de distribuir a infraestrutura de recarga por diferentes locais se aplica tanto à recarga de oportunidade quanto à recarga em garagem.

Outras estratégias vêm sendo aplicadas por muitas cidades ao redor do mundo para reduzir os custos de recarga, especialmente no caso de sistemas que têm um acesso mais limitado à rede elétrica. A recarga de veículos fora dos horários de pico e a realização de acordos com concessionárias de energia elétrica para ter acesso a tarifas diferenciadas são duas medidas que podem ajudar.

Ao planejar a infraestrutura, também é crucial considerar como manter uma fonte de energia confiável e implementar medidas de resiliência em caso de interrupções na rede. Em áreas urbanas com infraestruturas de energia mais avançadas, os impactos resultantes de níveis mais altos de distribuição e transmissão podem ser menos significativos. A confiabilidade da rede elétrica se torna ainda mais vital quando todo o sistema de transporte público depende de eletricidade para operar. A implementação gradual de frotas de ônibus elétricos poderia acompanhar mudanças incrementais na rede elétrica, permitindo que ajustes necessários fossem feitos ao longo do tempo.

## COMO EVITAR ESCASSEZ DE ENERGIA PARA A OPERAÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS DURANTE EVENTOS CLIMÁTICOS EXTREMOS

As frotas de ônibus elétricos dependem muito de um fornecimento estável de eletricidade, e qualquer interrupção pode afetar significativamente os serviços de transporte público. Para continuar dando suporte ao público durante crises ou desastres naturais, os operadores precisam ter um sistema de *backup* robusto. A fim de mitigar esses riscos, devem considerar estratégias adicionais de otimização para o armazenamento de energia. Uma abordagem prevê a implementação de sistemas descentralizados, com o armazenamento de energia fora da rede elétrica principal. Isso pode incluir redes menores e separadas alimentadas por energia solar ou geradores de reserva, de forma a garantir que os ônibus elétricos possam permanecer operacionais mesmo se a rede central falhar. Por exemplo, durante desastres naturais como tufões ou terremotos, a existência de fontes de energia descentralizadas pode ser crucial para manter os serviços de transporte.

Outra estratégia eficaz é a construção de garagens inteligentes, equipadas com seus próprios meios de geração e armazenamento de eletricidade, como, por exemplo, painéis solares. Essas garagens conseguem gerar e armazenar energia de forma independente, fornecendo uma fonte de energia confiável durante emergências. Na China, várias cidades adotaram essa abordagem, integrando painéis solares e sistemas de armazenamento de baterias a suas garagens de ônibus elétricos<sup>98</sup>. Isso não apenas aumenta a resiliência, mas também reduz a demanda geral na rede principal.

Manter um sistema digitalizado de gerenciamento de energia também é essencial para otimizar o uso de energia e garantir confiabilidade durante crises. Esses sistemas podem fornecer dados em tempo real sobre a demanda por energia, os preços e as condições climáticas, permitindo que os operadores tomem decisões fundamentadas sobre quando recarregar seus ônibus elétricos. Essa abordagem pode ajudar a evitar horários de pico de demanda e reduzir custos, além de garantir que os ônibus estejam com as baterias carregadas e prontos para o serviço quando isso for mais necessário. Por exemplo, em Xangai, um sistema avançado de gerenciamento de energia foi implementado para otimizar os cronogramas de recarga da frota de ônibus elétricos, considerando fatores como preços de eletricidade e previsões meteorológicas<sup>99</sup>.

Exercícios e simulações regulares de possíveis cenários de crise também podem ser úteis para preparar os operadores e garantir que os sistemas de *backup* funcionem conforme o esperado. Eles também ajudam a testar a resiliência da infraestrutura de ônibus elétricos. Essas medidas proativas — aliadas a investimentos estratégicos em tecnologia e infraestrutura — podem aumentar significativamente a confiabilidade e a segurança dos serviços de ônibus elétricos em face de desastres naturais e outras crises. Ao aprender com esses exemplos e melhorar continuamente seus sistemas, as cidades podem garantir que seu transporte público permaneça resiliente e confiável em todas as circunstâncias.

98 The Times of India (2020). Kolkata: Solar panels on depot roofs to charge e-buses. <https://timesofindia.indiatimes.com/city/kolkata/solar-panels-on-depotroofs-to-charge-e-buses/articleshow/74016804.cms>.

99 Qiang, L. et al. (2008). Advanced EMS and its trial operation in Shanghai power system. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11431-008-0010-3>.

Ademais, a capacidade de lidar com potenciais riscos de incêndio é fundamental para a implantação segura de ônibus elétricos. As baterias de íons de lítio, comumente usadas em ônibus elétricos, podem apresentar riscos de incêndio se danificadas ou gerenciadas incorretamente. Para mitigar esses riscos, é crucial implementar protocolos de segurança rigorosos e verificações de manutenção regulares. A instalação de sistemas avançados de detecção e combate a incêndios em garagens de ônibus elétricos e nos próprios ônibus pode ajudar a prevenir e gerenciar incêndios. Por exemplo, as garagens de ônibus elétricos podem ser equipadas com sistemas de combate a incêndio de última geração, projetados especificamente para incêndios relacionados a baterias. Além disso, oferecer treinamento ao pessoal sobre segurança contra incêndios e procedimentos de resposta a emergências é essencial para garantir uma reação rápida e eficaz. Ao adotar essas medidas de segurança, as cidades podem minimizar os riscos associados a incêndios de baterias e aumentar a segurança geral de suas frotas de ônibus elétricos.



Um ônibus elétrico mantém suas operações apesar do alagamento das ruas em Gdansk, Polônia.  
**FONTE:** Michal Bednarek via Shutterstock

Como estratégia para melhorar a resiliência do sistema e aumentar seus benefícios ambientais, os planejadores devem considerar a integração de fontes de energia sustentável à infraestrutura do sistema. Ao utilizarem energia sustentável, os órgãos de transporte público podem diminuir o risco de falta de energia e melhorar a confiabilidade do sistema. A presença de fontes locais de eletricidade renovável também pode proteger o sistema contra potenciais choques resultantes de picos repentinos nos preços de energia devido a fatores externos. Algumas abordagens de resiliência que podem ser empregadas são:

- **Painéis solares no local:** a instalação de painéis solares em terminais de ônibus ou ao longo das rotas de trânsito ajuda a fornecer uma fonte de energia limpa e reduzir a dependência da rede;
- **Sistemas de armazenamento de energia:** o uso de baterias ou outras tecnologias de armazenamento de energia pode ajudar a manter o fornecimento de energia durante interrupções e horários de pico de demanda;
- **Turbinas eólicas:** essa abordagem pode reduzir a dependência da rede principal e garantir um fornecimento de energia regular, especialmente em áreas com

ventos fortes e constantes. A energia eólica também pode complementar outras fontes renováveis, como a energia solar, para criar um sistema energético diversificado e robusto;

- **Microrredes:** a criação de redes de energia localizadas pode oferecer maior controle sobre a distribuição de energia e aumentar a resiliência ao isolar partes do sistema da rede principal durante interrupções;
- **Tecnologias de rede inteligente:** a implementação de ferramentas avançadas para o gerenciamento de rede pode ajudar a otimizar o uso de energia, equilibrar as cargas e melhorar a eficiência geral;
- **Soluções híbridas de recarga:** a combinação de vários métodos de recarga, como recarga solar no local e recarga alimentada pela rede, pode proporcionar flexibilidade e aumentar a resiliência do sistema.

Ao integrarem essas táticas, os órgãos de transporte público podem criar um sistema de ônibus elétricos mais resiliente e sustentável.



Salvador, Brasil.  
**FONTE:** Diogo Pires  
Ferreira

# 4

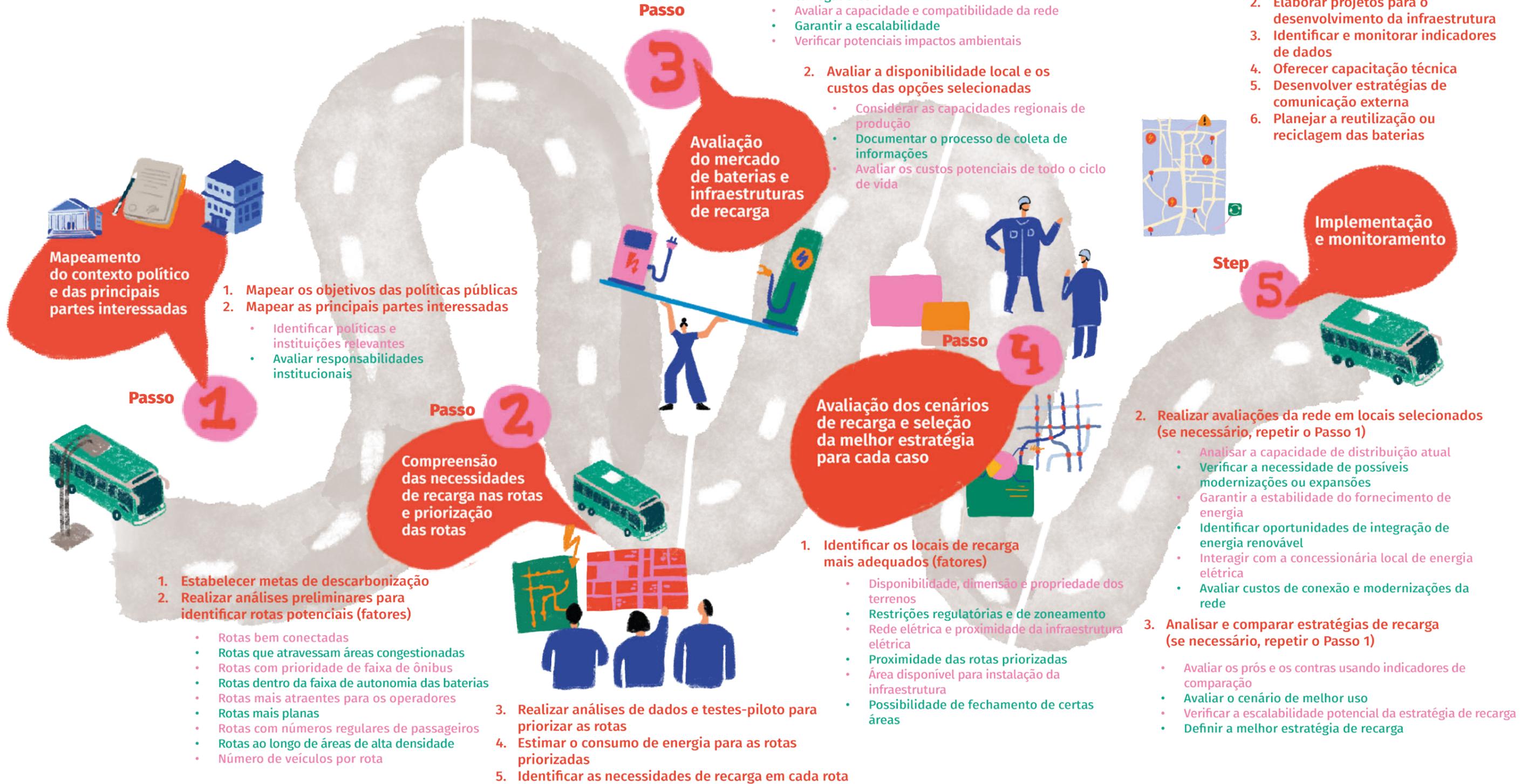
## PROCESSO DECISÓRIO

A descarbonização das frotas de ônibus por meio da adoção de veículos elétricos é um passo fundamental rumo à mobilidade urbana sustentável. No entanto, a transição envolve mais que apenas a substituição de veículos tradicionais por elétricos. Diversas cidades ao redor do mundo têm percebido que a implementação bem-sucedida de sistemas de ônibus elétricos exige um amplo planejamento que abranja infraestrutura de recarga, otimização de rotas e engajamento de partes interessadas. Em suma, a adoção de ônibus elétricos requer o planejamento de um novo modelo de serviço para o sistema de transporte público. Uma abordagem holística é essencial, levando em consideração o gerenciamento das baterias, as estratégias de recarga e seus impactos no ambiente urbano e nas redes elétricas. Um planejamento cuidadoso não apenas garante uma transição mais tranquila, mas também ajuda a evitar atrasos dispendiosos, garantindo a implantação eficiente e sustentável de ônibus elétricos.

Esta seção oferece um guia estruturado para ajudar os tomadores de decisão a desenvolver estratégias eficazes para a recarga de ônibus elétricos. Os cinco passos abaixo dotarão os tomadores de decisão dos conhecimentos e das ferramentas necessárias para que possam tomar decisões estratégicas e fundamentadas que promovam uma descarbonização bem-sucedida de suas frotas de ônibus.



# Cinco passos essenciais para o planejamento de sistemas de ônibus elétricos





#### 4.1. MAPEAMENTO DO MARCO DE POLÍTICAS PÚBLICAS E DAS PRINCIPAIS PARTES INTERESSADAS

A implementação e operação de um sistema de ônibus elétricos requer o engajamento estratégico de múltiplos atores. Nesse sentido, dois aspectos fundamentais devem ser considerados: (1) o mapeamento dos objetivos das políticas públicas e dos diferentes níveis de engajamento de cada parte interessada identificada; e (2) o mapeamento das potenciais partes interessadas que deverão participar do processo de implementação e operação da infraestrutura necessária, tanto em nível técnico quanto político.

Para engajar politicamente cada parte interessada e garantir um nível mais alto de envolvimento, é fundamental identificar mecanismos de incentivo à descarbonização nos marcos de políticas públicas nos níveis nacional, regional e local. Esse processo ajuda a entender as possíveis responsabilidades ou deveres de cada parte. Planos, leis, decretos, políticas, incentivos fiscais, metas e diretrizes são alguns exemplos disso. Ao mapear esses incentivos, é importante considerar todos os setores que possam ser afetados ou que venham a se beneficiar da eletrificação, tais como economia, saúde e meio ambiente.

Também é fundamental considerar o marco regulatório para a avaliação dos setores de energia e transporte. A compreensão e avaliação dos contratos em vigor é essencial para preparar o terreno e incentivar a descarbonização da frota, pois esses documentos podem definir questões técnicas e operacionais sobre como a frota será disponibilizada e como o serviço será prestado. Nesse sentido, a revisão das condições de bonificação e das penalidades em caso de descumprimento das obrigações pode acelerar a migração para os ônibus elétricos. É possível aplicar multas nos casos em que a renovação da frota não atender aos padrões de qualidade ambiental, ou adotar critérios para compensar os operadores que alcancem metas ambientais quantificáveis.

As partes interessadas podem variar dependendo do contexto local, mas geralmente incluem:

- **Governos:** contribuem com a supervisão regulatória, definem políticas e alocam os recursos necessários para a implantação e operação da infraestrutura de ônibus elétricos, bem como para a tomada de decisões e a adoção de medidas de implementação relacionadas aos setores de transporte e energia;

- **Operadores de transporte público:** realizam a gestão diária do sistema de ônibus elétricos, incluindo programação, manutenção e garantia de operações eficientes. Sua experiência prática e seus *insights* são inestimáveis para a identificação de desafios operacionais e oportunidades de melhorias. Os operadores de transporte público também precisam garantir que os ônibus elétricos sejam efetivamente integrados à rede de transporte público existente e forneçam um serviço confiável e eficiente aos passageiros. Isso também inclui o treinamento dos condutores e da equipe de manutenção sobre os requisitos específicos dos ônibus elétricos, o que é crucial para otimizar o desempenho e a segurança dos veículos;
- **Fabricantes:** desempenham um papel fundamental no fornecimento de ônibus elétricos, baterias, infraestrutura de recarga e soluções tecnológicas necessárias para o funcionamento do sistema, contribuindo para sua confiabilidade, desempenho e sustentabilidade. Os fabricantes oferecem sua experiência em *design*, produção e manutenção de ônibus elétricos, garantindo que os veículos atendam às necessidades e normas específicas da cidade. Seu papel é crucial para o fornecimento de suporte técnico e treinamento para operadores locais, ajudando a maximizar a eficiência e a vida útil da frota de ônibus elétricos;
- **Fornecedores e concessionárias de energia elétrica responsáveis pela distribuição e/ou comercialização:** analisam a necessidade de extensão da rede (se necessário), garantem recargas estáveis que não sobrecarreguem a rede e identificam formas de reduzir os custos de recarga. Essa articulação deve ser estabelecida o mais cedo possível, pois pode ajudar a prever impactos e custos potenciais. Novos acordos comerciais podem ser negociados para viabilizar operações mais eficientes e econômicas, como, por exemplo, o mercado livre de energia: um ambiente de negócios onde os participantes possam livremente chegar a um acordo sobre todas as condições comerciais, inclusive fornecimento, preço, quantidade de energia contratada, período de fornecimento e forma de pagamento. Nesse ambiente, por exemplo, o preço da energia elétrica necessária para carregar as baterias pode ser negociado diretamente com as concessionárias e de forma personalizada, conforme as demandas de serviço, o que mitiga os riscos de variações tarifárias;
- **Instituições de financiamento:** as partes interessadas do setor financeiro, incluindo bancos e potenciais investidores, podem expandir a fonte de recursos a serem incorporados ao projeto nessa fase. Essas instituições fornecem os instrumentos necessários para permitir que as cidades realizem os vultosos investimentos de capital necessários e podem ajudar a mitigar os altos custos iniciais de aquisição de ônibus elétricos e instalação de estações de recarga;
- **Organizações internacionais:** oferecem uma riqueza de conhecimentos, recursos e boas práticas globais; e viabilizam o compartilhamento de conhecimentos e capacitação, ajudando as partes interessadas locais a se manterem informadas sobre os últimos avanços tecnológicos e soluções inovadoras. Ao aproveitarem a experiência e o apoio desses organismos internacionais, as cidades podem desenvolver sistemas de ônibus elétricos mais robustos e sustentáveis, alinhados aos padrões globais e contribuindo para metas ambientais e climáticas mais amplas;

- **Organizações da sociedade civil:** ampliam a articulação entre cidades e sociedade civil para promover o intercâmbio de conhecimentos e capacitação profissional, oferecendo uma oportunidade para diferentes segmentos da sociedade participarem da transição. Essas organizações desempenham um papel crucial na promoção de soluções de transporte sustentáveis e equitativas, garantindo que as vozes e necessidades de diversos grupos da comunidade sejam ouvidas. Elas são capazes de mobilizar apoio público, aumentar a conscientização sobre os benefícios dos ônibus elétricos, promover o engajamento da comunidade e fornecer *feedback* valioso sobre os impactos sociais do sistema;
- **Autoridades e técnicos de outras cidades:** compartilham experiências com os projetos-piloto de ônibus elétricos para ajudá-los a otimizar seus recursos e explorar opções para a expansão total da frota. Essas partes oferecem *insights* práticos, desafios técnicos e aprendizados resultantes de suas próprias experiências de implementação de sistemas de ônibus elétricos. Essa cooperação pode levar ao desenvolvimento de soluções padronizadas e abordagens inovadoras adaptadas a diferentes contextos urbanos.

Durante a colaboração com as principais partes interessadas, é importante identificar e atribuir suas principais responsabilidades, competências, prazos e períodos de envolvimento no projeto. Para tal, as cidades devem garantir a presença de capital humano qualificado com as experiências, os conhecimentos e as habilidades necessárias para conduzir as atividades. Embora a entrada de novas partes interessadas possa aumentar o nível de complexidade dos processos decisórios relacionados à gestão, operação e manutenção das frotas, ela também permite que as cidades diluam as responsabilidades e despesas potenciais. Cada parte interessada pode participar de diferentes fases e/ou áreas do projeto, e seu envolvimento pode ser limitado a determinado período de tempo ou ser de mais longo prazo.

### **ACELERAÇÃO DA ADOÇÃO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS COM A ABORDAGEM HOLÍSTICA DA ÍNDIA PARA SUPORTE FINANCEIRO**

Uma abordagem holística que inclua tanto a aquisição de veículos quanto o desenvolvimento de infraestrutura é essencial para a integração bem-sucedida de ônibus elétricos aos sistemas de transporte público. O apoio financeiro e os subsídios do governo são cruciais para compensar os custos iniciais mais altos associados a ônibus elétricos e sua infraestrutura. A experiência da Índia com políticas de apoio oferece diversas lições importantes. As iniciativas de apoio da Índia foram incentivadas pelo Plano Nacional de Missão de Mobilidade Elétrica (NEMMP) de 2020, que definiu metas ambiciosas para as vendas de veículos elétricos até 2030 com o intuito de reduzir as emissões veiculares, chegando a 40% de todos os ônibus adquiridos<sup>100</sup>.

Em 2015, o governo da Índia introduziu o programa Adoção e Fabricação Acelerada de Veículos Híbridos e Elétricos (FAME) para fornecer subsídios às empresas estatais de transporte e apoiar a aquisição de ônibus elétricos e o desenvolvimento de infraestrutura de recarga para apoiar o sistema. A fase inicial, FAME I, tinha como objetivo impulsionar a demanda do consumidor e o desenvolvimento da indústria, embora não previsse incentivos para ônibus totalmente elétricos até meados de 2017. Apesar dos desafios, o FAME I apoiou a compra de 425 ônibus elétricos em dez cidades da Índia<sup>101</sup>.

<sup>100</sup> Government of India (2020). *National Electric Mobility Mission Plan*. Press Information Bureau, Ministry of Heavy Industries & Public Enterprises. <https://pib.gov.in/newsite/printrelease.aspx?relid=116719#:~:text=Government%20of%20India%20launched%20the,on%20year%20from%202020%20onwards>.

<sup>101</sup> ITDP India (2022). *Status of Electric Buses in India*. <https://www.itdp.in/wp-content/uploads/2022/10/Status-of-E-buses-in-India.pdf>.

A implementação do FAME II marcou uma mudança de foco rumo à eletrificação do transporte público e compartilhado. Diferentemente de seu antecessor, o FAME II ofereceu incentivos para a aquisição de ônibus elétricos com base em contratos de serviço (ou de custo bruto — do inglês *gross cost contract*, ou GCC), reduzindo o ônus financeiro sobre os órgãos de transporte e facilitando a adoção de ônibus elétricos sem despesas de capital substanciais. A adoção de modelos de aquisição flexíveis, como o modelo GCC, pode aliviar as pressões financeiras sobre os órgãos de transporte público, facilitando a transição para frotas elétricas. O FAME II também enfatizava a importância de uma infraestrutura de recarga que apoiasse o sistema, reconhecendo que uma abordagem holística para a eletrificação da frota precisa incluir investimentos em veículos e infraestrutura. O sucesso desses programas ressaltou a necessidade de apoio governamental para reduzir custos iniciais e promover a adoção de ônibus elétricos. Mais de 5.595 ônibus elétricos tiveram sua aquisição aprovada pelo FAME II, e mais de mil desses veículos já se encontram em operação<sup>102</sup>.

Além dos programas FAME, o governo indiano lançou o programa *PM E-bus Sewa Scheme* (Programa de Serviço de Ônibus Elétricos do Primeiro-Ministro), reforçando ainda mais seu compromisso com a adoção de ônibus elétricos. O programa aloca US\$ 2,4 bilhões para a implantação e operação de 10 mil ônibus elétricos em até 169 cidades por meio de parcerias público-privadas<sup>103</sup>. Essa iniciativa também prevê algo de importância crucial: suporte ao desenvolvimento de garagens e infraestrutura de energia, abordando necessidades críticas de infraestrutura juntamente com a aquisição de veículos. Esses esforços destacam a importância do planejamento abrangente e do apoio financeiro do governo, não apenas para a aquisição dos ônibus elétricos, mas também para a infraestrutura necessária para garantir sua operação eficaz e sustentável.



Ônibus elétricos no Aeroporto Internacional de Cochin, Índia.  
**FONTE:** Sebastian Castelier via Shutterstock

A governança para a implementação de sistemas de ônibus elétricos orienta as cidades sobre como delegar e atribuir responsabilidades entre as partes envolvidas. Nesse sentido, após o mapeamento inicial das principais partes interessadas, as cidades podem avaliar os modelos de responsabilidade institucional para a implementação da infraestrutura de recarga. Isso ajuda a definir os processos decisórios e determinar como o capital deve ser investido. Novos acordos comerciais podem ser negociados para permitir uma operação mais eficiente. Em geral, há diversos modelos de infraestrutura de recarga, nos quais diferentes atores atuam como catalisadores para a eletrificação do sistema.

<sup>102</sup> ITDP India (2022). *Status of Electric Buses in India*. <https://www.itdp.in/wp-content/uploads/2022/10/Status-of-E-buses-in-India.pdf>.

<sup>103</sup> Government of India (2023). *Guidelines for PM-eBus Sewa Part I*. Ministry of Housing and Urban Affairs. [https://mohua.gov.in/upload/\\_uploadfiles/files/PM-eBus-Sewa-Guidelines-Part-I.pdf](https://mohua.gov.in/upload/_uploadfiles/files/PM-eBus-Sewa-Guidelines-Part-I.pdf)

**TABELA 3. MODELOS DE RESPONSABILIDADE INSTITUCIONAL PARA A INFRAESTRUTURA DE RECARGA**

Modelo	Vantagens	Desvantagens
<p><b>Investimento governamental (ou seja, público)</b> O governo é o principal investidor na infraestrutura de recarga e é responsável por sua construção e operação.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ É propício para o desenvolvimento bem-organizado e intensivo (desde que a capacidade e a gestão governamental sejam eficientes).</li> <li>▲ Pode permitir a superação de barreiras iniciais até que os custos se reduzam graças à escala.</li> <li>▲ Pode aliviar um pouco o estresse no modelo financeiro.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ Por depender de financiamento governamental, é menos sustentável no longo prazo (se o investimento inicial vier do governo, pode permitir o dimensionamento ao longo do tempo até que o setor privado possa alcançá-lo e/ou os custos se reduzam).</li> <li>▼ O ente público tem pouco poder de negociação em processos de aquisição de infraestrutura.</li> <li>▼ O ente público tem capacidade técnica e estrutura administrativa limitadas para a contratação de bens e serviços, bem como para a elaboração e acompanhamento de contratos.</li> </ul>
<p><b>Investimento empresarial (ou seja, privado)</b> Empresas privadas (fabricantes e outros) são os principais investidores na infraestrutura de recarga e são responsáveis por sua construção e operação.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Há mais financiamento disponível.</li> <li>▲ As operações e o gerenciamento são de alta qualidade.</li> <li>▲ A <i>expertise</i> e o investimento do setor privado podem acelerar a adoção do sistema.</li> <li>▲ Incentiva a inovação e a eficiência devido às forças competitivas do mercado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ Pode não priorizar o interesse público ou a sustentabilidade no longo prazo.</li> <li>▼ Há um risco de práticas monopolistas se as atividades não forem devidamente regulamentadas.</li> </ul>
<p><b>Modelo misto</b> O setor privado desempenha um papel importante sob a supervisão e com apoio do governo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Combina a supervisão pública com a eficiência e os investimentos do setor privado.</li> <li>▲ Equilibra riscos e financiamento entre os setores público e privado.</li> <li>▲ Proporciona alta eficiência nas operações.</li> <li>▲ Evita desdobramentos e/ou operações insustentáveis que estejam em conflito com os interesses do governo para o público.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ Requer forte coordenação e colaboração entre o governo e entidades privadas.</li> <li>▼ Há um potencial para conflitos de interesses e prioridades.</li> <li>▼ Estruturas complexas de governança podem atrasar a tomada de decisões.</li> </ul>

**FONTE:** Atualizado de ITDP (2021) com base em contribuições dos escritórios regionais do ITDP.

Cada um desses modelos apresenta vantagens distintas e desafios específicos. Após a avaliação de cada modelo, deve ser selecionado aquele que melhor atenda ao contexto específico, incluindo o ambiente regulatório local, a maturidade do mercado e a disponibilidade de recursos.



## 4.2. SELEÇÃO DAS ROTAS E COMPREENSÃO DAS NECESSIDADES DE RECARGA

Ao selecionar as rotas, é importante entender os objetivos da cidade e o contexto local, bem como as características da cidade e o desempenho atual da frota. É fundamental estabelecer os principais objetivos da cidade para a implementação de ônibus elétricos e as justificativas por trás deles.

Tradicionalmente, as rotas são definidas com base em alguns fatores: necessidades de deslocamento dos usuários (origem e destino), número de passageiros, expansão urbana e demanda futura. Há várias estratégias que podem ser adotadas para a seleção das rotas de ônibus elétricos. Dada a complexidade do planejamento da transição energética e o volume de investimento necessário, estes são alguns critérios-chave a serem priorizados ao selecionar as rotas para eletrificação:

- **Rotas bem conectadas:** o objetivo é permitir o compartilhamento de veículos entre vários serviços e a instalação concentrada da infraestrutura de recarga;
- **Rotas que atravessam áreas congestionadas da cidade:** o objetivo é ampliar os benefícios da descarbonização no curto prazo em vias movimentadas (devem ser considerados certos fatores, como os perfis de velocidade dos veículos);
- **Rotas que já tenham previsão de implantação de faixas prioritárias de transporte público:** no longo prazo, a circulação em faixas prioritárias melhora a eficiência do consumo energético e a dinâmica operacional dos serviços;
- **Rotas dentro da faixa de autonomia das baterias:** o objetivo é garantir que todos os ônibus tenham carga suficiente para concluir os serviços e retornar aos postos de recarga. Devido ao desempenho mais limitado das baterias dos ônibus elétricos em comparação aos ônibus a diesel, os operadores podem precisar ajustar suas rotas ou frotas;
- **Rotas com maior interesse e abertura por parte dos operadores:** o engajamento dos operadores é crucial para garantir acordos regulatórios realistas entre as diversas partes interessadas;

- **Rotas mais planas:** levam em consideração o impacto das condições topográficas no desempenho do veículo;
- **Rotas com números regulares e previsíveis de passageiros:** o objetivo é fazer um uso mais eficiente da bateria e garantir que os benefícios dos ônibus elétricos sejam usufruídos pelo maior número possível de passageiros;
- **Rotas ao longo de áreas de alta densidade, com maior número de beneficiários potencialmente vulneráveis e próximas a grandes centros de emprego,** bem como rotas conectadas a outros modos de transporte;
- **Número de veículos por rota:** o objetivo é obter um benefício maior da frota eletrificável, sempre considerando o número mais viável conforme o objetivo definido pela cidade.

Para começar, a seleção de uma área da cidade para a implantação de um sistema de ônibus elétricos deve buscar um equilíbrio entre o local ideal para implementá-lo em termos de visibilidade para a iniciativa — geralmente nas áreas centrais — e os locais que gerarão o maior impacto para os beneficiários mais vulneráveis e marginalizados<sup>104</sup>, como, por exemplo, indivíduos de renda baixa (que normalmente vivem nas periferias). Seja qual for a escolha, é importante selecionar rotas que beneficiem a população da cidade de forma equitativa. Nesse sentido, priorizar a eletrificação das rotas mais usadas por esse público pode ser uma alternativa capaz de gerar benefícios equivalentes aos investimentos na ampliação do acesso a oportunidades com retorno social e econômico relevante.

As rotas devem ser analisadas considerando as características e o desempenho da frota. As informações técnicas — como distâncias percorridas por rota, topografia e características socioeconômicas e geoespaciais da cidade — precisam ser avaliadas para mensurar os impactos sociais da introdução de uma frota elétrica. Também é importante coletar dados e informações sobre as especificações da frota de cada rota: tamanho, tecnologia e idade dos ônibus.

Ao analisar as rotas, sugere-se que os planejadores considerem os cenários mais realistas, usando as condições operacionais de um dia típico e as condições mais rigorosas de desempenho operacional em termos de carga de passageiros, uso de sistemas auxiliares (como ar condicionado), condições climáticas e declives/ativos máximos. Como não é possível prever todas as condições operacionais que os ônibus podem encontrar, a realização de projetos-piloto pode ser uma boa maneira de avaliar a viabilidade dos ônibus elétricos, identificando desafios antecipadamente, minimizando riscos e ajustando estratégias operacionais. Com base nisso, a compreensão do comportamento rotineiro dos ônibus elétricos em rotas de teste ou projetos-piloto pode embasar as próximas etapas de planejamento e ampliação do projeto.

### PROJETOS-PILOTO COMO FORMA DE PREPARAÇÃO PARA A TRANSIÇÃO

O planejamento dos projetos-piloto deve ser integrado à implantação de infraestruturas de recarga e orientado por critérios de igualdade e inclusão. A garantia de acessibilidade para pessoas de renda baixa, especialmente mulheres, desde o início do planejamento é crucial para equilibrar a distribuição de benefícios com foco em quem mais depende do transporte público. Outro critério é a priorização das rotas mais poluentes.

<sup>104</sup> Os grupos que mais dependem do transporte público são: população de renda baixa, população negra, mulheres, pessoas com deficiência, idosos e crianças.

Priorizar as rotas mais críticas com base nesses critérios é uma estratégia para maximizar os benefícios da transição até que o serviço possa ser ampliado.

A segunda fase se concentra em planejar a avaliação de desempenho dos condutores e técnicos para lidar adequadamente com os veículos e a infraestrutura. Nesse sentido, a fase inicial não deve prever a presença de passageiros e deve ocorrer sob supervisão de pessoal treinado. A formação de parcerias com os fabricantes é uma opção para garantir treinamento e assistência básica durante o projeto-piloto e o primeiro ano de operação dos veículos. Além disso, a segunda fase deve prever experimentos com a recarga de veículos, prestando especial atenção à recarga em tempo real, correspondente à disponibilidade e capacidade de eletricidade e à localização de garagens e terminais.

A terceira fase deve monitorar o comportamento dos veículos numa rota experimental. Esse comportamento depende das condições topográficas ou viárias, de condições específicas de temperatura e de outros eventos climáticos. Ao pensar no transporte de passageiros, também é possível avaliar a frenagem e a marcha dos motores nas paradas para embarque e desembarque e verificar em que medida a autonomia da bateria é preservada (ou não) ao longo do serviço. Embora os projetos-piloto tenham uma função operacional específica, eles permitem que os gestores identifiquem as ações necessárias nos níveis de planejamento tático. O nível tático é responsável por quaisquer correções necessárias para solucionar falhas verificadas durante o teste operacional. A partir dos resultados de desempenho, devem ser identificadas as partes interessadas necessárias para a operação dos ônibus elétricos; definidas as responsabilidades; e planejada a gestão de uma frota permanente.

Por fim, um último aspecto é a necessidade de se garantir o engajamento da população, especialmente no planejamento das rotas. Um transporte público de qualidade precisa se concentrar na satisfação do usuário. Esse fator é crucial para reter e atrair as pessoas, principalmente aquelas que usam outros meios de transporte que precisam ser desestimulados, como, por exemplo, o automóvel. Embora as frotas elétricas exijam uma rota otimizada para atender a suas necessidades operacionais, as cidades devem conciliar isso com as demandas e exigências técnicas dos usuários.



A viabilidade de cada rota depende das necessidades de transporte da população. **FONTE:** NG-SPACETIME via Shutterstock

Essas informações ajudarão as cidades a definir critérios para priorizar as rotas que mais se beneficiariam da eletrificação. Após a avaliação de viabilidade e a identificação dos melhores locais para a instalação da infraestrutura de recarga, devem ser selecionadas as rotas prioritárias para a eletrificação dos ônibus.

Após reunir todos os dados a serem analisados, é importante estimar a eficiência energética, que mede a quantidade de energia utilizada por quilômetro percorrido, bem como a autonomia estimada para um veículo circulando em determinado trajeto. A autonomia é determinada pelo consumo de energia necessário para operar o serviço durante um dia útil, considerando a capacidade da bateria. No cálculo do consumo energético, é importante levar em consideração a degradação da bateria e os impactos operacionais sobre sua autonomia, conforme menciona a **Seção 2.2**. O consumo de energia será fundamental para entender as características e necessidades de recarga de cada rota priorizada e dará suporte à avaliação da infraestrutura de recarga.



### 4.3.AVALIAÇÃO DO MERCADO DE BATERIAS E INFRAESTRUTURAS DE RECARGA

Entender a disponibilidade e as especificações técnicas das diferentes baterias e carregadores é importante para mapear as possibilidades e os impactos potenciais de cada escolha. Cada modelo tem, conforme mencionado anteriormente, diferentes requisitos e padrões operacionais, como, por exemplo, autonomia e eficiência. As informações coletadas sobre a energia necessária para carregar as baterias das rotas prioritizadas e suas características serão essenciais para a avaliação dos custos potenciais de energia para cada uma das rotas prioritizadas. Ao mesmo tempo, também dará suporte à avaliação de baterias e carregadores que atendam às necessidades de recarga. As principais características das baterias estão disponíveis na **Seção 2.1, Tabela 1**. As características de cada tipo de carregador encontram-se descritas na **Seção 3.1, Tabela 2**, e seus principais prós e contras constam da Tabela 4 abaixo. Essas informações serão essenciais para a avaliação e determinação das opções viáveis para as rotas prioritizadas.

**TABELA 4. PRÓS E CONTRAS DE DIFERENTES CARREGADORES**

	<b>Plug-In</b>	<b>Pantógrafo</b>	<b>Flash</b>	<b>Em movimento</b>	<b>Sem fio</b>
<b>Prós</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Custos mais baixos de infraestrutura e eletricidade; portanto, menor investimento inicial.</li> <li>▲ Leiaute flexível.</li> <li>▲ Menos requisitos para a rede elétrica.</li> <li>▲ Impacto menor na vida útil da bateria (com a recarga em garagem).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Possibilidade de operações mais longas.</li> <li>▲ Recarga mais rápida.</li> <li>▲ Área menor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Possibilidade de operações mais longas.</li> <li>▲ Recarga mais rápida.</li> <li>▲ Área menor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Possibilidade de operações mais longas.</li> <li>▲ Custos de eletricidade mais baixos.</li> <li>▲ Fluxo de eletricidade mais constante e menos pressão sobre a rede.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Possibilidade de operações mais longas.</li> <li>▲ Recarga contínua.</li> <li>▲ Leiaute flexível.</li> </ul>

<b>Contras</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ Recarga mais longa.</li> <li>▼ Menor eficiência da recarga.</li> <li>▼ Leiaute de infraestrutura dispersa.</li> <li>▼ Possível redução da vida útil da bateria e exigência de mais capacidade da rede elétrica.</li> <li>▼ Maior área necessária para a infraestrutura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ Infraestrutura e custos de eletricidade mais altos.</li> <li>▼ Possível redução da vida útil da bateria e exigência de mais capacidade da rede elétrica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ Altos custos de infraestrutura.</li> <li>▼ Possibilidade de sobrecarregar a rede devido à demanda por alta potência num curto período.</li> <li>▼ Menos dados disponíveis sobre este modo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ Altos custos de infraestrutura.</li> <li>▼ Necessidade de manutenção das linhas aéreas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▼ Exigência de obras significativas, tanto em termos da área utilizada (toda a rota designada para a recarga) e tempo (cronograma de instalação mais longo).</li> <li>▼ Menos dados disponíveis sobre este modo.</li> </ul>
----------------	---	--	--	---	--

FONTE: Elaboração própria.

A escolha do tamanho das baterias para os ônibus elétricos deve ser baseada em vários fatores, principalmente a quilometragem diária percorrida pelos ônibus e a disponibilidade de estruturas de recarga. Uma estimativa precisa do tamanho ideal para a bateria é crucial para garantir operações eficientes e ininterruptas.

Estimar o consumo de energia também é fundamental para determinar o tamanho ideal da bateria, e isso pode ser feito com um cálculo simples: considerando apenas a recarga em garagem, a distância diária percorrida pelos ônibus (km) deve ser multiplicada por sua eficiência energética (kWh/km). A eficiência energética variará dependendo do tamanho do ônibus (por exemplo, 0,8 kWh/km para um ônibus de 9 m, e 1,2 kWh/km para um ônibus de 12 m)<sup>105</sup>. Além disso, deve ser considerado um *buffer* de estado de carga (SoC) de 20% para manter a saúde da bateria e garantir uma estimativa mais realista e sustentável dos requisitos operacionais. Se também for considerada a recarga de oportunidade, a capacidade e o tamanho da bateria podem ser reduzidos ainda mais, o que também abaixaria o custo geral dos ônibus.

Após avaliar as opções mais viáveis de baterias e carregadores, recomenda-se um estudo de mercado para verificar se a oferta local atende à demanda e às metas da cidade. Embora essa análise possa ser realizada por meio de sites oficiais, fichas técnicas e publicações, a sugestão é que seja feito um contato direto com os fabricantes por meio de canais oficiais (isso permitirá que a análise possa ser utilizada posteriormente num processo de licitação, se necessário). A **Tabela 5** apresenta as principais especificações e características sugeridas para essas análises.

**TABELA 5. ESPECIFICAÇÕES DE BATERIAS E CARREGADORES**

Escopo	Especificações a serem consideradas na avaliação de mercado
<p>Bateria</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonomia mínima com carga completa (km);</li> <li>• Capacidade mínima da bateria (kWh);</li> <li>• Perda máxima de eficiência ao longo do ciclo de vida;</li> <li>• Sistema de gerenciamento e monitoramento de bateria;</li> <li>• Custo por unidade;</li> <li>• Prazo de garantia;</li> <li>• Descrição detalhada das garantias e serviços incluídos no custo;</li> <li>• Prazo e tempo máximo de entrega da bateria.</li> </ul>
<p>Carregador</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de sistema (<i>plug-in</i>, pantógrafo etc.) e de conector (GBT, CCS2 etc.);</li> <li>• Tempo máximo para uma carga completa;</li> <li>• Potência de recarga (kW);</li> <li>• Voltagem (V);</li> <li>• Corrente de recarga (A);</li> <li>• Número de conectores;</li> <li>• Dimensões do carregador;</li> <li>• Sistema de gerenciamento de recarga;</li> <li>• Custo por unidade;</li> <li>• Prazo de garantia;</li> <li>• Descrição detalhada das garantias e serviços incluídos no custo;</li> <li>• Prazo e tempo máximo de entrega do carregador.</li> </ul>

**FONTE:** Elaboração própria.



## 4.4. SELEÇÃO DA ESTRATÉGIA DE RECARGA PARA AS ROTAS PRIORIZADAS

Após analisar as opções de infraestrutura de recarga e baterias disponíveis no mercado com base nas informações coletadas nas etapas acima, é fundamental selecionar qual estratégia de recarga será usada considerando os diferentes cenários potenciais de implementação. Para cada uma das três estratégias de recarga apresentadas na **Seção 3.2**, é importante avaliar diferentes cenários considerando as seguintes etapas:

### 4.4.1. POSICIONAMENTO POTENCIAL DA INFRAESTRUTURA DE RECARGA

O primeiro ponto é fazer uma lista preliminar das áreas potenciais em que a infraestrutura poderia ser instalada considerando as rotas selecionadas anteriormente. Com uma lista em mãos, é possível priorizar os locais para a instalação da infraestrutura, levando em consideração:

- **Disponibilidade, área e propriedade do terreno:** os ônibus elétricos precisam de uma infraestrutura adicional para sua recarga, o que pode se tornar um problema, pois as restrições de uso do solo em áreas urbanas podem impedir a construção de novas garagens, ou os proprietários das garagens existentes podem se opor à redução do espaço disponível para as operações normais de ônibus. Embora esses desafios possam ser enfrentados por meio de um planejamento meticuloso do espaço e da seleção de uma infraestrutura com pegada espacial mínima, ainda pode ser necessária uma redução no tamanho da frota nas garagens com espaço extremamente limitado;
- **Licenças ambientais:** conforme os regulamentos em vigor em cada país, a instalação da infraestrutura de recarga pode exigir licenciamento ambiental, o que serviria para avaliar e mitigar potenciais impactos ambientais;

- **Energia da rede e proximidade da infraestrutura elétrica:** deve ser feita uma avaliação da infraestrutura atual das garagens e terminais. Dependendo da configuração, podem ser necessárias apenas pequenas atualizações, ou, em alguns casos, a instalação de linhas de subtransmissão e subestações. A seleção de um local fisicamente próximo às subestações existentes pode ajudar a reduzir os custos da nova infraestrutura;
- **Proximidade das rotas priorizadas:** o objetivo é descarbonizar o sistema, minimizando ao máximo os quilômetros ociosos e garantindo a continuidade das operações durante todo o dia;;
- **Área disponível para instalação da infraestrutura:** a inclusão de ônibus elétricos nas garagens atuais gera preocupações devido ao espaço limitado para estacionamento e manobras, desenvolvimento de infraestrutura de rede e instalação de estações de recarga/troca de baterias;
- **Possibilidade de fechar as áreas:** a ideia é garantir a segurança e permitir uma melhor vigilância dos equipamentos.

O posicionamento relativo das áreas deve ser avaliado com base nas rotas priorizadas para as frotas elétricas, estimando o tempo médio de deslocamento entre cada uma das rotas e os potenciais carregadores. Isso ajuda a quantificar eventuais ineficiências inerentes ao sistema como resultado da necessidade de deslocamentos fora de serviço. Detalhes específicos relacionados à infraestrutura de recarga e aos leiautes de posicionamento dos pontos de recarga devem ser avaliados para garantir que haja espaço disponível para o número de ônibus envolvidos. No que diz respeito aos equipamentos de recarga, os tamanhos podem variar dependendo da escolha, como se viu na **Seção 3.1**.

#### **4.4.2. AVALIAÇÃO DA REDE PARA CADA CARREGADOR INSTALADO**

Após selecionar o posicionamento potencial dos carregadores, é fundamental avaliar a capacidade da rede elétrica analisando a rede de distribuição local. A introdução de ônibus elétricos pode resultar num aumento significativo da demanda por energia nas zonas onde forem instaladas as infraestruturas de recarga, como é possível verificar na Seção 3.5. A determinação da demanda de energia elétrica é um dos principais fatores a serem considerados, o que dependerá da estratégia de recarga selecionada: quanto maior o volume de demanda de energia necessária num curto espaço de tempo, maior a possibilidade de impacto caso a rede não esteja preparada.

A necessidade combinada de energia dos carregadores instalados em determinada área influenciará os ajustes e investimentos necessários para garantir que o fornecimento de energia possa atender à demanda da frota. Esse fator afetará diretamente a escolha do método de recarga e o número de carregadores necessários. A carga geral da rede em cada área designada deve ser calculada com base em padrões de segurança, número de carregadores, potência máxima de recarga por carregador e outros elementos, como estratégia de recarga, tamanho da frota e características da rota.

Portanto, é crucial avaliar as necessidades energéticas das rotas especificadas no projeto para garantir uma implementação eficiente. Recomenda-se o engajamento das concessionárias locais de energia para dar suporte às avaliações da implementação da infraestrutura de recarga e da rede elétrica, pois ela dispõe de conhecimentos específicos para verificar essas informações.

## **ENVOLVIMENTO DE CONCESSIONÁRIAS DE SERVIÇOS PÚBLICOS NO PLANEJAMENTO DA RECARGA DE ÔNIBUS ELÉTRICOS**

Envolver as concessionárias de serviços públicos no planejamento dos ônibus elétricos e da infraestrutura de recarga desde o início do processo é algo crucial para o sucesso do projeto. A comunicação direta e a promoção de parcerias com as concessionárias de energia elétrica podem gerar benefícios significativos tanto para o transporte público quanto para o setor de serviços públicos. O engajamento na fase inicial permite que os planejadores avaliem os serviços elétricos disponíveis nas garagens e em outros locais relevantes, garantindo que a infraestrutura possa suportar o aumento da demanda proveniente dos ônibus elétricos. As concessionárias de serviços públicos podem fornecer *insights* e recursos essenciais para ajudar a estimar a adequação dos serviços elétricos atuais e identificar eventuais atualizações necessárias.

Essa colaboração pode resultar em programas de financiamento e infraestrutura que reduzam os encargos financeiros e potencialmente diminuam os custos das tarifas de energia elétrica. Acordos sobre responsabilidades de implementação de infraestrutura e precauções de segurança são essenciais para evitar tensões na rede elétrica. As concessionárias podem aportar sua *expertise* no desenvolvimento de soluções de recarga que sejam econômicas e eficientes. Além disso, podem ajudar a implementar medidas de segurança para garantir a confiabilidade e a estabilidade do fornecimento de energia, o que é vital para a operação contínua dos ônibus elétricos.

As flutuações de tarifas elétricas ao longo do ano podem impactar significativamente o custo total de operação de uma frota de ônibus elétricos. As concessionárias podem fornecer informações valiosas sobre essas variações e recomendar programas de financiamento viáveis, adaptados às necessidades específicas do local do projeto. Ao trabalharem em estreita colaboração com as concessionárias de serviços públicos, os planejadores podem desenvolver estratégias que otimizem o uso de energia, gerenciem custos de forma eficaz e garantam que a infraestrutura elétrica necessária esteja disponível para dar suporte à sustentabilidade e à escalabilidade dos programas de ônibus elétricos no longo prazo.

### 4.4.3. ANÁLISE, CONSIDERAÇÕES E USO IDEAL DAS DIVERSAS ESTRATÉGIAS DE RECARGA

Ao deliberarem sobre uma estratégia de recarga, é fundamental que os planejadores analisem os fatores econômicos, operacionais e sociais envolvidos. A estratégia de recarga afeta diretamente a aquisição de energia elétrica, exigindo alinhamento entre as tarifas definidas, o planejamento operacional e a alocação da frota. Esse alinhamento é crucial para garantir a operação e a confiabilidade do serviço para os usuários. A estratégia a ser utilizada precisa considerar as análises prévias da rede elétrica local e o planejamento da instalação dos carregadores, o que é crucial para aumentar a eficiência do sistema, mitigar riscos, reduzir custos e otimizar a infraestrutura necessária, conforme mencionado anteriormente na **Seção 3.5** e na **Seção 4.4**.

**TABLE 6. ESTRATÉGIAS DE RECARGA: PRÓS, CONTRAS E USO IDEAL**

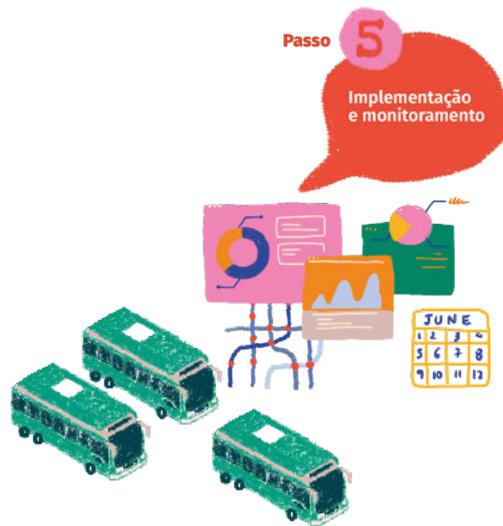
	Recarga em garagem	Recarga de oportunidade	Recarga combinada/mista
<b>Prós</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Requer alterações mínimas nos cronogramas operacionais, reduzindo interrupções;</li> <li>▲ Permite a recarga regular durante a noite, garantindo que os ônibus estejam totalmente carregados e prontos para o serviço no dia seguinte;</li> <li>▲ Os custos são inferiores aos da recarga de oportunidade devido à menor necessidade de infraestrutura;</li> <li>▲ O consumo geral de energia é baixo em comparação aos métodos de recarga rápida;</li> <li>▲ É possível reduzir os custos com tarifas de demanda de energia elétrica fora do horário de pico e aliviar a pressão sobre a rede com a recarga noturna em horários de menor demanda;</li> <li>▲ É possível economizar graças aos carregadores de menor potência;</li> <li>▲ O alinhamento dos cronogramas de recarga aos períodos de pico de tráfego otimiza a vida útil e a eficiência das baterias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Estende significativamente a autonomia dos ônibus, permitindo um serviço contínuo sem a necessidade de retorno à garagem para a recarga;</li> <li>▲ Reduz o tempo de inatividade e permite modificações nas rotas de ônibus, expandindo a cobertura dos serviços e atendendo à demanda dos passageiros;</li> <li>▲ Oferece flexibilidade quanto à localização dos carregadores, permitindo diversas configurações de vias, necessidades específicas da cidade e requisitos operacionais;</li> <li>▲ Estações de recarga estrategicamente posicionadas ao longo das rotas maximizam a utilidade da infraestrutura de recarga;</li> <li>▲ A instalação das estações de recarga em Intervalos estratégicos otimizam a autonomia dos ônibus e a cobertura dos serviços; e</li> <li>▲ Os tempos de recarga variam de segundos a minutos, dependendo da potência, garantindo a reposição eficiente da bateria durante o serviço.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▲ Permite a recarga rápida em pontos-chave ao longo das rotas ou em <i>hubs</i> de transporte público, minimizando o tempo de inatividade e aumentando a autonomia dos veículos;</li> <li>▲ Melhora a eficiência operacional reduzindo desvios de rota para recarga e elevando a confiabilidade geral nos serviços;</li> <li>▲ Aumenta a flexibilidade integrando diversas tecnologias de recarga adaptadas às necessidades específicas das rotas e operações;</li> <li>▲ Permite escalabilidade e uma melhor preparação para o futuro das infraestruturas de recarga, considerando mudanças no tamanho das frotas e avanços tecnológicos;</li> <li>▲ Otimiza os recursos da frota e reduz desvios de rota para recarga, levando a um uso mais eficiente de eletricidade e uma redução da sobrecarga na rede; e</li> <li>▲ A eletrificação se torna mais econômica, aproveitando a infraestrutura de rede elétrica existente e minimizando investimentos de capital.</li> </ul>

	<p>▼A autonomia limitada pode exigir mais ônibus em comparação a um sistema com veículos MCI, possivelmente exigindo recargas intermitentes para rotas mais longas;</p> <p>▼Os tempos de recarga mais longos podem exigir baterias maiores, aumentando potencialmente os custos iniciais e o peso dos ônibus;</p> <p>▼A escassez de áreas urbanas pode ser um desafio, possivelmente exigindo a modernização das garagens existentes ou a construção de novas instalações;</p> <p>▼Os requisitos adicionais de espaço para a instalação de infraestrutura de recarga dentro das garagens podem reduzir o espaço operacional e exigir ajustes;</p> <p>▼São altos os custos iniciais para a instalação da infraestrutura, a possível necessidade de reforma das garagens e os investimentos em carregadores, cabos e transformadores;</p> <p>▼Os tempos de recarga podem ser maiores, o que pode impactar a disponibilidade dos ônibus durante os horários de pico das operações; e</p> <p>▼Pode exigir planejamento adicional para otimizar os cronogramas de recarga e o uso de energia.</p>	<p>▼Exige planejamento complexo para o posicionamento dos carregadores e o desenvolvimento de infraestrutura, o que gera custos mais altos e potenciais desafios para a aquisição de terras;</p> <p>▼A demanda maior de energia durante os horários de pico pode sobrecarregar a rede elétrica;</p> <p>▼Os carregadores podem ter custos mais altos em comparação a outros métodos, o que exigiria investimentos significativos em equipamentos de recarga e, potencialmente, na aquisição de terras; e</p> <p>▼A maior demanda de energia durante os horários de pico pode sobrecarregar a rede elétrica, o que pode levar ao aumento dos custos de energia.</p>	<p>▼Há uma maior complexidade operacional associada ao gerenciamento de múltiplos métodos e cronogramas de recarga;</p> <p>▼Surgem desafios logísticos para equilibrar as necessidades de recarga rápida com base nos horários dos ônibus e a disponibilidade de infraestrutura de recarga;</p> <p>▼Os custos iniciais são mais altos em comparação com abordagens de recarga única devido aos investimentos em infraestrutura e equipamentos diversos;</p> <p>▼Há despesas operacionais contínuas associadas à manutenção e gerenciamento de múltiplas estações de recarga;</p> <p>▼Pode haver desafios relativos à compatibilidade entre diferentes tecnologias e infraestruturas de recarga; e</p> <p>▼É possível que haja despesas relacionadas ao treinamento de pessoal e à atualização da infraestrutura existente para garantir a compatibilidade.</p>
<p><b>Uso ideal</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É mais apropriada para rotas onde os ônibus possam operar a maior parte do dia com uma única carga lenta (isto é, rotas que variam de 180 km a 230 km de extensão: para rotas superiores a 200 km, deve ser garantida a recarga intermitente nas garagens ou considerada outra estratégia de recarga;</li> <li>• As rotas devem ter distâncias moderadas e horários previsíveis, permitindo que os ônibus recarreguem suas baterias durante a noite ou fora dos horários de pico sem interromper as operações;</li> <li>• As garagens devem ter espaço suficiente para a infraestrutura de recarga com impacto mínimo nas áreas operacionais, permitindo uma recarga eficiente durante a noite e interrupção mínima nas operações; e</li> <li>• As rotas devem ter horários previsíveis e demanda sobre a rede de moderada a baixa, permitindo a recarga noturna com impacto mínimo no consumo de energia e nos custos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É mais apropriada para rotas mais longas (&gt;200 km);</li> <li>• As rotas devem oferecer serviços de alta frequência, com alta demanda de passageiros, horários de operação mais longos e/ou rotas sobrepostas onde os ônibus possam recarregar as baterias quando não tiverem tempo suficiente para uma recarga em garagem completa entre uma viagem e outra;</li> <li>• As rotas devem ter baias de ônibus dedicadas, desvios ou áreas designadas separadas do tráfego que permitam a instalação de carregadores; e</li> <li>• As áreas urbanas devem ter uma rede de alta capacidade e fornecimento de eletricidade suficiente para permitir intervalos de recarga rápida, minimizando a sobrecarga da rede durante os horários de pico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A estratégia de recarga mista visa a minimizar as restrições e o impacto de ambos os sistemas, sendo mais apropriada para rotas mais longas (&gt;200 km);</li> <li>• As rotas devem ter alta demanda e paradas frequentes, e a recarga rápida em <i>hubs</i> de transporte público ou em pontos-chave ao longo da rota pode minimizar o tempo de inatividade e garantir a confiabilidade contínua dos serviços;</li> <li>• Os sistemas de transporte público devem ter planos para expansão futura e considerar avanços tecnológicos, permitindo que projetos de infraestrutura flexíveis e escaláveis atendam às necessidades de uma frota em evolução e permitam padrões de recarga interoperáveis; e</li> <li>• É ideal para áreas urbanas com diversas necessidades de recarga e infraestruturas elétricas, de forma que a recarga rápida possa maximizar a eficiência da frota e minimizar os investimentos de capital em infraestrutura de recarga.</li> </ul>

A relação entre custos e eficiência dos ônibus elétricos depende da obtenção de uma substituição o mais próxima possível de 1:1 dos ônibus movidos a combustível por elétricos, considerando os custos de capital muito altos dos ônibus e baterias e os custos operacionais mais baixos. O planejamento adequado das rotas pode garantir que o sistema seja financeiramente viável para as partes interessadas no planejamento e financiamento, ao mesmo tempo que permanece confiável para os passageiros. Isso está diretamente ligado a uma estratégia de recarga otimizada e à operação eficiente das rotas.

Para estimar os custos da eletricidade que esses carregadores usariam e compará-los aos custos de combustível da frota atualmente em operação no sistema, é necessário considerar as diferentes decisões do projeto em relação à estratégia de recarga, o planejamento operacional da frota e a potência instalada nas áreas designadas para recarga. A janela de tempo durante a qual será feita a recarga influenciará o valor da tarifa elétrica. Além disso, a estrutura de custos operacionais do sistema está relacionada à potência total instalada nas áreas destinadas à recarga, pois essa característica influencia a tensão da rede de distribuição conectada aos carregadores. Portanto, é importante ressaltar que quanto maior a potência instalada, maior será a tensão elétrica necessária para o consumo de energia, o que pode eventualmente demandar investimentos e adaptações na rede elétrica. Ressalta-se, portanto, que o projeto das instalações de recarga deve ser realizado em conjunto com a concessionária de energia.

Após ponderarem todos os fatores para determinar a abordagem mais eficaz para seu contexto específico, os planejadores devem tomar a decisão final sobre a estratégia de recarga a ser adotada.



## 4.5. IMPLEMENTAÇÃO E MONITORAMENTO DA ESTRATÉGIA

Após a seleção da infraestrutura de recarga e definição do plano estratégico, devem ser consideradas as seguintes ações:

- Elaboração do planejamento e cronograma de serviços:** o planejamento e um cronograma adequados são cruciais para garantir que o sistema de ônibus elétricos opere com eficiência e atenda às necessidades da comunidade. Esta etapa envolve otimizar rotas e alinhar aspectos operacionais para maximizar o desempenho do sistema.

  - Otimização das rotas para garantir que os ônibus tenham carga suficiente para realizar os serviços e retornar às garagens ou estações de recarga;
  - Planejamento dos impactos sobre aspectos operacionais, como horários de recarga e serviços, número de ônibus necessários e modelos financeiros; e
  - Alinhamento dos cronogramas de recarga aos períodos de pico de tráfego e localização das estações em locais próximos ao início e ao fim das rotas para otimizar a vida útil das baterias e a eficiência geral.
- Elaboração do projeto de engenharia para as áreas de recarga:** esta etapa garante que toda a infraestrutura atenda aos requisitos do sistema e inclua os ajustes e preparativos necessários.

  - Validação da infraestrutura no local para ver se atende às necessidades do sistema;
  - Previsão dos requisitos de infraestrutura e garagens em contratos, incluindo a responsabilidade de modernização de garagens de ônibus; e
  - Garantia de sistemas de drenagem eficientes para evitar alagamentos e proteger os equipamentos de recarga e os componentes elétricos dos ônibus.
- Identificação e monitoramento de indicadores de dados:** coletar e analisar dados é essencial para otimizar o sistema de ônibus elétricos e tomar decisões fundamentadas. Esta etapa se concentra na criação de uma estrutura de monitoramento robusta para rastrear indicadores-chave de desempenho e métricas operacionais.

  - Coleta e monitoramento de dados sobre características das rotas, desempenho de veículos e equipamentos, ajustes de planejamento de serviços, perspectiva de usuários e condutores, desempenho de baterias e carregadores, custos e outros fatores;
  - Monitoramento durante as fases-piloto para otimizar os cronogramas das rotas e os custos operacionais, incluindo condutores, construção, manutenção e eletricidade;
  - Coleta de dados sobre tecnologias de ônibus elétricos e a diesel para permitir uma avaliação comparativa entre elas e dar suporte à otimização; e
  - Uso dos dados quantitativos e qualitativos coletados para desenvolver uma estratégia de comunicação abrangente.

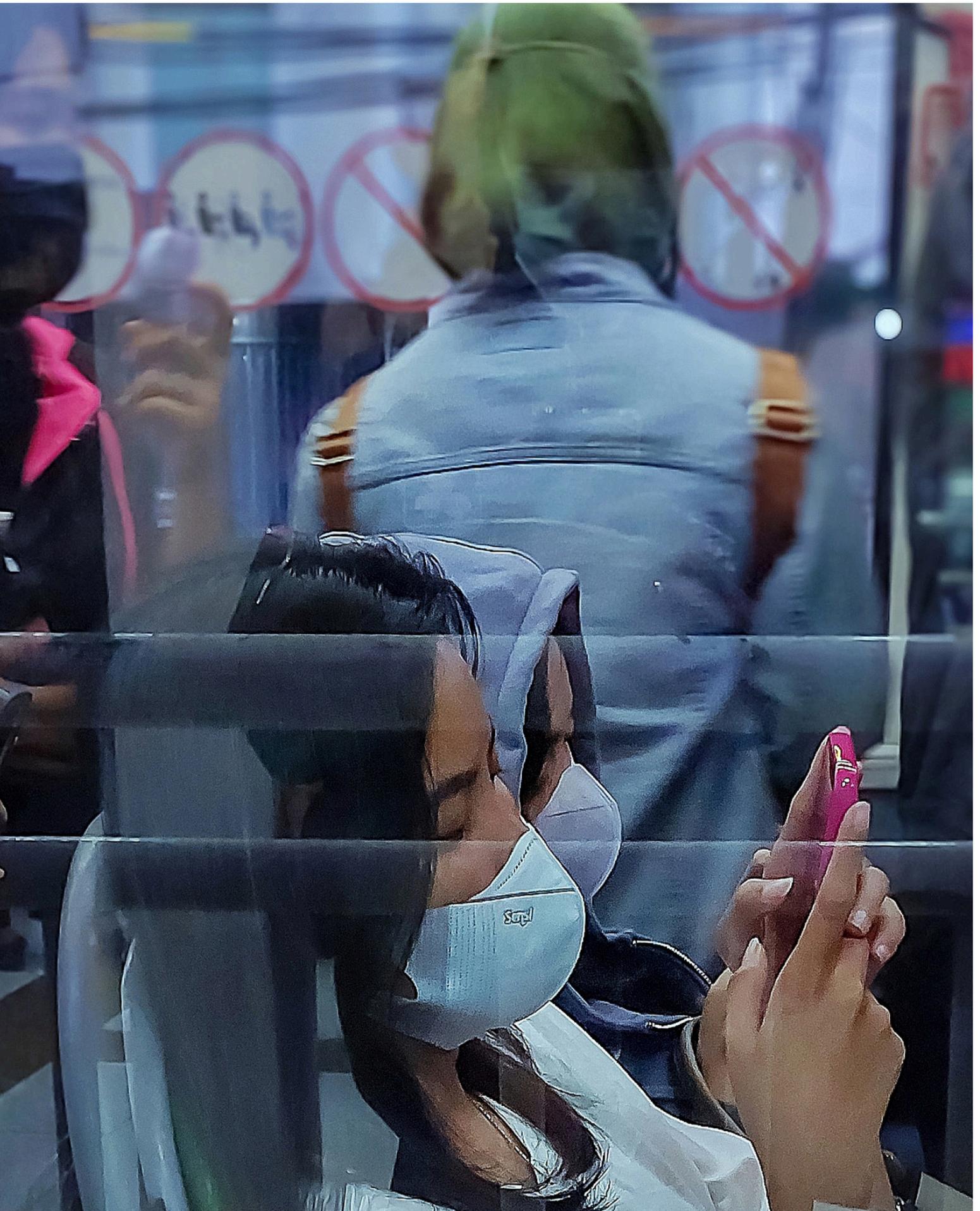
- **Oferta de capacitação técnica:** o treinamento técnico é essencial para garantir que todas as partes interessadas, incluindo planejadores, operadores, condutores e mecânicos, estejam bem preparados para gerenciar e operar o sistema de ônibus elétricos com eficiência. Esta etapa inclui o planejamento e realização de sessões regulares de treinamento.
  - Planejamento de treinamento técnico regular e obrigatório para planejadores, operadores, condutores e mecânicos;
  - Foco no impacto da estratégia de recarga e do comportamento dos condutores na eficiência dos veículos e na vida útil das baterias;
  - Garantia de que gerentes e operadores estejam capacitados para usar, monitorar e supervisionar o sistema de forma eficiente, gerenciando novos equipamentos e tecnologias específicas; e
  - Capacitação dos condutores sobre como prolongar a vida útil da bateria por meio de métodos de direção adequados, como, por exemplo, a frenagem regenerativa.
- **Desenvolvimento de uma estratégia de comunicação externa:** uma estratégia de comunicação eficaz é fundamental para o engajamento das partes interessadas, o aumento da conscientização e a obtenção de apoio para o projeto de ônibus elétricos. Esta etapa envolve o planejamento e a execução de ações de comunicação para destacar os benefícios e o progresso do projeto.
  - Uso de todos os dados e informações coletados para informar a comunidade sobre o projeto e, assim, impulsionar a agenda de descarbonização, aumentar a conscientização e mobilizar públicos-alvo específicos; e
  - Garantia de maior receptividade local e demonstração do comprometimento da cidade para melhorar a qualidade do transporte público e do ar e reduzir as emissões de gases de efeito estufa.
- **Planejamento de reutilização ou reciclagem de baterias:** o planejamento para o fim da vida útil das baterias de ônibus elétricos é essencial para minimizar os impactos ambientais e financeiros. Esta etapa envolve o desenvolvimento de estratégias para a reutilização ou reciclagem de baterias de forma a garantir práticas sustentáveis.
  - Planejamento adequado da reutilização ou reciclagem da bateria após a vida útil do ônibus elétrico a fim de minimizar os impactos ambientais e financeiros.
- **Promoção de uma rede mais equitativa:** a implementação de ônibus elétricos oferece uma oportunidade única para as cidades e países repensarem sua mobilidade urbana, reduzirem estigmas associados ao transporte em ônibus e promoverem justiça e equidade ambiental. Esta etapa se concentra na integração dessas considerações ao projeto de eletrificação para maximizar os benefícios sociais.
  - Priorização de projetos de eletrificação nas rotas mais demandadas para beneficiar populações marginalizadas;
  - Promoção de planejamento participativo para garantir que as mudanças estejam alinhadas às necessidades do usuário e obtenham apoio da comunidade; e
  - Promoção de um espaço viário mais equitativo e integrado, buscando justiça e equidade ambiental.

A implantação bem-sucedida de um sistema de ônibus elétricos exige novas ideias, maior comprometimento e uma visão compartilhada entre as partes interessadas. Seguindo esses passos, os planejadores podem implementar efetivamente estratégias de recarga que contribuam para o sucesso e a sustentabilidade dos ônibus elétricos no longo prazo. Essa abordagem holística garante que as cidades não apenas satisfaçam suas necessidades de transporte, mas também melhorem a qualidade de vida em geral, promovendo um futuro em que o transporte público seja um elemento-chave de cidades sustentáveis e equitativas.



# REFERÊNCIAS

- ADB (2024). *People's Republic of China: Shandong Spring City Green Modern Trolley Bus Demonstration Project*. Disponível em: <https://www.adb.org/projects/50010-002/main>
- An, K., Jing, W., & Kim, I. (2020). *Battery-swapping facility planning for electric buses with local charging systems*. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1573939>
- Anker (2023). *AC vs DC power: The ultimate guide to electrical currents*. Disponível em: <https://www.anker.com/blogs/ac-power/ac-vs-dc-power-the-ultimate-guide-to-electrical-currents>
- Argonne National Laboratory (2021). *Breakthrough research makes battery recycling more economical*. Disponível em: <https://www.anl.gov/article/breakthrough-research-makes-battery-recycling-more-economical>
- ATY (2024). *Agencia de Transporte de Yucatán*. Disponível em: <https://transporteyucatan.org.mx/ietram>.
- ATY (2024). *IE-Tram Carga De Las Unidades*. Disponível em: <https://transporteyucatan.org.mx/ietram/carga-unidades>.
- Bartłomiejczyk, M. (2017). *Practical application of in-motion charging: Trolleybuses service on bus lines*. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7967239>.
- Bartłomiejczyk, M., & Połom, M. (2021). *Sustainable use of the catenary by trolleybuses with auxiliary power sources on the example of Gdynia*. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2412-3811/6/4/61>.
- Basma, H., et al. (2022). *Evaluation of the techno-economic performance of battery electric buses: Case study of a bus line in Paris*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0739885922000294>.
- Battery University (2021). *Types of lithium-iron*. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>.
- Bloomberg New Energy Finance (2018). *Electric buses in cities—driving towards cleaner air and lower CO<sub>2</sub>*. Disponível em: [https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Electric-Buses-in-Cities-Driving-Toward-Cleaner-Air-and-Lower-CO2?language=en\\_US](https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Electric-Buses-in-Cities-Driving-Toward-Cleaner-Air-and-Lower-CO2?language=en_US).
- Bloomberg New Energy Finance (2021). *Battery pack prices fall to an average of \$132/kWh, but rising commodity prices start to bite*. Disponível em: <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-a-verage-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>.
- BID; MDR (2022). *Guia de eletromobilidade. Orientações para estruturação de projetos no transporte coletivo por ônibus. Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) and Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). Supported by WRI*. Disponível em: [https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/Guia\\_Eletromobilidade.pdf](https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/Guia_Eletromobilidade.pdf).
- Build Your Dreams (2024). *12m e-bus model*. Disponível em: <https://bydeurope.com/pdp-bus-model-12>.
- CFF (2020). *Final Report C40 Cities Finance Facility*. Disponível em: <https://cff-prod.s3.amazonaws.com/storage/files/iK2dLmNC6aSSVWEZ2fyMefqSPkQhiFahNhQBiV5.pdf>.



- CFF (2022). *Depot Electrification for Zero-Emission Bus Systems*. Disponível em: <https://cff-prod.s3.amazonaws.com/storage/files/ntxVux2cwtL1ktfVHHhAa3fR4GMmg627CiWjtM2O.pdf>.
- ChargeSim (2024). *What does the State of Charge really mean?* Disponível em: <https://www.chargesim.com/blog/what-does-the-state-of-charge-really-mean>.
- China Buses (2015). *Zhongtong double-source electric trolley bus highly welcomed in Jinan*. Disponível em: <https://m.chinabuses.org/news/7841.html>.
- Congressional Research Service (2022). *Critical Minerals in Electric Vehicle Batteries*. Disponível em: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R47227>.
- DKI Jakarta Province Legal Documentation and Information Network (2022). *Governor's Decree Number 1053 of 2022*. Disponível em: [https://jdih-jakarta-go-id.translate.goog/dokumen/detail/5368?\\_x\\_tr\\_sl=id&\\_x\\_tr\\_tl=en&\\_x\\_tr\\_hl=en&\\_x\\_tr\\_pto=sc](https://jdih-jakarta-go-id.translate.goog/dokumen/detail/5368?_x_tr_sl=id&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=en&_x_tr_pto=sc).
- Earth.org (2023). *The Environmental Impact of Battery Production for Electric Vehicles*. Disponível em: <https://earth.org/environmental-impact-of-battery-production/>.
- En:former (2023). *Electric bus batteries are given a second life as energy stores*. Disponível em: <https://www.en-former.com/en/electric-bus-batteries-are-given-a-second-life-as-energy-stores/>.
- EU Urban Mobility Observatory (2024). *Tallinn investing in electrifying its trolleybus network as part of its SUMP*. Disponível em: [https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/news-events/news/tallinn-investing-electrifying-its-trolleybus-network-part-its-sump-2024-03-01\\_en](https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/news-events/news/tallinn-investing-electrifying-its-trolleybus-network-part-its-sump-2024-03-01_en).
- Eudy, J. (2017). *Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results: Second Report*. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67698.pdf>.
- European Union (2014). *Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure*. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014L0094>.
- Fastmarkets (2023). *LFP batteries extend dominance over NCM batteries in China*. Disponível em: <https://www.fastmarkets.com/insights/lfp-batteries-extend-dominance-over-ncm-batteries-china/>.
- Federal Batteries (2020). *What is depth of discharge and why is it so important?* Disponível em: <https://federalbatteries.com.au/news/what-depth-discharge-and-why-it-so-important>.
- Forbes (2020). *Ever-cheaper batteries bring cost of electric cars closer to gas guzzlers*. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/mikescott/2020/12/18/ever-cheaper-batteries-bring-cost-of-electric-cars-closer-to-gas-guzzlers/?sh=ab1647d73c17>.
- Garche, J., et al. (2015). *Lead-acid batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S09781782423775000054>.
- Geuss, M. (2019). *Electric car batteries might be worth recycling, but bus batteries aren't yet*. Disponível em: <https://arstechnica.com/science/2019/02/electric-car-batteries-might-be-worth-recycling-but-bus-batteries-arent-yet/>.
- GME Recycling (2024). *What is the difference between lead-acid and lithium batteries?* Disponível em: <https://www.gme-recycling.com/what-is-the-difference-between-lead-acid-and-lithium-batteries/>.
- Gobierno de la Ciudad de México (2022). *Nuevas unidades de Trolebús y RTP*. Disponível em: <https://gobierno.cdmx.gob.mx/noticias/nuevos-trolebuses-y-rtp/>.
- Government of India (2020). *National Electric Mobility Mission Plan. Press Information Bureau. Ministry of Heavy Industries & Public Enterprises*. Disponível em: <https://pib.gov.in/newsite/printrelease.aspx?relid=116719#:~:text=Government%20of%20India%20launched%20the,on%20year%20from%202020%20onwards>.

Government of India (2023). *Guidelines for PM-e-bus Sewa Part I. Ministry of Housing and Urban Affairs*. Disponível em: <https://mohua.gov.in/upload/uploadfiles/files/PM-eBus-Sewa-Guidelines-Part-I.pdf>.

Guschinsky, N., et al. (2023). *Cost-minimizing decisions on equipment and charging schedule for electric buses in a single depot*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1366554523003253>.

Harding Energy, Inc (2024). *Rechargeable & Long Cycle Life*. Disponível em: <https://www.hardingenergy.com/nickel/>.

Heydari, S., et al. (2020). *Estimating traffic contribution to particulate matter concentration in urban areas*. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7273192/>.

Hitachi Energy (2018). *Grid-eMotion Flash: Fast-charging e-bus solution in Geneva, Switzerland*. Disponível em: <https://www.hitachienergy.com/us/en/about-us/customer-success-stories/tosa-flash-charging-e-bus-geneva-switzerland>.

Huang, D. (2023). *A robust coordinated charging scheduling approach for hybrid electric bus charging systems*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920923003528>.

ICCT (2023). *Scaling up reuse and recycling of electric vehicle batteries: Assessing challenges and policy approaches*. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/recycling-electric-vehicle-batteries-feb-23.pdf>.

IEA (2021). *Comparative life-cycle greenhouse gas emissions of a mid-size BEV and ICE vehicle*. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/comparative-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-a-mid-size-bev-and-ice-vehicle>.

ITDP; UC Davis (2021a). *The Compact City Scenario—Electrified. The Only Way to 1.5°C*. Disponível em: [https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2021/12/EN\\_Compact-Cities-REPORT\\_SINGLEPAGE-1.pdf](https://www.itdp.org/wp-content/uploads/2021/12/EN_Compact-Cities-REPORT_SINGLEPAGE-1.pdf).

ITDP (2021b). *From Santiago to Shenzhen: How Electric Buses Are Moving Cities*. Disponível em: <https://www.itdp.org/publication/from-santiago-to-shenzhen--how-electric-buses-are-moving-cities/>.

ITDP (2023). *E-buses: On the Road to Lowering Emissions and Improving Public Transport*. Disponível em: <https://itdp.org/2023/12/01/e-buses-on-the-road-to-lowering-emissions-and-improving-public-transport/>.

ITDP Africa (2024). *Feasibility Study on Scaling Up E-Buses in Kampala*. Ainda não disponível.

ITDP Brasil; Logit (2022a). *Electric Bus Financing Project for Belo Horizonte*. 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-ingles.pdf>.

ITDP Brasil; Logit (2022b). *Technical Reference Manual for Electromobility in Brazilian cities*. 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-ingles.pdf>.

ITDP India (2022). *Status of Electric Buses in India*. Disponível em: <https://www.itdp.in/wp-content/uploads/2022/10/Status-of-E-buses-in-India.pdf>.

ITDP India (2023). *E-Bus Basics. A Guide for Cities to Transition to Electric Buses*. Disponível em: <https://www.itdp.in/wp-content/uploads/2023/07/E-Bus-Basics.pdf>.

ITDP Indonesia & TUMI (2023). *TUMI E-Bus Mission: Supporting and Building the Capacity in Monitoring and Evaluating Pilot E-Bus Implementations*. Disponível em: [https://itdp-indonesia.org/wp-content/uploads/2023/07/Final\\_TUMI-E-bus-Mission-Jakarta-by-ITDP.pdf](https://itdp-indonesia.org/wp-content/uploads/2023/07/Final_TUMI-E-bus-Mission-Jakarta-by-ITDP.pdf).

Islameka, M., et al. (2019). *Modelling of regenerative braking system for electric bus*. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1402/4/044054>.

Jefatura De Gobierno de la Ciudad de México (2020). *Encabeza Jefa de Gobierno salida de pruebas preoperativas de 80 nuevos trolebuses*. Disponible em: <https://jefaturadegobierno.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/encabeza-jefa-de-gobierno-salida-de-pruebas-preoperativas-de-80-nuevos-trolebuses>.

Johnson, C., et al. (2019). *Financial Analysis of Battery Electric Transit Buses*. Disponible em: <https://www.worldtransitresearch.info/research/8100/>.

Kara, O. N. (2019). *Environmental and economic sustainability of zero-emission bus transport*. Disponible em: <http://essay.utwente.nl/78088>.

Kiepe Electric (2023). *San Francisco to prototype a major battery upgrade for enhanced in motion charging capability on electric trolley buses*. Disponible em: <https://kiepe-group.com/en/news>.

Klein, E., & Lantz, M. (2019). *Evaluation of Electric Bus Adoption in Sweden*. Chalmers University of Technology. Disponible em: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/e826ef31-d5da-4f10-9d35-f43c95bc3b15/content>.

Kostopoulos, E., et al. (2020). *Real-world study for the optimal charging of electric vehicles*. Disponible em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719310911>.

Lajunen, A. (2018). *Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods*. Disponible em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617323594#tbl5a>.

Landgeist (2021). *Trolleybus systems*. Disponible em: <https://landgeist.com/2021/07/04/trolleybus-systems/>.

Li, J. (2016). *Battery-electric bus developments and operations: A review*. Disponible em: <https://doi.org/10.1080/15568318.2013.872737>.

Liu, L., et al. (2019). *Impact of Time-Varying Passenger Loading on Conventional and Electrified Transit Bus Energy Consumption*. Disponible em: [https://afdc.energy.gov/files/u/publication/time-varying\\_passenger\\_loading\\_impact.pdf](https://afdc.energy.gov/files/u/publication/time-varying_passenger_loading_impact.pdf).

López, C., et al. (2019). *On the environmental and social sustainability of technological innovations in urban bus transport: The EU case*. Disponible em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/5/1413>.

MIT Climate Portal. (2022). *How much CO<sub>2</sub> is emitted by manufacturing batteries?* Available at: <https://climate.mit.edu/ask-mit/how-much-co-2-emitted-manufacturing-batteries>.

Mueller, S., et al. (2017). *Analysing the influence of driver behaviour and tuning measures on battery aging and residual value of electric vehicles*. Disponible em: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1403367/document.pdf>.

Nikkei Asia (2023). *BYD challenges CATL's EV battery crown in China*. Disponible em: <https://asia.nikkei.com/Spotlight/Electric-cars-in-China/BYD-challenges-CATL-s-EV-battery-crown-in-China>.

Disponible em

NREL (2021). *Electrifying Transit: A Guidebook for Battery Electric Buses*. USAID. Disponible em: <https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf>.

Olsson, O., et al. (2016). *Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems*. Disponible em: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1159796&dswid=6239>.

Pedestrian Observations (2018). *In-motion charging*. Disponible em: <https://pedestrianobservations.com/2018/12/09/in-motion-charging/>.

Qiang, L., et al. (2008). *Advanced EMS and its trial operation in Shanghai power system*. Disponible em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11431-008-0010-3>.

Randhahn, A. and Knotte, T. (2020). *Deployment of charging infrastructure for battery electric buses*. Disponible em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38028-1\\_12](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38028-1_12).

- Rogge, M.; Wollny, S.; Sauer D. U. (2015). *Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport—a feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements*. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/4587>.
- Sadrani, et al. (2023). *Charging strategy selection for electric bus systems: A multi-criteria decision-making approach*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923007791>.
- São Paulo (2009). *Lei do clima de São Paulo*. Disponível em: <https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/lei-ordinaria/2018/1681/16802/lei-ordinaria-n-16802-2018-da-nova-redacao-art-50-da-lei-n-14933-2009-que-dispoe-sobre-o-uso-de-fontes-motrices-de-energia-menos-poluentes-e-menos-geradoras-de-gases-do-efeito-estufa-na-frota-de-transporte-coletivo-urbano-do-municipio-de-sao-paulo-e-da-outras-providencias>.
- Science Direct (2023). *Advances in electric two-wheeler technologies*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nickel-metal-hydride>.
- Secretaria de Mobilidade de Prefeitura de Salvador (2012). *Plano de Mobilidade Urbana Sustentável em Salvador*. Disponível em: <http://planmob.salvador.ba.gov.br/>.
- Solution 1 (2023). *Battery-swapping technology: A comparison of different approaches and applications*. Disponível em: <https://solution1.com.tw/battery-swapping-technology-a-comparison-of-different-approaches-and-applications/>.
- Spirii, (2024). *Electric bus charging: Understanding sustainable public transport*. Disponível em: <https://www.spirii.com/en/resources/blog/electric-bus-charging>.
- Suh, I.-S., et al. (2015). *Design and experimental analysis of an efficient HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system on an electric bus with dynamic on-road wireless charging*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214014054>.
- Sustainable Bus (2019). *Trolleybuses return to Prague 47 years later*. Disponível em: <https://www.sustainable-bus.com/trolleybus-tramway/trolleybuses-return-to-prague-47-years-later/>.
- Sustainable Bus (2024). *Prague inaugurates (on March 6) trolleybus line to and from airport*. Disponível em: <https://www.sustainable-bus.com/trolleybus-tramway/prague-inaugurates-on-march-6-trolleybus-line-to-and-from-airport/>.
- The Times of India (2020). *Kolkata: Solar panels on depot roofs to charge e-buses*. Disponível em: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/kolkata/solar-panels-on-depotroofs-to-charge-e-buses/articleshow/74016804.cms>.
- The Verge (2022). *Toyota will recycle electric vehicle batteries with Tesla co-founder's project*. Disponível em: <https://www.theverge.com/2022/6/21/23177039/toyota-redwood-materials-ev-battery-recycling-partnership-prius>.
- Thomas Built Buses (2019). *Determining fuel costs*. Disponível em: <https://thomasbuiltbuses.com/resources/articles/determining-fuel-costs/>.
- UC Davis (2023). *Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries in Lower- and Middle-Income Countries: Life Cycle Impacts and Issues*. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/report/electric-vehicle-lithium-ion-batteries-lower-and-middle-income-countries>.
- UITP (2019a). *The impact of electric buses in urban life*. Disponível em: <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/06/UITP-policybrief-June2019-V6-WEB-OK.pdf>.
- UITP (2019b). *In motion charging: Innovative trolleybus*. Disponível em: <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2021/01/Knowledge-Brief-Infrastructure-May-2019-FINAL.pdf>.
- UITP (2022). *Electric Bus Performance Evaluation. Lessons from Six Indian Cities*. Disponível em: <https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2022/11/Action-Points-Electric-Bus-Performance-Evaluation-OK.pdf>.
- United Nations (2020). *Commodities at a glance: Special issue on strategic battery raw materials*. Disponível em: [https://unctad.org/system/files/official-document/ditcom2019d5\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ditcom2019d5_en.pdf).

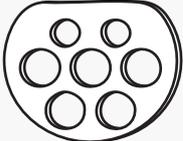
- Urban Transport Magazine (2021). *Bus electrification: A comparison of capital costs*. Disponível em: <https://www.urban-transport-magazine.com/en/bus-electrification-a-comparison-of-capital-costs/>.
- U.S. Department of Transportation (2023). *Electric bus basics*. Disponível em: <https://www.transportation.gov/rural/electric-vehicles/ev-toolkit/electric-bus-basics>.
- UK Pact (2023). *Building a Regulatory and Financial Basis for Transjakarta First Phase E-bus Deployment*. Disponível em: <https://itdp-indonesia.org/wp-content/uploads/2023/05/4.7.-Transjakarta-First-Phase-E-Bus-Deployment-Business-Case.pdf>.
- Urban Transport Magazine (2023). *Trolleybus, light rail, and cableway in Mexico City: The transformation of the STE*. Disponível em: <https://www.urban-transport-magazine.com/en/trolleybus-light-rail-and-cableway-in-mexico-city-the-new-ste/>.
- ViriCiti (2021). *Opportunity charging for e-buses: Insights and tips for optimizing charging behavior*. Disponível em: <https://www.sustainable-bus.com/wp-content/uploads/2021/06/Opportunity-charging-report.pdf>.
- Volvo Buses (2023). *How LCA helps to understand the true environmental impact of electric buses*. Disponível em: <https://www.volvobuses.com/en/news-stories/insights/lca-for-electric-buses.html>.
- Vorágine (2019). *Gobierno capitalino anuncia compra de 63 trolebuses eficientes de energía con inversión de 453 mdp*. Available at: <https://voragine.com.mx/2019/09/13/gobierno-capitalino-anuncia-compra-de-63-trolebuses-eficientes-de-energia-con-inversion-de-453-mdp/>.
- Wang, Y., & Lei, M. (2023). *An electric bus battery swapping station location method based on global optimized peak traffic flow*. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2032-6653/14/10/280>.
- WHO (2022). *Ambient (outdoor) air pollution*. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
- World Bank (2019). *Green Your Bus Ride: Clean Buses in Latin America*. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/410331548180859451/pdf/133929-WP-PUBLIC-P-164403-Summary-Report-Green-Your-Bus-Ride.pdf>.
- World Bank (2020). *Latin America Clean Bus in LAC: Lessons from Chile's Experience with E-Mobility*. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/34435?show=full>.
- WRI (2023). *Overcoming the operational challenges of electric buses: Lessons learnt from China*. Disponível em: <https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2023/06/TUMIVolt-Charging-Station-Webinar9-Monitoring-EBus-Operations.pdf>.
- WU (APTA), n.d. *Lessons Learned from Operating Battery Electric Buses in the Real World* (presentation). Disponível em: [https://www.apta.com/wp-content/uploads/SMW10\\_Lessons-Learned-from-BEB\\_Tina\\_Wu.pdf](https://www.apta.com/wp-content/uploads/SMW10_Lessons-Learned-from-BEB_Tina_Wu.pdf).
- ZEBRA (2020). *From pilots to scale—lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile. Zero Emission Bus Rapid-Deployment Accelerator*. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-buscase-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf>.
- ZEBRA (2022a). *Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus na cidade de São Paulo*. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/11/Sao-Paulo-ZEBRA-A4-v9-may22.pdf>.
- ZEBRA (2022b). *Operational analysis of battery electric buses in São Paulo. Zero Emission Bus Rapid-Deployment Accelerator*. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/Operational-analyis-of-battery-electric-buses-in-Sao-Paulo-final-feb2023.pdf>.
- ZeEUS. (2017). *ZeEUS eBus Report #2. An Updated Overview of Electric Buses in Europe*. Disponível em: <https://zeus.eu/uploads/publications/documents/zeus-report2017-2018-final.pdf>.
- Zhang, L., Wang, S., and Qu, X. (2021). *Optimal electric bus fleet scheduling considering battery degradation and non-linear charging profile*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136655452100209X#b0220>.

# APÊNDICE



Ônibus elétrico do Metrobus, o sistema de BRT da Cidade do México, México.  
**FONTE:** Azul Carazo

**TABELA 7. MODELOS DE CARREGADORES PLUG-IN**

Modelos de plugues		Velocidade de recarga	Países e regiões
Tipo 1 (J1772)		Corrente alternada (CA) de baixa velocidade	Japão, América do Norte e Coreia do Sul
Tipo 2 (Mennekes)		Corrente alternada (CA) de baixa velocidade	Europa, Nova Zelândia, América Latina e Indonésia
CHAdEMO		Corrente contínua (CC) de alta velocidade	Japão, Europa, Indonésia, América do Norte e Coreia do Sul
Supercharger Tesla		Corrente contínua (CC) de alta velocidade	Japão, América do Norte e Coreia do Sul
GB/T		Dependendo do modelo, pode ser corrente alternada (CA) de baixa velocidade, ou corrente contínua (CC) de alta velocidade	China
Combo CCS Tipo 1		Corrente contínua (CC) de alta velocidade	América do Sul, Europa, África do Sul, Índia, Indonésia e Austrália
Combo CCS Tipo 2		Corrente contínua (CC) de alta velocidade	América do Sul, América do Norte, Coreia do Sul, Taiwan e China

FONTE: BID e MDR, 2022; CFF, 2022; complementado por informações dos escritórios regionais do ITDP.



**INSTITUTO DE POLÍTICAS  
DE TRANSPORTE E  
DESENVOLVIMENTO**

[brasil@itdp.org](mailto:brasil@itdp.org)  
[www.itdpbrasil.org](http://www.itdpbrasil.org)

