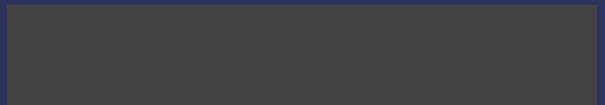


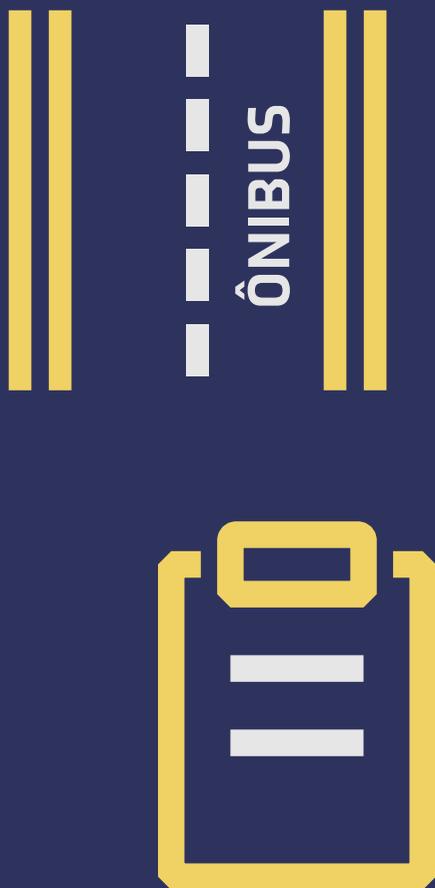
GUIA DE ELETROMOBILIDADE

Orientações para
estruturação de
projetos no transporte
coletivo por ônibus



MOBILIDADE
URBANA DE
BAIXO CARBONO





GUIA DE ELETROMOBILIDADE

Orientações para
estruturação de
projetos no transporte
coletivo por ônibus



MOBILIDADE
URBANA DE
BAIXO CARBONO

FICHA INSTITUCIONAL

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Presidente da República

Jair Messias Bolsonaro

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL

Ministro do Desenvolvimento Regional

Rogério Simonetti Marinho

Secretário-Executivo

Daniel de Oliveira Duarte Ferreira

SECRETARIA NACIONAL DE MOBILIDADE E DESENVOLVIMENTO REGIONAL E URBANO

Secretário Nacional de Mobilidade e Desenvolvimento
Regional e Urbano

Tiago Pontes Queiroz

Diretor do Departamento de Projetos de Mobilidade e
Serviços Urbanos

Maxwell Borges de Moura Vieira

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO

Representante do BID no Brasil

Morgan Doyle

Especialista Líder em Transporte

Karisa Maia Ribeiro

FICHA TÉCNICA

COORDENAÇÃO-GERAL

Fernando Araldi – MDR

Karisa Maia Ribeiro – BID

Raul Rodriguez Molina – BID

Carlos Mojica – BID

ELABORAÇÃO DE CONTEÚDO

Cristina Albuquerque – WRI Brasil

Eduardo Siqueira – WRI Brasil

Matheus Jotz – WRI Brasil

Virginia Bergamaschi Tavares – WRI Brasil

REVISÃO TÉCNICA

Fernando Araldi – MDR

Karisa Maia Ribeiro – BID

Arthur Oliveira – BID

Roberta Faria – BID

COLABORADORES

Pablo Guerrero – BID

Marcelino Madrigal – BID

Arthur Oliveira – BID

Roberta Faria – BID

Yaeko Yamashita – BID

Filipe Souza – BID

Giovanna Alelvan – BID

Lorena Borges – BID

Maria Emília Silva – BID

REVISÃO ORTOGRÁFICA E GRAMATICAL

Itamar Melo

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

DUO Design

FOTO DA CAPA

Shutterstock

APRESENTAÇÃO

O crescimento acelerado das cidades impõe grandes desafios à mobilidade urbana, pois se refere aos deslocamentos de bens, cargas e pessoas, sendo um dos atributos das cidades. A má distribuição do espaço público, em decorrência do uso intensivo do transporte individual motorizado, resulta em sistemas de mobilidade urbana ineficientes e que contribuem para a manutenção das desigualdades socioespaciais.

ESSE CENÁRIO ATINGE NEGATIVAMENTE A RENDA DA POPULAÇÃO, UMA VEZ QUE O TRANSPORTE TEM IMPORTANTE PAPEL NO DESENVOLVIMENTO URBANO, PERMITINDO ÀS PESSOAS O ACESSO À OPORTUNIDADE DE EMPREGO, ATIVIDADES, BENS E SERVIÇOS ESSENCIAIS.

Da mesma forma, o transporte impacta diretamente no agravamento das mudanças climáticas, com o aumento das emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE) e poluentes locais, ocasionando efeitos negativos em questões socioambientais e de saúde pública, diminuindo a qualidade de vida da população, entre outras externalidades.

Nessas circunstâncias, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) – Lei nº 12.587/2012 – em seus princípios, objetivos e diretrizes, direciona as cidades para um desenvolvimento urbano mais sustentável, reduzindo as desigualdades sociais e melhorando as condições urbanas de mobilidade e acessibilidade. A PNMU prevê mecanismos para priorização do transporte público e dos modos ativos, desestimulando o transporte motorizado individual e promovendo “o desenvolvimento sustentável com a mitigação dos custos ambientais e socioeconômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas nas cidades”.

Assim, o Ministério do Desenvolvimento Regional, por meio da Secretaria Nacional de Mobilidade e Serviços Urbanos (SMDRU), em conjunto com o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), com apoio do Global Environment Facility (GEF), por meio do Programa de Mobilidade Urbana de

Baixo Carbono em Grandes Cidades, desenvolveu diversos estudos e trabalhos para servirem como instrumento de orientação e apoio ao poder público no sentido de promover aspectos essenciais da mobilidade urbana no Brasil. O objetivo central dos estudos propõe fomentar uma mobilidade urbana mais sustentável, em consonância com os preceitos da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) e, como consequência, obter os benefícios socioeconômicos decorrentes da sua implantação, como a redução de GEE e poluentes locais e a efetiva melhoria da qualidade de vida da população.

ESTE GUIA TEM COMO OBJETIVO PRINCIPAL SER UM INSTRUMENTO DE CAPACITAÇÃO TÉCNICA PARA ORIENTAR PROCESSOS DE CONCEPÇÃO, ESTRUTURAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE PROJETOS DE ELETROMOBILIDADE NO TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS EM CIDADES BRASILEIRAS.

O guia tem como público-alvo gestores e técnicos da área de mobilidade urbana. Como objetivos específicos, podem-se destacar:

- fornecer informações técnicas de ônibus elétricos;
- apresentar orientações e diretrizes para o planejamento e a implementação da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus;
- identificar e fornecer informações sobre estudos de caso e boas práticas nacionais e internacionais de projetos de eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus.

O Guia de Eletromobilidade está estruturado em três capítulos.



INTRODUÇÃO

Apresentação de um panorama da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus, dos benefícios da eletromobilidade e dos desafios e oportunidades do setor.



CARACTERIZAÇÃO DA ELETROMOBILIDADE NO TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS

Discussão das principais questões tecnológicas que permeiam a eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus, incluindo definições e características técnicas dos diferentes tipos de veículos e baterias, informações sobre a infraestrutura de recarga e aspectos operacionais.



PLANEJAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO

Apresentação das principais etapas de planejamento e implementação de projetos de eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus.

SUMÁRIO



1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Panorama da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus	17
<hr/>	
1.2. Benefícios da eletromobilidade	18
1.2.1. Qualidade do ar e saúde	18
1.2.2. Desenvolvimento sustentável	19
1.2.3. Qualificação do transporte coletivo	19
<hr/>	
1.3. Desafios e oportunidades da eletromobilidade	20
1.3.1. Desafios da eletromobilidade	20
1.3.1.1. Desafios tecnológicos	20
1.3.1.2. Desafios financeiros	21
1.3.1.3. Desafios institucionais	21
BOX 1 Principais problemas dos contratos atuais	22
1.3.2. Oportunidades da eletromobilidade	24
1.3.2.1. Desenvolvimento de estudos e pesquisas	24
1.3.2.2. Formulação de novos modelos de negócio	25
1.3.2.3. Indústria e mão-de-obra	25
1.3.2.4. Desenvolvimento de políticas de incentivo à eletromobilidade	25
<hr/>	
2. CARACTERIZAÇÃO DA ELETROMOBILIDADE NO TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS	26
2.1. Ônibus de tração elétrica	28
2.1.1. Trólebus	28
2.1.2. Ônibus híbridos	29
2.1.2.1. Híbridos convencionais	30
2.1.2.2. Híbridos <i>plug-in</i>	31
2.1.3. Ônibus elétricos a bateria	31
<hr/>	
2.2. Baterias	34
2.2.1. Aspectos gerais	34
2.2.2. Baterias de íons de lítio	35
2.2.3. Disposição e reciclagem	37
<hr/>	
2.3. Infraestrutura de recarga	39
2.3.1. Sistemas de recarga	39
2.3.1.1. Recarga condutiva	39
2.3.1.2. Recarga indutiva	40
2.3.2. Estratégias de recarga	43
<hr/>	
ESTUDO DE CASO 1 ■ Londres, Inglaterra	44
<hr/>	
2.3.3. Impacto da eletromobilidade na rede de energia	46
<hr/>	
2.4. Aspectos operacionais	48
BOX 2 Avaliação do desempenho de ônibus elétricos em diferentes rotas	50

3. PLANEJAMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO	52
3.1. ETAPA 1: Preparação	54
3.1.1. Mobilização inicial	54
BOX 3 Formas de adoção da eletromobilidade	55
3.1.2. Mapeamento dos atores	56
3.1.3. Diagnóstico	56
3.1.3.1. Políticas locais	57
<hr/>	
ESTUDO DE CASO 2 ■ Shenzhen, China	58
3.1.3.2. Desafios e oportunidades	60
3.1.3.3. Sistema de transporte coletivo por ônibus e rede de energia	60
3.1.4. Estudo de pré-viabilidade	61
3.1.4.1. Benefícios	61
BOX 4 Avaliando os benefícios ambientais	62
3.1.4.2. Estudo de mercado	63
3.1.4.3. Escolha das rotas	64
3.1.4.4. Custo Total de Propriedade	65
BOX 5 Modelagem e simulação de rotas	66
BOX 6 Análise de Custo Total de Propriedade	68
3.1.5. Tomada de decisão	71
<hr/>	
3.2. ETAPA 2: Definição do escopo	72
3.2.1. Visão	72
3.2.2. Objetivos, metas e prazos	72
<hr/>	
ESTUDO DE CASO 3 ■ São Paulo, Brasil	74
<hr/>	
ESTUDO DE CASO 4 ■ Paris, França	76
<hr/>	
3.3. ETAPA 3: Elaboração	78
3.3.1. Processos gerenciais	78
3.3.1.1. Gerenciamento dos atores	78
3.3.1.2. Plano de trabalho e cronograma	79
3.3.1.3. Plano de comunicação	80
3.3.1.4. Mapeamento de riscos	80
3.3.2. Planejamento técnico e operacional	85
3.3.2.1. Veículos e baterias	85
BOX 7 Análise de cenários	86
3.3.2.2. Planejamento operacional	88
BOX 8 Planejando a operação	92
3.3.2.3. Infraestrutura de recarga	98
BOX 9 Planejando a infraestrutura	100
3.3.2.4. Plano de monitoramento	102
BOX 10 Desenvolvimento do plano de monitoramento	103
<hr/>	
ESTUDO DE CASO 5 ■ Condado de Los Angeles, Estados Unidos	104
3.3.2.5. Treinamento de equipes	106
3.3.2.6. Protocolos de testes	106

3.3.3. Modelos de negócio	108
3.3.3.1. Modelos de contratação e de aquisição	108
3.3.3.2. Custos	112
3.3.3.3. Fontes de recursos	112
3.3.3.4. Produtos financeiros	113
BOX 11 Linhas de financiamento	114
BOX 12 Títulos Verdes	115
ESTUDO DE CASO 6 ■ Santiago, Chile	118
3.3.3.5. Contratos e licitações	121
ESTUDO DE CASO 7 ■ Bogotá, Colômbia	122
<hr/>	
3.4. ETAPA 4: Execução	125
3.4.1. Início da operação	125
3.4.2. Lições aprendidas e sucessos	125
3.4.3. Expansão	126
<hr/>	
Referências	128
<hr/>	
Anexos	142
ANEXO 1. Tipos de carregadores	143
ANEXO 2. Diagnóstico do sistema de transporte coletivo por ônibus	144
ANEXO 3. Análise de emissões	148
ANEXO 4. Estudo de mercado	149
ANEXO 5. Protocolos de testes	151

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Estrutura do capítulo 2: caracterização da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus	27
FIGURA 2. Elementos do trólebus	28
FIGURA 3. Categorias dos ônibus híbridos	29
FIGURA 4. Configuração do sistema de propulsão híbrido	30
FIGURA 5. Configuração típica do sistema de propulsão elétrico	31
FIGURA 6. Características ambientais e de energia, econômicas/financeiras e operacionais	33
FIGURA 7. Resumo comparativo dos tipos de ônibus de tração elétrica	33
FIGURA 8. Esquema dos componentes e subcomponentes de uma bateria	34
FIGURA 9. Resumo comparativo dos sistemas de recarga	41
FIGURA 10. Estimativa de energia para verificação de impactos na rede elétrica	47
FIGURA 11. Estrutura do capítulo 3: planejamento e implementação do projeto	53
FIGURA 12. Atores envolvidos no projeto de eletromobilidade	56
FIGURA 13. Categorias do estudo de mercado	63
FIGURA 14. Exemplos de visão, objetivo e meta	73
FIGURA 15. Atividades e elementos para elaboração do projeto de eletromobilidade	78
FIGURA 16. Matriz de influência e de impacto dos grupos de atores	79
FIGURA 17. Matriz de probabilidade de ocorrência e impacto	82
FIGURA 18. Passos para execução do planejamento operacional	91
FIGURA 19. Principais elementos que devem estar preparados para início da operação	125

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. Aspectos de custos e vida útil das baterias	37
QUADRO 2. Possibilidades de segunda vida das baterias	38
QUADRO 3. Exemplos de desafios e oportunidades identificados no projeto de eletromobilidade	60
QUADRO 4. Categorias de riscos	81
QUADRO 5. Escala de probabilidade de ocorrência e impacto	81
QUADRO 6. Exemplo de lista de classificação dos riscos	82
QUADRO 7. Respostas para os riscos identificados no projeto de eletromobilidade	83
QUADRO 8. Exemplos de respostas e encaminhamentos para os riscos	84
QUADRO 9. Considerações para a infraestrutura de acordo com a estratégia de recarga	99
QUADRO 10. Tópicos para treinamentos de motoristas e equipes de recarga e de manutenção	106
QUADRO 11. Testes realizados nos ônibus elétricos	107
QUADRO 12. Possíveis atores responsáveis pelos componentes	109
QUADRO 13. Resumo das formas de aquisição dos veículos	111
QUADRO 14. Resumo de produtos financeiros	117
QUADRO 15. Contratos e pontos de atenção para os principais componentes da operação de ônibus elétricos	121

SIGLAS

BYD	Build Your Dreams
CA	Corrente alternada
CARB	California Air Resources Board
CC	Corrente contínua
CCS	<i>Combined Charging System</i> (sistema de carga combinada)
CO₂	Dióxido de carbono
CO_{2e}	Dióxido de carbono equivalente
COMFROTA-SP	Comitê Gestor do Programa de Acompanhamento da Substituição de Frota
DOE	Department of Energy (Departamento de Energia dos Estados Unidos)
GBP	<i>Green Bond Principles</i> (princípios para os Títulos Verdes)
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEF	Global Environment Facility
GLP	<i>Green Loan Principles</i> (princípios para empréstimos verdes)
GNV	Gás Natural Veicular
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GTFS	<i>General Transit Feed Specification</i>
IEC	International Electrotechnical Commission
kW	kilowatt
kWh	kilowatt-hora
LCO	Óxido de lítio cobalto
LFP	Fosfato de lítio ferro
LMO	Óxido de lítio manganês
LTO	Titanato de lítio
MP	Material particulado
NCA	Óxido de lítio níquel cobalto alumínio
NMC	Óxido de lítio níquel manganês cobalto
NOx	Óxidos de nitrogênio
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NTU	Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
PNME	Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica
PNMU	Política Nacional de Mobilidade Urbana
PPP	Parceria Público-Privada
RATP	Régie Autonome des Transports Parisiens
SGB	Sistema de Gerenciamento da Bateria
SITP	Sistema Integrado de Transporte Público
SMART	<i>Specific, Measurable, Achievable, Relevant e Time based</i> (em português: Específicas, Mensuráveis, Alcançáveis, Relevantes e Situadas no Tempo)
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i> (Custo Total de Propriedade)
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
VAUE	Valor Anual Uniforme Equivalente
VPL	Valor Presente Líquido
WRI	World Resources Institute
ZEBRA	<i>Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator</i>

TERMOS TÉCNICOS

A

AUTONOMIA:

É a distância percorrida pelo veículo considerando uma carga completa.

B

BLOCOS DE OPERAÇÃO:

São o conjunto de diversas alocações horárias de ônibus que compõem, em geral, uma linha de um sistema de transporte coletivo.

C

CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DA BATERIA:

Quantidade de energia armazenada na bateria do veículo, medida em kWh.

CONSUMO ENERGÉTICO:

Medida em kWh/km, é a quantidade de energia necessária para que o veículo percorra um quilômetro.

D

DEMANDA CONTRATADA:

Demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela distribuidora, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados em contrato, e que deve ser integralmente paga nas modalidades tarifárias binômias, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW). No caso de uma garagem com todas as recargas simultâneas (100% da potência instalada da garagem) em horário fora de ponta, a demanda ponta contratada poderia ser nula e a demanda fora de ponta seria a potência instalada total.

DENSIDADE DE ENERGIA:

É a relação entre a quantidade de energia e o volume, medida em Wh/l.

DISTÂNCIA MORTA PERCORRIDA:

Percurso percorrido para sair e chegar à garagem.

E

ESTADO DE CARGA:

É o nível de carga de uma bateria elétrica em relação à sua capacidade. As unidades de estado de carga são dadas em pontos percentuais (0% = vazio; 100% = cheio).

F

FRENAGEM REGENERATIVA:

A energia usada para frear ou desacelerar um veículo convencional é dissipada como calor no sistema de frenagem e perdida. Um veículo elétrico pode capturar a energia da frenagem e armazená-la no veículo. O motor de tração do veículo pode desenvolver um torque negativo que reverte o fluxo de potência, de modo que a energia cinética do veículo é convertida em potência mecânica negativa no eixo do rotor e posteriormente convertida em energia elétrica, usada para recarregar a bateria.

G

GASES DE EFEITO ESTUFA:

São gases que absorvem uma parte dos raios do sol e os redistribuem em forma de radiação na atmosfera. Podem ser emitidos por meio da combustão do diesel. Como exemplos, destacam-se: o dióxido de carbono (CO₂), o monóxido de carbono (CO), os óxidos nitrosos (NO_x) e os compostos orgânicos voláteis (VOCs).

H

HORÁRIO DE PONTA:

Período composto pelas três horas de pico de consumo de cada distribuidora, válido para dias úteis (ex.: das 18h às 21h).

L

LEASING:

Contrato em que o locador adquire um ativo (em projetos de eletromobilidade, usualmente, o ônibus ou a bateria) para alugar a um cliente (locatário). Ele possui duas modalidades: *leasing* financeiro e *leasing* operacional.

L

LEASING FINANCEIRO:

É a modalidade na qual o locatário tem a intenção de ficar com o ativo ao término do acordo, exercendo a opção de compra pelo valor previsto no contrato.

LEASING OPERACIONAL:

É a modalidade na qual o locatário não tem a intenção de adquirir o ativo ao final do contrato.

O

ÔNIBUS ELÉTRICOS A BATERIA:

Também denominados como elétricos puros, os ônibus elétricos a bateria são veículos que utilizam energia elétrica armazenada na bateria e convertida em força motriz por um motor elétrico. Quando a energia das baterias termina, elas precisam ser reabastecidas. Para isso, deve-se fornecer energia elétrica, por meio de uma fonte externa (carregador).

ÔNIBUS HÍBRIDOS:

Veículos híbridos combinam dois motores diferentes, usualmente de tração térmica (motor a combustão interna, podendo ser alimentado por diesel, gasolina, gás natural, etanol, entre outros) e de tração elétrica (motor elétrico).

P

POTÊNCIA DO CARREGADOR:

Quantidade de energia concedida pelo carregador para recarga do veículo, dada em kW.

POTÊNCIA INSTALADA:

Soma das potências nominais dos equipamentos elétricos instalados na unidade consumidora, em condições de entrar em funcionamento, expressa em quilowatts (kW). No caso da garagem de ônibus elétricos, essa carga será dada pelo número de carregadores de ônibus e suas potências nominais, somados aos demais equipamentos existentes na garagem.

R

RECARGA CONDUTIVA:

Carregamento realizado por meio de uma conexão física entre a rede elétrica e o veículo. Os métodos mais comuns de recarga condutiva são *plug-in* e pantógrafo.

RECARGA DE OPORTUNIDADE:

Estratégia que consiste na recarga do veículo ao longo da rota, em pontos predeterminados, que podem ficar em terminais ou em pontos de ônibus. O tempo de carregamento também varia, dependendo da potência da tecnologia adotada.

RECARGA INDUTIVA:

Sistema de carregamento no qual o ônibus é alimentado com energia elétrica fornecida por meio de um campo magnético, sem conexão direta entre o veículo e o carregador, como ocorre no sistema condutivo. O exemplo de recarga indutiva mais difundido é a recarga sem fio.

RECARGA MISTA:

Estratégia que se caracteriza por possibilitar uma combinação das demais estratégias de recarga. O veículo é carregado na garagem, usualmente à noite, e recebe recargas auxiliares durante a operação diurna, reduzindo assim a necessidade de que saia da garagem com uma grande autonomia (km).

RECARGA NA GARAGEM:

Estratégia em que os ônibus elétricos são alimentados durante um período específico em garagens/instalações. Como isso costuma acontecer à noite, muitos autores chamam esse modelo de recarga noturna.

RECARGA PLUG-IN:

Sistema de recarga condutivo que oferece ampla variedade de tipos de conectores, de velocidades de recarga e de fabricantes/fornecedores. É uma das opções mais populares e mais viáveis economicamente.

RECARGA POR PANTÓGRAFO:

Sistema de recarga condutivo que consiste em parar o ônibus sob ou próximo a um dispositivo de carregamento, que se conecta à parte superior ou à lateral do veículo.

RENDIMENTO:

É o inverso do consumo energético, ou seja, quantos quilômetros são possíveis de percorrer com um kWh de energia.

S**SIMULAÇÃO DE ROTAS:**

Estimativa do consumo de energia nas rotas, usando especificações técnicas dos veículos e características geográficas. É o método que apresenta o melhor custo-benefício para o processo de seleção de rotas, de um ponto de vista técnico.

SISTEMA DE CARGA COMBINADA (COMBINED CHARGING SYSTEM):

Sistema padrão para carregar veículos elétricos. Usa os conectores Combo 1 e Combo 2 para fornecer energia para as baterias.

SISTEMA DE GERENCIAMENTO DA BATERIA:

É um sistema eletrônico que gerencia uma bateria recarregável por meio de uma interface entre o monitoramento dos componentes químicos da bateria, durante a carga e a descarga, e as informações que são comunicadas ao usuário. Tem como função monitorar aspectos como a temperatura, o estado da carga e o balanceamento entre as células da bateria.

SMART CHARGING:

A recarga inteligente (em português) é um sistema em que veículos elétricos, estações de recarga e técnicos compartilham dados. Por meio do carregamento inteligente, é possível monitorar, gerenciar e restringir o uso de dispositivos de recarga para otimizar o consumo de energia.

SMART GRIDS:

As redes inteligentes de energia (em português) são uma nova arquitetura de distribuição de eletricidade, mais segura e inteligente, que integra e possibilita ações de todos os usuários a ela conectados. Nesse conceito, o fluxo de energia elétrica e de informações é bidirecional. Assim, a energia tradicionalmente gerada, transmitida e distribuída de forma radial a partir de instalações das concessionárias poderá, também, ser gerada e integrada às redes elétricas a partir de unidades consumidoras.

T**TEMPO DE RECARGA:**

Tempo durante o qual o veículo deve ser carregado para atingir um estado de carga de 100%.

TENSÃO DE CONEXÃO:

É a voltagem da rede elétrica à qual o consumidor será conectado.

TÍTULOS VERDES (GREEN BONDS):

São títulos de renda fixa emitidos para financiar ações voltadas ao combate das mudanças climáticas.

TRÓLEBUS:

São veículos que utilizam um sistema de tração elétrica. A alimentação do motor é realizada por meio de uma catenária, composta por dois cabos aéreos suspensos ao longo da via.

VELOCIDADE COMERCIAL:

Relação entre distância e tempo de percurso, incluindo os tempos de parada nas estações, para embarque e desembarque de passageiros, e as distâncias mortas percorridas.

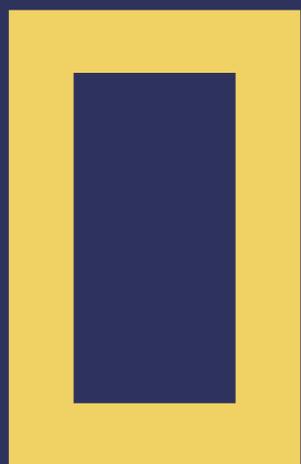
VELOCIDADE OPERACIONAL:

Relação entre distância e tempo de percurso, excluindo os tempos de parada nas estações, para embarque e desembarque de passageiros, e as distâncias mortas percorridas.

Z**ZONAS DE BAIXA EMISSÃO (LOW EMISSION ZONES):**

Áreas submetidas a controle de emissões, por meio da aplicação de limites de poluentes veiculares, com a finalidade de melhorar a qualidade do ar de determinada região.

INTRODUÇÃO





O objetivo deste capítulo é apresentar um panorama da eletromobilidade, bem como discutir os benefícios da tecnologia. Além disso, o capítulo aborda os principais desafios e oportunidades relacionados à adoção de frotas de ônibus elétricos nos sistemas de transporte coletivo.

1.1. Panorama da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus

As emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) no Brasil são oriundas principalmente dos setores de mudança do uso da terra e de agricultura, que responderam, em 2018, por 43,6% e 25,4% das emissões totais brasileiras, respectivamente. Em seguida, o setor de energia foi responsável por 21% das emissões, sendo que a principal fonte emissora nessa categoria são os transportes. Em 2018, eles responderam por 200,2 milhões de toneladas de CO₂e, o que representa 49% do total do setor de energia e 10,3% das emissões totais de GEE no país [1]. Nas cidades brasileiras, a proporção é ainda mais significativa: os transportes, incluindo transporte terrestre, ferroviário, hidroviário, aéreo e *off-road*, representam 59,4% das emissões totais em São Paulo, 65,6% em Salvador e 66,6% em Curitiba [2,3,4].

No Brasil, cerca de 85% da população vive em áreas urbanas [5]. Em termos globais, segundo o Departamen-

to de Assuntos Econômicos e Sociais da Organização das Nações Unidas, aproximadamente 55% das pessoas residem em cidades, e a perspectiva é que essa porcentagem suba para 68% em 2050 [6]. A projeção de crescimento da população vivendo em áreas urbanas acende um sinal de alerta, uma vez que implicará no aumento da demanda por infraestrutura, transporte e energia, importantes indutores das emissões de Gases de Efeito Estufa e de poluentes locais.

Nesse sentido, é preciso realizar investimentos em modos de transporte de alta e média capacidade, tanto para atender à demanda crescente quanto para suprir a necessidade de infraestruturas de transporte [7]. Por outro lado, é necessário que esses investimentos minimizem os impactos ambientais relacionados às emissões resultantes do consumo de energia pelo setor de transportes. Para isso, são recomendáveis duas linhas de atuação complementares. A primeira é priorizar e qualificar o transporte coletivo, tornando-o mais eficiente e atrativo para a população. A segunda consiste em assegurar que esse sistema seja propulsionado por fontes de energia de baixa ou nenhuma emissão de poluentes. Em face dessa realidade, cidades de todo o mundo estão adotando tecnologias limpas em suas frotas de ônibus urbanos.

A implantação da eletromobilidade no transporte coletivo vem sendo impulsionada, principalmente, por preocupações com a qualidade do ar e seus impactos

na saúde. Cerca de 500 mil ônibus elétricos estão em circulação no mundo, a maioria deles na China. Shenzhen, cidade do sudeste chinês, tem 100% de sua frota eletrificada, totalizando mais de 16 mil veículos [8]. Na Europa, diversas cidades se comprometeram a reduzir emissões: até 2050, Londres pretende ter um sistema de transporte com zero emissões, enquanto Paris fixou para 2025 o objetivo de transformar sua frota de ônibus em elétricos ou movidos a biogás [9,10]. A eletrificação de ônibus também está ganhando terreno em outras regiões. A cidade de Santiago (Chile) abriga a maior frota de ônibus urbanos elétricos fora da China [11,12]. Até o final de 2020, a capital chilena terá uma frota de mais de 770 veículos elétricos. Bogotá (Colômbia) é outra capital sul-americana que está investindo na eletromobilidade: até o final de 2020, 483 ônibus elétricos entrarão em operação na cidade – um movimento que pode salvar até 80 vidas e evitar até 2.902 hospitalizações ao longo dos próximos 30 anos, tornando visíveis os custos implícitos da poluição do ar [13,14].

No Brasil, há mais de 250 ônibus elétricos em operação, sendo 40 deles a bateria [15]. A iniciativa de maior destaque é a da cidade de São Paulo, que atualmente tem o maior número de ônibus elétricos do país e assumiu um compromisso público de renovar sua frota de ônibus com tecnologias de baixa emissão, por meio da Lei 16.802/2018 [15,16]. A nova concessão do transporte coletivo por ônibus de Campinas também é relevante: prevê que uma área da cidade seja operada exclusivamente por ônibus elétricos [17]. Além disso, outras cidades brasileiras já operam ônibus elétricos — como Brasília, Maringá e Volta Redonda — ou, a exemplo de Salvador e São José dos Campos, planejam inserir veículos elétricos em suas frotas de transporte coletivo [15,18,19].

Projetos acadêmicos, como os realizados pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), e iniciativas de organizações que promovem a mobilidade sustentável, como a Plataforma Nacional de Mobilidade Elétrica (PNME) e o Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator (ZEBRA), também têm impulsionado a eletromobilidade no Brasil [20,21,22,23].

Como acontece com toda nova tecnologia, ainda existem desafios que precisam ser superados para a implantação da eletromobilidade em larga escala. No entanto, há uma série de benefícios e oportunidades gerados a partir da inserção dos ônibus elétricos nas frotas de transporte coletivo.

1.2. Benefícios da eletromobilidade

A eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus tem se mostrado uma solução viável para as cidades, tanto para melhorar a qualidade do ar local quanto para contribuir com o esforço global de combate às mudanças climáticas. Além disso, a implementação de ônibus elétricos pode proporcionar uma oportunidade de repensar a mobilidade da cidade como um todo, qualificando e integrando o sistema de transporte e, assim, melhorando a vida da população [9].

1.2.1. Qualidade do ar e saúde

Renovar e modernizar as frotas de ônibus com tecnologias mais limpas é uma grande oportunidade para as cidades reduzirem as emissões de poluentes locais. Substituir ônibus a combustão por elétricos tem o potencial de melhorar substancialmente a qualidade do ar e a saúde pública, uma vez que veículos que queimam diesel emitem inúmeras substâncias – com destaque para os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o material particulado (MP) – que causam problemas de saúde e, por consequência, reduzem a qualidade e a expectativa de vida da população [24]. Outro benefício da adoção de ônibus elétricos é a redução de ruído, pois veículos com essa tecnologia são mais silenciosos que veículos a combustão interna.

As emissões produzidas pelos veículos a diesel têm efeito direto na saúde da população. A exposição ao NO_x irrita o sistema respiratório humano. No longo prazo, pode contribuir para o desenvolvimento de asma e aumentar a suscetibilidade a outras doenças respiratórias. Além de causar problemas de saúde, o NO_x , quando exposto à luz solar, reage com o oxigênio atmosférico (O_2) e outros poluentes, originando ozônio (O_3). O O_3 tem efeitos tóxicos nas camadas mais baixas da atmosfera, podendo causar danos consideráveis às espécies vegetais nativas e às culturas agrícolas [24].

O material particulado consiste em pequenas partículas sólidas (como fuligem e poeira) ou gotículas. O MP emitido pelo escapamento de veículos a diesel é especialmente perigoso, porque contém benzeno, formaldeído e outras substâncias nocivas à saúde. Os impactos na saúde são extensos, e estudos mostraram ligações entre exposição ao MP e asma agravada, batimentos cardíacos irregulares, função pulmonar diminuída, ataques cardíacos, morte prematura em pessoas com doenças cardíacas ou pulmonares, menor

expectativa de vida e aumento do risco de morte por acidente vascular cerebral [25].

Os benefícios à saúde gerados pela substituição de frotas a diesel por frotas mais limpas podem ser estimados por meio de ferramentas que identificam e mensuram hospitalizações, mortes, custos financeiros e bem-estar ligados às alterações no nível de poluição do ar urbano [14]. Com esse tipo de avaliação, ficam disponíveis mais informações para subsidiar a decisão de investir na compra de ônibus para o transporte coletivo. Ou seja, as ferramentas permitem uma análise mais adequada dos custos e benefícios relacionados à implementação de frotas de baixo carbono.

O impacto positivo dos ônibus elétricos pode ser maximizado se o sistema de transporte tiver uma rede eficiente, acessível e de qualidade. Usualmente, esses fatores são o principal incentivo para manter e atrair novos clientes. Combinados, podem ter um impacto significativo na qualidade do ar, na saúde e na qualidade de vida da população.

1.2.2. Desenvolvimento sustentável

Além da redução das emissões por escapamentos e do consequente impacto positivo na saúde da população, a adoção de ônibus elétricos traz outros benefícios, associados à sustentabilidade e à segurança energética. Mais eficientes em comparação com os

ônibus de combustão interna [11], os ônibus elétricos ainda têm a vantagem de não depender do petróleo, estando menos suscetíveis a variações de preços no mercado de combustíveis e a instabilidades na sua produção e distribuição [26]. Além disso, a geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente de matriz renovável, o que representa mais uma vantagem da eletromobilidade [27].

1.2.3. Qualificação do transporte coletivo

Levando em conta que uma rede de transporte coletivo eficiente e atrativa tem importância estratégica para a cidade, adotar ônibus elétricos pode ser uma grande oportunidade de qualificar o sistema e renovar sua imagem. Sabe-se que a implementação dessa tecnologia exige investimentos em infraestrutura – principalmente relacionados a recarga –, mas tais custos são compensados pela possibilidade de melhorias no transporte coletivo. A otimização do sistema e a renovação de terminais, de estações e de pontos de ônibus, por exemplo, podem vir na esteira da adoção dos ônibus elétricos, tornando tais infraestruturas mais acessíveis, seguras e integradas à paisagem urbana [9].

Essas melhorias, associadas ao aumento do conforto nos veículos elétricos, podem ter um resultado positivo na percepção dos passageiros, incrementando a experiência do cliente e a imagem do sistema de transporte coletivo por ônibus.



1.3. Desafios e oportunidades da eletromobilidade

Sabe-se que toda inovação tem de superar desafios para ser adotada. Em projetos que envolvem frotas de ônibus elétricos não é diferente. Estar preparado para enfrentar esses desafios e encontrar oportunidades pode ser fundamental para o sucesso do projeto.

1.3.1. Desafios da eletromobilidade

Os desafios para a eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus podem ser divididos em três eixos [28,29]:

- 1.3.1.1. Desafios tecnológicos;
- 1.3.1.2. Desafios financeiros;
- 1.3.1.3. Desafios institucionais.

Note-se que é difícil classificar perfeitamente alguns desafios, porque eles estão relacionados a mais de uma categoria. Nessas circunstâncias, buscou-se alocar cada desafio no eixo mais apropriado.

1.3.1.1. Desafios tecnológicos

Os desafios tecnológicos estão vinculados principalmente à falta de informações para subsidiar decisões e às limitações relacionadas aos veículos e às infraestruturas de recarga. Dentre eles, podem-se destacar:

- desconhecimento das vantagens e desvantagens da tecnologia e das informações necessárias para adotar modelos de operação adequados aos ônibus elétricos;
- limitações de autonomia e desempenho dos veículos;
- mercado de ônibus elétricos restrito;
- escassez de informações sobre as características operacionais e os requisitos de manutenção dos ônibus elétricos;
- limitações das estações e dos pontos de recarga e falta de acesso a terrenos para instalação dessas infraestruturas;
- instabilidade da rede de energia;
- falta de padrões e regulações para a infraestrutura de recarga.



A

“Realizar análises de Custo Total de Propriedade (em sua sigla em inglês TCO – *Total Cost of Ownership*), que estima os custos do ciclo de vida das tecnologias, pode viabilizar os projetos de eletromobilidade, uma vez que o TCO dos ônibus elétricos é frequentemente menor do que o dos ônibus convencionais [30].”

1.3.1.2. Desafios financeiros

Um dos principais desafios financeiros para implantar a eletromobilidade no transporte coletivo é o alto custo de capital dos veículos e das infraestruturas necessárias. Modificar o formato de avaliação dos custos nos contratos — que geralmente utilizam análises de custo inicial, que escondem as economias geradas ao longo do projeto — é um desafio a ser transposto. Realizar análises de Custo Total de Propriedade (em sua sigla em inglês TCO – *Total Cost of Ownership*), que estima os custos do ciclo de vida das tecnologias, pode viabilizar os projetos de eletromobilidade, uma vez que o TCO dos ônibus elétricos é frequentemente menor do que o dos ônibus convencionais [30]. É importante mencionar que há um movimento de redução nos preços dos veículos. Isso se deve ao fato de que o custo das baterias – parcela significativa do valor total dos ônibus – já caiu 79% desde 2010 e tem tendência de reduzir-se ainda mais nos próximos anos [30].

Questões relacionadas ao financiamento também são um desafio a superar. Devido aos altos custos iniciais, há poucas instituições financeiras dispostas a fazer esse investimento. Além disso, a capacidade de endividamento limitada dos municípios e das empresas operadoras de ônibus – que também têm poucas garantias financeiras sólidas –, associada às escassas linhas de financiamento atrativas para os ônibus elétricos, restringe a implementação da eletromobilidade no transporte coletivo em larga escala.

Também deve ser considerado um desafio a dificuldade que os órgãos de transporte enfrentam para realizar mudanças necessárias na estrutura de compras e nos modelos de remuneração e cálculo tarifário vigentes. Normalmente, os contratos preveem modelos rígidos de aquisição, embasados em baixo custo e baixo risco, e de remuneração. A maioria dos modelos não pos-

sibilita absorver os altos custos de aquisição dos ônibus elétricos e os riscos inerentes à nova tecnologia. As práticas tradicionais de compra também não preveem as novas responsabilidades associadas à operação de ônibus elétricos, como a manutenção das baterias, da rede de energia e da infraestrutura da recarga. É necessário que novos modelos sejam adotados de forma a estimular o uso de veículos limpos.

1.3.1.3. Desafios institucionais

Desafios institucionais incluem a ausência de políticas públicas facilitadoras e de planos específicos para orientar a adoção de ônibus elétricos. De maneira geral, as cidades não têm leis ou planos estratégicos com metas e incentivos claros para estimular o uso da nova tecnologia. Por esse motivo, muitas iniciativas acabam sendo pontuais e isoladas. Uma das principais razões para diretrizes e políticas não serem criadas e implementadas é a ausência de interesse genuíno dos governantes e dos principais atores. Quando há incentivos limitados e fraco apoio político, pode ser difícil estruturar projetos consistentes. A falta de autonomia e a fragilidade das estruturas institucionais também podem configurar uma barreira para a eletromobilidade, uma vez que grandes projetos necessitam de respaldo jurídico, técnico e político para sua execução.

Por se tratar de uma nova tecnologia, também pode-se mencionar a resistência à mudança como um desafio para a difusão da eletromobilidade. A falta de experiência na operação de veículos elétricos contribui para que operadores e órgãos de transporte estejam menos propensos a trabalhar por frotas elétricas no transporte coletivo.

O **BOX 1** aborda os principais aspectos que dificultam, nos contratos vigentes, a adoção da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus.

BOX 1

Principais problemas dos contratos atuais

Os contratos de licitação do transporte coletivo são importantes instrumentos para a administração pública regular o serviço e garantir sua função social, prevista na Constituição brasileira. Apesar disso, algumas fragilidades dos modelos atuais podem representar barreiras para a inserção da eletromobilidade nos sistemas de ônibus. Estudos que avaliaram os contratos de concessão em cidades brasileiras apontam alguns desses problemas [31,32,33] ¹.

Prazos de contrato e custos



A maior parte dos contratos de prestação de serviço do transporte coletivo tem prazo de duração superior a 15 anos. Se for considerado também o tempo possível de prorrogação, alguns contratos podem chegar a 40 anos de concessão [31,32,33]. Esses contratos por períodos prolongados restringem as oportunidades de adequação do serviço às novas tecnologias [32], não só em termos de veículos menos poluentes, mas também de inovações em geral no setor.

Prazos de concessão longos também limitam a quantidade de empresas que disputam um edital de licitação, o que representa uma barreira para a competitividade e um estímulo ao domínio econômico do setor por um número restrito de companhias. Em contrapartida, contratos mais curtos tendem a permitir uma previsão mais precisa dos custos e a incentivar a concorrência, atraindo mais participantes [31]. Por outro lado, a duração dos contratos deve ser compatível com o valor investido e com a complexidade do serviço prestado, sendo necessário definir os escopos com cuidado, para que os tempos de contrato não sejam entrave à implementação de novas tecnologias, aos padrões de qualidade e à mitigação de impactos ambientais [31].

A inserção de novas tecnologias veiculares nos contratos de concessão em andamento pode ser dificultada devido aos prováveis impactos nos custos totais de operação e remuneração [32]. As renovações, portanto, são uma oportunidade para prever a substituição de veículos convencionais movidos a diesel por tecnologias mais limpas. Para isso, é necessário que os novos editais e contratos prevejam modelos de negócio que respaldem a implementação de novas tecnologias no sistema de transporte coletivo, por meio da inclusão de incentivos e garantias financeiras e tecnológicas, por exemplo, além de não penalizarem veículos com custos de capital mais alto, mas com menores custo de operação e manutenção durante a vida útil.

1. Os estudos [31,32,33] avaliaram os contratos nas cidades de Belém, Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Fortaleza, Goiânia, Manaus, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro, Salvador e São Paulo. Campinas foi avaliada apenas no estudo [32]. Teresina, apenas no estudo [33].

Competitividade



Alguns elementos presentes nos editais podem estimular o domínio do mercado pelas poucas empresas que atendem os requisitos e se interessem pela prestação do serviço no transporte coletivo. Além do tempo de duração do contrato, outros itens que podem favorecer tal concentração são cobrar larga experiência prévia, exigir a propriedade de garagens para a operação e não impor barreiras à concentração societária (ou seja, barreiras para evitar que empresas de um mesmo grupo participem em diferentes contratos). Essas exigências não se limitam a desestimular a participação de mais empresas no processo licitatório. Também asseguram vantagens desproporcionais a grupos que já atuam no setor [31].

Transparência e posse dos dados



A transparência é condição indispensável da prestação de um serviço público. Portanto, a incorporação de uma tecnologia ao sistema deve ser acompanhada da divulgação dos dados correspondentes em *websites* e demais canais do poder público [31]. Os contratos devem garantir o pleno acesso do poder público e da sociedade civil às informações importantes para a fiscalização do serviço e para o planejamento do sistema e da mobilidade da cidade.

Incentivos à redução de emissões e a inovações



Os contratos de concessão dificilmente estabelecem incentivos para a redução de emissões e para a adoção de novas tecnologias. Na maior parte das vezes, eles não preveem sanções ou multas relacionadas ao não atendimento das normas ambientais e dos níveis de emissão de poluentes previstos. Muitos contratos sequer estabelecem a necessidade de monitoramento ou inspeção de emissões veiculares [33].

Em acréscimo a isso, os contratos de concessão tradicionais não contemplam muitas das particularidades de operação dos veículos elétricos, como a necessidade de considerar tempos de recarga e de dispor das infraestruturas para esse abastecimento. Outra lacuna muito prevalente é não prever a capacitação dos funcionários em áreas como utilização da nova tecnologia, qualidade do serviço e redução de emissões [33].

1.3.2. Oportunidades da eletromobilidade

Apesar dos desafios existentes, a implantação da eletromobilidade traz uma série de benefícios **(1.2)**, como a possibilidade de qualificação do sistema de transporte coletivo e a redução das emissões – melhorando a qualidade do ar e, conseqüentemente, a saúde e a qualidade de vida da população. Além desses aspectos, a eletromobilidade pode viabilizar novas oportunidades, que devem ser identificadas e exploradas de acordo com a realidade de cada cidade.

1.3.2.1. Desenvolvimento de estudos e pesquisas

A implementação da eletromobilidade deve ser aproveitada como uma oportunidade para a realização de estudos e pesquisas em prol de melhorias no transporte coletivo por ônibus. A inserção da nova tecnologia pode permitir a reestruturação e a otimização do sistema, uma vez que avaliar as linhas e suas características abre espaço a um novo olhar para a mobilidade na cidade.

Para um maior conhecimento sobre a tecnologia, devem-se buscar pesquisas e estudos existentes. A realização de testes e pilotos também pode ser um processo importante para a consolidação de informações que considerem o contexto local. Esse estágio pode ser considerado como um processo de tentativa e erro e um bom momento para coletar dados operacionais úteis para o planejamento de longo prazo e operações mais eficientes **[34]**.

Para uma adoção em larga escala, recomenda-se a inserção gradual dos ônibus elétricos, de forma a permitir uma avaliação dos diferentes aspectos da tecnologia, bem como para garantir continuidade da operação por meio dos ônibus com a tecnologia já utilizada. Uma frota composta por diferentes tecnologias permite avaliar cautelosamente questões como as limitações de autonomia em rotas mais longas, permitindo alocar os ônibus elétricos nas linhas que apresentam melhor rendimento e, conseqüentemente, otimizando os custos operacionais **[35]**.



A

A Ontário, Canadá. Foto: York Region.

1.3.2.2. Formulação de novos modelos de negócio

Os principais desafios financeiros para a eletromobilidade podem ser superados com a estruturação de modelos de negócio adequados. Contratos que avaliam o Custo Total de Propriedade podem ser benéficos aos ônibus elétricos, visto que eles apresentam uma tendência de custos de manutenção e operação mais baixos.

Modelos de negócio que agreguem atores com capacidade de investimento (como as companhias de energia) e que possam contribuir para a divisão dos riscos – intrínsecos a toda tecnologia nova – podem tornar os projetos de eletromobilidade mais atrativos. É fundamental que esses novos modelos sejam bem estruturados, para que eventuais custos adicionais de investimento não sejam revertidos em aumento da tarifa. Esses novos modelos de negócio podem prever formas de aquisição diferentes das aplicadas atualmente, como *leasing* dos veículos ou baterias e separação dos contratos de operação, de provisão de veículos e de infraestrutura [35, 36, 37]. Contratos separados podem ter durações diferentes, em conformidade com o tipo de serviço ofertado, tendo em vista aprimorar a qualidade do sistema de transporte. Para incentivar a eletromobilidade, podem-se estabelecer prazos de provisão ou posse dos veículos de 15 anos para ônibus elétricos e de até 10 anos para outras tecnologias veiculares, por exemplo, uma vez que veículos elétricos têm uma estimativa de vida útil maior do que a de veículos com motores de combustão.

Além disso, estipular prazos de operação mais curtos pode facilitar a incorporação de atualizações tecnológicas e estabelecer maior competitividade. Com licitações mais frequentes, novos entrantes tendem a buscar a redução de custos e a oferta de um serviço de mais qualidade [38]. Por fim, determinar indicadores de

qualidade e metas ambientais – prevendo o monitoramento e a aplicação de sanções em caso de descumprimento – também é uma forma de incentivar a eletromobilidade [39].

Deve-se ainda avaliar a possibilidade de incluir, nos contratos vigentes, incentivos para impulsionar a aquisição e a transição da frota, considerando aspectos técnicos, ambientais, financeiros e operacionais.

1.3.2.3. Indústria e mão-de-obra

A adoção da eletromobilidade no transporte coletivo pode desencadear impactos positivos na economia. Nacionalmente, pode incentivar a implantação de fábricas para fornecer os veículos e os componentes necessários, o que geraria empregos e aqueceria a economia. A implementação de ônibus elétricos também tem condições de fomentar a economia local, principalmente por meio da qualificação de mão-de-obra para manutenção e operação dos novos coletivos [30]. Estima-se, para o Estados Unidos, que cada US\$ 1 milhão investido em ônibus elétricos resulta na geração de pelo menos 5,7 empregos [25].

1.3.2.4. Desenvolvimento de políticas de incentivo à eletromobilidade

Estabelecer políticas nacionais, regionais e locais é fundamental para fomentar a eletromobilidade. Políticas integradas que envolvam outros setores além dos transportes, como indústria, energia, saúde e meio ambiente, possibilitam que os benefícios da eletromobilidade no transporte coletivo sejam maximizados. Essas políticas podem ser de diferentes naturezas, desde incentivos fiscais (para a produção no país ou a importação dos componentes necessários aos veículos elétricos) até o estabelecimento de padrões mais rígidos de qualidade do ar aceitos no país.

“Para incentivar a eletromobilidade, podem-se estabelecer prazos de provisão ou posse dos veículos de 15 anos para ônibus elétricos e de até 10 anos para outras tecnologias veiculares, por exemplo, uma vez que veículos elétricos têm uma estimativa de vida útil maior do que a de veículos com motores de combustão.”

**CARACTERIZAÇÃO DA
ELETROMOBILIDADE NO
TRANSPORTE COLETIVO
POR ÔNIBUS**

02



Este capítulo tem como objetivo caracterizar as principais questões tecnológicas que permeiam a eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus. A FIGURA 1 apresenta uma visão dos conteúdos deste capítulo.

FIGURA 1. Estrutura do capítulo 2: caracterização da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus



FONTE: Elaborado pelos autores.

2.1. Ônibus de tração elétrica

Esta seção aborda os principais tipos de ônibus que utilizam o sistema de tração elétrica: trólebus, híbridos e, com enfoque especial, elétricos a bateria. A seguir, para cada uma das tecnologias, serão apresentados um breve contexto histórico, as características técnicas de operação e armazenamento de energia, as práticas de manutenção veicular, bem como vantagens e desvantagens.

2.1.1. Trólebus

Com as primeiras aparições na Europa, datadas de 1882, os trólebus são considerados os primeiros ônibus totalmente elétricos. No período entre as duas guerras mundiais, o continente europeu foi marcado por crescimento e desenvolvimento da infraestrutura e, conseqüentemente, por grande difusão dessa tecnologia. No entanto, foi nos Estados Unidos, em 1920, que esses veículos ganharam evidência nos sistemas de transporte coletivo urbano.

No Brasil, o primeiro sistema de trólebus foi inaugurado na cidade de São Paulo, em 22 de abril de 1949, e opera até hoje, com uma frota de 201 veículos, 181 quilômetros de rede bifilar e 10 linhas/itinerários. Outros 14 sistemas de trólebus foram implantados no Brasil, principalmente na década de 1960. Dois permanecem em operação, ambos no estado de São Paulo: em Santos, com uma frota de seis veículos em uma linha, e no Corredor Metropolitano ABD, com 95 veículos e 11 linhas [40].

Os trólebus são veículos que utilizam um sistema de tração elétrica. A alimentação do motor é realizada por meio de uma catenária, composta por dois cabos aéreos suspensos ao longo da via. O veículo é conectado a essa infraestrutura por duas hastes pelas quais recebe a energia elétrica. As hastes têm uma certa flexibilidade para permitir o contato com a infraestrutura mesmo se a trajetória do veículo não estiver totalmente alinhada com a rede aérea e para absorver os impactos decorrentes das ondulações da via. Operacionalmente, esses veículos são empregados para efetuar um serviço de linha com rotas, pontos de ônibus, terminais e itinerários bem definidos. A FIGURA 2 mostra os principais elementos dos trólebus.

Os trólebus têm as vantagens dos veículos com sistema de tração elétrica: boa aceleração e desaceleração, baixa emissão de ruídos, eliminação das emissões de poluentes de escapamento, número de peças reduzido (o que pode diminuir a frequência e os custos das manutenções veiculares) e um aumento da vida útil do veículo [41,42]. No entanto, a dependência de uma infraestrutura de rede elétrica aérea para alimentação do sistema de tração pode resultar em uma baixa flexibilidade operacional. Eventos como manutenção na rede de energia, necessidade da realização de desvios de trajeto, veículos estacionados indevidamente na via e até mesmo o desprendimento das hastes dos trólebus podem causar problemas na operação.

De forma a minimizar algumas dessas desvantagens operacionais dos trólebus, os modelos mais recentes são providos de baterias com autonomia para o veículo percorrer trechos sem a dependência de infraestrutura aérea. Esses modelos são também conhecidos como trólebus duais [42]. Ainda no que tange à infraestrutura, dois argumentos podem pesar contra a adoção desses veículos e devem ser levados em conta: o alto custo de investimento e de manutenção da infraestrutura e a obstrução visual que ela causa no ambiente urbano [42,43,44].

A utilização e o desenvolvimento dos trólebus no último século contribuíram de forma decisiva para o desenvolvimento de componentes e acessórios utilizados em outros veículos, como os ônibus elétricos a bateria, e para a aceitação e a familiaridade por parte de operadores e da população em relação à eletromobilidade. Apesar dessa tecnologia não ser o objetivo principal deste guia, muitos desafios e benefícios que serão abordados no decorrer do texto podem estar relacionados com a implementação de trólebus no sistema de transporte coletivo, cabendo ao gestor/ope-

FIGURA 2. Elementos do trólebus



FONTE: Elaborado pelos autores.

rador/técnico selecionar a tecnologia que melhor se adequa ao contexto e às necessidades locais.

2.1.2. Ônibus híbridos

Uma alternativa de baixa emissão para o transporte coletivo são os ônibus híbridos. Essa tecnologia representa uma forma de transição, ao combinar elementos da tração térmica (motor a combustão interna, podendo ser alimentado por diesel, gasolina, gás natural, etanol, entre outros) e da tração elétrica (motor elétrico).

Em comparação com os ônibus convencionais a diesel, os ônibus híbridos apresentam uma série de vantagens. Além de uma melhor eficiência energética, a tecnologia reduz as emissões de escapamento e produz menos ruído. É importante salientar que os benefícios energéticos e ambientais estão diretamente ligados ao ciclo de condução e à eficiência do motorista na direção. Também são benefícios dos híbridos a possibilidade de usar combustíveis estratégicos na matriz energética brasileira – como o etanol e o biodiesel – e de não necessitar de grandes adequações de infraestrutura – como as linhas bifilares necessárias para a operação de trólebus ou as estações de recarga de porte exigidas pelos ônibus elétricos a bateria [45].

Como desvantagens, em comparação com ônibus a diesel, esses veículos apresentam maior custo de aquisição, maior complexidade e peso do sistema de propulsão, maior número de peças e maior necessidade de manutenções veiculares, como decorrência do uso combinado dos sistemas de tração térmica e elétrica.

Como mostra a **FIGURA 3**, há dois tipos de ônibus híbridos: o convencional e o *plug-in*. O convencional pode ter duas configurações de motor: em série ou em paralelo. O *plug-in* tem configuração em série.

FIGURA 3. Categorias dos ônibus híbridos



FUNTE: Elaborado pelos autores.



2.1.2.1. Híbridos convencionais

A concepção e a evolução dessa tecnologia surgiram, em grande parte, da ideia de desfrutar dos benefícios dos sistemas de tração térmica e elétrica e, ao mesmo tempo, de reduzir as limitações que esses sistemas impunham quando atuavam de forma isolada. O veículo é dotado de um mecanismo que permite a utilização de cada motor, ou de uma combinação deles, de acordo com diferentes características do percurso e da operação [46]. Esse arranjo tem como objetivo fazer a utilização mais eficiente dos dois tipos de motores.

Quando uma menor quantidade de energia se mostra necessária, geralmente em viagens com velocidade constante, o motor a combustão interna carrega a bateria do veículo. Além desse carregamento, em veículos híbridos existe outro sistema que fornece cargas à bateria: a frenagem regenerativa. A frenagem aproveitada-se do movimento cinético das rodas e impulsiona o gerador que, por sua vez, carrega a bateria. Em média, a redução no consumo de energia alcançada pela regeneração pode ser de 20% a 30%, em linhas urbanas com pequenas distâncias entre os pontos de ônibus [46]. Esse sistema de frenagem também está presente em ônibus elétricos a bateria e resulta em um “consumo negativo”, ou seja, retorna energia ao sistema. Existem dois tipos principais de ônibus híbridos, caracterizados por duas configurações de motor: série e paralelo.

O **ônibus híbrido em série** dispõe de um motor a combustão interna, desacoplado mecanicamente das ro-

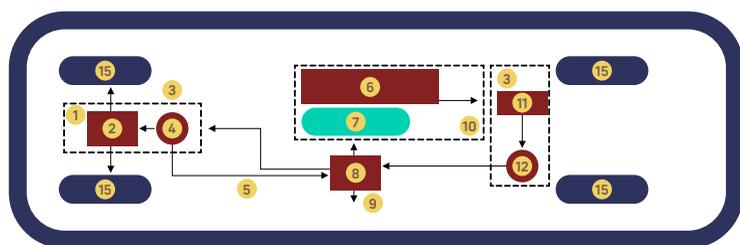
das, que tem como função alimentar o gerador elétrico. A energia elétrica produzida é utilizada para acionar o motor elétrico, que impulsiona o eixo diferencial e de tração do ônibus. Durante o pico de demanda de energia, na aceleração, o motor a combustão interna é auxiliado pela energia da bateria. No entanto, em um regime de velocidade constante, a bateria tem a capacidade de prover toda a energia necessária ao veículo. Quando o veículo estiver estacionário ou em marcha lenta, a energia elétrica produzida pela combinação do motor a combustão e do gerador é utilizada para carregar a bateria. Durante a frenagem, como explicado anteriormente, a energia produzida também é enviada para a bateria. Dessa forma, o motor a combustão interna não movimenta o ônibus diretamente, somente por meio do motor elétrico.

O **ônibus híbrido em paralelo** caracteriza-se por ambos os motores (combustão e elétrico) movimentando os eixos do veículo, separadamente ou em conjunto. O motor elétrico é utilizado em situações que requerem maior aceleração. Em regime de velocidade constante, o veículo é tracionado unicamente pelo motor a combustão interna. Durante o período estacionário ou em marcha lenta, o motor a combustão pode atuar como um gerador e carregar a bateria. Na frenagem, o eixo do veículo também impulsiona o gerador, e a corrente produzida carrega a bateria.

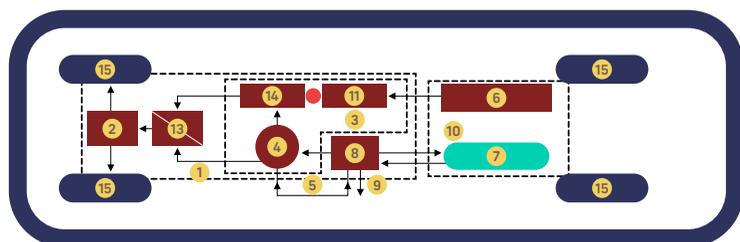
A **FIGURA 4** esquematiza os componentes e o funcionamento de ambas as configurações de veículos híbridos.

FIGURA 4. Configuração do sistema de propulsão híbrido

CONFIGURAÇÃO EM SÉRIE



CONFIGURAÇÃO EM PARALELO



- 1 Unidade de tração
- 2 Sistema de transmissão mecânica
- 3 Unidade de conversão de energia
- 4 Motor elétrico
- 5 Freio regenerativo
- 6 Tanque de combustível
- 7 Baterias
- 8 Controlador
- 9 Carga dos acessórios
- 10 Unidade de estocagem de energia
- 11 Motor de combustão interna
- 12 Gerador
- 13 Acoplador de torque
- 14 Caixa de marchas
- 15 Rodas

FONTE: Adaptado de [47]



Em linhas gerais, o ônibus híbrido é projetado com a capacidade de utilizar os dois motores (combustão e elétrico) e possui uma bateria (ou outro componente de armazenamento) que fornece energia ao motor elétrico e tracionar o veículo. O motor a combustão e a frenagem regenerativa carregam a bateria. Dessa forma, o híbrido utiliza esses três componentes (motor a combustão interna, motor elétrico e bateria) interconectados de maneira a otimizar a potência necessária em um regime de aceleração ou frenagem, para que o veículo opere perto do seu regime ideal de eficiência energética.

Uma condição particular de funcionamento que vem ganhando espaço no mercado de ônibus híbridos é o modo dual. Trata-se da desativação temporária do motor a combustão e da alimentação do motor elétrico exclusivamente pela bateria. Nesse modo totalmente elétrico, o veículo tem a possibilidade de percorrer certas distâncias sem apresentar emissões de escapamento. Essa alternativa pode ser uma solução quando há necessidade de operação dos veículos em Zonas de Baixa Emissão (do inglês *Low Emission Zones*).

2.1.2.2. Híbridos *plug-in*

Ônibus híbridos *plug-in* combinam elementos do veículo elétrico a bateria e do sistema híbrido. Os veículos são alimentados por uma bateria que pode ser carregada por meio de uma fonte de energia externa, um carregador. Uma vantagem dessa tecnologia é a possibilidade de operar em modo totalmente elétrico por determinadas distâncias (semelhante ao modo dual, mencionado nos híbridos convencionais). A autonomia para o ônibus operar no modo elétrico dependerá de diversos fatores, como características da rota, frequência de recarga, porte e outras configurações do veículo [48].

Como os híbridos *plug-in* podem ser carregados por uma fonte externa, esses ônibus conseguem percorrer distâncias de 20 a 50 quilômetros utilizando sua bateria (sem emissões de escapamento) e, em seguida, continuar sua operação utilizando o motor de combustão interna [49]. Apesar dessa característica, os benefícios de mitigação de poluentes e de eficiência energética são mais complexos e incertos do que os benefícios dos ônibus elétricos a bateria [50].

2.1.3. Ônibus elétricos a bateria

Os primeiros ônibus elétricos a bateria eram, em sua maioria, veículos de pequeno porte, como miniônibus e midiônibus. Por volta de 2010, avanços na tecnologia da bateria impulsionaram o surgimento de ônibus elétricos das classes padron e articulados. No Brasil, de acordo com a Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), os primeiros ônibus elétricos a bateria (10 veículos no total) vieram dos Estados Unidos, em 1917, e operaram na cidade do Rio de Janeiro por cerca de 10 anos [51].

O princípio geral de um ônibus elétrico a bateria, também denominado como elétrico puro, é relativamente simples. A energia elétrica fornecida por meio de uma fonte externa pode ser armazenada em uma bateria. Quando necessário, essa energia é extraída da bateria e convertida em força motriz por um motor elétrico. Assim, o veículo se movimenta [52]. Quando a energia das baterias termina, elas precisam ser reabastecidas. Para isso, deve-se fornecer energia elétrica, por intermédio de uma fonte externa (carregador). Assim como nos ônibus híbridos, essa tecnologia se beneficia do abastecimento de energia à bateria por meio



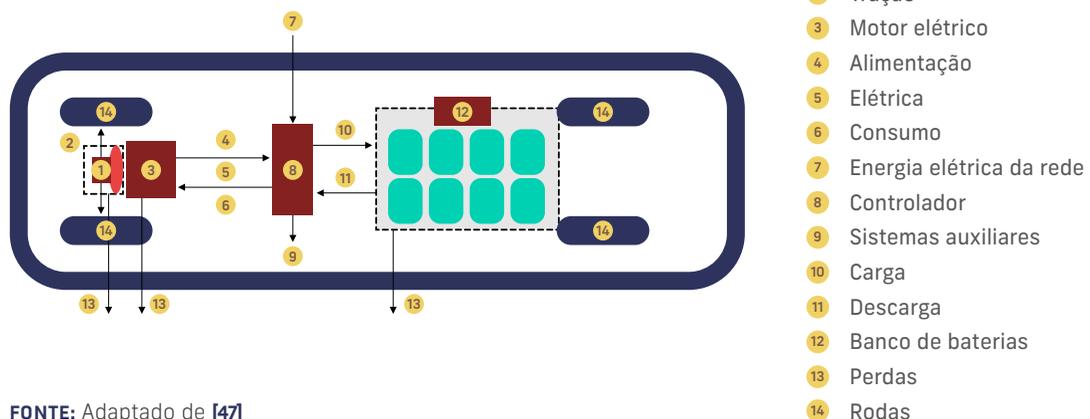
da frenagem regenerativa. Esses veículos apresentam uma grande redução no número de peças e componentes, quando comparados com um ônibus convencional a diesel.

As principais características que distinguem os ônibus elétricos a bateria dos ônibus de combustão interna são os componentes para armazenamento de energia, propulsão e frenagem. No lugar de tanque de combustível, motor, caixa de câmbio e escapamento, encontrados nos veículos a combustão, os veículos elétricos requerem uma bateria, um motor elétrico e conversores de potência. Os motores elétricos são mais eficientes do que motores a combustão, e a frenagem regenerativa fornece ainda mais ganhos de eficiência. Esse sis-

tema de frenagem ajuda a manter a bateria do veículo elétrico carregada, convertendo em eletricidade parte da energia que normalmente seria perdida como calor pela frenagem tradicional [53].

A maioria dos veículos elétricos também tem a bordo um equipamento retificador para transformar corrente alternada (CA), proveniente da rede elétrica, em corrente contínua (CC), apropriada para recarga das baterias [54]. Restrições de temperatura e de custo limitam a potência que o retificador pode converter. Em alguns casos, por isso, é melhor que a conversão seja realizada na estação de recarga, e não no interior do veículo. A FIGURA 5 apresenta o layout dos veículos com sistema de propulsão elétrico.

FIGURA 5. Configuração típica do sistema de propulsão elétrico



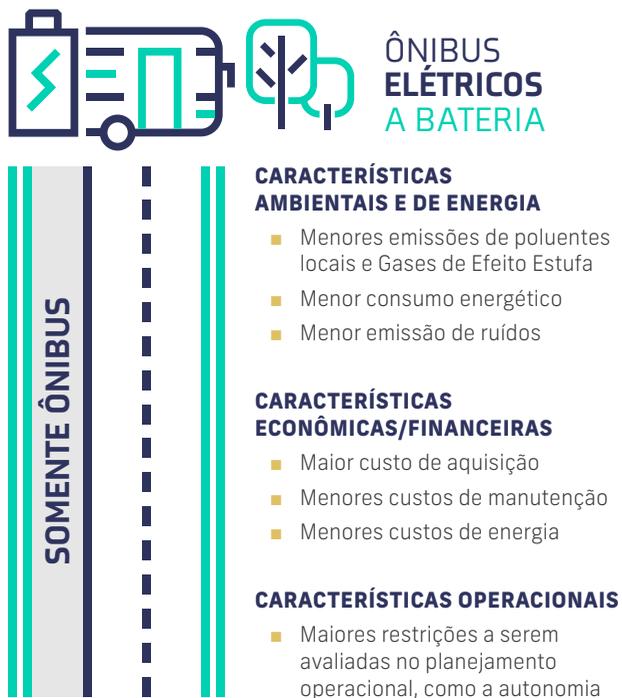
FONTE: Adaptado de [47]

Os ônibus elétricos se diferenciam dos demais por algumas características específicas, que devem ser levadas em consideração para uma implementação de sucesso. A **FIGURA 6** apresenta as vantagens e desvantagens desses veículos conforme características ambientais e de energia, econômicas/financeiras e operacionais.

A **FIGURA 7** apresenta um comparativo entre os tipos de ônibus de tração elétrica.

OS ÔNIBUS ELÉTRICOS A BATERIA SE DESTACAM PELA OBTENÇÃO INTEGRAL DOS BENEFÍCIOS DA ELETROMOBILIDADE E TAMBÉM NA QUESTÃO DA TRANSIÇÃO PARA UM SISTEMA DE TRANSPORTE COLETIVO COM ZERO EMISSÕES. POR ISSO, A PARTIR DAQUI, PARA PADRONIZAR, SEMPRE QUE SE USAR A EXPRESSÃO “ÔNIBUS ELÉTRICOS”, VAI SE ESTAR FALANDO DOS ÔNIBUS ELÉTRICOS A BATERIA DESCRITOS NESTA SEÇÃO.

FIGURA 6. Características ambientais e de energia, econômicas/financeiras e operacionais



FONTE: Elaborado pelos autores.

FIGURA 7. Resumo comparativo dos tipos de ônibus de tração elétrica



FONTE: Elaborado pelos autores.



2.2. Baterias

Esta seção tem o objetivo de consolidar informações e apresentar as características técnicas de um dos principais componentes dos ônibus elétricos: a bateria. As baterias têm a importante função de armazenar energia elétrica e alimentar o sistema de tração. No caso dos ônibus elétricos, esse sistema é alimentado exclusivamente pela energia desse componente.

2.2.1. Aspectos gerais

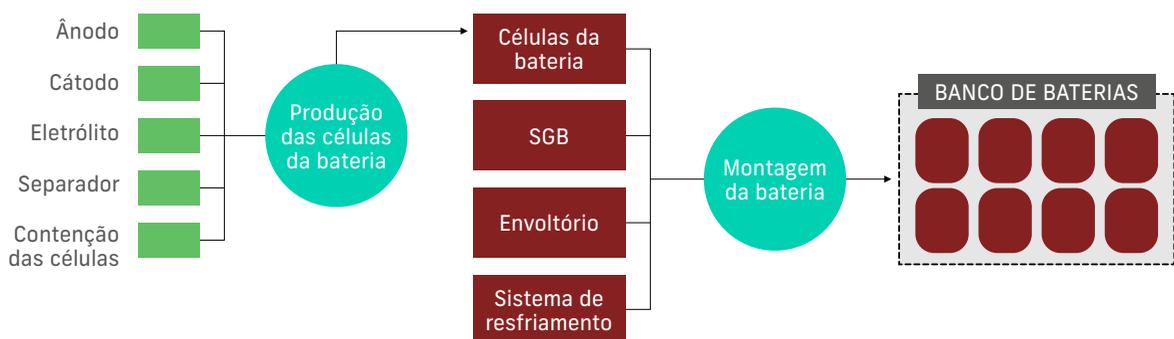
Em linhas gerais, as baterias são dotadas de materiais distintos que compõem dois polos: positivo e negativo. O polo negativo da bateria é chamado de ânodo, e o positivo, de cátodo. Essa diferença de polaridade entre ambos fornece uma tensão terminal, medida em Volts (V). A multiplicação dessa tensão pela corrente elétrica, medida em Amperes (A), gera a energia que, por fim, é medida em Watts-hora (Wh).

As baterias mais comuns na indústria de veículos elétricos são as de íons de lítio, as de níquel-metal hidreto e as de chumbo ácido. As baterias de níquel-metal hidreto e de chumbo ácido têm uma menor representatividade no mercado, devido a limitações como a densidade de energia (Wh/l), os custos de produção, a vida útil e a quantidade de calor gerado em altas temperaturas. São utilizadas principalmente em veículos híbridos [55].

Apesar da existência de diferentes tipos de baterias para veículos, os componentes principais são os mesmos: células, Sistema de Gerenciamento da Bateria (SGB), envoltório e sistema de resfriamento (FIGURA 8).

As células da bateria são compostas por cinco subcomponentes: ânodo, cátodo, eletrólito, separador e contenção das células. O ânodo e o cátodo compõem os eletrodos de uma bateria, ou seja, o polo condutor de corrente elétrica. O ânodo é o eletrodo que libera elétrons, e o cátodo tem a função de absorver elétrons, constituindo-se assim a reação inicial para a produção

FIGURA 8. Esquema dos componentes e subcomponentes de uma bateria



de energia em uma bateria. O eletrólito caracteriza-se por ser o catalisador que permite o fluxo de íons entre o cátodo e o ânodo. Esse subcomponente é formado por sais solúveis, ácidos ou outras bases nos formatos líquido, gelificado e seco. O separador segrega o ânodo do cátodo, permitindo apenas a passagem de íons. Por fim, o último subcomponente permite a contenção das células que compõem o cátodo e o ânodo [56].

O SGB é o sistema eletrônico que gerencia a bateria recarregável por meio de uma interface entre o monitoramento dos componentes químicos da bateria, durante a carga e a descarga, e as informações que são comunicadas ao usuário. Esse sistema, componente essencial em um conjunto de baterias, permite:

- fornecer segurança e uma vida útil prolongada para a bateria;
- revelar o atual estado de carga da bateria e a capacidade de armazenamento restante;
- monitorar de maneira imediata eventos como altas temperaturas ou desequilíbrio entre as células;
- alertar quando a vida útil estimada estiver abaixo da expectativa do usuário.

O envoltório da bateria caracteriza-se pelo formato e pelos materiais utilizados no encapsulamento de todo o sistema. A padronização dos formatos e materiais usados depende do fabricante. Porém, é necessário que o processo de encapsulamento dos materiais siga normas de segurança para a mitigação de acidentes, especialmente quando as baterias são descartadas.

Considerando que as baterias, em geral, operam de maneira otimizada em temperaturas entre 20°C e 27°C, é necessário um sistema de resfriamento. Os métodos mais utilizados de resfriamento são por convecção do ar, passivamente ou de maneira induzida, e arrefecimento por líquidos [57]. Com todos os componentes fabricados, o banco de baterias pode ser montado.

Apresentadas as principais generalidades sobre as baterias, o foco da **SEÇÃO 2.2.2** é a bateria de íons de lítio. A predominância dessa composição química e a sua utilização em maior escala devem-se a características que serão abordadas a seguir.

2.2.2. Baterias de íons de lítio

As baterias de íons de lítio revolucionaram a indústria de veículos elétricos e se tornaram a composição química com maior representatividade nesse setor, tanto para veículos pesados quanto para leves. Essas baterias apresentam características como alta densidade de energia e voltagem, baixa taxa de auto descarga, longa vida útil e alta capacidade de carga e descarga [30]. Em um ônibus elétrico, as baterias atuam nos sistemas de *start-stop*, de frenagem regenerativa, de aceleração e de propulsão dos veículos.

As baterias se diferenciam pela composição do material do cátodo. Em alguns casos, o cátodo contribui com até 20% da massa total da bateria, e a maior parte delas utiliza o elemento cobalto [53]. Não obstante, devido à importância econômica e ao risco de fornecimento do cobalto, os fabricantes estão buscando reduzir a quantidade desse metal na composição das baterias de íons de lítio. As composições e nomenclaturas usualmente utilizadas nessas baterias são:

- Fosfato de ferro lítio – LFP;
- Óxido de lítio manganês – LMO;
- Óxido de lítio cobalto – LCO;
- Óxido de lítio níquel manganês cobalto – NMC;
- Óxido de lítio níquel cobalto alumínio – NCA;
- Titanato de lítio – LTO.

Cada composição tem suas vantagens e desvantagens, e a química selecionada pode variar conforme a oferta de matéria-prima, a produção e os requisitos do conjunto de bateria. Como exemplo, as baterias de fosfato de ferro lítio (LFP) são consideradas seguras e têm uma longa vida útil, porém apresentam uma densidade de energia (Wh/l) menor. Em contrapartida, as baterias de óxido de lítio níquel cobalto alumínio (NCA) oferecem uma maior densidade de energia, mas sua vida útil tende a ser mais curta [30]. As diferentes químicas, que variam conforme as características da cadeia de suprimentos relacionada à produção, contribuem também para as emissões do ciclo de vida da bateria.

“As baterias de íons de lítio revolucionaram a indústria de veículos elétricos e se tornaram a composição química com maior representatividade nesse setor, tanto para veículos pesados quanto para leves.”



COMO É O MERCADO DAS BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO?

A tendência de expansão das baterias de íons de lítio no mercado é positiva por três principais fatores [11]:

- trata-se de uma tecnologia bem estabelecida no mercado, com fabricação em larga escala e um bom entendimento das características de durabilidade dos materiais;
- os grandes investimentos feitos na cadeia de suprimentos para a produção desse tipo de bateria podem constituir um desafio para a entrada de outras composições;
- as alternativas existentes ainda apresentam um baixo grau de disponibilidade, sendo que poucas delas foram testadas e aplicadas em condições reais de operação. Apesar de surgirem em menor escala, essas alternativas têm o objetivo de contornar barreiras apresentadas pelas baterias de íons de lítio e futuramente podem ganhar espaço no mercado. Como exemplo, aponta-se que as baterias de lítio-enzofre poderão ser as sucessoras das baterias de íons de lítio, por serem mais leves e acumularem mais energia [58].



COMO É A RECICLAGEM DESSAS BATERIAS?

O processo de reciclagem de baterias de íons de lítio é desafiador, principalmente quando comparado ao das baterias de chumbo-ácido, que têm matérias-primas mais acessíveis e um processo de reciclagem relativamente mais simples. As baterias de íons de lítio apresentam diferentes estruturas e composições de cátodo, resultando em um custo de reciclagem elevado [53]. Os processos industriais atuais de reciclagem dispõem de uma elevada quantidade de energia e tendem a não atingir níveis satisfatórios de aproveitamento dos materiais para atender ao crescimento da demanda.

O atual método utilizado para a reciclagem das baterias de íons é baseado em um processo pirometalúrgico. Esse processo caracteriza-se pela fusão dos componentes da bateria a restos de outros materiais e não apresenta um resultado com altos níveis de pureza para produção de novas baterias. Outros processos, como os hidrometalúrgicos, estão sendo desenvolvidos. Esses métodos de processamento são mais caros, mas podem produzir materiais de maior pureza, com potencial de reutilização na fabricação de baterias de íons de lítio [30].

Quando se trata de baterias de íons de lítio para veículos, dois aspectos merecem destaque: os custos e a vida útil (**QUADRO 1**).

QUADRO 1. Aspectos de custos e vida útil das baterias.

Custos

Um dos principais desafios das baterias de íons de lítio é o alto custo de fabricação, que incide também no custo final dos veículos. Em geral, a estrutura do custo de fabricação dessas baterias é mantida em sigilo. Estima-se, no entanto, que entre 60% e 66% do valor corresponda à matéria-prima. Os encargos trabalhistas respondem por 5% a 15%. O restante seriam custos adicionais, como processos de fabricação e distribuição, além do lucro do fabricante **[59]**.

Tais custos estão inversamente relacionados com o crescimento do mercado de veículos elétricos. Na medida em que a tecnologia ganha atratividade e a demanda aumenta, a produção em maior quantidade levará à redução do custo unitário, reduzindo assim o valor final do veículo. Desde 2010, os preços das baterias caíram 79%, e estima-se que essa tendência seja mantida nos próximos anos **[30]**. Além da redução dos custos, as baterias de íons de lítio tiveram, nos últimos anos, um aumento da densidade de energia **[60]**.

Vida útil

A vida útil das baterias é usualmente medida de duas formas: pelo número de ciclos que ela pode completar ou pela quantidade de anos de durabilidade. Um ciclo de carga é contabilizado quando se utiliza toda a energia armazenada na bateria e, então, é necessário carregá-la novamente. O número de ciclos pode ser afetado pela química e pelo tipo de células utilizadas nas baterias. Cada química de bateria tem suas vantagens e desvantagens.

As baterias têm uma vida útil devido às reações químicas contínuas que ocorrem dentro de seus componentes. Essas reações se dão independentemente da utilização, mas podem se intensificar em situações desfavoráveis, como quando as baterias são submetidas a altas temperaturas.

Considera-se, assim, que as baterias atingem o fim de sua vida útil, para aplicação nos ônibus, quando a capacidade de armazenamento atinge patamares inferiores a 80% do valor inicial. Utilizadas adequadamente, as baterias podem ter uma vida útil de oito a 15 anos **[11]**.

FONTE: Elaborado pelos autores.

Ao longo deste guia, aborda-se a necessidade de prever garantias contratuais que minimizem o impacto da bateria nos projetos de eletromobilidade. Apesar de ser um tópico complexo, a previsão de garantias tecnológicas adequadas pode atenuar impactos econômicos e facilitar a adoção da tecnologia.

Entender as funções e características da bateria é importante para reduzir riscos na aquisição e garantir a operação da tecnologia. Um tópico menos abordado, mas também de suma importância, é o planejamento da utilização após o fim da vida útil. Como se mostra a seguir, ainda é possível utilizar essas baterias para armazenamento estacionário de energia e gerenciamento de pico de demanda.

2.2.3. Disposição e reciclagem

Definir o destino e a disposição das baterias após o término da vida útil é um tema complexo, mas garantir níveis elevados de reciclagem pode resultar em benefícios para a produção dos veículos e incidir na redução do preço final dos ônibus elétricos.

A recuperação de materiais críticos para a produção de baterias, por meio de um sistema consolidado de reciclagem, significaria menor demanda por matérias-primas, queda nas emissões de GEE e contenção dos impactos locais negativos resultantes da mineração e do refinamento **[11, 61]**. Os benefícios ambientais variam conforme o balanço entre as emissões geradas pelo

processo de recuperação dos materiais (reciclagem) e as emissões do processo de extração e processamento das matérias-primas (produção). Em geral, as emissões provenientes do processo de reciclagem tendem a ser menores, especialmente com a utilização de fontes de energia térmica de baixo carbono e por meio da melhoria da eficiência energética da unidade de reciclagem.

A situação no Brasil é similar à de diversos países onde muitas das políticas e regulamentações de disposição e reciclagem para baterias foram desenvolvidas antes da existência do mercado de veículos elétricos, deixando de cobrir as baterias de íons de lítio. É de extrema importância a construção de uma regulamentação que consolide e direcione o manejo adequado desse tipo

de baterias para os ônibus elétricos. Tal regulamentação pode diminuir incertezas no projeto e, até mesmo, fomentar uma maior adoção da tecnologia.

Na medida em que a indústria de reciclagem de baterias e as regulamentações estejam adequadas ao avanço do mercado, a reutilização dessas baterias, como segunda vida, ganhará relevância. Após o final da vida útil e antes da reciclagem, existe ainda a possibilidade de utilização das baterias como armazenamento estacionário de energia. Dado que após o final da vida útil as baterias ainda conservam cerca de 80% da capacidade de armazenamento, elas podem ser reaproveitadas para deslocamento de pico de energia elétrica e para armazenamento de energia (**QUADRO 2**).

QUADRO 2. Possibilidades de segunda vida das baterias

Deslocamento do pico de energia

O conceito de deslocar o pico consiste em recarregar as baterias que já encerraram sua vida útil nos momentos de ociosidade da rede de energia. Na hora de pico, essas baterias seriam então usadas para reforçar a oferta de abastecimento dos veículos elétricos. Os benefícios de reaproveitar as baterias incluem contenção de custos, utilização mais eficiente da rede de transmissão, redução de emissões e integração com fontes de energia renovável [62].

Estima-se que o custo para reaproveitar um conjunto de baterias e transformá-lo em elemento de armazenamento de energia estacionária abranja transporte, trabalho e processos adicionais de adequação ao novo funcionamento [30]. Apesar de todos esses custos, essa adequação ainda se mostra mais econômica do que a aquisição de um novo conjunto de baterias. É importante salientar que, com a tendência de redução de preço das baterias, torna-se necessário avaliar os impactos econômicos desse reaproveitamento, para garantir a viabilidade do projeto.

Armazenamento de energia

A utilização das baterias para armazenamento de energia pode dar suporte à implementação do conceito de *smart grids*. Essas redes inteligentes são sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica que utilizam recursos digitais. Dessa forma, o sistema opera de forma mais eficiente, por meio de um maior controle do fluxo de energia, resultando em um modelo mais sustentável. A existência de um sistema de armazenamento de energia mostra-se fundamental para o desenvolvimento dessas redes inteligentes, por permitir a transição e a adequação do fornecimento de energia conforme os períodos de pico ou de menor demanda.

Apesar das incertezas e de ser um modelo ainda em desenvolvimento, já surgem algumas iniciativas de utilização como segunda vida por parte de fabricantes e entidades. Na China, a fabricante Build Your Dreams (BYD) anunciou a instalação, na província de Hunan, de um projeto de armazenamento de energia como segunda vida de baterias. Nos Estados Unidos, o Center for Transportation and the Environment, em parceria com a Universidade do Texas, desenvolveu um sistema que possibilita a veículos híbridos e elétricos servir como geradores de energia móveis e sob demanda [42].

FONTE: Elaborado pelos autores.

2.3. Infraestrutura de recarga

Planejar e instalar a infraestrutura necessária para a operação dos ônibus elétricos pode ser um desafio. O tema desta seção são os conceitos básicos necessários para desenvolver uma estrutura de recarga que seja condizente com o contexto local e as características do projeto. Inicialmente, os principais sistemas e estratégias de recarga serão definidos. Também serão discutidos tópicos referentes à capacidade da rede de energia e às adequações necessárias.

2.3.1. Sistemas de recarga

O sistema ou tecnologia de recarga caracteriza-se pela forma como a eletricidade é transmitida da rede elétrica para o sistema de armazenamento do veículo. Os dois sistemas de recarga abordados nesta seção são a **recarga condutiva** e a **recarga indutiva**.

2.3.1.1. Recarga condutiva

A recarga condutiva ocorre quando o carregamento é realizado por meio de uma conexão física entre a rede elétrica e o veículo. Os métodos mais comuns de recarga condutiva são **plug-in** e **pantógrafo**.

A **recarga plug-in** é uma das opções mais populares e mais viáveis economicamente. Oferece ampla variedade de tipos de conectores, de velocidades de recarga e de fabricantes/fornecedores.

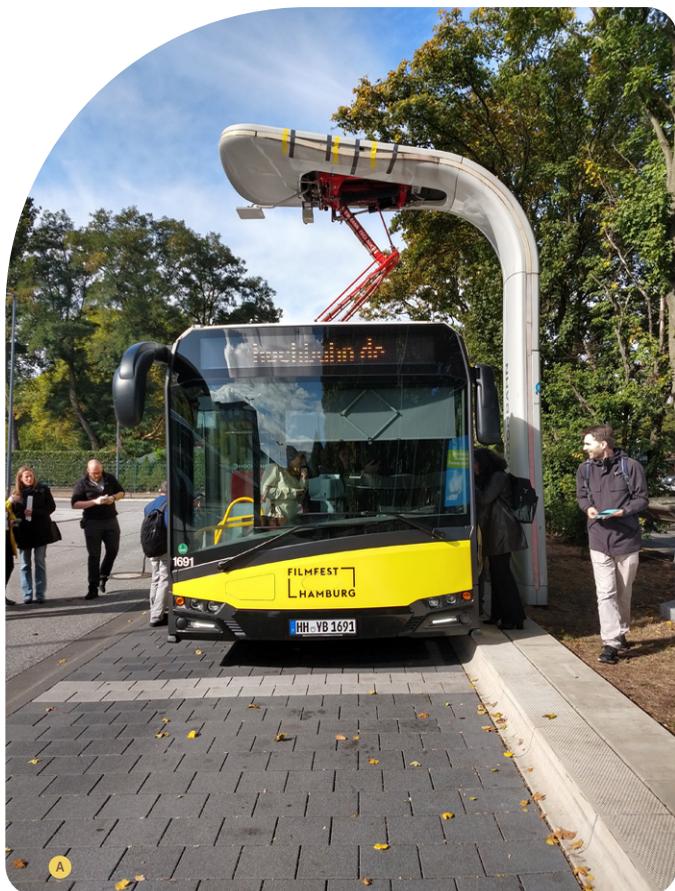
Embora seja, em geral, de carregamento mais lento do que outras opções (o que limita o período em que o ônibus está disponível para operação, reparo e manutenção), a recarga **plug-in** pode reduzir os gastos com eletricidade, uma vez que os veículos são carregados durante a noite, quando a energia costuma ser mais barata. Por causa desse carregamento noturno, o conjunto de baterias tende a ser maior, para assegurar mais autonomia ao veículo. No entanto, baterias maiores também tornam os ônibus mais pesados, podendo reduzir a quantidade de espaço disponível para os passageiros, gerar um consumo de energia mais elevado por quilômetro rodado e comprometer o pavimento das vias.

QUAL O TEMPO NECESSÁRIO PARA UMA RECARGA PLUG-IN?



O tempo necessário para recarregar o veículo por meio desse sistema é, em geral, de três a seis horas, podendo chegar a até oito horas [63, 64]. É importante destacar que isso dependerá primordialmente de especificações técnicas como a necessidade de autonomia dos veículos e a potência dos carregadores. Uma pequena tomada doméstica pode proporcionar uma potência de 1,2 kW, enquanto as estações de recarga condutiva apresentam potências de até 450 kW [64]. As velocidades de carga também estão associadas ao tipo de corrente, alternada (CA) ou contínua (CC). Apesar de ainda não existir uma definição clara de quais intervalos de potência (kW) caracterizam-se por uma recarga lenta ou rápida, quando se utiliza uma corrente do tipo CA o carregamento é considerado em modo lento, e o veículo deve ter um equipamento a bordo para realizar a conversão para CC. Já o tipo CC está associado a uma velocidade de carga rápida.





Além disso, um importante componente desse sistema de recarga, que pode possibilitar uma padronização e interoperabilidade tanto para veículos pesados quanto para veículos leves, são os plugues. O **QUADRO A1-1 DO ANEXO 1** apresenta um compilado de modelos, características e regiões de maior utilização dos principais modelos de carregadores *plug-in*. Vale salientar que essa tecnologia se mostra em constante evolução e que as características dos plugues podem ser aprimoradas ao longo dos anos.

Com o objetivo de acelerar o processo de padronização dos plugues no mercado, foi criado o Sistema de Carga Combinada (em sua sigla em inglês CCS – *Combined Charging System*), que se baseia em padrões universais para veículos elétricos. O CCS é uma combinação de plugues e de entradas, bem como um sistema de gestão que visa proporcionar uma solução para todos os requisitos de carga necessários e promover a interoperabilidade dos sistemas de recarga. Isto é, tanto um veículo pesado quanto um leve, de diferentes fabricantes, devem poder utilizar a mesma infraestrutura de recarga. O **QUADRO A1-2 DO ANEXO 1** apresenta os dois principais plugues, denominados de Combo 1 e Combo 2.

Outro sistema de recarga condutiva é a **recarga por pantógrafo**. Esse sistema vem ganhando popularidade nas novas frotas de ônibus elétricos na Europa e nos Estados Unidos. Ele oferece uma gama de velocidades de carregamento, devido às variadas tecnologias de pantógrafo.

O pantógrafo implica em parar o ônibus sob ou próximo a um dispositivo de carregamento, que se conecta à parte superior ou à lateral do veículo. Os pantógrafos podem carregar a bateria com muito mais rapidez do que no sistema *plug-in*.

Em geral, os ônibus projetados para esse tipo de recarga têm baterias menores, o que pode reduzir os custos de aquisição, liberar mais espaço para os passageiros e melhorar a eficiência energética do veículo. No entanto, a autonomia é menor, o que pode gerar a necessidade de recarregar os veículos durante o dia, quando o custo da eletricidade tende a ser mais alto. Por isso, deve-se avaliar qual será o impacto da adoção desse tipo de carregamento na operação de um sistema de eletromobilidade.

2.3.1.2. Recarga indutiva

A recarga indutiva é um sistema de carregamento no qual o ônibus é alimentado com energia elétrica fornecida por meio de um campo magnético, sem conexão direta entre o veículo e o carregador, como ocorre no sistema condutivo. Esse modelo já é utilizado em sistemas de transporte sobre trilhos. O carregamento indutivo fornece de 50 kW a 200 kW de potência, geralmente obtidos a partir de pontos de carregamento localizados no solo [66].



QUAIS NORMAS DEVEM SER AVALIADAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA INFRAESTRUTURA?



Como normatização para esses sistemas, existem duas normas aplicáveis: ABNT NBR IEC 61851 e 62196. Ambas apresentam diretrizes e padrões em conformidade com a organização mundial International Electrotechnical Commission (IEC). A NBR IEC 61851 estabelece requisitos gerais, métodos de carregamento, configurações de conexão, requisitos de proteção, equipamentos de alimentação e ensaios funcionais das estações para um sistema de recarga. Já a NBR 62196 tem como base a norma citada anteriormente, porém com enfoque nos plugues e cabos de recarga para os veículos elétricos [65].

FIGURA 9. Resumo comparativo dos sistemas de recarga

RESUMO Sistemas de recarga	CONDUTIVA		INDUTIVA
	PLUG-IN	PANTÓGRAFOS	SEM FIO
Custo de infraestrutura e manutenção	●○○	●●○	●●●
Custo do conjunto da bateria	●●●	●○○	●○○
Autonomia	●●●	●○○	●○○
Potência do carregador [kW]	25-150	50-450	50-200
BAIXO (A) ●○○	MÉDIO (A) ●●○	ALTO (A) ●●●	

O exemplo de recarga indutiva mais difundido é a recarga sem fio. Caracteriza-se por um sistema no qual a energia é transferida de uma bobina enterrada no solo a uma bobina de captação acoplada ao veículo.

Esse método permite que o ônibus carregue com mais frequência e por períodos mais curtos, apresentando os mesmos benefícios de redução do tamanho da bateria que os sistemas condutivos por pantógrafo. Construir esse equipamento de recarga no pavimento pode reduzir o impacto visual da infraestrutura, mas torna a manutenção ou a substituição mais complexas. Essa tecnologia é, atualmente, a que apresenta maiores custos de implementação, sendo utilizada, na maioria dos casos, em projetos-piloto [25].

A FIGURA 9 apresenta um comparativo entre os sistemas de recarga.

FONTE: Elaborado pelos autores.



A

2.3.2. Estratégias de recarga

Definir uma estratégia de recarga adequada ao contexto local e ao tamanho da frota de ônibus é fundamental para o sucesso do projeto. Nesta seção, classificam-se as estratégias de recarga que podem ser utilizadas, como **recarga na garagem**, **recarga de oportunidade** e **recarga mista**.

Na **recarga na garagem**, os ônibus elétricos são alimentados durante um período específico. Como isso costuma acontecer à noite, ela também é chamada de recarga noturna. O sistema de recarga frequentemente adotado para atender essa estratégia é o *plug-in*.

Para atender aos requisitos de operação, a adoção dessa estratégia implica na necessidade de um conjunto de baterias maiores (250 kWh a 500 kWh), com o objetivo de proporcionar mais autonomia ao veículo [67]. Como já foi mencionado anteriormente, maiores baterias significam maior peso do veículo, maior custo de aquisição do conjunto de baterias, menor espaço para passageiros e menor eficiência energética.

A recarga na garagem requer potências entre aproximadamente 25 kW e 150 kW para cada carregador, sendo que, na maioria dos casos, potências entre 50 kW e 100 kW já são suficientes para a recarga, que dura entre três e seis horas, dependendo da potência do carregador e da capacidade de armazenamento da bateria [63, 64]. Em alguns casos, os tempos de recarga nessa modalidade podem chegar a até oito horas, conforme a potência dos carregadores.

Comparativamente, os custos para implementação dessa infraestrutura são vantajosos. Como os veículos podem ser carregados durante o período da noite e,

consequentemente, por um intervalo mais longo, a potência necessária para os carregadores pode ser menor, e o impacto na rede elétrica, também. No entanto, dependendo do tamanho da frota, uma grande quantidade de veículos em carregamento simultâneo pode resultar em um maior impacto na rede elétrica [30]. Para minimizar esse impacto, recomenda-se que sejam implantados sistemas de recarga inteligente (do inglês *smart charging*), que avaliam o estado de carga de cada veículo e direcionam a energia sob demanda. Outra vantagem dessa estratégia é que o custo de eletricidade, durante a noite, tende a ser menor.

Nessa estratégia, recomenda-se que a garagem fique perto das rotas de operação, para que a quilometragem morta seja minimizada. Com o carregamento na garagem, a operação dos ônibus elétricos apresenta maior flexibilidade em termos de rotas [68]. Não é necessário que a infraestrutura esteja alocada ao longo das vias, como é o caso da recarga de oportunidade.

Em termos de infraestrutura, a garagem deve abrigar oficinas e parte elétrica, o que inclui transformadores para compatibilizar as tensões entre a rede de energia e os pontos de recarga. A carga total da rede de cada garagem deve ser calculada levando em consideração critérios de segurança, número de carregadores, máxima potência de recarga de cada um deles e outros fatores, como a estratégia de recarga, o tamanho da frota e as características das rotas. Pode-se ainda avaliar a instalação de painéis solares nas garagens, mitigando os gastos com energia e tornando a eletromobidade ainda mais sustentável.

O **ESTUDO DE CASO 1** apresenta como Londres desenvolveu o projeto para a primeira garagem adaptada para recarga de ônibus elétricos fora da China.





ESTUDO DE CASO 1 LONDRES, INGLATERRA

A primeira garagem adaptada para recarga de ônibus elétricos fora da China.

Em 2016, o operador de ônibus londrino Go-Ahead London adquiriu 46 ônibus elétricos a bateria. Como consequência da mudança tecnológica, o operador teve de superar o desafio de ser o primeiro da cidade a adaptar uma garagem utilizada para abastecimento de ônibus a diesel à recarga dos novos ônibus elétricos [64].

A garagem apresentava limitações de espaço, e foi necessário o envolvimento de diversos atores para que o projeto tivesse êxito. Trabalharam em conjunto a cidade (Setor de Engenharia), o operador de ônibus (Go-Ahead London), a empresa responsável pela rede de energia (SSE), a empresa responsável pelo fornecimento de energia (UKPN) e o fabricante dos ônibus (Alexander Dennis, ADL). Além disso, as estações de recarga e seus componentes foram fornecidos pela empresa chinesa BYD, em uma parceria com o fabricante ADL.

Para o carregamento de todos os veículos, uma conexão de rede de 2,5 MW foi instalada pela UKPN. Para o fornecimento de energia, instalaram-se duas subestações de 11 kV na garagem. Foram necessários dois transformadores, fornecidos pela SSE. Por fim, duas placas distribuem essa energia para 45 carregadores *plug-in* – 43 com uma potência de carga de 40 kW e dois com uma potência de 80 kW, que permitem a recarga completa em 8h e 4h, respectivamente.





Além do planejamento e da implementação da infraestrutura de recarga, o espaço físico também representou um desafio. Com a instalação dos carregadores, a área de manobra e estacionamento dos veículos teve de ser repensada, pela necessidade de maior espaço para cada veículo. A **FIGURA ES1-1** apresenta a *layout* da garagem, indicando o local de estacionamento dos veículos e dos equipamentos de recarga.

Com essa mudança de *layout*, os motoristas não podem mais escolher aleatoriamente seus veículos. Foi necessária uma gestão inteligente que determina a sequência de carregamento, em concordância com a programação horária do dia seguinte e com o estado de carga de cada veículo. Isso levou à necessidade de estabelecer um cronograma de manobra e de retirada de veículos para cada motorista, além de um treinamento intensivo de direção. A escolha da estratégia de recarga noturna se deveu ao fato de todos os veículos operarem durante o dia.

Durante seis meses, até a obra estar finalizada, o operador teve de se adaptar e estacionar os veículos existentes em áreas vizinhas. Apesar disso, a operação foi mantida em quase 100% durante todo o período.

A experiência obtida pela cidade ajudou a dar escala à ideia. Atualmente, mais de 100 garagens em Londres já se encontram adaptadas para o carregamento e a operação de ônibus elétricos.

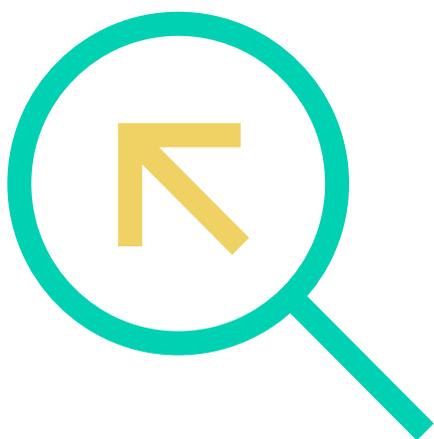
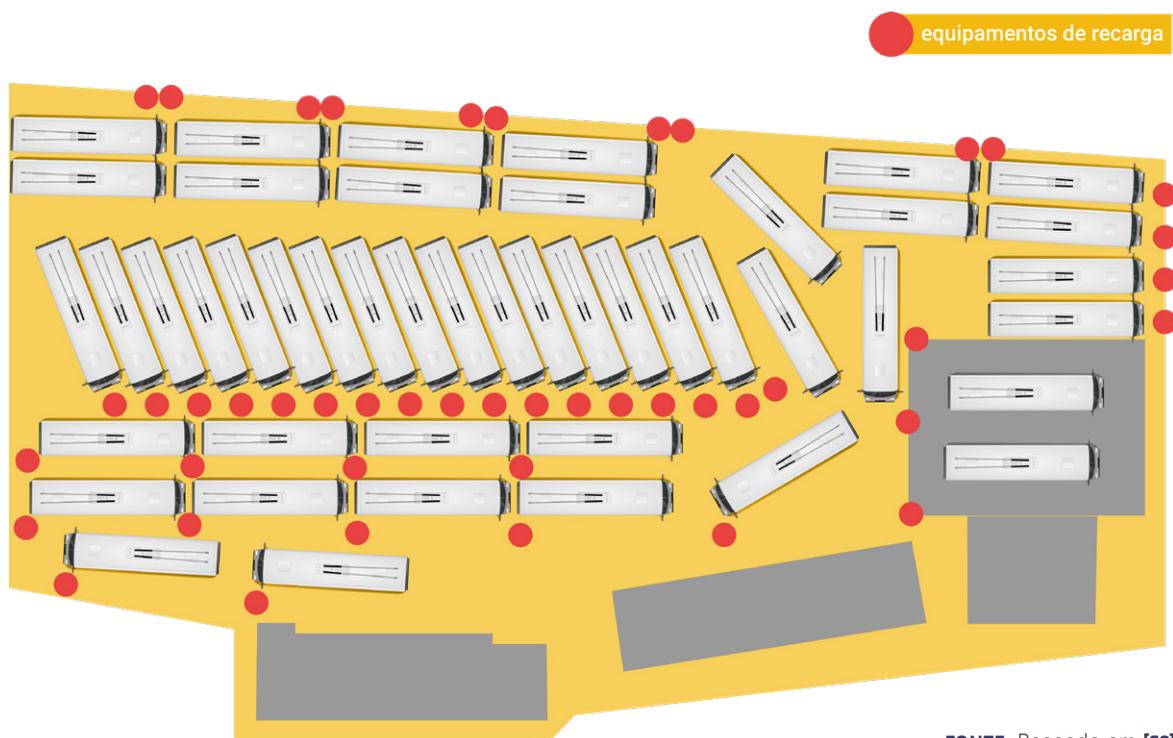


FIGURA ES1-1. *Layout* da garagem



FONTE: Baseado em [69]

A **recarga de oportunidade** consiste na recarga do veículo ao longo da rota, em locais predeterminados, que podem ficar em terminais ou em pontos de ônibus. O tempo de carregamento também varia, dependendo da potência da tecnologia adotada. No entanto, o tempo é inferior ao da recarga na garagem, variando de segundos a até alguns minutos para uma carga parcial. Essa carga parcial deve permitir que o ônibus chegue ao próximo ponto de carregamento, com uma folga de autonomia.

Para adotar a recarga de oportunidade, é possível usar tanto as tecnologias condutivas de transmissão de energia (pantógrafo ou *plug-in*) quanto a indutiva (sem fio). O mais usual é a utilização dos pantógrafos.

Como os pontos de recarga são distribuídos ao longo das rotas ou nos terminais, essa estratégia requer baterias menores e, conseqüentemente, resulta em uma autonomia reduzida. A capacidade de armazenamento das baterias pode variar de 30 kWh a 90 kWh, diminuindo os custos de aquisição desse componente [44]. No entanto, essa estratégia apresenta altos custos de implementação da infraestrutura e limita a flexibilidade de operação, na medida em que fixa os pontos onde o veículo pode ser carregado.

A estratégia de recarga mais viável, dos pontos de vista técnico e econômico, varia de projeto para projeto. Em alguns casos, a melhor opção pode ser a combinação da recarga na garagem com a de oportunidade. Assim, surge a **recarga mista**. Essa estratégia caracteriza-se por possibilitar uma recarga noturna do veículo e recargas auxiliares durante a operação diurna, reduzindo assim a necessidade de que o veículo saia da garagem com uma grande autonomia. Este é o caso do órgão de transporte Foothill, no condado de Los Angeles, que optou pela utilização de pantógrafos que permitem uma carga de oportunidade e pela utilização da recarga *plug-in* na garagem, durante a noite.

2.3.3. Impacto da eletromobilidade na rede de energia

A introdução de frotas de ônibus elétricos pode ter um efeito significativo na rede de energia elétrica local. É essencial, no planejamento do projeto, avaliar a capacidade da rede de lidar com essa nova demanda e ainda fornecer, normalmente, energia aos outros usuários.

O impacto de um projeto de ônibus elétricos na rede de energia varia conforme a quantidade de ônibus que

COMO É ESCOLHIDA A LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE RECARGA?



A localização dos pontos de recarga deve ser bem pensada, uma vez que não pode atrapalhar o tráfego ou outros ônibus. Existem algumas condições operacionais para adoção dessa estratégia. Ela só é recomendável, por exemplo, se o tempo de recarga não superar 1/6 do tempo de rota entre os pontos de recarga. Ou seja, se o tempo entre os pontos é de 2 minutos (120 segundos), indica-se que o tempo de recarga não seja superior a 20 segundos.

Quanto à infraestrutura, é importante considerar a necessidade de um transformador (de média a baixa tensão), do equipamento de recarga (com uma saída de corrente contínua) e de outros componentes que podem demandar um grande espaço na via [64].



compõem a frota, a estratégia de recarga utilizada, as características da rede elétrica local, o pico de demanda de energia e a potência instalada.

A potência instalada (kW) exigida para o carregamento dos veículos é o fator primordial a ser considerado para estimar o impacto do projeto e, conseqüentemente, as adequações necessárias na rede elétrica. Essa potência definirá o dimensionamento da rede e os investimentos necessários para assegurar o fornecimento adequado nos pontos de ônibus ou nas garagens.

Para a concessionária de energia elétrica, essa potência representa a quantidade de eletricidade que deve ser fornecida ao cliente. À medida que a demanda aumenta, o impacto na rede elétrica tende a ser maior. Se, além dos carregadores, forem necessários outros equipamentos que demandem um aumento da capacidade instalada, é fundamental incluir o valor extra na potência que será contratada junto à companhia de energia.

Uma visão geral do processo de cálculo utilizado para estimar a potência instalada, proveniente do dimensionamento dos carregadores, é mostrada na **FIGURA 10 [70]**. A primeira etapa do processo é função de quatro parâmetros principais:

- distância média diária percorrida por veículo [km];
- número de veículos a serem carregados;
- consumo energético dos veículos [kWh/km];
- janela de tempo para recarga [h].

Para a **recarga na garagem**, ainda se recomenda o acréscimo de um fator de contingência ao valor da potência instalada, para, então, determinar a potência total. Esse fator tem como objetivo prever uma energia adicional, em função da necessidade de uma pequena proporção da frota precisar ser carregada em uma menor janela de tempo. Para cobrir essas situações, é comum que seja considerada a utilização de carregadores de maior potência.

No que tange à **recarga de oportunidade**, a potência mínima de cada carregador é muito maior, quando comparada com a recarga na garagem, para prover a energia necessária em um curto período. Assim, é necessário verificar também se a rede elétrica local tem a capacidade de fornecer essa potência sem resultar em uma instabilidade para os demais usuários. Por outro lado, como o carregamento é distribuído em pontos de ônibus ou terminais, e os veículos não são todos car-

regados ao mesmo tempo (como pode ocorrer na recarga na garagem), a potência total demandada tende a ser menor.

A adoção de ônibus elétricos pode exigir adaptações e instalações adicionais na rede elétrica local. Em cidades onde o atendimento da demanda de energia é mais estruturado, os impactos nos níveis mais altos de distribuição e transmissão tendem a ser menores. Em outras cidades, podem ser necessárias adaptações nas redes de transmissão para atendimento da demanda. A implementação das frotas de ônibus elétricos em fases pode ser uma alternativa para possibilitar que os ajustes necessários da rede de energia também sejam executados de forma gradual.

Por fim, alguns outros componentes e pontos importantes a considerar serão abordados na seção de infraestrutura de recarga **(3.3.2.3)**.

FIGURA 10. Estimativa de energia para verificação de impactos na rede elétrica



FUNTE: Adaptado de [70]

2.4. Aspectos operacionais



Esta seção discute aspectos operacionais que influenciam no desempenho dos ônibus elétricos e que serão divididos em: **sistemas auxiliares (ar condicionado, ventilação e aquecimento), características da rota, comportamento durante a condução e outros parâmetros.**

A utilização de **sistemas auxiliares** como **ar condicionado, ventilação e aquecimento** influencia diretamente na eficiência energética do veículo. O impacto é maior e deve ser um ponto de atenção em regiões com temperaturas extremas, seja por causa de invernos rigorosos ou verões muito quentes [71]. A maior parte das cidades brasileiras não experimenta invernos rigorosos, mas esse é um fator importante em certos países europeus.

Um estudo com base em testes operacionais verificou que 21,4% do consumo total de energia de um ônibus elétrico com carregamento indutivo (sem fio) decorria do sistema auxiliar de aquecimento [72]. Nesse mesmo estudo, a utilização de ar condicionado representava 18,8% do consumo. O uso do ar condicionado pode reduzir a autonomia dos veículos em até 40%. Sugere-se que uma temperatura ideal de operação, que não exige o acionamento desses sistemas auxiliares, seria próxima de 21°C [73].

No que tange às **características da rota**, é importante verificar o impacto de variáveis como velocidade média e máxima e topografia [71].

Tanto em velocidades médias baixas quanto em velocidades médias elevadas, a eficiência dos ônibus elétricos – quando comparados com veículos a die-

sel – mostra-se superior. A grande diferença é que os veículos elétricos apresentam um consumo de energia mais uniforme, seja em velocidades baixas ou nas mais altas. Isto é, o consumo de energia tende a não variar tanto com o aumento ou a diminuição da velocidade média [76]. Entretanto, é importante garantir a prioridade na via ao transporte coletivo, para que ele possa ter um bom desempenho – mantendo sua eficiência – e garantir a confiabilidade do serviço.

Sobre a topografia da rota, a seguinte generalização pode ser feita: quanto maior o aclive a ser superado, maior será o consumo de energia, devido à necessidade de superar a força vertical [77]. Alguns fabricantes reportam que os ônibus elétricos superam aclives de até 18% [78].

O **BOX 2** apresenta um exemplo de como as características da rota podem impactar no desempenho dos veículos elétricos.

Sobre o **comportamento durante a condução**, salienta-se a importância de um treinamento específico para os motoristas. A condução adequada e a correta utilização do sistema de frenagem regenerativa podem gerar ganhos de até 14% na eficiência energética e até mesmo prolongar a vida útil da bateria [79, 80].

Destacam-se, por fim, **outros parâmetros** que podem afetar o desempenho e o planejamento operacional dos ônibus elétricos. O consumo de energia por veículos elétricos é afetado pelas condições atmosféricas, não somente por influência direta na capacidade de armazenamento das baterias, mas também pelo aumento do consumo devido à demanda dos sistemas auxiliares (mencionados anteriormente).

Um estudo realizado na Europa com 22 ônibus elétricos durante um período de 12 meses calculou a energia consumida em diferentes condições atmosféricas [81]. Em geral, os resultados apontam que o consumo de energia por ônibus elétricos cresce com a redução da temperatura e da pressão atmosférica e com o aumento da umidade e da densidade do ar, enquanto a energia recuperada pela frenagem regenerativa aumenta com a elevação da temperatura e cai com o crescimento dos outros três parâmetros.

Por fim, variáveis como o carregamento de passageiros e os níveis de congestionamento podem afetar significativamente o desempenho do veículo, mas o impacto se assemelha ao que já é verificado em outras tecnologias de ônibus usualmente utilizadas no transporte coletivo.

QUAIS SÃO AS ESTRATÉGIAS PARA DISTRIBUIR O PICO DE DEMANDA?

Destacam-se aqui algumas estratégias para distribuir o pico de demanda de energia e, assim, atenuar o impacto da eletromobilidade na rede de energia elétrica [34,70]:

- **armazenamento de energia:** consiste em armazenar a energia durante os períodos de menor demanda e fornecê-la nos momentos em que um maior número de veículos é carregado simultaneamente;
- **combinação de estratégias de recarga:** para distribuir a potência instalada de um ponto específico da rede elétrica para outros locais, é interessante avaliar a possibilidade de combinar as estratégias de recarga, como na mencionada recarga mista;
- **geração de energia renovável:** a utilização de energias renováveis no ponto de recarga pode ser uma alternativa interessante para mitigar o impacto na rede local. As regulamentações necessárias para viabilizar essa alternativa devem ser avaliadas;
- **sistemas de gerenciamento inteligente de recarga:** a utilização desse tipo de sistema de gerenciamento, nas garagens, tem como objetivo otimizar a energia necessária durante a recarga com base no tamanho da frota, no tempo disponível de recarga, no estado de carga de bateria de cada veículo e em requisitos de operação;
- **tarifas programadas:** essa modalidade pode permitir que as garagens tenham demandas estimadas de energia diferentes durante o dia e a noite e, conseqüentemente, tarifas diferenciadas. Por exemplo, ao exigir uma demanda de energia mais alta apenas no período da noite, o impacto na rede elétrica e as adequações podem ser minimizados.



O QUE É IMPORTANTE AVALIAR NOS SISTEMAS AUXILIARES, LEVANDO EM CONSIDERAÇÃO AS CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DAS CIDADES BRASILEIRAS?

Na maior parte do Brasil, o que deve ser considerado, por impactar diretamente na eficiência e nos custos energéticos do projeto, é a utilização do ar condicionado. Um estudo realizado em Macau (China) avaliou dois ônibus elétricos diferentes, um fabricado pela BYD e outro pela Anka. Os testes foram feitos em uma rota de 8,8 quilômetros, e os veículos obtiveram velocidades médias de 15,8 km/h e 13,2 km/h, respectivamente. As temperaturas externas

variaram entre 15°C e 25°C. Quando acionado o sistema de ar condicionado, os veículos consumiam entre 10% e 17% a mais de energia do que com o sistema desligado, nas mesmas condições ambientais [74]. Vale salientar que, em ônibus convencionais, o impacto do ar condicionado também é significativo para o consumo de energia, chegando a valores superiores a 30% [75].

BOX 2

Avaliação do desempenho de ônibus elétricos em diferentes rotas

Para conhecer melhor a tecnologia e o desempenho dos ônibus elétricos ofertados no mercado estadunidense, a Federal Transit Administration conduziu, em parceria com a Universidade Estadual da Pensilvânia, uma avaliação de três ônibus elétricos de diferentes fabricantes [82, 83, 84]. Todos os veículos foram submetidos a testes em laboratório de integridade estrutural e consumo energético. Os veículos também tiveram seu desempenho simulado para três rotas com características distintas: em áreas centrais (1), vias arteriais (2) e zonas interurbanas (3), conforme o **QUADRO B2-1**.

QUADRO B2-1. Características das rotas avaliadas

Rota	Extensão [km]	Distância entre pontos de ônibus [m]	Número de pontos de ônibus por segmento	Velocidade máxima [km/h]	Velocidade média [km/h]
1	3	200	15	32	19
2	3	750	4	64	42
3	6	6.000	1	64	61

FONTE: Baseado em [82, 83, 84]

Os três veículos, todos de 12 metros de comprimento, eram dos fabricantes BYD, Proterra e New Flyer e tinham as características apresentadas no **QUADRO B2-2**.

QUADRO B2-2. Características dos ônibus

Ônibus	Bateria [kWh]	Estratégia de recarga	Potência do carregador [kW]
BYD	280 kWh	Recarga noturna	40 kW
Proterra BE40	74 kWh	Recarga de oportunidade	160 kW
New Flyer XE40	208 kWh	Recarga de oportunidade	80 kW

FONTE: Baseado em [82, 83, 84]

Ao simular o desempenho nas diferentes rotas, os seguintes resultados foram obtidos em termos de consumo de energia (**QUADRO B2-3**).

QUADRO B2-3. Resultado do consumo energético por veículo

Rota	Consumo energético [kWh/km]		
	BYD	Proterra BE40	New Flyer XE40
1	1,24	0,96	1,09
2	1,58	1,34	1,43
3	0,89	0,90	0,93
Média	1,24	1,03	1,10

FONTE: Baseado em [82, 83, 84]

Nos testes realizados, a rota que apresentou um menor consumo de energia, para os três veículos, foi a 3. Com maior extensão e menor número de pontos de ônibus, essa mesma rota foi a que permitiu o desenvolvimento da velocidade média mais alta. A rota que levou a um maior consumo de energia foi a 2. Apesar disso, verificou-se que a rota com menor velocidade média foi a 1, e não a 2. A rota 1 também apresenta maior número de pontos de ônibus, o que pode ter potencializado a frenagem regenerativa dos veículos, aumentando seu rendimento e diminuindo seu consumo energético. Parcerias entre governo e instituições de pesquisa para simulações como essa fornecem dados relevantes para fomentar e embasar a tomada de decisão por parte de cidades interessadas na transição para a eletromobilidade.



**PLANEJAMENTO
E IMPLEMENTAÇÃO
DO PROJETO**

03



Este capítulo elenca as principais etapas e atividades para a adoção de ônibus elétricos. Sugere-se uma ordem, que pode variar de acordo com o contexto local e a maturidade do projeto. O importante é que todas as atividades sejam executadas.

As etapas mencionadas neste capítulo poderão guiar atores públicos e privados durante um processo de adoção dos ônibus elétricos. Elas podem ser aplicadas tanto em projetos de substituição da frota quanto naqueles concebidos, desde o início, para a eletromobilidade – um novo eixo de transporte, por exemplo. A **FIGURA 11** oferece uma visão geral das etapas e atividades necessárias ao planejamento e à implementação de um projeto de ônibus elétricos.

FIGURA 11. Estrutura do capítulo 3: planejamento e implementação do projeto



FONTE: Elaborado pelos autores.

3.1. ETAPA 1: Preparação

A etapa de preparação é de grande importância para o projeto de adoção de frotas elétricas no transporte coletivo. As atividades envolvidas nessa fase incluem:

- 3.1.1. Mobilização inicial;
- 3.1.2. Mapeamento dos atores;
- 3.1.3. Diagnóstico;
- 3.1.4. Estudo de pré-viabilidade;
- 3.1.5. Tomada de decisão.

3.1.1. Mobilização inicial

O passo inicial da preparação é a designação de um grupo de trabalho multidisciplinar, formado por gestores, técnicos e demais interessados. Por se tratar de um projeto estratégico e que depende do envolvimento de muitos atores, é necessária uma gestão eficiente e objetiva desde o início do processo, com a atribuição clara de responsabilidades, competências e prazos, ou seja, o que deve ser feito, quem faz o quê e em qual prazo.

A depender do setor que toma a iniciativa de implementação da eletromobilidade no transporte coletivo — público ou privado —, o grupo de trabalho terá diferentes composições. Mas, nos dois casos, é fundamental que seja escolhido um responsável pela coordenação do projeto e que haja apoio dos tomadores de deci-

são: prefeito, secretários e outros gestores, no poder público, proprietários, diretores e gerentes, no setor privado. É recomendável que, entre os tomadores de decisão, haja um apoiador principal. Essa pessoa deve aprovar os principais pontos do projeto, atuar como interlocutor entre os interessados e ser o principal defensor da adoção da eletromobilidade.

Compete ao grupo de trabalho compreender as necessidades da instituição, as motivações para implementação da frota elétrica e os potenciais ganhos advindos do projeto. Essas informações são essenciais para estruturar uma boa argumentação sobre a pertinência de desenvolver a proposta. Por exemplo, devem ser reunidas informações sobre os principais benefícios da eletromobilidade (melhora da qualidade do ar, ganhos para a saúde da população, redução dos custos operacionais, qualificação do sistema de transporte coletivo etc.), sobre a abrangência do projeto (eletrificação de um eixo de transporte ou transição completa da frota para ônibus elétricos) e sobre a forma de inserção dos novos veículos — discutida no **BOX 3**. Essas reflexões são fundamentais para a concepção do projeto e podem ser necessárias para conquistar o suporte dos atores que precisam estar envolvidos [85].

O grupo de trabalho, liderado por um coordenador e com o suporte do apoiador, será responsável por todo o planejamento e a implementação do projeto de eletromobilidade.



BOX 3

Formas de adoção da eletromobilidade

Vários fatores influenciam o processo de adoção da eletromobilidade no transporte coletivo. Um deles é a forma como os ônibus elétricos serão inseridos na frota. De maneira geral, considera-se que há dois caminhos de inserção: por meio de contratos de concessão ou por meio de projetos específicos.



Cidades em fase de estruturação de novos contratos de concessão têm uma grande oportunidade de estabelecer metas específicas para incentivar a inclusão de ônibus com zero emissões no transporte coletivo. Os editais também podem prever modelos de negócio, análises econômico-financeiras e formas de remuneração que beneficiem as frotas limpas.

Crerios que colocariam os ônibus elétricos em vantagem incluem considerar uma maior vida útil para esses veículos, pontuar melhor as propostas com tecnologia limpa e contemplar o Custo Total de Propriedade nas análises financeiras. Os contratos podem prever também metas específicas para a substituição de toda a frota ou de uma parte dela. Esses gatilhos são importantes para desencadear a transição para a eletromobilidade desde o começo do contrato [86].

No caso de contratos de concessão ainda vigentes, as cidades devem avaliar a possibilidade de modificá-los, de forma a incluir metas que contribuam para a inserção de frotas limpas ou renegociar as formas de remuneração. Algumas concessões do serviço de transporte coletivo, por exemplo, remuneram o capital investido, o que dificulta a adoção de modelos de contratação como *leasing*, que poderiam ser favoráveis economicamente. Reavaliar os prazos contratuais também pode ser uma forma de incentivo à adoção da nova tecnologia.

O segundo caminho é a inserção de ônibus elétricos por intermédio de projetos específicos, quando o poder público ou uma empresa operadora desejarem eletrificar uma frota, uma rota ou um eixo de transporte — que pode, por exemplo, estar recebendo uma nova infraestrutura de faixas dedicadas ao transporte coletivo.

Independentemente da forma de implementação, há uma série de preparativos que devem ser executados. Este capítulo orienta os diferentes atores para que o projeto de inserção da eletromobilidade seja um caso de sucesso na cidade.

“Os editais também podem prever modelos de negócio, análises econômico-financeiras e formas de remuneração que beneficiem as frotas limpas.”

3.1.2. Mapeamento dos atores

Nessa atividade deve-se realizar uma listagem dos atores que têm interesse no projeto. Devem ser identificadas organizações públicas e privadas que exerçam, direta ou indiretamente, influência sobre os objetivos e resultados do projeto, bem como entes que possam ser afetados de forma positiva ou negativa pela sua execução.

Esse mapeamento, realizável por meio de um *brainstorming* com os componentes do grupo de trabalho, deve contemplar a realidade local e permitir a identificação de novos atores a incorporar ao grupo. A **FIGURA 12** apresenta, de forma geral, os potenciais integrantes dessa lista.

3.1.3. Diagnóstico

O coordenador do projeto e o grupo de trabalho têm como primeira atribuição conduzir um levantamento geral de dados e informações, realizando um diagnóstico que subsidie o estudo de pré-viabilidade e a tomada de decisão.

Essa ação tem como objetivo identificar e coletar dados e informações disponíveis sobre os seguintes elementos:

- 3.1.3.1. Políticas locais;
- 3.1.3.2. Desafios e oportunidades;
- 3.1.3.3. Sistema de transporte coletivo por ônibus e rede de energia.

FIGURA 12. Atores envolvidos no projeto de eletromobilidade



FONTE: Elaborado pelos autores.



3.1.3.1. Políticas locais

Identificar leis, políticas, decretos, diretrizes e metas – nacionais, regionais e locais – que podem afetar o processo de eletrificação da frota de transporte coletivo é um passo fundamental para o sucesso do projeto. Esse mapeamento deve considerar não somente o setor de transportes, mas também outras áreas impactadas pela eletromobilidade, como saúde, meio ambiente e economia.

Em nível nacional, podem-se identificar alinhamentos do projeto de eletromobilidade com as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) e com o Programa Rota 2030 [87, 88]. Da mesma forma, avaliar incentivos fiscais nas esferas nacionais e regionais colabora para a adoção de veículos mais limpos. Como a padronização das infraestruturas de recarga estimula a adoção de ônibus elétricos, a existência de políticas nacionais nesse campo é igualmente relevante [30].

Diretrizes e metas estabelecidas no plano de mobilidade urbana da cidade, nos editais e contratos de concessão do transporte coletivo, nos planos de ação climática ou em políticas de redução de emissões também podem fundamentar o projeto de eletrificação. Quando metas de redução de poluentes ou de renovação da frota com a tecnologia elétrica são incluídas nos planos de governo, e sobretudo quando esses planos são transformados em leis, fica demonstrado o compromisso público de alcançar objetivos e ocorre um direcionamento das ações. A existência de mecanismos de incentivo à eletromobilidade permite à cidade buscar apoio de ins-

tituições de financiamento climático e de organizações que oferecem capacitação técnica para a transição aos ônibus limpos [35].

Destaca-se que esses são alguns exemplos e que há outros instrumentos úteis. A realização de um levantamento pelo grupo de trabalho é a chance de encontrar oportunidades para dar tração ao projeto. Além disso, é interessante conceber instrumentos alinhados com o projeto, de forma a impulsioná-lo.

O Estudo de Caso 2 mostra como Shenzhen aproveitou o alinhamento de políticas nacionais e locais para se tornar a primeira cidade do mundo com a frota 100% composta por ônibus elétricos.



B Shenzhen, China. Foto: Attila Jandl, Shutterstock.

A Amsterdam, Holanda. Foto: Jeroen Pijper.



ESTUDO DE CASO 2 SHENZHEN, CHINA

A primeira frota de transporte coletivo por ônibus 100% elétrica do mundo.

Em 2017, Shenzhen, no sudeste da China, tornou-se a primeira cidade do mundo a eletrificar 100% de sua frota de transporte coletivo por ônibus. Foi um esforço iniciado em 2009, quando o município elaborou um plano, aprovado pelo governo central chinês, para promover veículos mais limpos (incluindo híbridos, com célula de hidrogênio e elétricos a bateria).

Esse plano propunha um modelo de negócio inovador para mobilizar fabricantes de veículos, companhias de energia, operadores de ônibus e táxis, institutos de pesquisa e população. Shenzhen tinha como estratégia priorizar a eletrificação do sistema de transporte público (ônibus e táxis) e planejar uma transição gradual dos veículos privados para veículos mais limpos [89].





A cidade iniciou testes com ônibus elétricos em 2011, durante um evento esportivo. A partir daí, a frota foi crescendo ano após ano, superando 16 mil ônibus elétricos em 2017. Os subsídios do governo central e do governo municipal de Shenzhen foram altos para que este objetivo fosse alcançado [90]. Até 2016, os ônibus elétricos adquiridos pela cidade eram subsidiados em US\$ 150 mil, mais da metade do custo do veículo, como parte de um plano de incentivos com previsão de redução gradual [8]. Além disso, como resultado relevante do plano executado, Shenzhen converteu 100% de sua frota de 22 mil táxis para veículos elétricos [91].

Para Shenzhen e muitas cidades chinesas, incentivos políticos, como subsídios nacionais e locais, desempenham um papel fundamental na superação da barreira dos altos custos iniciais da tecnologia. Esse exemplo evidencia a importância de haver alinhamento entre as políticas nacionais e locais para impulsionar o trabalho de transição para frotas elétricas no transporte coletivo por ônibus. Muito em função dessas políticas, a China possui hoje 98% de toda a frota de ônibus elétricos a bateria do mundo [11].

“Para Shenzhen e muitas cidades chinesas, incentivos políticos, como subsídios nacionais e locais, desempenham um papel fundamental na superação da barreira dos altos custos iniciais da tecnologia.”

3.1.3.2. Desafios e oportunidades

Os desafios e as oportunidades do projeto que se deseja implementar devem ser identificados. A equipe destacada para o diagnóstico pode utilizar as categorias propostas na **SEÇÃO 1.3** deste guia, sempre considerando o contexto local na sua avaliação. Os desafios e oportunidades levantados podem ser organizadas como exemplificado no **QUADRO 3**.

Nessa fase, os desafios e oportunidades são elencados de uma forma mais ampla, já que ainda estão em um contexto de diagnóstico. Os encaminhamentos para superar os desafios e explorar as oportunidades serão tratados nas etapas seguintes deste guia. Por exemplo, para superar o desafio dos altos custos iniciais, recomenda-se estruturar um modelo de negócio que facilite a implementação da eletromobilidade e considerar parcerias que possam apoiar financeiramente o projeto, o que será tratado na seção sobre modelos de negócio **(3.3.3)**.

O mapeamento deve ser realizado desde o início, para que seja possível, na etapa de elaboração **(3.3)**, verificar se a estruturação do projeto ajuda a superar os desafios e a explorar as oportunidades identificados, ou se outras soluções são necessárias. Nesses casos, o suporte do apoiador do projeto pode ser fundamental.

3.1.3.3. Sistema de transporte coletivo por ônibus e rede de energia

Nessa etapa, deve-se realizar um levantamento de dados sobre o transporte coletivo por ônibus na cidade, com o objetivo de identificar as características das linhas de todo o sistema ou de parte dele (no caso de projetos que atendam uma área específica) e de obter informações dos atuais operadores.

Para esse diagnóstico, recomenda-se que sejam coletadas informações por meio de dados de GTFS (General Transit Feed Specification), de GPS (Global Positioning System) e até mesmo de bilhetagem eletrônica. Esses dados permitem consolidar indicadores essenciais para avaliação do sistema, como:

- extensão da linha;
- distância morta percorrida;
- frota operante da linha (categorizada por tipo de veículo);
- número de pontos de ônibus;
- distância média entre os pontos de ônibus;
- tempo total de viagem;
- intervalo entre viagens na hora-pico;
- velocidades comercial e operacional da linha;
- quantidade de viagens diárias;
- quantidade de viagens na hora-pico;
- demanda diária da linha;
- demanda da linha na hora-pico;
- passageiros transportados por veículo;
- inclinações (greides) máxima e média.

QUADRO 3. Exemplos de desafios e oportunidades identificados no projeto de eletromobilidade

	Desafios	Oportunidades
Tecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> ■ Limitações de autonomia dos veículos ■ Instabilidade da rede de energia 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Desenvolver estudos sobre a tecnologia
Financeiros	<ul style="list-style-type: none"> ■ Altos custos iniciais ■ Falta de fontes de financiamento 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Desenvolver novos modelos de negócio que incentivem a inserção da eletromobilidade
Institucionais	<ul style="list-style-type: none"> ■ Inexistência de políticas facilitadoras ■ Fraca coordenação governamental 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Engajar diferentes atores para fortalecer o projeto ■ Desenvolver políticas facilitadoras para implementação de veículos limpos

FONTE: Elaborado pelos autores.

Outro aspecto a avaliar são as características da rede de subestações e de distribuição de eletricidade da cidade ou da região onde se pretende implementar a frota elétrica. Recomenda-se que a companhia de energia local seja engajada para apoiar as avaliações das garagens e da rede elétrica, visto que ela tem o conhecimento específico para atestar as informações.

No que tange ao mapeamento das garagens do sistema, a lista abaixo contém indicadores que podem ser coletados para avaliar a viabilidade da implementação de ônibus elétricos:

- área da garagem;
- quantidade de veículos;
- distância entre a garagem e a subestação de energia;
- nível de tensão;
- potência instalada;
- demanda contratada de energia.

O **ANEXO 2** deste guia contém um modelo de planilha para coleta desses indicadores.

3.1.4. Estudo de pré-viabilidade

Após o levantamento de informações realizado no diagnóstico, a atividade seguinte é avaliar a pré-viabilidade técnica da implementação dos ônibus elétricos, com vistas a garantir a melhor seleção e adaptação da tecnologia e, conseqüentemente, diminuir riscos técnicos e operacionais. A análise pode combinar as informações obtidas no diagnóstico do transporte coletivo e da rede de energia da cidade com as especificações técnicas, as restrições e outros dados da tecnologia elétrica. Nesse estudo de pré-viabilidade, os seguintes elementos devem ser avaliados:

- 3.1.4.1. Benefícios;
- 3.1.4.2. Estudo de mercado;
- 3.1.4.3. Escolha de rotas;
- 3.1.4.4. Custo Total de Propriedade.

3.1.4.1. Benefícios

Para mensurar os benefícios, é possível medir potenciais reduções de custo decorrentes do ciclo de vida útil dos ônibus elétricos (**SEÇÃO 3.1.4.4**), da queda nas emissões, do impacto positivo na saúde da população e da possibilidade de qualificação do serviço.

Para avaliar as emissões, o dióxido de carbono (CO₂), o óxido de nitrogênio (NO_x) e o material particulado (MP) costumam ser considerados. A emissão de poluentes pela frota é calculada a partir de três indicadores principais: a quilometragem percorrida, o fator de emissão e o consumo dos ônibus². Os dados de entrada dessa análise podem ser obtidos por meio de revisão da literatura, com base em mensurações feitas em outras cidades ou, preferencialmente, a partir de informações coletadas no próprio município que está realizando a avaliação. Existem calculadoras online que estimam as reduções de emissões e facilitam a quantificação dos benefícios ambientais [92, 93]. O **ANEXO 3** deste guia apresenta as equações utilizadas para calcular as emissões, e o **BOX 4** exemplifica como a redução de emissões de poluentes pode ser estimada.

A redução de poluentes locais está associada, por exemplo, à queda de morbidade e mortalidade por doenças respiratórias, o que pode ser levado em consideração no investimento. A partir desses benefícios ambientais, é possível estimar as conseqüências para a saúde, com o auxílio de ferramentas que calculam esse tipo de impacto, e os custos decorrentes da variação da qualidade do ar provocada pelos ônibus urbanos. Um exemplo dessas ferramentas é a ImpactAr [14].

A qualificação do transporte coletivo também pode ser vista com um benefício, pois, além da tecnologia mais silenciosa e confortável, os novos ônibus podem vir equipados com outros atributos, como ar condicionado e carregadores USB. Esses itens podem melhorar a reputação do transporte: é possível aproveitar a adoção de veículos elétricos na forma de apoio da população, de marketing ambiental e da construção de uma imagem de compromisso com a sustentabilidade.

2. Existem outros fatores que influenciarão a emissão dos ônibus, como número de passageiros, rota e idade do veículo. No entanto, esses indicadores não são captados na análise.

BOX 4

Avaliando os benefícios ambientais

É possível estimar a redução das emissões para mensurar os benefícios ambientais de um projeto de substituição de frota. Para frotas de ônibus, os poluentes comumente avaliados são o dióxido de carbono (CO₂), o material particulado (MP) e os óxidos de nitrogênio (NO_x). Para isso, conforme as equações apresentadas no **ANEXO 3**, são necessários os seguintes dados:

- número de ônibus;
- distância anual percorrida por ônibus;
- consumo de combustível;
- fator de emissão do poluente.



Em um exemplo hipotético, a cidade Z deseja realizar a substituição de 500 ônibus a diesel Euro III. Em média, cada veículo percorre 60.000 km por ano, com um consumo médio de 0,5 km/L. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente, essa tecnologia possui um fator de emissão de MP de 0,3030 g_{MP}/L [94]. As emissões de material particulado dessa frota podem ser calculadas a partir da equação:

$$\text{Emissões anuais de MP [ton/ano]} = \text{Número de ônibus [ônibus]} \times \text{Distância anual percorrida por ônibus [km/ano.ônibus]} \times \text{Consumo de combustível [L/km]} \times \text{Fator de emissão de MP [g/L]}$$

Aplicando a equação tem-se que:

$$\text{Emissões anuais de MP} = 500 \times 60.000 \times 0,5 \times 0,303 = 4,55 \text{ ton/ano}$$

Dessa forma, verifica-se que a substituição dos 500 ônibus a diesel pode evitar a emissão de mais de 4,5 toneladas de MP por ano, visto que ônibus elétricos não apresentam emissões de escapamento desse poluente. Assim como para o MP, é possível estimar a redução de emissões de outros poluentes.

3.1.4.2. Estudo de mercado

Após levantamento e análise do sistema de transporte coletivo por ônibus e da rede de energia (**SEÇÃO 3.1.3.3**), é importante conduzir um estudo inicial para identificar a disponibilidade de ônibus elétricos e as especificações técnicas dos veículos. Nessa etapa, deve-se verificar se os diferentes fabricantes e modelos de ônibus elétricos disponíveis atendem a requisitos como autonomia, eficiência energética e disponibilidade para as rotas previamente levantadas.

Para tal, recomenda-se a realização de um estudo de mercado que avalie a oferta de ônibus e a possibilidade de atendimento da demanda na região específica. Essa análise inicial pode ser realizada por meio de páginas oficiais, fichas técnicas, publicações reconhecidas e pelo contato direto com os fabricantes. Se houver interesse, o estudo de mercado pode avaliar a possibilidade de *retrofit*, processo que transforma veículos de outras tecnologias em ônibus elétricos, reutilizando componentes.

A estrutura geral dessa pesquisa pode ser definida e adaptada pelos atores envolvidos conforme as necessidades do projeto. Como estrutura geral, sugere-se que sejam coletadas informações de acordo com as categorias apresentadas na **FIGURA 13**.

Para cada uma das categorias, recomenda-se que sejam criadas variáveis que direcionem a coleta de dados conforme os objetivos e as necessidades levantados no diagnóstico. Por exemplo, a categoria de custos pode ser composta por indicadores como custo do ônibus, custo do ônibus com entrega na região em análise, possibilidade de financiamento, condições (prazo, taxa de juros etc.), possibilidade de *leasing*, tempos de entrega, entre outros.

O **ANEXO 4** apresenta uma estrutura detalhada das variáveis que podem ser incluídas em um estudo de mercado. Trata-se de um exemplo, sujeito a modificações conforme as necessidades do projeto.

Os dados obtidos com essa pesquisa serão a base para avaliar os custos do projeto de eletromobilidade e para fazer uma comparação com a tecnologia de ônibus convencionais já operante. Ou seja, o estudo permitirá seguir avaliando, com maiores detalhes, a viabilidade técnica e econômico-financeira do projeto.

FIGURA 13. Categorias do estudo de mercado



FONTE: Elaborado pelos autores.

“Recomenda-se a realização de um estudo de mercado que avalie a oferta de ônibus e a possibilidade de atendimento da demanda na região específica.”

3.1.4.3. Escolha das rotas

A escolha das rotas que serão eletrificadas deve estar de acordo com dados de demanda da cidade e características geográficas, a fim de atender ou continuar atendendo a população de forma efetiva.

Existem diversas estratégias para a seleção de rotas. Em geral, a opção recairá sobre aquela que atende aos objetivos e ao contexto da cidade. Do ponto de vista ambiental, é possível iniciar o processo de eletrificação em eixos de transporte ou regiões que apresentem elevados índices de concentração de poluentes. Outra estratégia seria escolher rotas centrais, que tendem a gerar uma maior visibilidade à iniciativa, devido à grande circulação de pessoas e às baixas velocidades comerciais dos veículos. É importante levar em consideração, durante o processo de seleção, rotas que beneficiem a população de forma equitativa.

Do ponto de vista técnico, a melhor rota será aquela que maximizar a eficiência energética do veículo elétrico e proporcionar um serviço adequado aos clientes. Para fazer essa definição, existem três principais métodos:

- modelar e simular rotas;
- avaliar testes de ônibus elétricos de outros operadores da cidade ou de outras cidades que apresentem características similares (demanda e geografia);
- testar os veículos nas rotas que se planeja eletrificar.



Dentre esses métodos, o que apresenta o melhor custo-benefício é a modelagem e simulação de rotas. Uma alternativa de como realizar essa modelagem é descrita no **BOX 5**.



B São Paulo, Brasil. Foto: Alf Ribeiro, Shutterstock.

A Canadá. Foto: Paul Robertson.

3.1.4.4. Custo Total de Propriedade

O próximo passo é verificar os custos para saber se é viável prosseguir com o projeto. Isso se faz por meio de um estudo do Custo Total de Propriedade (TCO) da nova tecnologia. Nesse primeiro momento, utilizam-se informações gerais, que podem ser coletadas por meio de testes com ônibus elétricos feitos pela própria cidade ou junto a cidades em contexto similar que já tenham adotado a eletromobilidade.

Usualmente, os cálculos de TCO são divididos em **custos de capital** e **custos operacionais**.

Os **custos de capital** são aqueles relacionados à aquisição da tecnologia. Abrangem os gastos com compra da frota, da infraestrutura de recarga e de uma nova bateria durante a vida útil do veículo (caso seja necessário), bem como os juros pagos pelo financiamento necessário para efetuar essas aquisições.

Já os **custos operacionais** são os custos para manter a tecnologia operando e incluem despesas com combustível, manutenção e pessoal, entre outros. Dentre esses custos, há desembolsos que não precisam necessariamente ser contabilizados, como os gastos administrativos e de pessoal, pois não estão ligados diretamente aos veículos elétricos.

Os diferentes tipos de ônibus elétricos podem ser avaliados e comparados com as tecnologias já utilizadas pela cidade. A análise de TCO pode ajudar no desenho de incentivos e subsídios, no planejamento da licitação e na escolha do modelo de negócio que será desenvolvido nas próximas etapas [96].

Destaca-se que a análise do TCO é sensível a preços de combustível e eletricidade, distâncias médias percorridas, custos dos produtos financeiros e configuração de carregamento [30]. Por isso, será diferente para cada cidade, pois os valores são distintos. Os resultados dependem das condições locais e do tipo de tecnologia considerada [45].

O TCO para ônibus elétricos vem caindo à medida que a tecnologia evolui, principalmente devido ao barateamento da bateria, o que torna a tecnologia mais competitiva [30]. Com essa redução no custo de capital, a tendência é os veículos elétricos se tornarem cada vez mais atrativos, pois os custos de operação e manutenção deles já são vantajosos na comparação com os de tecnologias a combustão. Como os gastos operacionais são menores na eletromobilidade, o TCO do ônibus elétrico também se tornará comparativamente mais baixo na medida em que houver aumento de rodagem.

O **BOX 6** apresenta um exemplo de análise de TCO.



BOX 5

Modelagem e simulação de rotas

Existem ferramentas que, mediante a inserção de dados sobre características técnicas dos veículos elétricos, ciclo de condução e trajetos a avaliar, permitem a modelagem e a simulação de rotas. Uma opção é a Autonomie [95]. Independentemente da ferramenta, é importante usar dados de entrada adequados ao contexto local.

O processo de modelagem e simulação de rotas inclui sete passos, apresentados na FIGURA B5-1 e discutidos a seguir [85].

1. Completar a alocação horária de veículos em diferentes blocos

É necessário criar blocos de operação e categorizá-los de acordo com quilometragem a ser percorrida e tempo. Os blocos representam um veículo ou um grupo de veículos que possuem características operacionais semelhantes, como por exemplo o tempo de operação e a distância a ser percorrida. Deve-se definir, para cada bloco, a probabilidade de que um veículo elétrico realize a operação de forma adequada. Recomenda-se a utilização de uma escala com as seguintes classificações: muito provável, provável e pouco provável (QUADRO B5-1). A modelagem deve ser realizada, pelo menos, quando o bloco for categorizado como provável.

FIGURA B5-1. Passos para a modelagem e a simulação de rotas



FONTE: Baseado em [85]

QUADRO B5-1. Exemplo de escala de probabilidade de operação dos ônibus

	Bloco 1 (MUITO PROVÁVEL)	Bloco 2 (PROVÁVEL)	Bloco 3 (POUCO PROVÁVEL)
6:00			
8:00			
10:00			
12:00			
14:00			
16:00			
18:00			
20:00			
22:00			
0:00			

R Recarga

FONTE: Elaborado pelos autores.

2. Utilizar dados de rotas representativas do sistema



Os blocos construídos no passo anterior devem ser refinados com informações como o perfil de velocidade dos veículos e o carregamento de passageiros, por exemplo. Se as rotas em análise são preexistentes, a modelagem deve considerar as informações já coletadas na etapa do diagnóstico.

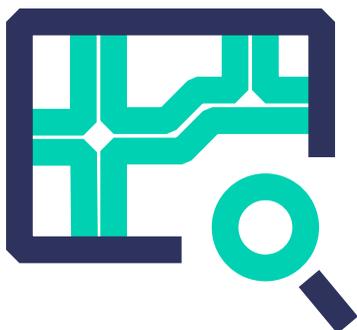
Se o objetivo for avaliar novos percursos, os dados correspondentes podem ser estimados a partir de informações sobre rotas com características similares e que sejam representativas do sistema de transporte coletivo da cidade.

3. Determinar cenários realista e pessimista em termos de eficiência energética dos veículos



Como não é possível prever todas as condições de operação a que os ônibus serão submetidos, recomenda-se a construção de dois cenários: um realista e outro pessimista.

O cenário realista deve representar as condições de operação de um dia típico. O pessimista, de um dia atípico, no qual o veículo seria submetido a uma operação mais rigorosa (deve ser um cenário que, apesar de menos provável, possa acontecer). Para definir esses cenários, são necessários parâmetros como: peso do veículo (com passageiros), condições climáticas, inclinações máximas, perfil de velocidade, utilização do ar condicionado, entre outros.



4. Considerar os impactos da degradação da bateria



É importante incluir na modelagem uma estimativa da redução, no longo prazo, da capacidade de armazenamento das baterias (kWh) e, por conseguinte, da autonomia do veículo. O impacto da degradação da bateria é mais evidente em rotas com quilometragem alta e, conseqüentemente, com um número mais elevado de cargas e descargas da bateria. Esse ciclo (carga e descarga) é um fator que, no decurso do tempo, reduz a capacidade de armazenamento da bateria.

5. Incorporar a estratégia de recarga



É necessário incorporar à modelagem alguns parâmetros da estratégia de recarga, inserindo no modelo dados que possam influenciar a operação e a eficiência do veículo. Considerar tempos curtos de recarga, por exemplo, pode prejudicar a operação planejada e, conseqüentemente, a viabilidade da rota em análise. Já numa estratégia de recarga na garagem, o ideal será um percurso com pouca quilometragem morta.

6. Avaliar os resultados



Os resultados fornecidos pelo modelo serão estimativas com capacidade de nortear a escolha de rotas. Mas o processo de modelagem pode ser iterativo. A partir dos resultados, torna-se possível, se necessário, promover mudanças e validações nos parâmetros de entrada do modelo.

7. Validar e atualizar o modelo



Concluída a modelagem e definida a rota, o próximo passo será validar o modelo com dados reais de operação, após a chegada dos veículos. Essa validação é útil para uma posterior expansão do projeto, além de poder servir como base para análises técnicas de outras cidades interessadas em implantar a eletromobilidade.

BOX 6

Análise de Custo Total de Propriedade

O que é

A análise de TCO estima os custos do ciclo de vida de cada tecnologia, calculados em valor presente [36]. Ou seja, nela são consideradas as principais despesas associadas a cada tecnologia durante sua vida útil. Se um veículo tiver vida útil de 15 anos, serão avaliados todos os custos que ele vai gerar durante esse período, como combustível, manutenção de peças ou juros pagos pelo financiamento para aquisição.

Os custos geralmente se dividem em custos de capital e custos operacionais. Também não é obrigatório que variáveis macroeconômicas sejam consideradas, mas fazê-lo pode ser o diferencial para a escolha entre uma tecnologia e outra [36]. Contemplar diferentes perspectivas para os custos operacionais ao longo dos anos, como variações no custo do combustível, por exemplo, pode trazer diferenças de resultado.

Como os custos incidem em diferentes períodos (meses ou anos), é preciso convertê-los ao valor presente, mediante aplicação de uma taxa de desconto, para assim chegar ao valor total durante a vida útil. O TCO também pode ser apresentado por quilometragem (R\$/km). Neste exemplo, optou-se por utilizar o valor total para a vida útil.

A equação abaixo expressa o cálculo do TCO, onde t é o período e n o total de períodos da vida útil. O cálculo inicia no período zero, pois uma parte do custo de capital pode ser paga à vista.

$$TCO = \text{Custos de capital}_0 + \sum_{t=1}^n ((\text{Custos de capital}_t + \text{Custos operacionais}_t) \times (1 + \text{Taxa de desconto})^{-t})$$

Elementos a considerar

Os elementos que serão utilizados na análise de TCO dependem do nível de detalhamento desejado e da qualidade das informações disponíveis. Para os custos de capital, é importante considerar pelo menos as parcelas do principal (valor a ser amortizado), os juros do financiamento e o valor pago à vista com capital próprio. Já para os custos operacionais, os itens básicos são os custos com combustível e manutenção. Alguns dos elementos a levar em conta no cálculo são:

Elementos gerais:

- **taxa de desconto:** taxa para trazer ao valor presente os custos em cada período;
- **vida útil do ônibus:** tempo estimado de operação do veículo. Os custos operacionais são calculados conforme esse período. Quando veículos com diferentes estimativas de vida útil são comparados, é necessário anualizar as análises por meio do Valor Anual Uniforme Equivalente (VAUE).

Elementos para custos de capital:

- **preço do veículo:** preço de aquisição do veículo;
- **preço da infraestrutura de recarga:** é o preço para a instalação da infraestrutura de recarga. Normalmente, não se consideram as obras necessárias para expansão da rede de energia elétrica;
- **preço da bateria:** preço para reposição de bateria, caso sua vida útil seja menor do que a do veículo;
- **parcela a ser financiada:** em geral, uma parte do valor do veículo precisa ser paga com capital próprio. Assim, é necessário definir que porcentagem pode ser financiada. Sobre o valor financiado serão pagas parcelas para amortização da dívida e juros;
- **taxa de financiamento:** taxa de juros a ser cobrada sobre a parcela financiada;
- **prazo de financiamento:** é o tempo estipulado para pagar a parcela do ônibus que foi financiada. Em geral, esse prazo é de no máximo um ano a menos do que a vida útil do veículo;
- **valor residual:** valor de venda do veículo ao final da vida útil.



Elementos para custos operacionais:

- **custo do combustível:** calculado pela multiplicação dos seguintes fatores:
 - **preço do combustível:** preço do diesel ou da eletricidade;
 - **consumo do veículo:** consumo médio de combustível;
 - **distância média percorrida:** quilometragem média percorrida pelo veículo;
- **custos com pessoal:** despesa com a folha salarial, conforme o tipo de tecnologia;
- **custos de manutenção:** gasto com reposição de peças.

Comparação entre tecnologias

O TCO indica o Valor Presente Líquido (VPL) dos custos totais de cada tecnologia durante seu período de vida. Mas nem sempre se pode fazer uma comparação direta para avaliar qual opção é mais atrativa. Caso a vida útil das tecnologias seja a mesma, a comparação direta entre TCOs é viável. Se for diferente, é preciso calcular o VAUE para fazer a comparação.

$$\text{VAUE} = (\text{TCO} \times \text{Taxa de desconto}) / (1 - (1 + \text{Taxa de desconto})^{-n})$$

Exemplo:

Utilizam-se dados simplificados, apresentados no **QUADRO B6-1**, para demonstração de cálculo comparativo entre um veículo elétrico a bateria e um trólebus. Destaca-se que os dados são meramente ilustrativos.

QUADRO B6-1. Dados simplificados para análise de TCO

Elemento do TCO	Trólebus	Elétrico a bateria
Custo do veículo	R\$ 800.000	R\$ 1.400.00
Parcela a ser financiada	80% (20% à vista)	
Taxa de financiamento	10% ao ano	
Prazo de financiamento	14 anos	
Vida útil do ônibus	15 anos	
Preço do combustível	R\$ 0,45/kWh	
Consumo do veículo	2,3 kWh/km	1,3 kWh/km
Distância média percorrida	60.000 km/ano	
Custos com pessoal	R\$ 50.000/ano	
Custos de manutenção	R\$ 60.000/ano	R\$ 20.000/ano
Valor residual	R\$ 40.000	R\$ 70.000
Taxa de desconto	6%	

FONTE: Elaborado pelos autores.

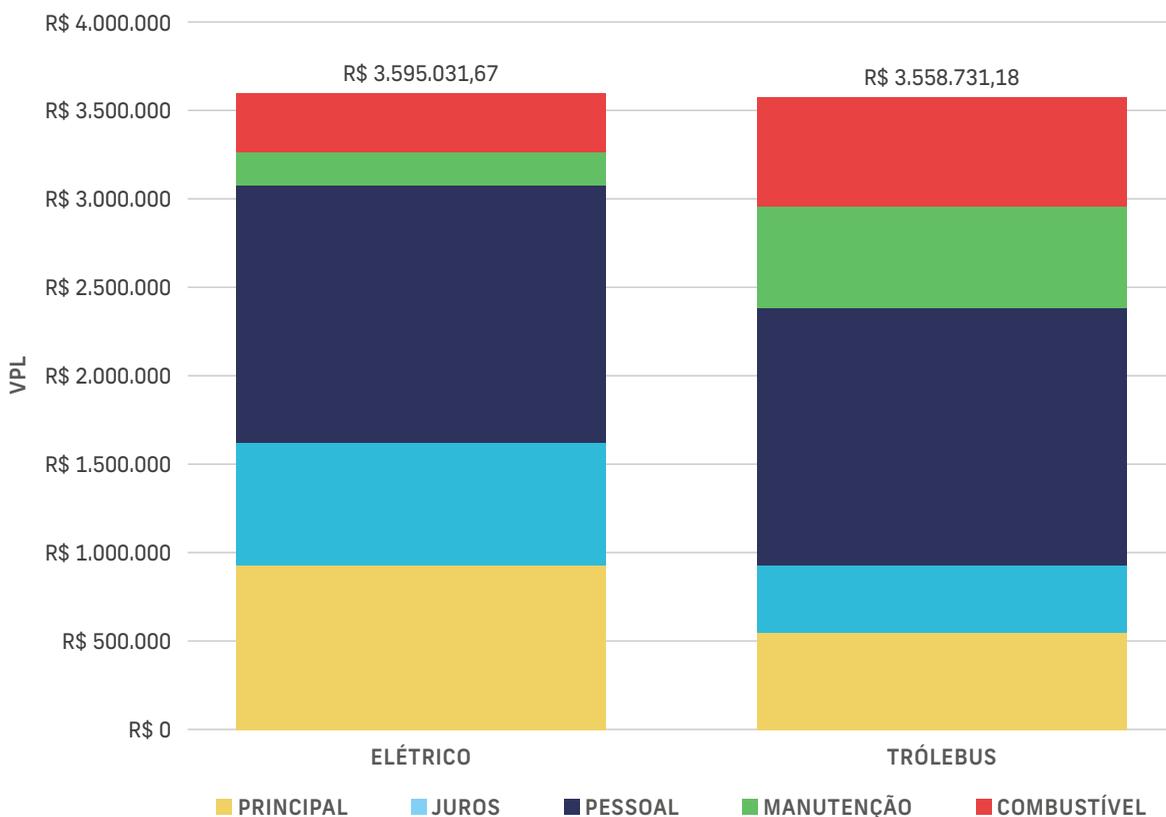
Com esses dados, ficam estabelecidos os custos de cada categoria durante a vida útil das tecnologias avaliadas. No exemplo, os custos de capital foram separados em principal e juros, e os custos operacionais, em pessoal, manutenção e combustível/eletricidade. Para simplificar, ficou estabelecido que a duração da bateria equivale à vida útil do veículo, não havendo necessidade de considerar um custo de reposição.

No caso apresentado, os TCOs podem ser comparados diretamente por meio do VPL, porque a vida útil das tecnologias é idêntica. Se não fosse, seria preciso calcular o VAUE (que anualiza o VPL uniformemente) para efetuar uma comparação.

Com os dados utilizados neste exemplo, o valor dos dois veículos é muito parecido, com o elétrico a bateria levemente mais caro (1,02%), conforme é observado na **FIGURA B6-1**.



FIGURA B6-1. Valores comparativos de VPL



FONTE: Elaborado pelos autores.

3.1.5. Tomada de decisão

A tomada de decisão, fundamentada nas análises realizadas nesta etapa, deve consolidar o compromisso de implantar o projeto de eletromobilidade. Ela deve ser efetivada pelos tomadores de decisão, com o suporte do apoiador e do coordenador do projeto, e estabelecer as diretrizes preliminares para tópicos essenciais, como abrangência, prazo para implementação e previsão de alocação de recursos financeiros e técnicos.

Assumir um compromisso público, apresentando os principais resultados do estudo de pré-viabilidade, pode ser um importante instrumento de consolidação do projeto. Engajar a imprensa local na divulgação dessas informações, por sua vez, colabora para obtenção do apoio da população e, conseqüentemente, para o fortalecimento da iniciativa.

AO FINAL DA ETAPA 1

Preparação, os objetivos a seguir devem ter sido alcançados:

01

MOBILIZAÇÃO INICIAL

- ✓ Ter um apoiador do projeto
- ✓ Definir um coordenador do projeto
- ✓ Formar um grupo de trabalho multidisciplinar
- ✓ Identificar necessidades e motivações para implementação de frotas elétricas
- ✓ Definir a abrangência do projeto e a forma de inserção dos novos veículos



02

MAPEAMENTO DOS ATORES

- ✓ Montar uma lista dos atores envolvidos
- ✓ Identificar atores que devem ser integrados ao grupo de trabalho multidisciplinar



03

DIAGNÓSTICO

- ✓ Identificar leis em nível municipal, estadual e nacional que promovam a eletromobilidade
- ✓ Definir os desafios e oportunidades
- ✓ Traçar um panorama do sistema de transporte coletivo por ônibus e da rede de energia



04

ESTUDO DE PRÉ-VIABILIDADE

- ✓ Identificar e mensurar os benefícios
- ✓ Realizar um estudo de mercado
- ✓ Realizar um estudo de escolha das rotas
- ✓ Fazer uma estimativa dos custos do projeto



05

TOMADA DE DECISÃO

- ✓ Definir a implementação da frota de ônibus elétricos no sistema de transporte coletivo

3.2. ETAPA 2: Definição do escopo

Essa etapa consiste na definição estratégica sobre como se dará a adoção da eletromobilidade na cidade. Os seguintes elementos do projeto devem ser delineados:

3.2.1. Visão;

3.2.2. Objetivos, metas e prazos.

3.2.1. Visão

A construção de uma visão comum para implementação da eletromobilidade é fundamental para que todos os envolvidos estejam alinhados e tenham clareza de onde se almeja chegar. A visão define o que se busca atingir no futuro, mas também pode contemplar objetivos intermediários, caso o projeto tenha diferentes fases. Ela deve definir e incorporar as ambições, descrevendo o quadro que se quer atingir, desde o curto até o longo prazo. Recomenda-se evitar definições muito técnicas e extensas ou estabelecer uma visão impossível de alcançar [97].

A visão precisa obter consenso entre os envolvidos, considerando as múltiplas perspectivas e interesses. Para isso, sugere-se que ela seja construída no formato de *brainstorming* com o grupo de trabalho multidiscipli-

nar e com a participação do coordenador e do apoiador do projeto. Para que uma visão seja clara, ela deve:

- ter sentido;
- ser compreendida por todos os atores;
- ser clara e concisa para quem lê;
- considerar todo o ciclo de vida do projeto.

Por fim, destaca-se que a visão deve estar em sintonia com outras estratégias adotadas pelo município ou pela empresa que possam ter influência na adoção de veículos elétricos. Uma visão de boa qualidade é capaz de orientar a condução do projeto, de forma que ele transcorra conforme o planejado e atinja os objetivos propostos.

3.2.2. Objetivos, metas e prazos

Para que a visão se torne realidade, ela precisa ser traduzida em objetivos concretos que estabeleçam as mudanças almejadas. Os objetivos de um projeto devem estar de acordo com a visão, e ambos devem trabalhar alinhados, auxiliando-se mutuamente. Decididos pelo grupo de trabalho, os objetivos são o foco e a razão pela qual o projeto está sendo desenvolvido. Precisam refletir as necessidades identificadas inicialmente e estar em conformidade com os benefícios e as oportunidades da eletromobilidade.



As metas devem ser mensuráveis e permitir a avaliação do progresso em direção ao atendimento dos objetivos. Uma vez atingidas, fica caracterizado o sucesso do projeto. As metas orientam as ações que devem ser tomadas em horizontes de tempo definidos (curto, médio e longo prazo). Metas claras indicam o que deve ser alcançado — redução, aumento ou manutenção de determinado aspecto ou índice — e o período de execução.

É importante evitar metas que dificilmente possam ser cumpridas. Elas devem atender ao princípio SMART: ser específicas, mensuráveis, alcançáveis, relevantes e situadas no tempo. Podem ser validadas e ajustadas durante a elaboração do projeto [98].

Compete ao grupo de trabalho, liderado pelo coordenador do projeto, estabelecer os prazos para a execução das atividades subsequentes, abordadas na próxima seção.

A **FIGURA 14** apresenta exemplos de visão, objetivo e meta para um projeto de eletromobilidade.

Os estudos de caso 3 e 4, de São Paulo e Paris, respectivamente, oferecem exemplos de como essas cidades estabeleceram objetivos e metas para a adoção da eletromobilidade em seus sistemas de transporte coletivo por ônibus.

FIGURA 14. Exemplos de visão, objetivo e meta

VISÃO



No ano XXXX, a cidade contará com 500 ônibus elétricos a bateria operando no sistema de transporte coletivo municipal.



OBJETIVO



Reduzir as emissões provenientes do sistema de transporte coletivo.



META



Reduzir em 25% as emissões de material particulado em X anos.

FONTE: Elaborado pelos autores.

A Barcelona, Espanha. Foto: TMB.





ESTUDO DE CASO 3 SÃO PAULO, BRASIL

A Lei do Clima e as metas de redução de emissões no transporte coletivo.



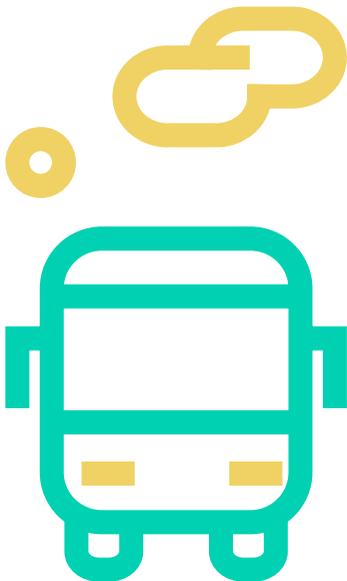
A Lei do Clima de São Paulo, como ficou conhecida a Lei 14.933 de 2009, estabeleceu como diretriz a substituição gradual de combustíveis fósseis por outros menos poluentes, estipulando metas e prazos a serem cumpridos a partir de 2012 [99]. O processo de formulação da política foi iniciado em março de 2007 e contou com diversas consultas públicas à sociedade civil e a especialistas, entre outros, antes de ser aprovada na Câmara de Vereadores, contando também com firme apoio do prefeito da época [100].

Sua principal motivação foi contribuir para o cumprimento dos propósitos da Convenção das Nações Unidas sobre a Mudança Climática. A lei determinou que licitações e contratos administrativos do município, entre eles os referentes ao serviço de transporte coletivo por ônibus, incorporassem critérios ambientais e de sustentabilidade, ou seja, que promovessem a redução progressiva das emissões de dióxido de carbono (CO₂) de origem fóssil e de poluentes tóxicos emitidos na operação das frotas, com a utilização gradual de combustíveis e tecnologias mais limpos.

A lei tinha metas ambiciosas, mas que não foram atingidas por não considerarem aspectos institucionais, financeiros e tecnológicos. Um dos principais entraves foi a impossibilidade de aplicação em contratos de concessão vigentes.



Em função do não cumprimento, o artigo 50 da Lei do Clima foi alterado, originando a Lei 16.802 de 2018. As metas previstas na nova lei estabeleceram uma redução mínima de 50% das emissões totais de CO₂ de origem fóssil no prazo de dez anos e de 100% no período de vinte anos (tendo como base as emissões totais das frotas de transporte coletivo em 2016). A lei também determinou a criação do Comitê Gestor do Programa de Acompanhamento da Substituição de Frota (COMFROTA-SP), responsável por apoiar a implementação das recomendações e diretrizes estabelecidas [16,101].



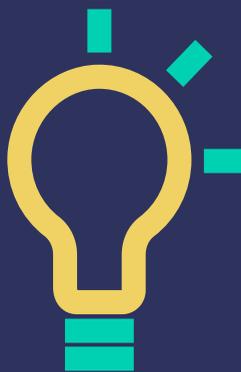
Originalmente prevista para 2013, a licitação do sistema só foi lançada em 2018 [102]. Dessa forma, a aplicação da Lei 16.802 no transporte coletivo se deu por meio da estipulação de metas no edital de licitação. O edital previa que os vencedores entregassem um cronograma de substituição da frota, atendendo a índices anuais de redução de emissão de poluentes. Também estabelecia que a implementação começasse no máximo 12 meses após a assinatura do contrato, com cronogramas submetidos à aprovação do COMFROTA-SP.

Em setembro de 2019, a prefeitura assinou os novos contratos e, em novembro, os primeiros 15 ônibus elétricos a bateria foram adquiridos pela empresa Transwolff, uma das operadoras contempladas na licitação [103]. Em função dos desequilíbrios financeiros no sistema de transporte coletivo, gerados pela pandemia do coronavírus, os cronogramas de implementação da frota estão sendo reavaliados.



B São Paulo, Brasil. Foto: Gabriel Oliveira

A São Paulo, Brasil. Foto: Sidnei Santos/SPTTrans.



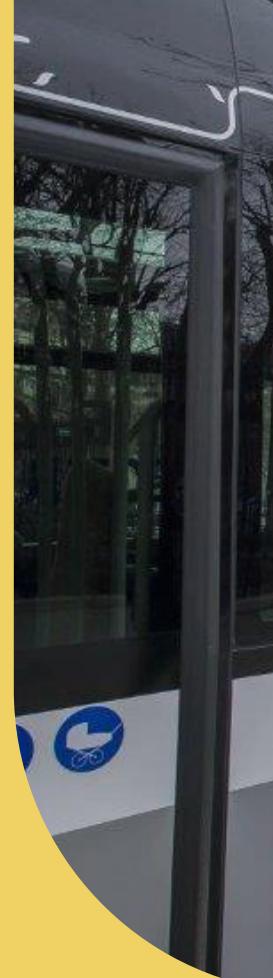
ESTUDO DE CASO 4 PARIS, FRANÇA

Paris anuncia a compra de 800 ônibus elétricos para combater a poluição.

Para combater os altos níveis de poluição, Paris caminha em direção a um sistema de transporte coletivo por ônibus cada vez mais limpo. Empresa pública responsável pelo setor na capital francesa, a Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP) estabeleceu como meta renovar até 2025 sua frota de 4,7 mil ônibus, de forma que dois terços deles sejam de tração elétrica e os demais, a biogás. Essa meta está alinhada com o Plano de Transporte Urbano de Ilê-de-France, que prevê a redução de 20% das emissões de Gases de Efeito Estufa [10].

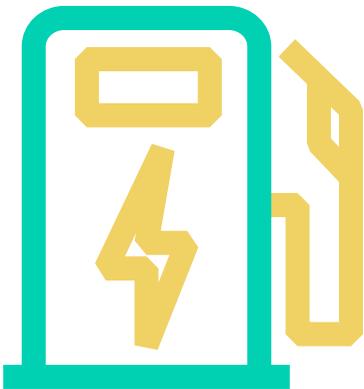
Em 2018, em busca desse objetivo, a cidade lançou uma grande licitação para aquisição dos primeiros 800 ônibus elétricos, que devem iniciar sua operação em 2020. O modelo de negócio para a inserção desses primeiros veículos apresenta aspectos interessantes.

No início do planejamento, a companhia de energia e o operador público de transporte assinaram uma parceria para realização de estudos de viabilidade, com avaliação do desempenho das baterias e do impacto do sistema de recarga na rede elétrica. Os resultados foram satisfatórios e familiarizaram o operador com a tecnologia [104]. A manutenção da nova frota será realizada pelo operador nas garagens, que serão adaptadas para o recebimento dos ônibus elétricos.





Além da meta de ter uma frota 100% composta por ônibus elétricos e a biogás, o arcabouço institucional que sustenta a eletrificação inclui o compromisso parisiense de garantir um transporte coletivo limpo e de qualidade durante os Jogos Olímpicos de 2024, que serão sediados na cidade. Outro pilar é o marketing ambiental, resultado da visibilidade que o projeto ganhou, por configurar uma das maiores aquisições de ônibus elétricos em curso na Europa.



No que diz respeito ao produto financeiro, a RATP fez o investimento de capital para a compra dos veículos, realizada mediante licitação aberta a propostas de fabricantes. Foram contemplados três deles, todos empresas francesas (Heuliez, Bolloré e Alstom), o que tende a fomentar esse setor econômico no país. O valor aproximado da licitação foi de 400 milhões de euros, com previsão de entrega dos primeiros 150 ônibus entre 2020 e 2022 (serão 50 veículos de cada fabricante, o que reduz o risco de problemas na entrega) [105].

Em relação à fonte dos recursos, uma parte do dinheiro para a compra dos veículos veio do Fundo de Transporte Público da cidade, alimentado por receitas tarifárias e pela taxa de transporte paga por empresas com mais de nove funcionários, conhecida como *Versement Mobilité Transport* [106]. Subsídios e multas também compõem o fundo.

Quando o processo estiver concluído, a RATP terá cortado pela metade sua pegada de carbono [10].

AO FINAL DA ETAPA 2

Definição do escopo, os objetivos a seguir devem ter sido alcançados



VISÃO

✓ Construir a visão desejada



OBJETIVOS, METAS E PRAZOS

✓ Definir os objetivos, as metas e os prazos do projeto



3.3. ETAPA 3: Elaboração

Depois das etapas de preparação e de definição do escopo (3.1 e 3.2), devem-se definir os elementos para uma adequada elaboração do projeto. Três linhas de atividade, subdivididas em vários elementos, orientam esse processo, conforme o esquema apresentado na FIGURA 15. A ordem das ações pode variar conforme as características de cada projeto.

3.3.1. Processos gerenciais

Há quatro principais elementos que devem ser desenvolvidos entre os processos gerenciais do projeto:

- 3.3.1.1. Gerenciamento dos atores;
- 3.3.1.2. Plano de trabalho e cronograma;
- 3.3.1.3. Plano de comunicação;
- 3.3.1.4. Mapeamento de riscos.

FIGURA 15. Atividades e elementos para elaboração do projeto de eletromobilidade

3.3.1. Processos gerenciais	3.3.2. Planejamento técnico e operacional	3.3.3. Modelos de negócio
3.3.1.1. Gerenciamento dos atores	3.3.2.1. Veículos e baterias	3.3.3.1. Modelos de contratação e de aquisição
3.3.1.2. Plano de trabalho e cronograma	3.3.2.2. Planejamento operacional	3.3.3.2. Custos
3.3.1.3. Plano de comunicação	3.3.2.3. Infraestrutura de recarga	3.3.3.3. Fontes de recursos
3.3.1.4. Mapeamento de riscos	3.3.2.4. Plano de monitoramento	3.3.3.4. Produtos financeiros
	3.3.2.5. Treinamento de equipes	3.3.3.5. Contratos e licitações
	3.3.2.6. Protocolo de testes	

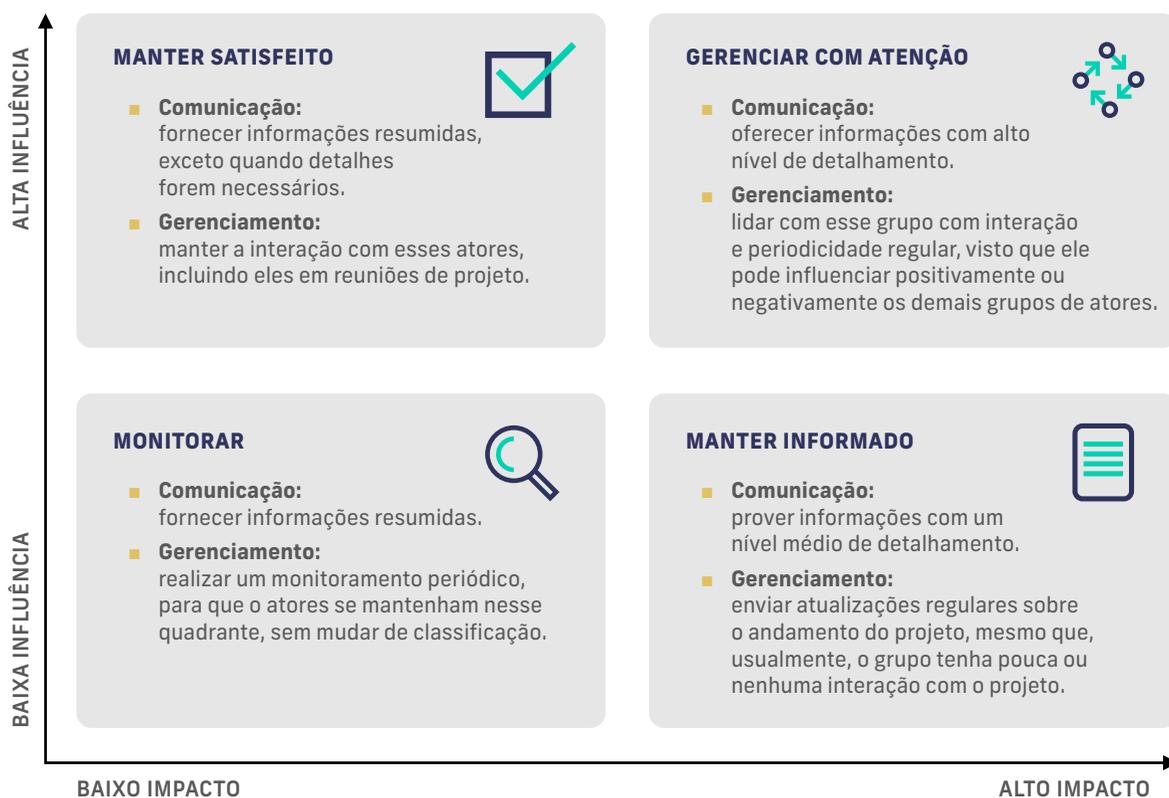
FONTE: Elaborado pelos autores.

3.3.1.1. Gerenciamento dos atores

Nesta etapa, a lista de atores desenvolvida durante o mapeamento (3.1.2) deve ser revisitada, com a inclusão de novos entes identificados durante o desenvolvimento do projeto. Esse processo pode ser executado por meio de um workshop com os interessados no processo. Visto que o escopo foi definido, nesse momento

torna-se possível avaliar com mais clareza como cada um dos atores contribuirá e identificar os interesses deles em relação à adoção da eletromobilidade. Para isso, recomenda-se que algumas questões sejam respondidas: Quais são os atores mais impactados? Quais são os mais beneficiados? Quais não são escutados? Quais são favoráveis e quais se opõem às propostas e por quê? [97].

FIGURA 16. Matriz de influência e de impacto dos grupos de atores



FONTE: Adaptado de [107]

Após a consolidação da lista, os atores devem ser classificados em uma análise qualitativa, conforme seus níveis de influência e de impacto em relação ao projeto. O grau de influência categoriza os atores com base no seu engajamento ativo, enquanto o grau de impacto classifica os atores por sua capacidade de efetuar mudanças no planejamento ou na execução do projeto.

O produto dessa análise é uma matriz, apresentada na **FIGURA 16**, que setoriza os grupos e sugere como proceder com cada conjunto de atores [107]. Para cada quadrante, é necessário definir diferentes ações de gerenciamento e de comunicação, estabelecendo como os atores serão envolvidos no projeto. É possível que, ao longo do tempo, um mesmo ator mude de quadrante.

Esse processo exige grande dedicação, mas representa um importante passo para a elaboração do projeto. Outro fator relevante a considerar é a forma como os atores vão se relacionar com os responsáveis pelo projeto e entre si. A identificação dos diferentes interesses envolvidos permite promover arranjos inovadores. Esses arranjos podem ser constituídos por diversos atores que contribuam nas definições técnicas, financeiras e jurídicas para viabilização do projeto de eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus.

3.3.1.2. Plano de trabalho e cronograma

Para ter sucesso na implementação da eletromobilidade no transporte coletivo, é importante planejar as ações. Nessa fase, recomenda-se a criação de um plano de trabalho e de um cronograma que deem uma visão de todo o projeto, assim como um detalhamento dos prazos e atividades para o curto prazo. Esses documentos devem registrar a distribuição das tarefas entre os diferentes participantes na elaboração do projeto, para que todos tenham uma boa compreensão dos seus prazos e responsabilidades. É fundamental que o coordenador tenha ingerência sobre as atividades que serão executadas e sobre quem será o responsável por cada uma delas.

O plano de trabalho e o cronograma devem estar alinhados com objetivos, metas e prazos estabelecidos (3.2.2), facilitar a verificação de atividades que estão conectadas – para identificação de eventuais gargalos – e refletir como o projeto vai ser executado ao longo do tempo. É importante montar um projeto faseado, para que a transição para a eletromobilidade ocorra de forma gradual e segura.

Etapas administrativas podem ter grande impacto no cronograma de trabalho, se não forem bem gerenciadas. Existe a possibilidade de atrasos na execução das atividades mais complexas ou burocráticas (mesmo que possam ser mitigados pelo gerenciamento dos riscos). É aconselhável que o cronograma preveja algum tempo adicional para imprevistos dessa natureza.

Quanto mais distante o horizonte de tempo, maiores são as incertezas e mais difícil é planejar com precisão. A saída é detalhar o cronograma para aquisição do primeiro lote de veículos, que dará início à operação, deixando marcos para o planejamento da expansão do projeto. Já nesse momento, contudo, as fases posteriores devem estar definidas, porque a criação de um plano de trabalho a longo prazo permite uma melhor organização e a visualização do processo como um todo.

É importante lembrar que mudanças fazem parte de qualquer projeto e que precisam ser bem gerenciadas para que os objetivos sejam alcançados. Ou seja, o plano de trabalho e o cronograma devem ser revistos sempre que necessário.

3.3.1.3. Plano de comunicação

Além da comunicação já estabelecida entre os atores envolvidos, o projeto deve ter um plano de comunicação, alinhado com a visão, os objetivos e as metas do projeto. Entre outros aspectos, o plano deverá [108]:

- **desenvolver a narrativa do projeto:** contextualização dos desafios que o projeto aborda e explicação de como e por que a eletromobilidade colaborará para a superação deles;
- **definir o público-alvo:** quem será o público-alvo das ações de comunicação;
- **construir uma marca e uma identidade:** a marca expressa os valores do projeto e, no caso do transporte coletivo, deve remeter a conceitos como modernidade, eficiência, rapidez, confiabilidade, conforto e segurança. O fato de uma nova tecnologia estar envolvida colabora para a transmissão dessa mensagem. Nos quesitos marca e identidade podem ser definidos: nome, logotipo, esquema de cores, slogan e design do veículo;
- **definir a estratégia de comunicação com a população:** os cidadãos devem ter conhecimento sobre o projeto e seus principais benefícios. O plano deve estruturar mensagens para os

diferentes públicos e definir os canais de veiculação das campanhas de marketing: anúncios nos ônibus, campanhas na internet (sites e redes sociais), spots para rádio etc.;

- **estabelecer a comunicação externa:** a mídia local deve ser engajada e receber as informações detalhadas do projeto para manter o público corretamente informado.

3.3.1.4. Mapeamento de riscos

Para um bom planejamento e andamento do projeto, é importante avaliar os riscos existentes e indicar quais medidas podem ser adotadas caso eles se tornem realidade. O mapeamento dos riscos é feito em três fases:

- levantamento dos riscos;
- classificação dos riscos;
- gestão dos riscos.

Os riscos são eventos em potencial, podendo ser positivos ou negativos. Riscos positivos podem acelerar ou incrementar o sucesso do projeto, por isso devem ser fomentados. Já riscos negativos, os mais comuns, precisam ser bem gerenciados, a fim de evitar consequências graves.

a] Levantamento dos riscos

Os riscos devem ser levantados e podem ser categorizados de acordo com o **QUADRO 4**. É importante identificar o maior número possível de riscos, o que é facilitado pela categorização sugerida.

b] Classificação dos riscos

Após o levantamento desses itens, deve-se realizar sua classificação, considerando a probabilidade de ocorrência e o impacto no projeto. Para isso, pode-se utilizar uma escala de 1 a 3, conforme apresentado no **QUADRO 5**.

A multiplicação dos fatores “probabilidade de ocorrência” e “impacto” resulta em um índice para cada risco. O **QUADRO 6** apresenta alguns exemplos de riscos em projetos de eletromobilidade, com indicação dos riscos positivos (+) e dos negativos (-), e mostra como eles devem ser classificados [109].

A partir desse índice (probabilidade x impacto), constroem-se matrizes como a apresentada na **FIGURA 17**. Recomenda-se que sejam criadas matrizes para cada categoria de risco. Os riscos classificados como de alto grau de impacto e com maior probabilidade de ocorrer são os que devem receber maior atenção.

QUADRO 4. Categorias de riscos

Processo de implementação

Esses riscos são associados à preparação dos documentos de licitação e ao processo de implementação do projeto.

Operacionais/Técnicos

Esses riscos dizem respeito diretamente à operação e ao desempenho técnico dos ônibus elétricos. Nessa categoria, também devem ser identificados os riscos de ter uma frota elétrica em vez da operação tradicional com ônibus a diesel.

Organizacionais

São riscos decorrentes da estrutura e da capacidade das organizações envolvidas no projeto, que podem se revelar incompatíveis com as necessidades das novas condições operacionais.

Financeiros

Riscos financeiros estão relacionados ao investimento no projeto, considerando os custos iniciais, de operação e de manutenção da tecnologia.

Políticos

Riscos políticos referem-se à possibilidade de que os objetivos de uma determinada ação não sejam atingidos ou sejam afetados devido a mudanças governamentais ou a decisões políticas. Eles têm a ver com as mudanças, às vezes frequentes, que interferem nas decisões e estratégias definidas pelos atores principais. Além de afetarem esses atores, podem causar prejuízo à imagem do projeto e comprometer sua continuidade.

FONTE: Elaborado pelos autores.

QUADRO 5. Escala de probabilidade de ocorrência e impacto

	Probabilidade de ocorrência	Impacto
Baixo	1	1
Médio	2	2
Alto	3	3

FONTE: Elaborado pelos autores.



QUADRO 6. Exemplo de lista de classificação dos riscos

Categoria	Risco	Ocorrência	Impacto	Ocorrência x impacto
Riscos do processo de implementação	Poucas propostas para provisão da tecnologia (-)	3	1	3
	Expectativa de queda de preços dos veículos adiar investimentos (-)	2	2	4
Riscos operacionais/técnicos	Rendimento dos veículos é menor do que o esperado (-)	2	3	6
	Vida útil da bateria é menor do que o esperado (-)	2	3	6
Riscos organizacionais	Suporte local de pós-vendas limitado, gerando atrasos e maiores custos (-)	2	2	4
	Problemas de condução devido ao despreparo dos motoristas (-)	2	2	4
Riscos financeiros	Custo de manutenção maior do que o esperado (-)	1	3	3
	Histórico de crédito do operador encarece financiamentos (-)	2	2	4
Riscos políticos	Alta aceitação da tecnologia pela população (+)	1	2	2
	Mudanças na vontade política de implementar o projeto (-)	2	3	6

FONTE: Elaborado pelos autores.



FIGURA 17 | Matriz de probabilidade de ocorrência e impacto



c] Gestão dos riscos

O gerenciamento dos riscos é feito de acordo com o grau de influência que se tem sobre eles. Devem-se escolher as melhores estratégias para lidar com cada um. Os riscos negativos devem ser prevenidos, transferidos, mitigados ou aceitos. Por outro lado, os positivos podem ser explorados, melhorados, compartilhados ou aceitos. O **QUADRO 7** detalha as possíveis respostas.

FONTE: Elaborado pelos autores.



QUADRO 7. Respostas para os riscos identificados no projeto de eletromobilidade

Riscos negativos

PREVENIR

Agir para eliminar o risco ou proteger o projeto contra o seu impacto.

TRANSFERIR

Transferir o impacto de um risco para terceiros, juntamente com a responsabilidade pela resposta.

MITIGAR

Agir para reduzir a probabilidade de ocorrência ou o impacto do risco.

ACEITAR

Reconhecer a existência do risco e não agir, a menos que ele se manifeste.

Riscos positivos

EXPLORAR

Agir para garantir que o risco seja concretizado.

COMPARTILHAR

Transferir integral ou parcialmente a responsabilidade do risco a um terceiro que tenha mais capacidade de explorá-lo para benefício do projeto.

MELHORAR

Trabalhar para aumentar a probabilidade de impactos positivos de um risco.

ACEITAR

Estar disposto a aproveitar o risco que surgir, mas sem persegui-lo ativamente.

FONTE: Adaptado de [107]

A partir dessas respostas aos riscos, é recomendável elaborar um plano de ação, como exemplificado no **QUADRO 8**, para que a cada risco mapeado corresponda um planejamento de possíveis encaminhamentos ou soluções. É necessário definir responsáveis para cada um dos riscos, a fim de garantir que os encaminhamentos sejam monitorados e executados.

QUADRO 8. Exemplos de respostas e encaminhamentos para os riscos

Categoria	Risco	Ocorrência x impacto	Resposta	Encaminhamentos
Riscos do processo de implementação	Poucas propostas para provisão da tecnologia (-)	3	Mitigar	Reavaliar requisitos de projeto para permitir o fornecimento por mais fabricantes
	Expectativa de queda de preços dos veículos adiar investimentos (-)	4	Mitigar	Estabelecer em lei ou contratos metas de renovação para frota elétrica, para sinalizar o compromisso com a implementação de frotas limpas
Riscos operacionais/técnicos	Rendimento dos veículos é menor do que o esperado (-)	6	Transferir	Transferir o risco para o fabricante, estabelecendo contratualmente o rendimento esperado dos veículos e as compensações financeiras caso ele fique abaixo do esperado
	Vida útil da bateria é menor do que o esperado (-)	6	Transferir	Transferir o risco para o fabricante, estabelecendo um contrato de <i>leasing</i> em que ele deve repor a bateria em caso de a vida útil ser menor que a esperada
Riscos organizacionais	Suporte local de pós-vendas limitado, gerando atrasos e maiores custos (-)	4	Transferir	Transferir o risco para o fabricante, estabelecendo contratualmente presença local para reposição de peças e compensações financeiras em caso de atraso
	Problemas de condução devido ao despreparo dos motoristas (-)	4	Mitigar	Realizar treinamentos para que os motoristas se adaptem à nova tecnologia
Riscos financeiros	Custo de manutenção maior do que o esperado (-)	3	Transferir	Transferir os custos para o fornecedor da tecnologia, assinando acordo prévio de manutenção com os valores a serem pagos
	Histórico de crédito do operador encarece financiamentos (-)	4	Mitigar	Criar fundos de contingência para o transporte coletivo que possam ser utilizados em caso de não pagamento pelo operador
Riscos políticos	Alta aceitação da tecnologia pela população (+)	2	Melhorar	Acelerar a implementação da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus e investir em campanhas de divulgação do projeto
	Mudanças na vontade política de implementar o projeto (-)	6	Prevenir	Estabelecer em lei ou contratos metas de renovação para frota elétrica, para sinalizar o compromisso com a implementação de frotas limpas

FONTE: Elaborado pelos autores.

3.3.2. Planejamento técnico e operacional

Há seis principais elementos que devem ser desenvolvidos durante o planejamento técnico e operacional do projeto:

- 3.3.2.1. Veículos e baterias;
- 3.3.2.2. Planejamento operacional;
- 3.3.2.3. Infraestrutura de recarga;
- 3.3.2.4. Plano de monitoramento;
- 3.3.2.5. Treinamento de equipes;
- 3.3.2.6. Protocolos de testes.

3.3.2.1. Veículos e baterias

Depois da coleta de informações abordada no diagnóstico (3.1.3) e no estudo de pré-viabilidade (3.1.4) — que permite caracterizar linhas e garagens disponíveis e identificar a disponibilidade, as especificações técnicas e as restrições dos ônibus elétricos —, é possível conduzir algumas análises de cenários. Para cada um deles, deve-se avaliar a viabilidade técnica e econômica das diferentes opções de veículo, bateria e estratégia de recarga (levantadas durante o estudo de mercado, em conformidade com os requisitos operacionais das linhas).

Uma vez que a viabilidade técnica e econômica dos diferentes cenários seja avaliada e comparada, é possível definir, por fim, os atributos e as características tecnológicas das opções disponíveis no mercado que melhor se adaptam ao contexto local. O **BOX7** apresenta alguns parâmetros que podem ser analisados nessa etapa.



A



B

BOX 7

Análise de cenários

A análise de cenários consiste em comparar e avaliar veículos, sistemas e estratégias de recarga disponíveis, além de outros itens definidos pela cidade. Como nesta etapa o diagnóstico do sistema de transporte coletivo e o estudo de mercado já foram realizados, estão à disposição os insumos necessários para pré-selecionar tecnologias com especificações técnicas adequadas às necessidades locais.

Considere-se o exemplo da cidade A, que, após estudo de mercado, recebeu informações de seis modelos de ônibus elétricos, de cinco fabricantes distintos. Para embasar a seleção dos requisitos mínimos dos veículos, os técnicos locais decidiram realizar uma análise de cenários.

O primeiro passo foi verificar e comparar a viabilidade econômica para cada uma das opções. Para isso, realizou-se o cálculo do TCO, apresentado na **FIGURA B7-1**.

Aparentemente, as melhores opções seriam os Modelos 1, 3 e 5. No entanto, com base no conhecimento obtido nas etapas anteriores do projeto, os técnicos decidiram definir outros critérios, para avaliação mais detalhada das opções, apresentada no **QUADRO B7-1**.

Com base nisso, percebeu-se que o Modelo 3, apesar de ser uma opção viável economicamente, não atenderia o cronograma proposto pela cidade, de acordo com os prazos de entrega fornecidos pelo fabricante.

QUADRO B7-1. Avaliação detalhada dos modelos de veículos

	Fabricante 1		Fabricante 2	Fabricante 3	Fabricante 4	Fabricante 5
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
Estratégia de recarga	Noturna	Oportunidade	Noturna	Noturna	Oportunidade	Noturna
Oferece treinamento para motoristas e técnicos?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Prazo de entrega para 15 veículos	6 meses	1 ano	1,5 ano	2 anos	6 meses	1 ano
Oferece pós venda?	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Já existem veículos desse modelo na América Latina?	Sim	Não	Sim	Sim	Não	Sim

FONTE: Elaborado pelos autores.

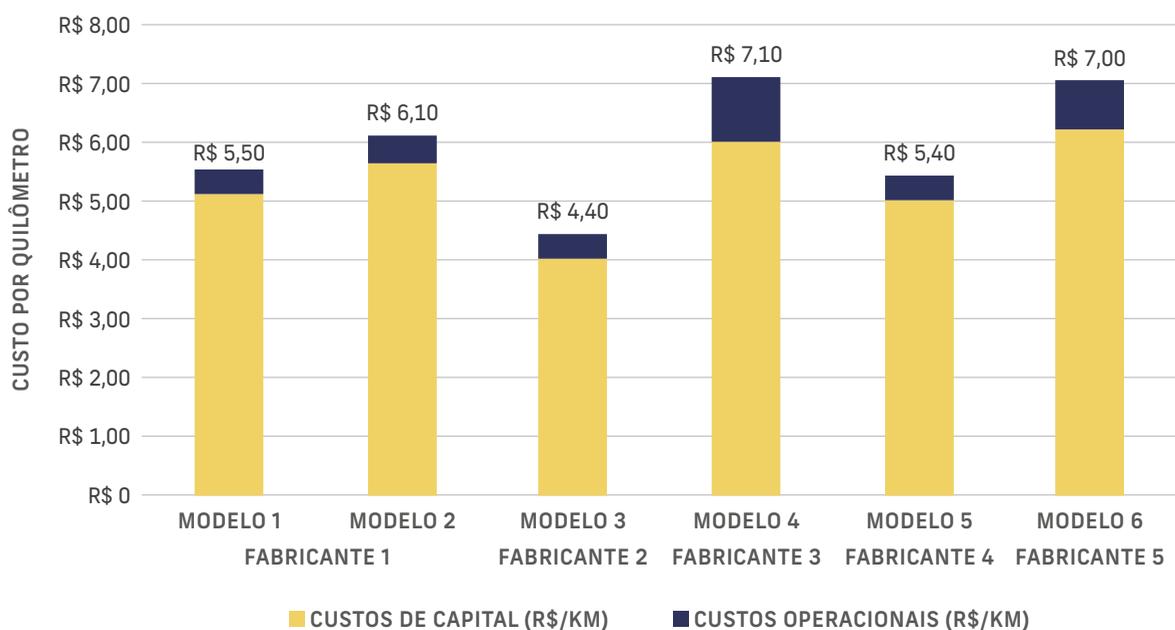


Já o Modelo 5 foi descartado pela estratégia de recarga de oportunidade, que na avaliação dos técnicos gerava riscos para o contexto da cidade. Além disso, já existiam duas garagens próximas à linha que se pretendia eletrificar.

As especificações técnicas do Modelo 1 foram consideradas adequadas à realidade local. Ou seja, um possível edital de licitação poderia exigir dos fabricantes veículos com viabilidade econômica similar à daquele modelo e que atendessem também aos demais critérios fixados pela cidade.

Porém, para confirmar a pré-seleção do Modelo 1, será necessário verificar a viabilidade técnica/operacional dessa opção.

FIGURA B7-1. Cálculo do TCO



FONTE: Elaborado pelos autores.



Nessa etapa, recomenda-se também que sejam abordados e planejados temas como a segunda vida e a destinação final dos veículos e das baterias após o término das vidas úteis (SEÇÃO 2.2.3). O planejamento a longo prazo para os componentes pode reduzir incertezas e favorecer a viabilidade econômica do projeto. É fundamental que sejam avaliadas as opções de utilização da bateria como segunda vida (armazenamento estacionário, por exemplo), já que ela ainda apresenta uma capacidade de armazenamento adequada a esse fim [110].

Apesar da complexidade, é indicado decidir sobre a disposição e a utilização final de veículos e baterias com base em critérios definidos, avaliando fatores como: projeções do custo das baterias, valor de mercado das baterias após o final da vida útil e projeções dos custos dos ônibus elétricos [34]. Esses fatores, sempre que necessário, devem ser revistos ao longo do projeto. Definir um plano entre todos os atores envolvidos, seja para o descarte, seja para a utilização após o fim da vida útil (incluindo divisão de responsabilidades), favorecerá uma quantificação melhor dos impactos ambientais e financeiros do projeto.

Com as avaliações e cenários considerados, devem-se definir os requisitos técnicos necessários para os veículos, incluindo a estratégia de recarga que será adotada.

3.3.2.2. Planejamento operacional

Uma parte da elaboração do projeto consiste em planejar a operacionalidade dos ônibus elétricos que serão incorporados ao transporte coletivo da cidade. Nessa etapa, são levadas em consideração as informações levantadas no diagnóstico (3.1.3) e no estudo de pré-viabilidade (3.1.4). As diferentes estratégias de recarga, por exemplo, geram impacto no processo de desenho das rotas e podem até mesmo otimizar a tabela horária praticada.

O planejamento da operação de transporte coletivo por ônibus costuma ser estruturado em quatro etapas principais [111]:

- concepção de rede e rotas;
- desenvolvimento da tabela horária;
- alocação dos veículos;
- programação de equipe.

Essa estrutura pode ser alterada se os processos estiverem em fases distintas de desenvolvimento. É importante encarar o planejamento como um processo iterativo, no qual as etapas podem ser repetidas até que se alcance o resultado operacional mais adequado à necessidade. A seguir são apontadas algumas adaptações que devem ser levadas em consideração na construção de um plano operacional para os ônibus elétricos [112].

a] Concepção de rede e rotas

Nessa etapa, recorre-se às informações sobre características geográficas e demanda pela modalidade de transporte recolhidas na fase de diagnóstico (3.1.3). Além das informações coletadas e analisadas, caso a cidade deseje realizar estudos aprofundados, é possível avaliar o ciclo de condução associado a simulações e a análises de TCO para cada rota [113].

Essas informações devem possibilitar a definição de critérios para dar preferência a rotas com maior pendur para a eletrificação. Assim, esse é o momento em que, depois das análises prévias de viabilidade e da avaliação de possíveis rotas e garagens, faz-se uma definição concreta das rotas e da rede, permitindo que os demais aspectos operacionais sejam verificados e refinados.

Devem também ser consideradas especificações técnicas da frota de ônibus. Além das rotas mais eletrificáveis, nessa etapa é possível fazer uma lista preliminar de possíveis pontos ou garagens de recarga, em conformidade com as avaliações já realizadas.

b] Desenvolvimento da tabela horária

Este é o momento de construir a tabela horária de operação dos ônibus elétricos. Os objetivos mais frequentes são minimizar tempos de espera dos passageiros e sincronizar as partidas dos veículos que operam na linha. Cada estratégia de recarga e tipo de veículo terá impactos distintos na tabela horária.

Na recarga na garagem (ou recarga noturna), o desenvolvimento da tabela não oferecerá dificuldade, em comparação com a operação de ônibus convencionais, se os elétricos forem dotados de uma autonomia mínima maior do que a distância total a percorrer por dia. Essa autonomia está ligada à capacidade de armazenamento da bateria (kWh). No entanto, se a autonomia mínima, com carga completa, for insuficiente para um dia útil de operação na linha prevista, será necessário um deslocamento até o ponto de recarga (a garagem). Nesse caso, pode ser necessária uma frota ligeiramente maior, em comparação com a exigida por veículos convencionais. Na maioria dos casos, ônibus adaptados para uma estratégia de recarga noturna cobrem as distâncias máximas diárias observadas nos sistemas de transporte coletivo por ônibus, evitando alterações significativas nas programações operacionais já existentes – mas isso deve ser avaliado de acordo com a realidade local.

Na recarga de oportunidade, os fatores decisivos para a adaptação da tabela horária são a potência do carregador (kW) e, por tabela, o tempo de recarga (em minutos) e o número de pontos para abastecimento da bateria ao longo da linha ou dos terminais. Essa estratégia, dependendo da tecnologia, pode acarretar uma parada de 30 segundos a até alguns minutos para recarga nos pontos ou terminais. No primeiro caso, uma recarga rápida pode ser realizada durante pausas já previstas na operação, como o embarque e o desembarque dos passageiros ou a troca de motorista. Quando a potência do carregador é menor e a recarga leva alguns minutos, é necessário prever o tempo total de cada recarga e estimar seu impacto na tabela horária.

É essencial que, mesmo com um tempo maior de pausa para recarga, o nível de serviço do sistema não seja afetado. Em muitos casos, quando a recarga é realizada em terminais, o impacto na operação pode ser mínimo, se comparado com ônibus convencionais. A estratégia de recarga mista tem como objetivo justamente permitir que as restrições e o impacto de cada uma das outras estratégias sejam minimizados.





A Luxemburgo, Capital. Foto: Martyn Jandula, Shutterstock.

Por fim, nessa etapa devem ser realizadas análises para verificar o percentual de carga ao longo da operação e otimizar os momentos ao longo do dia em que poderão ser necessárias recargas. Em geral, recomenda-se que o percentual de carga da bateria, para operação, esteja sempre entre 20% e 80% da carga total, podendo variar conforme as especificações de cada veículo. Isso precisa ser cuidadosamente avaliado durante o planejamento operacional.

c] Alocação de veículos

Na etapa de alocação dos veículos, verifica-se se as restrições de operação determinadas pelas especificações técnicas dos ônibus e decorrentes das estratégias de recarga permitem o atendimento da demanda de passageiros com a frota prevista. Podem ser necessários ajustes e atualizações do que foi definido em etapas anteriores, para otimizar o número de veículos e diminuir o impacto na operação. Nessa fase, define-se em que momentos é necessário introduzir um ônibus da frota re-

serva ou promover algum ajuste de alocação devido à necessidade de recarga.

d] Programação de equipe

No processo de planejamento de operação de um sistema de transporte coletivo, essa é a etapa menos afetada pela introdução de ônibus elétricos. Como ponto a considerar, pode-se aproveitar para que a troca de motoristas ocorra enquanto o veículo realiza a recarga de oportunidade. Também é interessante que os treinamentos de equipe previstos na elaboração do projeto sejam realizados, sempre que possível, antes do início da operação dos veículos.

A FIGURA 18 consolida passos, dados de entrada e resultados de cada etapa e o BOX 8 exemplifica como o processo de planejamento operacional pode ser realizado. Vale lembrar que definir a solução mais adequada às características locais é um processo iterativo, durante o qual podem ser necessárias adaptações. Ao final desse processo, será possível definir a quantidades de veículos que serão necessários para o projeto.

FIGURA 18. Passos para execução do planejamento operacional



FONTE: Elaborado pelos autores.

BOX 8

Planejando a operação

Para exemplificar um dos possíveis casos relacionados ao planejamento operacional de uma frota de ônibus elétricos, considere-se o seguinte caso.

Concepção de rede e rotas

Uma cidade A deseja renovar a frota de uma importante linha (L1) de transporte coletivo por ônibus já existente. Essa linha caracteriza-se pela operação em corredores exclusivos com 10 km (sentido único) e 20 estações. Além disso, existem duas garagens que poderão ser utilizadas para instalar a infraestrutura de recarga, localizadas próximo às estações 1 e 6. A **FIGURA B8-1** resume as características e a localização das estações e garagens.

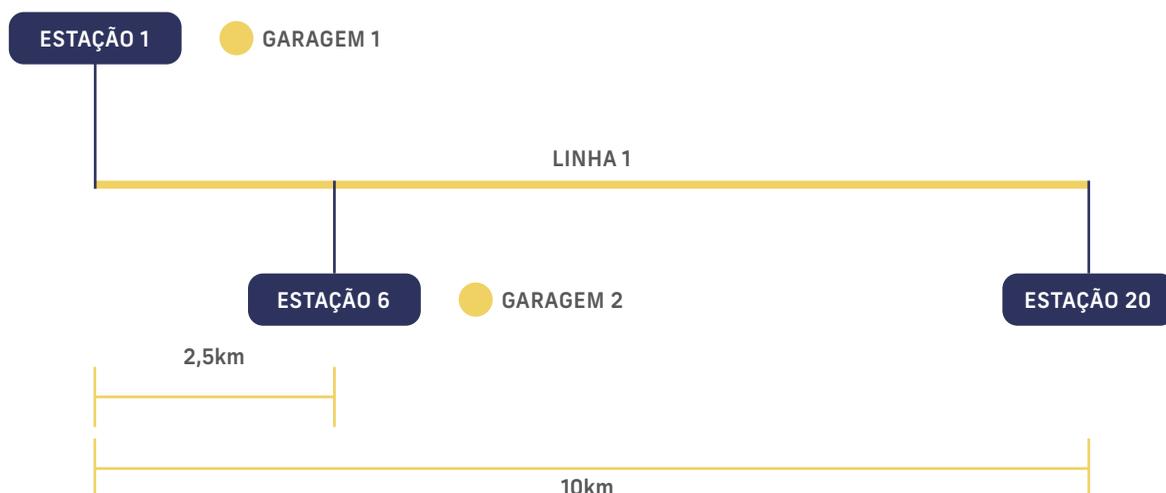
A frota atual operacional (sem frota reserva) conta com 15 ônibus padron a diesel. A ideia inicial, obtida na definição do escopo (3.2), era renovar os 15 veículos padron para outros 15 ônibus elétricos a bateria. No entanto, apesar de ser uma linha já existente, a agência responsável por regulamentar a operação do transporte na cidade decidiu encarar a renovação da frota como uma oportunidade de avaliar outros indicadores e promover melhorias para os clientes do transporte coletivo.



Assim, buscou-se avaliar se o dimensionamento de frota atendia adequadamente à demanda ou se seriam necessários ajustes. O primeiro passo foi separar os volumes de passageiros por estação no sentido mais carregado durante o horário de pico da linha (entre as 18h e as 19h).

A **FIGURA B8-2** apresenta a demanda de passageiros por estação na hora pico e a atual oferta de veículos na linha. Observou-se que a oferta atual de veículos entre as estações 7 e 14 é insuficiente.

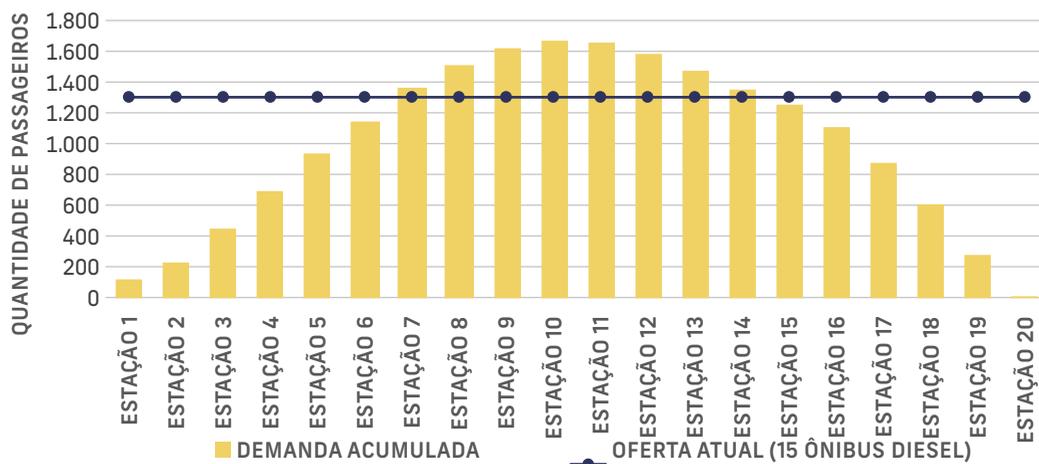
FIGURA B8-1 | Características da Linha 1



FONTE: Elaborado pelos autores.



FIGURA B8-2. Demanda de passageiros por estação na hora pico



FONTE: Elaborado pelos autores.

Assim, a cidade resolveu aprimorar as condições do serviço oferecido, realizando um dimensionamento de frota que deveria atender melhor à demanda nas estações em que se verificou um subdimensionamento.

Com base nas características dos veículos elétricos coletadas em um estudo de mercado realizado pela cidade, foi possível prosseguir com o novo dimensionamento. Segundo o fabricante, o veículo pré-selecionado tem uma capacidade de 85 passageiros. Com essas informações, o novo dimensionamento para a Linha 1 foi de 20 ônibus elétricos, resultando em cinco veículos a mais do que a oferta atual.

Resumindo, apesar de ser uma rota já existente e da opção por manter o percurso, a renovação de frota revelou-se uma oportunidade para revisar indicadores e prover melhorias, proporcionando um melhor serviço à população.

Desenvolvimento da tabela horária

Após a análise inicial das características, gerou-se uma nova tabela horária para atendimento da demanda da Linha 1, levando em conta informações sobre a frota necessária (QUADRO B8-1).

Na nova tabela horária, considerando que não houve alterações nas rotas e estações, o principal resultado foi a diminuição do intervalo de tempo entre os ônibus (*headway*), devido ao aumento da frota operacional. Para desenvolvimento da tabela horária, os principais métodos utilizados são os de programação linear [46,111].

QUADRO B8-1. Frota necessária para a Linha 1

	Período manhã					Entre picos					Período tarde									
	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00*	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
L1 Padron (elétrico)	4	9	15	19	17	15	9	8	8	8	8	9	15	19	20	16	14	12	8	3

FONTE: Elaborado pelos autores.

QUADRO B8-2. Dados do modelo de ônibus pré-selecionado

	Capacidade de armazenamento [kWh]	Consumo energético [kWh/km]	Autonomia (Sem A/C) [km]	Potência do carregador [kW]	Tempo de recarga [h]
Modelo 1	330	0,85	384	80	4,12

FONTE: Elaborado pelos autores.

Nessa etapa, a cidade considerou que não haveria grandes restrições operacionais para a introdução dos ônibus elétricos, pois a recarga seria realizada primordialmente à noite e durante intervalos de operação durante o dia.

Na fase seguinte, ainda será necessário confirmar que os veículos não impõem restrições operacionais e que a tabela planejada será cumprida, além de verificar a quantidade de carregadores que estarão conectados simultaneamente, dado que deverá ser repassado à empresa de energia.

QUADRO B8-3. Matriz de alocação dos ônibus elétricos padron

	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	
Ônibus 1	L1	L1	L1	L1					L1																
Ônibus 2	L1	L1	L1	L1					L1																
Ônibus 3	L1	L1	L1	L1					L1																
Ônibus 4	L1	L1	L1	L1	L1						L1	L1	L1	L1	L1										
Ônibus 5		L1	L1	L1	L1						L1														
Ônibus 6		L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1														
Ônibus 7		L1	L1	L1	L1	L1					L1	L1	L1	L1	L1	L1									
Ônibus 8		L1	L1	L1	L1	L1					L1	L1	L1	L1	L1	L1									
Ônibus 9		L1	L1	L1	L1	L1						L1													
Ônibus 10			L1	L1	L1	L1							L1	L1											
Ônibus 11			L1	L1	L1	L1							L1	L1	L1										
Ônibus 12			L1	L1	L1	L1							L1												
Ônibus 13			L1	L1	L1	L1	L1	L1					L1												
Ônibus 14			L1	L1	L1	L1	L1	L1					L1												
Ônibus 15			L1	L1	L1	L1	L1	L1					L1												
Ônibus 16				L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1	L1	L1	L1	L1	L1						
Ônibus 17				L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1	L1										
Ônibus 18				L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1	L1										
Ônibus 19				L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1	L1										
Ônibus 20					L1	L1	L1	L1	L1	L1					L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1			

FONTE: Elaborado pelos autores.

Alocação dos veículos

Com base no novo dimensionamento de frota e nos ajustes na tabela horária, o próximo passo é alocar cada ônibus e avaliar as janelas de recarga que representariam menor impacto operacional e na rede elétrica.

Para saber se há restrições operacionais, avaliam-se algumas características dos veículos, como a autonomia (km) e o consumo energético (kWh/km). O estudo de mercado proporcionou esses dados para o modelo de ônibus pré-selecionado (Modelo 1). As informações são apresentadas no **QUADRO B8-2**.

Após a definição da quantidade de veículos necessários em cada intervalo de tempo (**QUADRO B8-1**), foi criada a matriz de alocação dos ônibus elétricos (**QUADRO B8-3**).

Depois disso, é possível definir as janelas de tempo em que os veículos serão recarregados sem prejudicar a operação, evitando os horários de maior demanda já identificados. A definição dos tempos de recarga (R) também deve levar em conta um menor impacto sobre a rede elétrica e a minimização da quilometragem morta. Uma possível opção para a recarga é apresentada no **QUADRO B8-4**.

QUADRO B8-4. Matriz de alocação dos ônibus elétricos padron – operação e recarga

	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00
Ônibus 1	L1	L1	L1	L1					L1				R	R	R									
Ônibus 2	L1	L1	L1	L1					L1				R	R	R									
Ônibus 3	L1	L1	L1	L1					L1				R	R	R									
Ônibus 4	L1	L1	L1	L1	L1						L1	L1	L1	L1	L1				R	R	R			
Ônibus 5		L1	L1	L1	L1						L1		R	R	R									
Ônibus 6		L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1		R	R	R									
Ônibus 7		L1	L1	L1	L1	L1			R		L1	L1	L1	L1	L1	L1					R	R		
Ônibus 8		L1	L1	L1	L1	L1			R		L1	L1	L1	L1	L1	L1					R	R		
Ônibus 9		L1	L1	L1	L1	L1			R			L1			R	R								
Ônibus 10			L1	L1	L1	L1							L1		R	R	R							
Ônibus 11			L1	L1	L1	L1							L1		R	R	R							
Ônibus 12			L1	L1	L1	L1			R				L1		R	R								
Ônibus 13			L1	L1	L1	L1	L1	L1					L1	L1	L1	L1	L1	L1				R	R	R
Ônibus 14			L1	L1	L1	L1	L1	L1					L1	L1	L1	L1	L1	L1				R	R	R
Ônibus 15			L1	L1	L1	L1	L1	L1					L1	L1	L1	L1	L1	L1				R	R	R
Ônibus 16				L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1	L1	L1	L1	L1				R	R	R
Ônibus 17	R			L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1			R	R						
Ônibus 18	R			L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1			R	R						
Ônibus 19	R			L1	L1	L1	L1	L1	L1	L1				L1			R	R						
Ônibus 20	R				L1	L1	L1	L1	L1	L1					L1	L1	L1	L1	L1	L1		R	R	

R Recarga

FONTE: Elaborado pelos autores.

Combinando a matriz de alocação de cada ônibus (**QUADRO B8-4**) com os dados do **QUADRO B8-2**, é possível estimar o estado de carga da bateria durante a operação, apresentado no **QUADRO B8-5**. O cálculo leva em consideração o consumo dos veículos e as características operacionais da linha. Essa análise é útil para verificar se os percentuais de carga durante a operação estão em conformidade com o recomendado pelos fabricantes, o que é importante para prolongar a vida útil das baterias.

A matriz gerada permite saber – para a potência de carregador e a estratégia de recarga adotadas – que entre a meia noite e as 3h serão utilizados simultaneamente dez equipamentos de 80 kW. Existem diversas opções de distribuição desses carregadores nas duas

garagens disponíveis, a depender da necessidade de adequação de infraestrutura elétrica em cada uma delas. Essa definição deve ser realizada com a empresa de energia.

Apesar do tempo reportado pelo fabricante ser de quatro horas para uma carga completa (de 0 a 100%), a alocação dos ônibus e os requisitos operacionais da linha permitiram que esse tempo fosse reduzido, devido ao nível remanescente de carga nas baterias. Na operação desenhada, o tempo máximo que um ônibus permanece conectado ao carregador é de três horas. A previsão é que o estado de carga mínimo que um veículo terá ao longo do dia seja de 39% da capacidade de armazenamento inicial, que é igual a 330 kWh.

QUADRO B8-5. Estado de carga da bateria durante a operação

	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	0:00	1:00	2:00	3:00	
Ônibus 1	95%	91%	86%	81%	81%	81%	81%	81%	76%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	48%	48%	48%	72%	97%	100%	100%	100%	100%	
Ônibus 2	95%	91%	86%	81%	81%	81%	81%	81%	76%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	48%	48%	48%	72%	97%	100%	100%	100%	100%	
Ônibus 3	95%	91%	86%	81%	81%	81%	81%	81%	76%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	48%	48%	48%	72%	97%	100%	100%	100%	100%	
Ônibus 4	95%	91%	86%	81%	76%	76%	76%	76%	76%	76%	72%	67%	62%	58%	53%	53%	53%	53%	77%	100%	100%	100%	100%	100%	
Ônibus 5	100%	95%	91%	86%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	76%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	48%	72%	97%	100%	100%	100%	100%	
Ônibus 6	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	72%	72%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	39%	39%	63%	87%	100%	100%	100%	100%	
Ônibus 7	100%	95%	91%	86%	81%	76%	76%	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	72%	72%	72%	72%	96%	100%	100%	100%	
Ônibus 8	100%	95%	91%	86%	81%	76%	76%	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	72%	72%	72%	72%	96%	100%	100%	100%	
Ônibus 9	100%	95%	91%	86%	81%	76%	76%	100%	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	67%	62%	62%	87%	100%	100%	100%	
Ônibus 10	100%	100%	95%	91%	86%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	76%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	43%	68%	92%	100%	
Ônibus 11	100%	100%	95%	91%	86%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	81%	76%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	43%	68%	92%	100%	
Ônibus 12	100%	100%	95%	91%	86%	81%	81%	100%	100%	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	67%	67%	91%	100%	100%	100%	
Ônibus 13	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	72%	72%	72%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	43%	43%	43%	68%	92%	100%	
Ônibus 14	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	72%	72%	72%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	43%	43%	43%	68%	92%	100%	
Ônibus 15	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	72%	72%	72%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	43%	43%	43%	68%	92%	100%	
Ônibus 16	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	67%	67%	67%	67%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	43%	43%	43%	68%	92%	100%
Ônibus 17	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	67%	67%	67%	67%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	39%	39%	39%	39%	63%	87%
Ônibus 18	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	67%	67%	67%	67%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	39%	39%	39%	39%	63%	87%
Ônibus 19	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	67%	67%	67%	67%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	39%	39%	39%	39%	63%	87%
Ônibus 20	100%	100%	100%	100%	95%	91%	86%	81%	76%	72%	72%	72%	72%	72%	67%	62%	58%	53%	48%	43%	43%	43%	68%	92%	

FONTE: Elaborado pelos autores.



Se a proposta de alocação de veículos e de recarga não fosse viável tecnicamente, seria necessário retornar aos passos anteriores e realizar mudanças na tabela horária, no dimensionamento da frota ou até mesmo na concepção das rotas. Esse é um processo iterativo, com diversas soluções possíveis, cabendo ao responsável tomar a melhor decisão para o projeto.

Programação de equipe

Por fim, para a programação da equipe que irá garantir a operação adequada da nova frota de ônibus elétricos da cidade A, é necessário levar em consideração alguns pontos importantes:

- a frota total dimensionada para atender à demanda de passageiros é maior, assim a cidade A precisará aumentar o número de motoristas disponíveis;
- como os veículos serão carregados também durante o dia, será necessário um protocolo para que os motoristas cheguem nas garagens e realizem os procedimentos de conexão e desconexão dos veículos aos carregadores de maneira adequada. Também pode ser previsto que outros técnicos da empresa realizem esse procedimento. Um sistema que facilita essa gestão é o sistema de recarga inteligente.

É necessário também promover treinamentos para a equipe de motoristas e para a equipe de manutenção. Recomenda-se avaliar com o fabricante a possibilidade de disponibilização desses treinamentos, anteriores ao início da operação.



3.3.2.3. Infraestrutura de recarga

A partir da definição dos veículos e dos aspectos operacionais do projeto, é o momento de planejar a infraestrutura necessária para a execução da recarga. A definição da estratégia de recarga e a seleção do veículo são fatores que influenciam diretamente na definição da infraestrutura.

Cada estratégia de recarga tem requisitos, adaptações e restrições distintos. Assim, planejar e implementar de maneira adequada essa etapa do projeto pode aumentar a eficiência do sistema, mitigar riscos e custos e otimizar a infraestrutura necessária. Independentemente do tamanho da frota a ser introduzida, é interessante realizar análises prévias. Se a infraestrutura for bem planejada, mesmo para um projeto de pequena escala, as instalações podem ser utilizadas posteriormente e facilitar a incorporação de mais veículos à frota.

Uma vez que a adoção de frotas elétricas requer uma série de investimentos em infraestrutura, é necessário criar um plano que mapeie detalhadamente ajustes

e novas infraestruturas necessários à operação, utilizando como subsídio os dados avaliados no diagnóstico (3.1.3) e no estudo de pré-viabilidade, além de definições adicionais. É fundamental que a companhia de energia local apoie a elaboração desse plano. Mudanças de *layout* nas garagens, aquisição de novos terrenos, implementação de subestações de energia e outros investimentos devem ser avaliados nessa fase.

O **QUADRO 9** destaca algumas considerações importantes para um projeto de infraestrutura de recarga na garagem ou recarga de oportunidade. Para sistemas de recarga mista, as adequações necessárias podem ser maiores, porque se trata da combinação das outras duas estratégias. Por ser uma alternativa emergente, contudo, ainda não está claro o alcance dessas adequações. É importante que também para essa estratégia seja elaborado um plano detalhado, prevendo prazos, custos e responsabilidades para implementação e otimização da infraestrutura.

QUADRO 9. Considerações para a infraestrutura de acordo com a estratégia de recarga**Recarga na garagem**

No que diz respeito à recarga na garagem, abordada na **SEÇÃO 2.3.2**, a potência dos carregadores tende a variar entre 25 kW e 150 kW para cada dispositivo. Na maioria dos casos, carregadores com potência entre 50 kW e 100 kW são o suficiente para garantir uma carga completa em até seis horas [64].

Assim, para essa estratégia, havendo definição de variáveis como quantidade de ônibus elétricos, capacidade de armazenamento da bateria (kWh), tempo disponível para recarga (h), horário de chegada e de saída de cada veículo para recarga, horário de início de operação e potência dos carregadores (kW), é possível estimar adequações para implementação da infraestrutura de recarga, a potência instalada na garagem e os horários de maior demanda de energia (horário de ponta). A forma de cálculo pode ser encontrada na **FIGURA 10**.

Com base nos picos de demanda de energia, é possível prever as adequações na garagem e na rede elétrica necessárias para suportar a frota de ônibus elétricos. Como uma parte das garagens pode não estar adaptada a receber altas cargas de energia, devem ser previstos transformadores adicionais, para reduzir o nível de energia da rede elétrica de alta tensão nos pontos de carregamento. Essa e outras adaptações devem ser avaliadas nessa etapa de estruturação do projeto. Na **SEÇÃO 2.3.3**, apresentam-se ações que têm como objetivo otimizar a estratégia de recarga a fim de diminuir o impacto na rede elétrica e na adequação de garagens.

Uma vez estabelecidas a quantidade e as especificações técnicas dos carregadores e demais dispositivos da infraestrutura de recarga, é necessário avaliar o *layout* da garagem, levando em conta que, após a instalação das estações de recarga, os ônibus elétricos precisam de espaço suficiente para manobras. Em garagens com espaço reduzido, um trabalho maior de planejamento pode fazer diferença. Nesses casos, é possível otimizar o número de carregadores e distribuir melhor os tempos de carregamento, a fim de que seja viável a implementação da tecnologia. Na **SEÇÃO 2.3.3**, são mencionadas algumas ações desse tipo.

Recarga de oportunidade

A recarga de oportunidade, abordada na **SEÇÃO 2.3.2**, requer altas taxas de potência durante curto intervalo de tempo. A distribuição dos pontos de recarga, nessa estratégia, resultará de considerações sobre a energia elétrica disponível, a capacidade de armazenamento e o tipo da bateria, que por sua vez afetam o tempo que o veículo permanece parado no ponto para carregamento [25]. A ponderação desses fatores para determinar as melhores opções de carregamento é uma questão de equilíbrio complexa. Deve-se considerar também a possibilidade de interoperabilidade entre essa estrutura e os veículos de outros operadores e fabricantes.

A recarga de oportunidade requer um planejamento mais complexo devido à alocação dos pontos de recarga nas vias. Além do envolvimento da empresa de energia, é necessário que os órgãos responsáveis da cidade participem, para verificar situações de obstrução visual e de tráfego. O processo de aprovação pode não ser trivial.

Uma questão importante a considerar nesse tipo de recarga é o espaço físico requerido. A infraestrutura, usualmente, consiste em [64]:

- um transformador (de média tensão para baixa tensão), se não houver uma conexão de rede de baixa tensão disponível;
- um dispositivo de recarga com saída de corrente contínua (pantógrafo ou *plug-in*);
- uma estrutura (poste) de carregamento;
- um sistema de contato na via (em caso de recarga indutiva).

Alguns requisitos de espaço para a infraestrutura de recarga de oportunidade devem ser considerados [64]. Eles dependem diretamente da potência instalada necessária para o carregamento e podem variar significativamente para cada projeto:

- transformadores mais compactos, com potência nominal de até 630 kVA, têm dimensões gerais a partir de 1,4 m × 3,0 m × 1,6 m (largura × comprimento × altura), com uma profundidade de base adicional de aproximadamente 0,8 m;
- para potências de 350 kW de corrente contínua, as estações de carregamento conectadas ao lado dos transformadores de baixa tensão têm dimensões gerais a partir de 0,8 m × 2,4 m × 1,8 m (largura × comprimento × altura).

Alerta-se que o transformador, a estação de carregamento e os postes de carregamento não necessariamente precisam ser instalados um ao lado do outro. Existem casos em que podem ser necessárias distâncias de até 50 metros entre a estação de carregamento e o poste. Distâncias maiores do que sete metros podem exigir instalações adicionais para a comunicação entre os ônibus e a estação [64].

FONTE: Elaborado pelos autores.

Entre outros aspectos, essa fase permitirá a elaboração do plano de adequação das garagens e da rede de energia e a definição da quantidade e do local de instalação dos carregadores. O **BOX 9** apresenta um exemplo de dimensionamento da infraestrutura de recarga na garagem.

BOX 9

Planejando a infraestrutura

Para exemplificar uma parte do processo de planejamento da infraestrutura de recarga, considere-se o caso hipotético a seguir [70].

Uma cidade de médio porte deseja implementar 25 ônibus elétricos, de 12 metros, em uma linha com percurso médio diário por ônibus de 200 quilômetros. Após um estudo de mercado e um diagnóstico inicial, opta-se pela adoção da estratégia de recarga na garagem, durante a noite. Essa escolha considera a autonomia máxima do veículo (280 quilômetros, conforme o fabricante), a localização da garagem e as características da rota. Seguindo ainda as especificações técnicas do veículo selecionado, a recarga será do tipo *plug-in*.

Com isso, primeiro deve-se avaliar a energia necessária para o carregamento simultâneo desses 25 ônibus. Para isso, sabe-se que:

Potência instalada [kW] = Distância média percorrida por veículo [km/dia.ônibus] x Número de veículos a serem carregados [ônibus] x Consumo energético [kWh/km] / Janela de recarga [h]

Depois da avaliação de dados fornecidos pelo fabricante e de variáveis como o ciclo de condução, a utilização de ar condicionado e a inclinação máxima da rota, chega-se a um consumo energético médio de 1,3 kWh/km. A melhor opção para carregamento desses veículos, após etapa de planejamento operacional, resulta em uma recarga noturna durante uma janela de tempo de no máximo seis horas. Dessa forma, seria necessária, aproximadamente:

Potência instalada = 1.083 kW = 200 [km/dia.ônibus] x 25 [ônibus] x 1,3 [kWh/km] / 6 [h]



Para o dimensionamento da quantidade de carregadores, há duas possibilidades. No primeiro cenário, considerando um carregador por veículo, tem-se a potência mínima necessária para cada carregador:

Potência mínima do carregador [kW] = Potência instalada [kW] / Quantidade de veículos [ônibus]

Potência mínima do carregador [kW] = 44 kW = 1.083 [kW] / 25 [ônibus]

Não há necessidade, porém, de disponibilizar um carregador para cada veículo. Para otimizar o espaço da garagem, pode-se considerar a instalação de um carregador de maior potência (75 kW), de forma a reduzir a quantidade de dispositivos. Nesse segundo cenário, o dimensionamento deve ser realizado com base em custos, informações e restrições disponíveis no projeto. Assim, tem-se que:

Quantidade de carregadores = Potência instalada [kW] / Potência do carregador ofertado [kW]



Quantidade de carregadores = 15
 carregadores = 1.083 [kW] / 75 [kW]

Para além do cálculo acima, recomenda-se prever um fator de contingência. Esse fator tem como objetivo acrescentar, no cálculo, carregadores com uma potência maior, que permitam reduzir a janela de recarga de alguns veículos, quando necessário. Uma forma de fazer essa adição é somar a potência dos carregadores adicionais ao final do processo. Por exemplo, pode-se considerar um carregador rápido de 120 kW. Assim, aplicando a contingência, um dimensionamento possível para essa garagem seria:

Cenário 1: 25 carregadores de 44 kW com um carregador adicional de 120 kW = potência instalada de 1.220 kW.

Cenário 2: 15 carregadores de 75 kW com um carregador adicional de 120 kW = potência instalada de 1.245 kW.

Para os dois cenários, deve-se estudar como será o novo *layout* da garagem com a instalação dos carregadores. Para o caso de não haver um carregador por veículo, deve-se avaliar o alcance dos carregadores e a necessidade de manobra de veículos para realização da recarga.

Também é importante verificar se as características dos carregadores atendem aos requisitos de potência e de tempo disponível para recarga. Além disso, caso o número de carregadores final não tenha implementação viável, pela falta de espaço na garagem, podem-se adotar estratégias como os sistemas de carregamento inteligente, abordados na **SEÇÃO 2.3.3**, ou pode-se refazer o processo de dimensionamento, considerando um menor número de carregadores, mas com uma potência nominal maior.



3.3.2.4. Plano de monitoramento

Para determinar os resultados do projeto e embasar novas iniciativas é fundamental a elaboração de um plano de monitoramento do desempenho dos veículos. Esse plano deve estar integrado a outros indicadores do transporte coletivo, coletados continuamente [114]. Monitorar o desempenho mostra-se importante, especialmente, na adoção de uma nova tecnologia, pois [96]:

- **fornece uma avaliação da tecnologia:** monitorar permite uma compreensão abrangente do desempenho de diferentes tecnologias de veículos elétricos sob diferentes condições operacionais e a aplicação dessas lições para o aprimoramento da tecnologia;
- **permite comparação de dados e aprendizado em conjunto:** facilita e fomenta a aprendizagem entre cidades por meio de práticas padronizadas de gerenciamento e coleta de dados;
- **permite o gerenciamento de operações e contratos:** com o monitoramento, é possível avaliar a eficiência dos operadores que prestam serviços para a cidade;
- **possibilita calibrar as estimativas de Custo Total de Propriedade (TCO):** a avaliação de desempenho da operação de ônibus elétricos em diferentes contextos pode fornecer estimativas

precisas de vários componentes do TCO. Isso, por sua vez, ajuda as cidades a identificar a alternativa que apresenta melhor adequação ao contexto operacional. A análise do TCO pode, ainda, ajudar a desenhar incentivos e subsídios que realmente sejam úteis para as cidades, a planejar licitações e a escolher o modelo de negócio mais adequado;

- **embasa as estimativas de redução de emissões:** a avaliação de desempenho ajudará a desenvolver estimativas mais precisas sobre os impactos dos ônibus elétricos em termos de poluição local e emissão de Gases de Efeito Estufa;
- **auxilia no planejamento da operação:** como as agências de transporte em geral estão acostumadas a operar veículos convencionais, dispor de informações provenientes do monitoramento dos ônibus elétricos é fundamental para a seleção de rotas e garagens. Para isso, após o monitoramento, devem-se avaliar as restrições da tecnologia e o contexto operacional de cada cidade para tomar uma decisão embasada em dados.

O **BOX10** detalha alguns aspectos que devem estar contemplados no plano de monitoramento dos ônibus elétricos. A importância desse acompanhamento é verificada no Estudo de Caso 5.



BOX 10

Desenvolvimento do plano de monitoramento

Para estruturação de um plano de monitoramento, o primeiro passo é a atribuição de responsabilidades. Diferentes atores podem ser responsáveis pela implementação do plano, porém é fundamental que isso seja feito de forma integrada, para que todos os envolvidos tenham conhecimento da duração, dos indicadores, da metodologia de coleta e dos resultados desse plano.

Definidos os responsáveis, recomenda-se a construção de um conjunto de indicadores e de uma metodologia de coleta. A metodologia de coleta e o nível de detalhamento dos indicadores estão intrinsicamente relacionados. Alguns indicadores podem ser coletados com base nos sistemas inteligentes já existentes nos veículos e, assim, oferecer um nível maior de desagregação de informações. No entanto, em muitos casos, alguns indicadores deverão ser coletados e registrados de forma manual. Para que a coleta seja viável nessas situações, pode ser necessário que o nível de detalhamento dos indicadores seja menor. É importante que todos os indicadores tenham definições claras e uma metodologia de coleta predeterminada.



A construção dos indicadores deve ser realizada de acordo com as necessidades e possibilidades de coleta de cada projeto. A **FIGURA B10-1** apresenta sugestões de indicadores para o plano de monitoramento.

Recomenda-se que a duração da coleta permita que os dados sejam consistentes e comparáveis com os de outras cidades. Monitorar por um período demasiado curto poderá afetar a representatividade dos dados e gerar incertezas sobre os indicadores. O tempo ideal dependerá da possibilidade de coleta em cada projeto, podendo variar de três meses a anos. Coletar os indicadores de forma contínua, durante toda a vida útil dos ônibus, possibilita a comparação do desempenho da tecnologia ao longo dos anos e favorece a implementação gradual de novos veículos ao sistema, como revela a experiência da Foothill Transit (**ESTUDO DE CASO 5**).

FIGURA B10-1. Indicadores sugeridos para o plano de monitoramento da frota de ônibus elétricos



FONTE: Elaborado pelos autores.



ESTUDO DE CASO 5 CONDADO DE LOS ANGELES, ESTADOS UNIDOS

O plano de monitoramento da Foothill Transit.

Em outubro de 2010, a Foothill Transit iniciou um processo de testes e monitoramento de ônibus elétricos que mostrou resultados positivos [115]. A agência avaliou três veículos elétricos da fabricante Proterra em San Gabriel e Pomona Valley, na região de Los Angeles, Califórnia. Inicialmente, o objetivo foi verificar se a tecnologia poderia atender aos requisitos de rotas selecionadas. O desempenho foi satisfatório e levou à compra de 12 ônibus elétricos. Os novos veículos, de 10,6 m, que utilizam a estratégia de recarga de oportunidade, começaram a operar em março de 2014.

Com o objetivo de fazer novas avaliações imparciais e abrangentes do desempenho dos ônibus elétricos adquiridos, a Foothill Transit iniciou uma colaboração para o monitoramento com o California Air Resources Board (CARB), o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) e o National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Antes do monitoramento, foi definida uma linha de base para a comparação de desempenho entre as tecnologias. Na avaliação da agência, a linha de base que mais se assemelhava aos novos ônibus elétricos era composta por oito veículos a Gás Natural Veicular (GNV), da fabricante NABI. Esses ônibus eram novos e estavam sob garantia. A expectativa era que, assim como os ônibus elétricos, eles também apresentassem baixos custos de manutenção.





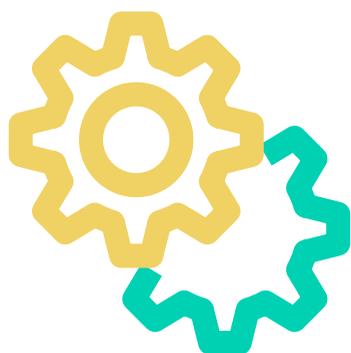
A

Desde 2014, o desempenho dos ônibus elétricos vem sendo monitorado e registrado em relatórios elaborados pelos participantes do acordo de cooperação [115, 116, 117].

O monitoramento contínuo de diversos indicadores permite comparar as oscilações de desempenho dos veículos ao longo do tempo. Por exemplo, o consumo energético médio entre abril e julho de 2014 foi de 1,33 kWh/km. Para o período de janeiro a junho de 2018, foi de 1,31 kWh/km. A pequena variação verificada reduz as incertezas sobre a eficiência energética dos ônibus testados e comprova a importância da realização do monitoramento de forma constante.

Comparando o desempenho dos ônibus elétricos com o de veículos a GNV, observou-se uma redução de 43% no consumo de energia dos ônibus elétricos e de 33% nos custos de manutenção do sistema de propulsão, sem os custos de manutenção das baterias. Os veículos a GNV apresentaram uma maior quilometragem entre falhas (aproximadamente 16 mil km) do que os elétricos (aproximadamente 3,5 mil km).

O projeto tem se mostrado vantajoso. Ao longo do tempo, a coleta de dados trouxe lições e desencadeou adequações anuais, que deram ainda mais impulso à introdução de ônibus elétricos. No início de 2017, dois novos veículos elétricos começaram a operar na região, e se espera que, gradualmente, esse número aumente conforme as incertezas da tecnologia, atenuadas pelo plano de monitoramento, diminuam.



3.3.2.5. Treinamento de equipes

Eventuais dificuldades durante a operação e a manutenção dos novos veículos podem estar relacionadas à curva de aprendizado da tecnologia. Planejar um treinamento adequado dos motoristas e das equipes responsáveis por recarga e manutenção resulta em melhoria da eficiência energética dos veículos, redução da frequência e dos custos de manutenção e prolongamento da vida útil das baterias [34]. Assim, o treinamento das equipes deve ser estruturado durante a elaboração do projeto.

Recomenda-se que o cronograma estabelecido preveja que os treinamentos teóricos e práticos ocorram antes do início da operação dos novos veículos. Quando o treinamento ocorre previamente, a aceitação é maior e se evitam incertezas com a tecnologia por parte de operadores, motoristas e equipes envolvidas. Além disso, podem-se avaliar formas de reconhecimento aos funcionários que concluírem o treinamento, como cerimônias de conclusão ou outros incentivos.

É aconselhável que o fabricante ministre essas capacitações, com suporte da agência de transporte e, eventualmente, de outras organizações. Nesse caso, é importante que o contrato de aquisição dos veículos estabeleça essas atividades, incluindo requisitos como [85]:

- abrangência: definir se todas as equipes serão treinadas ou se facilitadores participarão da capacitação, para depois atuarem como replicadores de conhecimento;
- carga horária;
- materiais que serão disponibilizados;
- ferramentas e equipamentos: recomenda-se que o fabricante forneça veículos para a fase de aprendizado. Nos casos em que esse empréstimo não é possível, deve-se determinar um período de treinamentos práticos entre o recebimento dos veículos adquiridos e o início da operação.

Entre outros aspectos, os treinamentos devem incluir os tópicos apresentados no **QUADRO 10**.

QUADRO 10. Tópicos para treinamentos de motoristas e equipes de recarga e de manutenção

Motoristas	Equipes de recarga e de manutenção
<ul style="list-style-type: none"> ■ Conhecimento geral sobre a tecnologia: estado de carga da bateria, autonomia, notificações do sistema que podem ocorrer durante a operação ■ Boas práticas de condução (para potencializar o uso da frenagem regenerativa) ■ Procedimentos em caso de acidentes 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Manutenções preditivas, preventivas e corretivas ■ Conhecimento dos sistemas de diagnóstico do veículo e de outros equipamentos ■ Práticas seguras para trabalho em sistemas de alta tensão, incluindo o manuseio das baterias ■ Procedimentos em caso de acidentes

FONTE: Baseado em [85]

3.3.2.6. Protocolos de testes

Há uma série de protocolos de testes que devem ser estruturados para a implementação da eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus. Esses testes têm como objetivo verificar o cumprimento das normas aplicáveis e as especificações técnicas contratadas.

Nessa etapa do projeto, tais protocolos são especificados. É importante que os atores relacionados a esses testes, como fornecedores da tecnologia, companhia de energia e operadores, estejam cientes e alinhados com as normas existentes.

O **QUADRO 11** apresenta testes que devem ser planejados e seus objetivos gerais.

QUADRO 11. Testes realizados nos ônibus elétricos**Testes de tipo**

Geralmente aplicados em um único veículo (o primeiro da série fabricada), esses testes verificam o cumprimento das especificações de contrato, o funcionamento do veículo e o cumprimento das regulações nacionais.

A **PLANILHA A5-1** do **ANEXO 5** traz uma estrutura geral para aplicação dos testes de tipo. Para cada objetivo e projeto específico, recomenda-se a definição das variáveis medidas e da metodologia de avaliação.

Responsável: fabricante.

Testes de série

Esses testes são realizados na frota e buscam verificar se conjunto de veículos entregues cumpre os requisitos técnicos e as especificações de contrato. Os testes de série devem ser documentados e apresentados ao receptor da frota no momento da entrega. Também para os testes de série, a **PLANILHA A5-2** do **ANEXO 5** traz uma estrutura padrão.

Responsável: fabricante.

Testes de recepção dos veículos elétricos

Esses testes são planejados para garantir o cumprimento das questões contratuais e a verificação do estado geral e da qualidade da frota. Os testes devem fazer parte do procedimento de recepção dos novos veículos.

A execução dos testes deve ser registrada em ata (formalizando a aplicação e os resultados) a ser entregue ao receptor da frota.

O ideal é que esses testes sejam realizados em todos os veículos, mas para frotas maiores pode-se optar, por economia, por testes de amostragem, desde que a amostra assegure um nível de confiança e erro de, respectivamente, 95% e 5%.

Para os ônibus elétricos, destacam-se quatro tipos de testes de recepção:

- **testes estáticos:** consistem em realizar uma inspeção visual de cada veículo para garantir o cumprimento das normas e dimensões, das características de acessibilidade e de outros requisitos. Durante o procedimento se revisa a integridade do veículo e as funcionalidades básicas, como abertura e fechamento das portas, ventilação, luzes e catracas;
- **testes dinâmicos:** são testes na via, realizados com o veículo vazio e com carga máxima, para verificar o funcionamento do sistema de tração e frenagem, a subida e a descida na inclinação máxima em que o veículo deve operar, os freios de emergência, o raio de giro, os sistemas de emergência etc.;
- **testes de verificação de cumprimento e de funcionamento dos veículos elétricos:** conjunto de testes que tem como objetivo medir o desempenho da frota e verificar o cumprimento das condições contratuais de desempenho do veículo, assim como das baterias e do sistema de recarga. Para isso, esses testes devem ser realizados simulando uma operação cotidiana;
- **testes do sistema de recarga:** verificação do sistema de recarga da frota, por meio da inspeção e da realização de ensaios com os carregadores. Também devem ser testados o funcionamento e a compatibilidade dos carregadores. Outra testagem a fazer é a de estresse do sistema de recarga (na qual todos os carregadores de uma mesma garagem são colocados para funcionar ao mesmo tempo).

Responsável: fabricante, comprador ou empresa terceirizada.

FONTE: Elaborado pelos autores.

COMO GARANTIR QUE O TREINAMENTO SEJA EFICIENTE?



Algumas boas práticas de treinamento que podem ser citadas são [25]:

- treinar pequenos grupos para priorizar o desenvolvimento individual;
- fazer os treinamentos quando alguns ônibus já estiverem disponíveis ou acordar com o fabricante a disponibilização de um veículo-teste para o treinamento;
- possibilitar o acompanhamento e a participação de parceiros;
- treinar também, quando possível, socorristas e bombeiros, para que estejam familiarizados com os tipos de acidentes possíveis.



3.3.3. Modelos de negócio

Existem inúmeras possibilidades de arranjo para o modelo de negócio. Elas variam conforme as especificidades do contexto, tais como: capacidade fiscal do setor público local, atores/provedores de tecnologia existentes, regulações e políticas prévias.

Há cinco principais elementos que devem ser desenvolvidos para a consolidação do modelo de negócio em um projeto de eletromobilidade no transporte coletivo por ônibus:

- 3.3.3.1. Modelos de contratação e de aquisição;
- 3.3.3.2. Custos;
- 3.3.3.3. Fontes de recursos;
- 3.3.3.4. Produtos financeiros;
- 3.3.3.5. Contratos e licitações.

Apesar da ordem apresentada, esses elementos estão concatenados: as definições feitas em relação a cada um deles terão impacto nos demais. Assim, muitas decisões deverão ser tomadas conjuntamente.

3.3.3.1. Modelos de contratação e de aquisição

A definição do modelo de contratação e de aquisição dos veículos é uma das atividades mais importantes para a consolidação do projeto. As possibilidades de contratação variam conforme o arcabouço institucional de cada cidade e as possíveis limitações nos contratos de concessão do serviço de transporte coletivo. Para uma definição, é fundamental avaliar os custos, as fontes de recursos e os produtos financeiros do projeto, de forma a verificar qual o impacto dos diferentes modelos de contratação na viabilidade econômico-financeira.

Há uma série de componentes e serviços que precisam ser fornecidos para a operação do transporte coletivo por ônibus. Entre eles, destacam-se veículos, combustível e eletricidade, equipes, operação, manutenção e infraestruturas. Nos atuais modelos, esses componentes e serviços são, em sua maioria, fornecidos pelas empresas operadoras e, para alguns aspectos, pelo poder público [37]. Novos formatos de negócios que incentivem a eletromobilidade estão sendo estudados e desenvolvidos, agregando atores que tenham capacidade de investimento (como as companhias de energia) e que possam assumir a divisão dos riscos, intrínsecos à nova tecnologia.

QUADRO 12. Possíveis atores responsáveis pelos componentes

Componentes	Empresa operadora (pública ou privada)	Poder público	Fabricantes de ônibus	Empresa de energia	Outro ente privado
Posse dos veículos/das baterias	X	X	X	X	X
Manutenção dos veículos	X		X		X
Operação	X				
Posse da garagem	X	X			X
Infraestrutura de recarga	X	X	X	X	X

FONTE: Elaborado pelos autores.

Alguns novos modelos propõem a divisão das responsabilidades entre três atores, o que é estruturado por meio de diferentes contratos entre eles: várias empresas responsáveis pela aquisição de ônibus, várias empresas operadoras e uma ou várias empresas responsáveis pelas infraestruturas [37]. Em estudo para projeto de ônibus elétricos no Peru, o Banco Interamericano de Desenvolvimento, por meio de entrevistas com operadores e fabricantes, verificou a preferência por um modelo que separe a propriedade dos ônibus da operação [36].

Nos Estados Unidos, existem modelos que oferecem a alternativa de transferir parte ou toda a infraestrutura de recarga associada aos ônibus elétricos para os concessionários do serviço de energia [118]. As concessionárias têm fortes incentivos para se envolver no negócio, uma vez que eventuais investimentos de capital podem depois ser recuperados por meio de tarifas cobradas aos consumidores de eletricidade.

O World Resources Institute também destaca o surgimento de modelos de negócio inovadores, em que novos atores, como fabricantes, desempenham maior papel na aquisição dos ônibus [119]. Além disso, esses atores podem ser os responsáveis pela manutenção.

A participação desses novos atores permite que uma diversidade de formatos seja estruturada. Recomenda-se que cada projeto avalie as possibilidades e estruture o formato adequado à sua realidade. O QUADRO 12 apresenta as alternativas mais usuais, mas outras configurações podem ser possíveis.

Em relação aos veículos, podem-se avaliar formas de aquisição diferentes das atuais. Os principais modelos de aquisição são a compra do ônibus ou o *leasing*. Dentro dessas categorias, há diferentes configurações.

A compra do veículo ainda é a forma mais comum, normalmente viabilizada por meio de incentivos [30]. Ela pode ser feita pelo ente público, por meio de licitação, ou por ente privado, com opção de pagamento à vista ou financiado. Em caso de financiamento, uma parte é paga à vista pelo comprador, enquanto a instituição financeira que empresta o valor correspondente ao saldo assume o risco do crédito em troca de maiores pagamentos futuros, o que aumenta o custo da aquisição do veículo [35]. Ao se realizar um financiamento para a compra, são necessários mecanismos de garantia de crédito e seguros, para o caso de as especificações do fabricante não serem atendidas [36].

A compra conjunta é um modelo diferenciado de aquisição, em que se aproveitam economias de escala para obtenção de condições mais vantajosas. Nos Estados Unidos, a cidade de São Francisco enxergou uma oportunidade no anúncio de compra de veículos elétricos pela localidade de King County. Uniu-se ao negócio e conseguiu preços menores [30].

Já no Piemonte (Itália), operadoras de transporte da região uniram-se na compra pública de 23 ônibus elétricos (por 8,5 milhões de euros, fornecidos pelo Ministério do Meio Ambiente e administrados pelos governos provincial e local). Inicialmente, as operadoras

definiram suas necessidades, o número de ônibus, as rotas e a infraestrutura de recarga. Depois, assinaram contratos independentes com a fornecedora dos veículos, tendo o governo estadual como financiador. O processo poupou esforços administrativos e reduziu os custos de aquisição [86]. A compra conjunta também pode ser realizada por mais de um operador privado da mesma cidade.

Outro modelo que vem ganhando espaço é o **leasing**, que permite uma variedade de condições e prazos. Outras vantagens do *leasing* são a redução dos investimentos iniciais necessários para a compra de ônibus elétricos e a possibilidade de estruturar o fornecimento de uma maneira inovadora, permitindo uma melhor conexão entre os interessados e envolvendo terceiros, o que leva a compartilhamento de riscos, maior eficiência e melhor desempenho [118, 120].

O QUE É LEASING? QUAIS SÃO SUAS MODALIDADES?



O *leasing* é um contrato por meio do qual o locador adquire um ativo (em projetos de eletromobilidade, usualmente, o ônibus ou a bateria) para alugar a um cliente (locatário). Ele possui duas modalidades:

- *leasing* financeiro: é a modalidade na qual o locatário tem a intenção de ficar com o ativo ao término do acordo, exercendo a opção de compra pelo valor previsto no contrato;
- *leasing* operacional: é a modalidade na qual o locatário não tem a intenção de adquirir o ativo ao final do contrato.



Além de ter duas modalidades, o *leasing* também apresenta duas configurações: *leasing* total do veículo e *leasing* parcial (ou de componente). No *leasing* total do veículo, pode não haver necessidade de envolver seguradoras, bancos de desenvolvimento, bancos multilaterais e fundos climáticos, embora ainda se faça necessária uma garantia de crédito [36]. A exclusão desses operadores é viável porque essa configuração de *leasing* permite a entrada no negócio de investidores de porte, que podem usar capital próprio na aquisição dos veículos (nada impede que esses atores sejam os próprios fabricantes). Os novos participantes também podem ter capacidade de adquirir financiamento mais barato do que os operadores, devido ao seu histórico de

risco. Portanto, é possível que esse modelo custe menos do que o financiamento para a compra [30].

Como a bateria representa uma parte significativa do custo total do ônibus elétrico, esse componente costuma ser adquirido por *leasing* parcial. Quando é feita essa opção, o operador compra o restante do veículo. Esse modelo reduz, para o operador, os riscos decorrentes da incerteza quanto à vida útil da bateria [35]. Empresas de energia, para as quais o equipamento ainda terá uso após o fim da vida útil, podem entrar no negócio, atraídas por esse modelo, na condição de proprietárias que oferecem o *leasing* ao operador. Em caso de opção pelo *leasing* da bateria, pode não ser

mais necessária a contratação de um seguro, porque esse é o componente de maior risco tecnológico no veículo [36].

Existem diversos arranjos para a contratação. Em cada caso, é importante estudar quais mecanismos ajudam na adoção e quais incentivos compensam desvantagens dos veículos elétricos. Também de-

vem-se avaliar vantagens, desvantagens e restrições das opções. O modelo não precisa ser o mesmo durante todo o projeto. Por exemplo, se a frota for renovada em etapas, é possível optar por diferentes modelos de contratação (e modelos de negócio) nas diferentes fases.

O **QUADRO 13** apresenta um resumo das formas de aquisição dos veículos.

QUADRO 13. Resumo das formas de aquisição dos veículos

Forma de aquisição	Descrição	Propriedade	Observações sobre riscos
Compra com capital próprio	Valor total da compra é pago antecipadamente	Operador, poder público ou empresa responsável pelo fornecimento dos veículos	Proprietário assume risco operacional e de tecnologia
Compra por empréstimo	Parte do valor é pago antecipadamente, e o restante é obtido por empréstimo	Operador, poder público ou empresa responsável pelo fornecimento dos veículos	Credor tem risco de crédito, o que pode aumentar o custo do empréstimo Proprietário assume risco operacional e de tecnologia
Leasing total do veículo	Paga-se pelo uso do ônibus por um prazo especificado	Leasing financeiro: ao término do contrato, veículo é ativo do locatário (usualmente o operador ou empresa responsável pelo fornecimento dos veículos) mediante ao pagamento de um valor residual Leasing operacional: ao término do contrato, veículo é ativo do locador (usualmente o fabricante ou a empresa de energia)	Locador assume risco operacional e de tecnologia
Leasing parcial	Paga-se por componentes específicos (por exemplo, a bateria) por um prazo especificado	Leasing financeiro: ao término do contrato, componente é ativo do locatário (usualmente o operador) mediante ao pagamento de um valor residual Leasing operacional: ao término do contrato, componente é ativo do locador (usualmente o fabricante ou a empresa de energia)	Locatário assume o risco operacional Locador assume risco de tecnologia

FONTE: Baseado em [35]



A

3.3.3.2. Custos

Uma vez que o projeto está amadurecido, com definição de objetivos e metas para inserção da eletromobilidade, plano operacional claro e conhecimento dos modelos de contratação disponíveis, é possível detalhar a análise de custos realizada na etapa de diagnóstico (**SEÇÃO 3.1.3.5**) e elaborar outras. O cálculo de TCO pode ser refinado verificando as diferentes possibilidades de modelos de contratação e de linhas de financiamento disponíveis e fazendo-se análises para cada um desses cenários.

A análise inicial de TCO faz uma comparação entre tecnologias para saber seus custos quando adquiridas no mesmo período, mas não leva em consideração quantidade nem quando os veículos serão comprados.

Nesta fase, quando estão estabelecidos a quantidade de veículos e o horizonte de tempo almejados, recomenda-se fazer uma análise econômica mais precisa para toda a duração do projeto, avaliando quanto a nova tecnologia custará para o sistema à medida que se aumenta a frota elétrica. Nessa análise, pode-se considerar a tendência de redução de preço das baterias, que tem se confirmado ao longo dos anos.

Como os custos não são uniformes ao longo dos anos, recomenda-se a análise de fluxo de caixa completo, que inclui não apenas as despesas, mas também as re-

ceitas previstas. Este método simula o impacto financeiro que a inclusão dos veículos elétricos terá para o sistema. Por meio dele, prevê-se para cada período a alocação dos valores projetados de custos e receitas. Com a inclusão das receitas, é possível analisar o quanto a compra dos veículos elétricos pode afetar a tarifa, de acordo com as variações projetadas de arrecadação. Destaca-se a importância de avaliar outras fontes de recursos (**SEÇÃO 3.3.3.3**), além da tarifária, para financiamento do sistema, de forma a amenizar possíveis impactos no preço da passagem e atender ao princípio de modicidade tarifária no transporte coletivo.

3.3.3.3. Fontes de recursos

São os recursos financeiros não reembolsáveis, ou seja, que não precisam ser amortizados. Elas são utilizadas para pagar os investimentos realizados (infraestrutura, veículos etc.) e os custos dos produtos financeiros (**SEÇÃO 3.3.3.4**). Podem ser categorizadas como:

- receita tarifária;
- incentivos;
- outras receitas.

A **receita tarifária** é a fonte de recurso mais tradicional do transporte coletivo. No Brasil, o custeio da operação do transporte coletivo por ônibus é feito, em geral, pelas receitas arrecadadas por meio de tarifas pagas pelos clientes dos serviços de transporte.

Os **incentivos** são um tipo de fonte de recurso muito importante para a adoção da eletromobilidade. Ônibus elétricos têm custos iniciais de capital muito altos, o que pode ser um desafio para sua implementação. Entre outras possibilidades, incentivos podem ser aportados no projeto por meio de:

- subsídios diretos, quando quantias são destinadas à operação do transporte coletivo;
- incentivos fiscais, com redução de impostos que incidem sobre a operação ou aquisição dos veículos;
- doações de terrenos ou equipamentos de infraestrutura;
- fornecimento de treinamentos.

As **outras receitas** podem ser oriundas de publicidade, da avaliação de economias operacionais, da venda de ativos e de novas receitas tributárias. No caso de exploração da publicidade, as peças de propaganda podem aparecer nos veículos, nas estações e nas infraestruturas de recarga (dependendo do tipo de tecnologia adotado). A utilização de veículos elétricos também pode gerar economias de operação, já que os gastos com combustível e manutenção são menores. Essas economias podem ser mensuradas e contabilizadas como recursos para o projeto.

Embora existam muitas incertezas quanto ao valor residual dos veículos e das baterias – especialmente pela indefinição sobre a durabilidade da bateria e sobre a sua segunda vida – há potencial para reutilização desses ativos, o que pode trazer um montante considerável de recursos financeiros, já que atualmente o custo da bateria é um dos mais elevados nos veículos elétricos[30]. Por fim, outra possível fonte de recursos são as receitas tributárias destinadas ao transporte coletivo. Elas podem vir, por exemplo, de instrumentos de gestão do uso das vias, incentivando o transporte mais sustentável, como a taxação do congestionamento ou a cobrança por estacionamento.

Nessa etapa, deve-se avaliar e definir quais serão as fontes de recursos do projeto de eletromobilidade. Recomenda-se que sejam adotadas diferentes fontes para garantir a robustez do projeto.

3.3.3.4. Produtos financeiros

Para definir o modelo de negócio de adoção da eletromobilidade, é necessário ter informações sobre os produtos financeiros disponíveis. Os produtos financeiros representam as formas de mobilizar capital para o projeto. São recursos com expectativa de amortização ou pagamentos futuros e englobam:

- capital dos investidores;
- instrumentos de dívida;
- garantias.

Um dos produtos financeiros mais comuns consiste na utilização de **capital dos investidores** (privados ou públicos). Os investidores são aqueles que estão financiando as obras de infraestrutura, adquirindo os veículos ou realizando outras aplicações no projeto. Diversos atores podem entrar nessa categoria, como operadores do transporte coletivo, poder público e empresas que são donas dos ônibus e alugam ou realizam *leasing* para o operador, o que depende do modelo de contratação e de quem faz o investimento.

Os **instrumentos de dívida** mais utilizados são empréstimos e emissão de títulos. Usualmente, os empréstimos são obtidos pelos investidores (públicos ou privados) e podem ser realizados de diversas formas, dependendo dos atores envolvidos. Bancos bilaterais ou multilaterais, bancos nacionais ou regionais de desenvolvimento e bancos comerciais são os fornecedores mais comuns. Os empréstimos podem ser nacionais ou internacionais, públicos ou privados, subsidiados ou não, podendo também gerar financiamentos em condições preferenciais – informações adicionais sobre linhas de financiamentos são apresentadas no **BOX 11**.

Entre os diferentes tipos de títulos de dívida disponíveis, destacam-se debêntures (incentivadas ou não), letras financeiras e notas promissórias. Investimentos em ônibus elétricos podem se beneficiar da emissão de Títulos Verdes – denominados no Brasil debêntures verdes incentivadas³ –, por tratar-se de instrumento direcionado a projetos de sustentabilidade. No país, os títulos não podem ser emitidos por governos locais (estados e municípios), permanecendo restritos ao governo federal ou a instituições privadas. O **BOX 12** discute alguns aspectos sobre Títulos Verdes.

3. Decreto nº 10.387 de 5 junho de 2020 criou as debêntures verdes incentivadas, que são direcionadas ao financiamento de projetos de infraestrutura com benefícios ambientais e sociais, prevendo explicitamente a aquisição de ônibus elétricos, inclusive por célula de combustível, e híbridos a biocombustível ou biogás, para sistemas de transporte [121].

BOX 11

Linhas de financiamento

Frequentemente a aquisição do capital é realizada por empréstimos, que podem ser obtidos por diferentes linhas de financiamento. O custo financeiro é um dos pontos cruciais a considerar para o sucesso do empreendimento, uma vez que o custo de capital inicial é relativamente alto nos projetos de eletromobilidade. Nesse sentido, fontes de financiamento mais baratas reduzem os riscos financeiros para as cidades, facilitando a inovação [120].

“Novas linhas estão surgindo com taxas de juros mais baixas, para projetos de cunho ambiental, que colaborem para o desenvolvimento sustentável.”

As linhas de financiamento oferecidas por diversos atores financeiros têm diferentes taxas de juros e prazos. Além disso, para que o empréstimo seja concedido, exige-se uma determinada porcentagem de capital próprio na aquisição.

No caso de compra de ônibus, o prazo de pagamento em geral vai no máximo até um ano antes do final da vida útil, mas alguns financiamentos podem ter prazos menores. Novas linhas estão surgindo com taxas de juros mais baixas, para projetos de cunho ambiental, que colaborem para o desenvolvimento sustentável.

Na concessão de alguns tipos de financiamento, o agente financiador exige uma determinada taxa de nacionalização dos insumos, o que pode significar uma limitação dos produtos disponíveis.



BOX 12

Títulos Verdes

Os Títulos Verdes, ou *Green Bonds* em inglês, são títulos de renda fixa emitidos para financiar ações voltadas ao combate das mudanças climáticas [122, 123]. Podem estar configurados sob diferentes formatos de dívida, tais como debêntures, letras financeiras e notas promissórias, e sua emissão pode ser realizada por governos, banco ou empresas [124].

Para a classificação como “verde”, é necessária a comprovação dos atributos ambientais e climáticos do projeto por meio de verificação externa, por uma terceira parte qualificada, além dos emissores e compradores⁴ do título [122]. Deve-se atestar que os recursos provenientes da emissão sejam direcionados a ativos “verdes” em setores que incluem energia, edificações, transporte, água, resíduos, uso da terra, indústria e tecnologia da informação [124].

No mundo, entre 2007 e 2019, foram emitidos Títulos Verdes no montante de US\$ 776 bilhões [123]. No Brasil, desde a primeira emissão, em 2015, acumulou-se um total de US\$ 5,13 bilhões em 19 Títulos Verdes emitidos, com recursos direcionados para os setores de energia (40%), uso da terra (36%), indústria (7%), resíduos (7%), recursos hídricos (5%), transportes (3%) e edificações (2%) [125]. Os principais emissores foram empresas não financeiras, bancos de desenvolvimento e ABS (*Asset-backed Securities*) no país [124].



O setor de veículos elétricos ainda é modesto, mas vem crescendo devido à viabilização proporcionada pelos Títulos Verdes [126]. No Brasil, há um grande potencial para que esses títulos apoiem iniciativas e projetos de mobilidade elétrica, incluindo o transporte coletivo.

Apesar de os governos locais não terem permissão para emitir títulos, eles podem utilizar estruturas de financiamento alternativas, que permitem canalizar recursos advindos da emissão de Títulos Verdes. Exemplos disso são as aquisições definitivas de ativos por parte do setor privado, a implementação de Parcerias Público-Privadas (PPPs) em nível municipal [125] e a realização de empréstimos com instituições financeiras que realizam esse tipo de emissão.

As oportunidades para financiamento da eletromobilidade via emissão de Títulos Verdes tornaram-se ainda maiores no Brasil a partir do Decreto Federal 10.387/2020, que visa fomentar projetos de infraestrutura com benefícios sociais e ambientais [121]. Por meio de incentivos, o decreto estimula a emissão de debêntures para infraestrutura urbana, incluindo o setor de mobilidade urbana e os sistemas de transporte não-motorizado e de transporte público de baixo carbono.

“No Brasil, há um grande potencial para que esses títulos apoiem iniciativas e projetos de mobilidade elétrica, incluindo o transporte coletivo.”

4. A maioria das certificações de Títulos Verdes segue os Princípios para os Títulos Verdes (Green Bond Principles, GBP) ou os Princípios para Empréstimos Verdes (Green Loan Principles, GLP) [124]. Esses princípios são conjuntos de diretrizes voluntárias destinadas a promover a transparência e a divulgação dos Títulos Verdes [127].



A

Como investimentos em ônibus elétricos são de caráter inovador e apresentam tempos de maturação mais longos, a percepção de risco é maior. Uma forma de mitigação desse risco é por meio do estabelecimento de **garantias** financeiras para o projeto. Elas podem ser asseguradas de várias formas, como pela criação de um fundo de contingência destinado ao transporte coletivo ou por meio de um pacto com a companhia de energia a respeito das tarifas.

Essas e outras garantias possibilitam uma maior segurança ao investidor ou a quem concede o empréstimo, aumentando as chances de realização do negócio e possibilitando a aplicação de taxas menores, o que torna o projeto mais atrativo.

O **ESTUDO DE CASO 6** aborda como Santiago (Chile) estabeleceu garantias financeiras para sustentar o modelo de negócio estruturado para a cidade.

O **QUADRO 14** apresenta um resumo dos produtos financeiros.

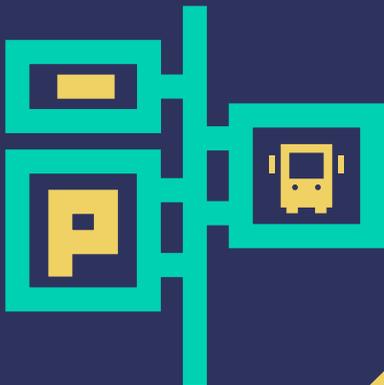
QUADRO 14. Resumo de produtos financeiros

Produtos financeiros	O que é?	Quem utiliza/tem acesso?	Como acessar/quem fornece?
Capital	Utilização de capital próprio	Não se aplica	Investidor público ou privado que realizará o aporte de capital
	Empréstimos	Entidade(s) pública e/ou privada com responsabilidade pela execução do projeto	Bancos bilaterais ou multilaterais Bancos nacionais ou regionais de desenvolvimento Bancos comerciais
Dívida	Títulos de dívida: debêntures (incentivadas ou não), letras financeiras e notas promissórias	Governo federal, bancos ou empresas privadas	Estruturação da oferta de emissão se dá por meio de uma instituição financeira, como bancos nacionais ou regionais de desenvolvimento
	Estruturação de mecanismos de garantia, como fundos de contingência	Fornecedor do capital ou da dívida	Investidores ou setor público

FONTE: Elaborado pelos autores.

NESSE MOMENTO, DEVE-SE DEFINIR QUAIS SERÃO OS PRODUTOS FINANCEIROS UTILIZADOS PARA A ESTRUTURAÇÃO DO PROJETO. PARA ISSO, É PRECISO AVALIAR AS CONDIÇÕES DE TODAS AS OPÇÕES EXISTENTES E COMPARÁ-LAS, DE FORMA A VERIFICAR QUAL É A MAIS VANTAJOSA.





ESTUDO DE CASO 6 SANTIAGO, CHILE

Adoção de um modelo inovador para a maior frota de ônibus elétricos do mundo fora da China.



Santiago vem incorporando ônibus elétricos ao seu sistema de transporte coletivo e se destacando como pioneira no setor no continente. Em dezembro de 2018, os primeiros 100 veículos elétricos foram entregues e começaram a operar na Avenida Grecia, que em 2019 se tornou o primeiro corredor de ônibus da América Latina a operar 100% com elétricos a bateria [63].

O trabalho começou anos antes e envolveu o estabelecimento de relações estreitas entre os atores, o que incluía indústrias e diferentes níveis de governo. Um dos primeiros passos, em 2016, foi a formação de um consórcio encarregado de avaliar as barreiras de implementação, de impulsionar a produção de veículos elétricos pela indústria e de servir como plataforma de inovação tecnológica. Também no início do projeto foram desenhados estudos de viabilidade e testes operacionais para verificar a adequação dos ônibus ao sistema. Entre os participantes do consórcio estava a companhia de energia, facilitando a avaliação do impacto sobre a rede elétrica e das adequações necessárias [34].

Os componentes de investimento envolveram vários atores. As companhias de energia (ENEL e Engie) fizeram um aporte para a aquisição de veículos e infraestrutura, ficando a cargo do operador dos veículos pagar esse investimento em prestações mensais. No valor pago está incluído o aluguel dos ônibus, a infraestrutura de recarga e o fornecimento de energia à frota [128].



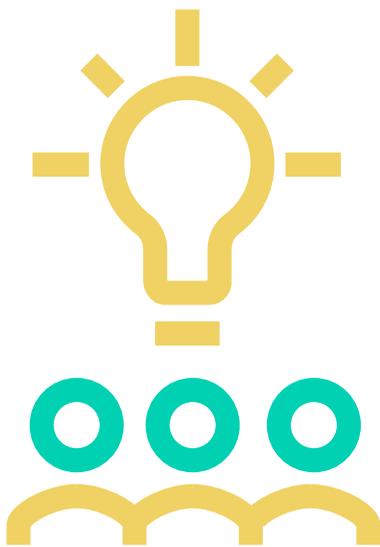
Apesar de o capital utilizado vir de investidores privados, o projeto contou com garantias contratuais do fabricante dos veículos e do governo federal, que também ajuda a manter a operação do sistema, com subsídios de fundos públicos. Os contratos garantem a permanência dos veículos até que a dívida seja paga, independentemente da empresa encarregada da operação.

Nesse arranjo, o fabricante de ônibus é responsável por fazer a manutenção dos veículos na garagem, enquanto a manutenção da infraestrutura de recarga fica a cargo da companhia de energia. Um centro de controle e monitoramento inteligente de recarga foi criado em parceria entre o fabricante o operador, com o objetivo de otimizar o processo de carregamento, cortar custos e reduzir o impacto sobre a rede elétrica.

Um arcabouço institucional robusto garantiu a concretização do projeto. No âmbito do Acordo de Paris, o Chile assumiu compromissos de redução das emissões de Gases de Efeito Estufa, e o setor de transportes era estratégico para mitigá-las. Em 2017, em concordância com os compromissos assumidos e para melhorar a qualidade do ar, o governo publicou uma Estratégia Nacional de Eletromobilidade, elaborada em conjunto pelos ministérios de Energia, Transportes e Meio Ambiente e assentada em cinco pilares visando a transição para os veículos elétricos. A meta chilena é eletrificar 40% dos veículos particulares e 100% dos veículos de transporte público até 2050 [12,129].

Com esse arcabouço institucional e um modelo de negócio consistente, com vários atores envolvidos e participação destacada do setor privado (especialmente o de energia), Santiago conseguiu se destacar no cenário internacional. De 2018 para cá, o modelo foi replicado para que mais ônibus elétricos entrassem em operação na cidade. No final de 2020, devem ser 770 veículos.

Os ganhos ambientais e a satisfação dos clientes [130] tornam Santiago um exemplo a ser avaliado pelas cidades, principalmente em um contexto de retomada pós-pandemia, em que novos arranjos de transporte coletivo se fazem necessários.





A

3.3.3.5. Contratos e licitações

A adoção da eletromobilidade pode exigir que mecanismos como contratos e licitações sejam criados ou alterados. Os documentos resultantes devem conter todos os quesitos definidos durante a elaboração do projeto, em especial os modelos de contratação e aquisição estipulados, e estabelecer as relações entre os diferentes atores envolvidos, sejam eles públicos ou privados. Os editais e os contratos são fundamentais para sustentar a execução do projeto (SEÇÃO 3.4). Além disso, é possível trabalhar, em paralelo, em prol de projetos de lei que incentivem e agilizem a transição para os ônibus elétricos.

O poder público deverá estruturar uma série de editais de licitação, que irão variar de acordo com o modelo definido para o projeto. Entre outros exemplos, essas licitações podem ser referentes à operação do sistema de transporte coletivo e à construção das novas infraestruturas – como garagens, terminais e estrutura de recar-

ga. Após todo o processo licitatório, o ganhador assinará um contrato que estabelecerá a relação entre o poder público e o ente privado. O **ESTUDO DE CASO 7** mostra como Bogotá (Colômbia) estruturou sua licitação.

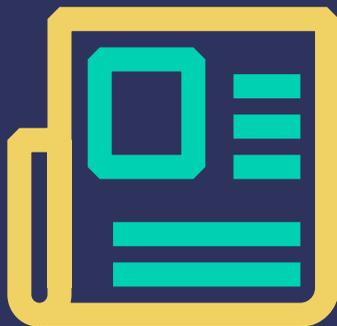
O modelo do projeto pode prever, por exemplo, que o poder público licitará a operação do sistema, mas o vencedor não terá a propriedade dos ônibus. Nessa opção, a provisão dos veículos será estabelecida entre dois entes privados que, por sua vez, também terão sua relação instituída por meio de um contrato.

Os contratos, tanto entre entidades públicas e privadas quanto entre empresas privadas, devem ser detalhados e específicos, para que todos tenham entendimento de suas responsabilidades. O **QUADRO 15** apresenta tipos de contratos que podem ser necessários e chama a atenção para os principais componentes que diferenciam a operação com frotas elétricas da operação com ônibus a combustão.

QUADRO 15. Contratos e pontos de atenção para os principais componentes da operação de ônibus elétricos

Componentes	Contratos envolvidos	Pontos de atenção dos contratos
Veículos	Compra	<ul style="list-style-type: none"> ■ Requisitos técnicos dos veículos devem estar de acordo com as necessidades operacionais e com as regulamentações do sistema ■ Garantias tecnológicas: o contrato deve prever penalizações em caso de não cumprimento e necessidade de substituição de peças ou componentes. Devem ser estabelecidas exigências sobre as baterias (incluindo expectativa de vida útil, performance e duração esperadas) e sobre a disponibilidade dos veículos ■ Garantias financeiras devem estar detalhadas ■ Realização dos testes de acordo com os protocolos (3.3.2.6) ■ Prazo de recebimento dos veículos ■ Responsabilidade de treinamentos e manutenções
	Leasing	
	Treinamento	
	Manutenção	
Infraestrutura de recarga	Fornecimento	<ul style="list-style-type: none"> ■ Especificações mínimas dos equipamentos e das instalações, de acordo com as regulamentações de segurança e da rede elétrica ■ Responsabilidade pelas manutenções ■ Realização de testes da infraestrutura, com critérios de aprovação e previsão de readequações, caso necessário ■ Prazo de finalização da instalação deve estar previsto para antes da entrega dos veículos
	Instalação	
	Manutenção	
Energia	Fornecimento	<ul style="list-style-type: none"> ■ De acordo com a estratégia e o sistema de recarga, definir necessidades energéticas ■ Negociação das tarifas, buscando previsibilidade de custos

FONTE: Baseado em [85]



ESTUDO DE CASO 7 BOGOTÁ, COLÔMBIA

A nova licitação do Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá (SITP).

Em 2019, após planejamento e estruturação, a cidade de Bogotá lançou processo licitatório para o componente zonal do Sistema Integrado de Transporte Público da cidade (SITP). Os dois editais publicados previam concessão de 18 áreas (denominadas unidades funcionais) e operação de mais de três mil ônibus, mas não houve propostas para todas as unidades. O resultado será a incorporação ao sistema de 483 ônibus elétricos até o final de 2020.

Além de melhorar segurança viária, confiabilidade e conforto do serviço, o objetivo da licitação foi contribuir para a qualidade do ar e a mitigação das mudanças climáticas, por meio da adoção de tecnologias de emissão baixa ou zero no transporte da cidade, com um padrão mínimo de ônibus EURO VI.

No processo licitatório, foram estabelecidos contratos separados para operação e fornecimento da frota. Assim, o contrato de fornecimento visou prover os veículos para o operador. O edital fixou requisitos mínimos para os ônibus, adequados às necessidades de operação do sistema. Os proponentes desse tipo de contrato são, majoritariamente, fabricantes de veículos elétricos que já têm presença no mercado e garantem a entrega nos prazos estabelecidos. Contudo, empresas de energia e fundos de investimento também vêm participando dessas disputas. Da licitação para a operação poderiam participar proponentes com experiência comprovada em sistemas similares.





Os contratos de fornecimento têm um prazo de 15 anos, enquanto os contratos de operação são por 10 anos. O edital permitia que fossem feitas propostas para apenas um dos componentes licitados ou a formação de consórcios prévios que contemplassem os dois componentes. De acordo com a municipalidade, a separação teve como objetivo proporcionar os seguintes benefícios:

- **flexibilidade:** garante a disponibilidade de frota no sistema, independentemente da continuidade de um operador específico;
- **viabilidade:** está de acordo com o contexto financeiro atual do transporte público na Colômbia;
- **eficiência:** não gera custos adicionais ao cliente do transporte;
- **confiabilidade:** garante que quem fornece a frota e quem a opera tenham experiência e demonstrem especialização na área que lhes cabe;
- **sustentabilidade:** oferece estrutura técnica, legal e financeira para garantir a prestação do serviço.



Estima-se que, em Bogotá, a implementação dessa frota possa salvar até 80 vidas e evitar 2.902 hospitalizações nos próximos 30 anos, como consequência da melhoria da qualidade do ar [13].

Além disso, nas novas etapas da licitação do sistema TransMilenio são oferecidas vantagens competitivas para os ônibus elétricos, como maior vida útil (15 anos, frente a 10 anos para veículos a diesel). Chegou-se a isso graças a pressões sociais e políticas. Dessa forma, Bogotá dá passos importantes em favor da mobilidade urbana sustentável, da qualidade do ar e da saúde de seus habitantes.

AO FINAL DA ETAPA 3

Elaboração, os objetivos a seguir devem ter sido alcançados

01

PROCESSOS GERENCIAIS

- ✓ Revisitar e atualizar a lista de atores
- ✓ Classificar os atores na matriz de influência e impacto
- ✓ Desenvolver as estratégias de gerenciamento para cada um deles
- ✓ Elaborar o plano de trabalho e o cronograma
- ✓ Desenvolver o plano de comunicação do projeto
- ✓ Levantar, classificar e gerenciar os riscos

02

PLANEJAMENTO TÉCNICO E OPERACIONAL

- ✓ Realizar análises de viabilidade técnica e econômica dos veículos
- ✓ Definir as características necessárias para o veículo, incluindo a estratégia de recarga utilizada
- ✓ Realizar planejamento operacional dos veículos
- ✓ Definir a quantidade de veículos que serão adquiridos
- ✓ Elaborar plano de adequação das garagens e da rede de energia
- ✓ Definir a quantidade e o local de instalação dos carregadores dos veículos
- ✓ Definir a lista de indicadores que serão monitorados e a metodologia
- ✓ Definir a forma de coleta dos indicadores
- ✓ Desenvolver programas de treinamento com as equipes que estarão envolvidas na operação, na recarga e na manutenção dos veículos
- ✓ Definir os testes que serão realizados nos veículos, as metodologias e os responsáveis pela execução

03

MODELOS DE NEGÓCIO

- ✓ Definir o modelo de contratação e de aquisição
- ✓ Realizar uma avaliação detalhada dos custos do projeto, verificando possíveis impactos na tarifa
- ✓ Verificar as fontes de recursos do projeto, avaliando novas fontes de financiamento para o transporte coletivo
- ✓ Definir os produtos financeiros que serão utilizados
- ✓ Elaborar contratos e licitações



3.4. ETAPA 4: Execução

Após a elaboração do projeto, passa-se à sua execução. Como foi mencionado na elaboração do cronograma (3.3.1.2), recomenda-se que o projeto seja concretizado em estágios, uma vez que esse formato permite testar ideias e aprender na prática. A implementação faseada deve estar organizada de acordo com a capacidade e a disponibilidade de fornecimento dos veículos, com a construção das infraestruturas necessárias e com gargalos identificados durante a estruturação do projeto. Essa etapa abrange três elementos:

- 3.4.1. Início da operação;
- 3.4.2. Lições aprendidas e sucessos;
- 3.4.3. Expansão.

3.4.1. Início da operação

Para o início da operação, é necessário que diversos elementos estejam preparados. Eles estão destacados na FIGURA 19.

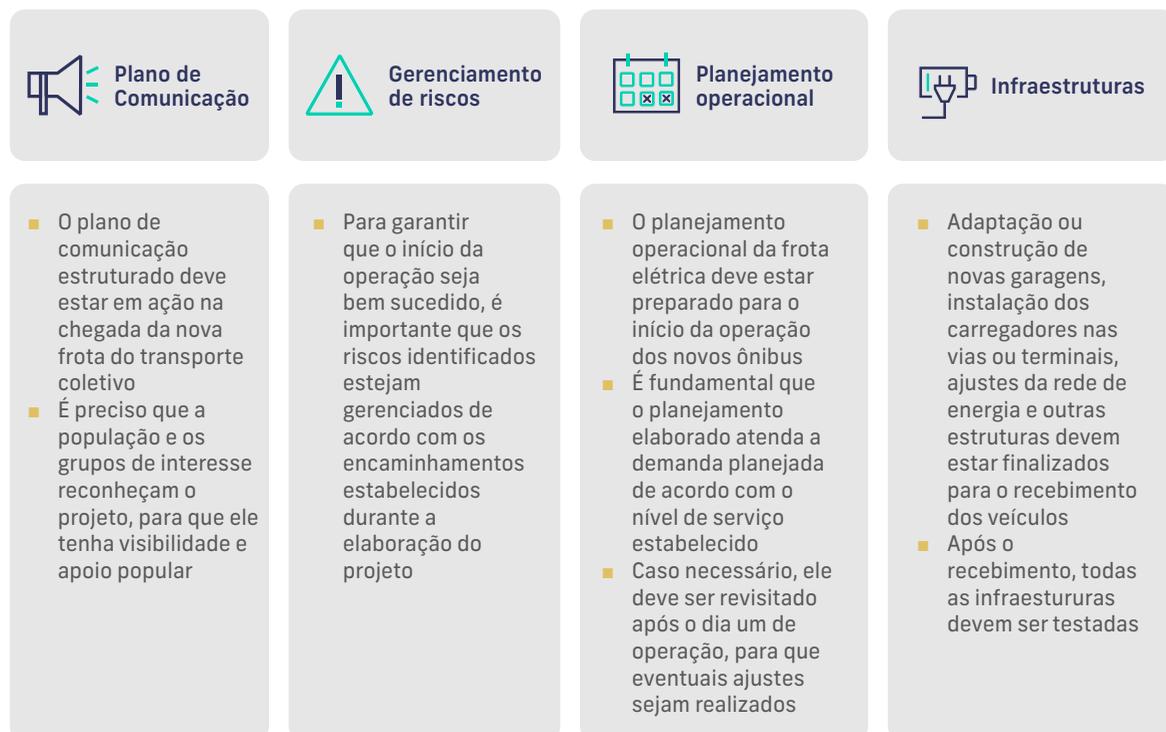
Por ser uma nova tecnologia, recomenda-se que o início de operação ocorra em um sábado, dia de menor de-

manda, permitindo a realização dos ajustes operacionais necessários no domingo. Outra sugestão é que haja uma fase inicial de operação branca, ou seja, sem cobrança da tarifa. Esse formato pode contribuir para o processo de adaptação aos novos veículos e, em caso de falhas ou problemas, pode atenuar a insatisfação dos clientes.

3.4.2. Lições aprendidas e sucessos

Passado o período inicial de operação, sugere-se a realização de um levantamento das principais lições aprendidas e dos êxitos alcançados. Esse momento também pode ser uma oportunidade para celebrar a implementação do projeto. Uma reunião deve ser chamada para que todos os atores possam contribuir e opinar sobre o que deu certo e o que deu errado até esse momento. A partir desse encontro, será possível identificar melhorias a implantar na expansão da frota (3.4.3) e aspectos positivos que devem ser replicados nas outras fases do projeto. Possíveis aprimoramentos podem incluir, entre outros aspectos, a revisão do cronograma de acordo com os prazos verificados e os ajustes identificados pela aplicação dos protocolos de testes ou o monitoramento dos veículos.

FIGURA 19. Principais elementos que devem estar preparados para início da operação



FONTE: Elaborado pelos autores.



3.4.3. Expansão

Uma vez que as lições aprendidas com o início de operação do projeto tenham sido consideradas, a cidade deve começar a expansão da frota de ônibus elétricos, de acordo com o cronograma estabelecido. De forma geral, as fases de expansão devem seguir processos semelhantes aos discriminados no início da operação (3.4.1). Dependendo do tamanho da frota que se deseja implementar, a expansão também pode ser dividida em diferentes fases, conforme o planejamento realizado.

Destaca-se que as fases de expansão devem estar previstas, pelo menos, desde o início na elaboração do projeto (SEÇÃO 3.3). Caso um projeto seja implantado e posteriormente se decida pela sua ampliação, todas as quatro etapas do planejamento e implementação (CAPÍTULO 3) devem ser desenvolvidas.



Plano de monitoramento

- O plano de monitoramento estruturado deve ser implementado desde o dia um de operação, para que o desempenho dos ônibus elétricos seja avaliado
- Um bom monitoramento ajuda a refinar as definições feitas durante a estruturação do projeto (análise de custos, planos operacionais e necessidade de treinamentos)



Treinamentos

- Todos os profissionais que estarão envolvidos na operação dos novos veículos deverão ser treinados
- Caso os treinamentos práticos ainda não tenham ocorrido, eles devem ser executados logo após a chegada dos novos ônibus



Protocolos de testes

- Todos os processos de aprovação e homologação dos novos ônibus devem ser observados
- Protocolos de testes devem ser realizados, para garantir que os veículos estejam em conformidade com as especificações técnicas contratadas

FONTE: Elaborado pelos autores.

AO FINAL DA ETAPA 4

Execução, os objetivos a seguir devem ter sido alcançados

01

INÍCIO DA OPERAÇÃO

- ✓ Implementar o plano de comunicação
- ✓ Ter gerenciamento sobre os riscos do projeto
- ✓ Implementar o planejamento operacional
- ✓ Verificar as infraestruturas (pontos de recarga, garagens, rede de energia e outros ajustes realizados)
- ✓ Aplicar o plano de monitoramento
- ✓ Treinar as equipes
- ✓ Receber os veículos e executar os protocolos de teste
- ✓ Iniciar a operação dos ônibus elétricos



02

LIÇÕES APRENDIDAS E SUCESSOS

- ✓ Documentar as lições aprendidas e os sucessos do projeto
- ✓ Celebrar a implementação do projeto



03

EXPANSÃO

- ✓ Executar as outras fases previstas no projeto



REFERÊNCIAS



- [1]. SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Análise das emissões brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas do Brasil**. SEEG, 2019. Disponível em: <<https://seeg-br.s3.amazonaws.com/2019-v7.0/documentos-analiticos/SEEG-Relatorio-Analitico-2019.pdf>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [2]. SÃO PAULO. Mudanças climáticas. Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente, set. 2019. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/comite_do_clima/index.php?p=284393>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [3]. SALVADOR. **Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) do município de Salvador**. Plano de mitigação e adaptação às mudanças do clima em Salvador, 2020. Disponível em: <http://sustentabilidade.salvador.ba.gov.br/wp-content/uploads/2020/04/InventarioGEE_2014_2018_PMAMC.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [4]. CURITIBA. **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa da cidade de Curitiba – ano-base 2016**. Secretaria Municipal do Meio Ambiente, Curitiba, 2019. Disponível em: <<https://mid.curitiba.pr.gov.br/2019/00284780.pdf>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [5]. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População rural e urbana**. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD), 2015. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [6]. UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects: the 2018 revision**. 2018. United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA). [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf>>. Acesso em: 7 jul. 2020.
- [7]. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Plano CNT de Transporte e Logística**. Brasília: CNT, 2018. Disponível em: <<https://planotransporte.cnt.org.br>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [8]. THE CITY FIX. **How did Shenzhen build the world's largest electric bus fleet?** Abr. 2018. Disponível em: <<https://thecityfix.com/blog/shenzhen-build-worlds-largest-electric-bus-fleet-lu-lu-lulu-xue-weimin-zhou>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [9]. UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS. **The impact of electric buses on urban life**. Policy brief, jun. 2019. Disponível em: <<https://www.uitp.org/impact-electric-buses-urban-life>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [10]. RATP Group. **Bus2025 – the ambitious RATP plan for a 100% ecologically friendly fleet**. [s. l.: s. d.]. Disponível em: <<https://www.ratp.fr/sites/default/files/inline-files/RATP%202025%20Bus%20Plan%20Press%20Kit.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [11]. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2020 – Entering the decade of electric drive?** IEA, 2020.
- [12]. WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **Como Santiago se tornou líder global em ônibus elétricos**. Jan. 2019. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2019/01/como-santiago-se-tornou-lider-global-em-onibus-eletricos>>. Acesso em: 9 jul. 2020.

- [13]. WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **Adoção de ônibus elétricos em Bogotá pode salvar vidas e reduzir emissões e custos.** Maio 2020. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/blog/2020/05/adocao-de-onibus-eletricos-em-bogota-salva-vidas-e-reduz-emissoes-e-custos>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [14]. WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **ImpactAr** – ferramenta de valoração dos impactos da qualidade do ar na saúde para mudanças de frota no Brasil. Technical note, WRI Brasil, 2020. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/publicacoes/impactar-ferramenta-valoracao-impactos-qualidade-do-ar-saude-frota-onibus-eletrico>>. Acesso em: 3 jul. 2020.
- [15]. EBUS RADAR, **Brasil**. Disponível em: <<https://www.ebusradar.org>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [16]. SÃO PAULO. **Lei N° 16.802/2018**. Diário Oficial Cidade de São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://documentacao.camara.sp.gov.br/jah/fulltext/leis/L16802.pdf>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [17]. EMPRESA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO DE CAMPINAS. **Licitação do transporte público coletivo de Campinas**. EMDEC, Campinas, 2019. Disponível em: <http://www.emdec.com.br/eficiente/sites/portalemdec/pt-br/site.php?secao=concessao_transporte_publico>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [18]. CORREIO. **ACM Neto quer BRT inaugurado em novembro e já com ônibus elétricos**. Jan. 2020. Disponível em: <<https://www.correio24horas.com.br/noticia/nid/acm-neto-quer-brt-inaugurado-em-novembro-e-ja-com-onibus-eletricos>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [19]. DIÁRIO DO TRANSPORTE. **BYD vai fornecer 12 ônibus articulados 100% elétricos de 22 metros para Linha Verde de São José dos Campos**. Abr. 2020. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2020/04/29/byd-vai-fornecer-12-onibus-articulados-100-eletricos-de-22-metros-para-linha-verde-de-sao-jose-dos-campos>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [20]. CAMPUS SUSTENTÁVEL. **Mobilidade elétrica** – ônibus elétrico. Universidade Estadual de Campinas, [s. d.]. Disponível em: <<http://www.campus-sustentavel.unicamp.br/mobe>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [21]. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Ônibus elétrico**. Fotovoltaica UFSC, [s. d.]. Disponível em: <<http://fotovoltaica.ufsc.br/sistemas/fotov/blog/2017/04/24/onibus-eletrico>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [22]. PLATAFORMA NACIONAL DE MOBILIDADE ELÉTRICA. **Plataforma nacional de mobilidade elétrica**. PNME, [s. d.]. Disponível em: <<http://www.pnme.org.br>>. Acesso em: 2 set. 2020.
- [23]. PARTNERING FOR GREEN GROWTH AND THE GLOBAL GOALS 2030. **The Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator**. ZEBRA, [s. d.]. Disponível em: <<https://p4gpartnerships.org/partnership/zero-emission-bus-rapid-deployment-accelerator>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [24]. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2018**. CETESB, 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2019/07/Relat%C3%B3rio-de-Qualidade-do-Ar-2018.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

- [25]. VEEDER, C. **Transforming transit, realizing opportunity**: how battery-electric buses can benefit the environment, the economy, and public transit. Jobs to Move America, EUA, 2019. Disponível em: <<https://jobstomoveamerica.org/resource/transforming-transit-realizing-opportunity>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [26]. DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Greve dos caminhoneiros**: confira a situação dos serviços de ônibus no País com a falta de diesel. Maio 2018. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2018/05/23/greve-dos-caminhoneiros-confira-a-situacao-dos-servicos-de-onibus-no-pais-com-a-falta-de-diesel>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [27]. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2018**: ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/balanco-energetico-nacional/-/document_library_display/e70oHgSHii8r/view_file/434771?_110_INSTANCE_e70oHgSHii8r_redirect=http%3A%2F%2Fwww.mme.gov.br%2Fweb%2Fguest%2Fsecretarias%2Fplanejamento-e-desenvolvimento-energetico%2Fpublicacoes%2Fbalanco-energetico-nacional%2F-%2Fdocument_library_display%2Fe70oHgSHii8r%2Fview%2F434434%3F_110_INSTANCE_e70oHgSHii8r_redirect%3Dhttp%253A%252F%252Fwww.mme.gov.br%252Fweb%252Fguest%252Fsecretarias%252Fplanejamento-e-desenvolvimento-energetico%252Fpublicacoes%252Fbalanco-energetico-nacional%253Fp_p_id%253D110_INSTANCE_e70oHgSHii8r%2526p_p_lifecycle%253D0%2526p_p_state%253Dnormal%2526p_p_mode%253Dview%2526p_p_col_id%253Dcolumn-1%2526p_p_col_pos%253D1%2526p_p_col_count%253D2>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [28]. SUZUKI, M. Identifying roles of international institutions in clean energy technology innovation and diffusion in the developing countries: matching barriers with roles of the institutions. **Journal of Cleaner Production**, n. 98, p. 229–240, July 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652614008932>>. Acesso em: 7 jul. 2015.
- [29]. WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Barriers to adopting electric buses**. Ross Center for Sustainable Cities program. Washington, D. C., 2019. Disponível em: <<https://www.wri.org/publication/barriers-adopting-electric-buses>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [30]. BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. **Electric buses in cities** – driving towards cleaner air and lower CO2. [s. l.], 2018. Disponível em: <<https://www.c40.org/research>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [31]. INSTITUTO BRASILEIRO DE DEFESA DO CONSUMIDOR. **Editais de licitação do sistema de transporte coletivo por ônibus em capitais brasileiras**. Relatório de pesquisa, IDEC, 2020. Disponível em: <https://idec.org.br/arquivos/movedados/idec_relatorio-de-pesquisa_mobilidade_levantamento-concessoes-sistema-de-onibus_2020.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2020.
- [32]. INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Análise de aspectos fundamentais para a introdução de ônibus não poluentes em 13 cidades brasileiras**. IEMA, 2020. Disponível em: <<http://energiaeambiente.org.br/produto/analise-de-aspectos-fundamentais-para-a-introducao-de-onibus-nao-poluentes-em-13-cidades-brasileiras>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

- [33]. INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO BRASIL. **Infográfico:** Incentivos na regulamentação podem ser a chave para a eletrificação. ITDP Brasil, 2020. Disponível em: <<https://itdpbrasil.org/infografico-incentivos-na-regulamentacao-podem-ser-a-chave-para-a-eletrificacao>>. Acesso em: 13 ago. 2020.
- [34]. WORLD RESOURCES INSTITUTE. **How to enable electric bus adoption in cities worldwide:** a guiding report for city transit agencies and bus operating entities. Ross Center for Sustainable Cities program. Washington, D. C., 2019. Disponível em: <<https://www.wri.org/publication/how-enable-electric-bus-adoption-cities-worldwide>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [35]. INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **Financing the transition to soot-free urban bus fleets in 20 megacities.** Washington, D. C., 2017. Disponível em: <https://ccacoalition.org/sites/default/files/resources/Soot-Free-Bus-Financing_ICCT-Report_11102017_vF.pdf>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [36]. BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. **Análisis y diseño de modelos de negocio y mecanismos de financiación para buses eléctricos en Lima, Perú.** Nota técnica del BID, 2020. Disponível em: <<https://publications.iadb.org/es/an%C3%A1lisis-y-dise%C3%B1o-de-modelos-de-negocio-y-mecanismos-de-financiacion-para-buses-electricos-en-lima-peru>>. Acesso em: 28 maio 2020.
- [37]. ORBEA, J.; CASTELLANOS, S.; ALBUQUERQUE, C.; SCLAR, R.; PINHEIRO, B. Adapting procurement models for electric buses in Latin America. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 10., p. 175–184, maio 2019. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0361198119846097?journalCode=traa>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [38]. PEREIRA, B, M. **Modelagem da rede de stakeholders envolvidos em melhorias de transporte coletivo por ônibus.** Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/139390>>. Acesso em: 20 jul. 2020.
- [39]. INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE & DESENVOLVIMENTO BRASIL. **O papel da regulamentação na transição para eletromobilidade.** ITDP Brasil, 2020. Disponível em: <<https://itdpbrasil.org/o-papel-da-regulamentacao-na-transicao-para-eletromobilidade>>. Acesso em: 8 jul. 2020.
- [40]. DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Trólebus 70 anos:** um meio de transporte que é viável para os dias de hoje e para o futuro. Abr. 2019. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2019/04/21/trolebus-70-anos-um-meio-de-transporte-que-e-viavel-para-os-dias-de-hoje-e-para-o-futuro>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [41]. DÍEZ, A. E.; DIEZ, I. C.; LOPERA, J. A.; BOHORQUEZ, A.; VELANDIA, E.; ALBARRACIN, A.; RESTREPO, M. Trolleybuses in Smart Grids as effective strategy to reduce greenhouse emissions. **IEEE International Electric Vehicle Conference**. 6 p., Apr. 2012. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6183213/authors#authors>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [42]. HANLIN, J.; REDDAWAY, D.; LANE, J. **Battery electric buses — state of the practice:** a synthesis of transit practice. TCRP synthesis 130, Washington, D. C.: Transit Cooperative Research Program, 2018. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/1508207>>. Acesso em: 4 maio 2020.

- [43]. BARTŁOMIEJCZYK, M. Driving performance indicators of electric bus driving technique: naturalistic driving data multicriterial analysis. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 20, n. 4, p. 1442-1451, April 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8410432>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [44]. KLEIN, E.; LANTZ, M. **Evaluation of electric bus adoption in Sweden**. Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden, 2019. Disponível em: <<https://odr.chalmers.se/bitstream/20.500.12380/257065/1/257065.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [45]. WORLD BANK. **Green your bus ride – clean buses in Latin America**. Washington, D. C., 2019. Disponível em: <<http://documents.worldbank.org/curated/en/410331548180859451/Green-Your-Bus-Ride-Clean-Buses-in-Latin-America-Summary-Report>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [46]. VUCHIC, V. R. **Urban transit: systems and technology**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [47]. D'AGOSTO, M. A. **Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- [48]. GRÜTTER CONSULTING. **Real world performance of hybrid and electric buses – environmental and financial performance of hybrid and battery electric transit buses based on real world performance of large operational fleets**. Oct. 2014. Disponível em: <https://slocat.net/wp-content/uploads/legacy/u10/report_hybrid_and_electric_buses.pdf>. Acesso em 24 jul. 2020.
- [49]. TONG, F.; JARAMILLO, P.; AZEVEDO, I. M. L. Comparison of life cycle greenhouse gases from natural gas pathways for light-duty vehicles. **Energy & Fuels** 2015, v. 29, n. 9, p. 6008-6018. Aug. 2015. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.energyfuels.5b01063>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [50]. ZHOU, B.; ZHANG, S.; WU, Y.; KE, W.; HE, X.; HAO, J. Energy-saving benefits from plug-in hybrid electric vehicles: perspectives based on real-world measurements. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 23, p. 735–756, 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11027-017-9757-9>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [51]. DIÁRIO DO TRANSPORTE. **O primeiro ônibus elétrico no Brasil**. Jul. 2017. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2017/07/16/historia-o-primeiro-onibus-eletrico-no-brasil>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [52]. MAHMOUD, M.; GARNETT, R.; FERGUSON M.; KANAROGLOU, P. Electric buses: a review of alternative powertrains. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 673-684, September 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116301290>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [53]. KARA, O. N. **Environmental and economic sustainability of zero-emission bus transport**. 2019. 69 f. Dissertação (Mestrado em Industrial Engineering & Management) – University of Twente, Holanda, 2019. Disponível em: <<http://essay.utwente.nl/78088>>. Acesso em: 4 maio 2020.

- [54]. HAYES, J. G.; GOODARZI, G. A. **Electric powertrain** – energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2018.
- [55]. GARCHE, J.; MOSELEY, P. T.; KARDEN, E. Lead-acid batteries for hybrid electric vehicles and battery electric vehicles. In: SCROSATI, B.; GARCHE, J.; TILLMETZ, W. (Ed.) **Advances in battery technologies for electric vehicles**. Woodhead Publishing, Elsevier, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781782423775000054>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [56]. BATTERY UNIVERSITY. **Battery building blocks**. Nov. 2018. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_104b_building_blocks_of_a_battery>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [57]. AVID TECHNOLOGY. **What is the best electric vehicle battery cooling system?** Jul. 2017. Disponível em: <<https://avidtp.com/what-is-the-best-cooling-system-for-electric-vehicle-battery-packs>>. Acesso em 24 jul. 2020.
- [58]. KUMAR, R.; LIU, J.; HWANG, J-Y; SUN, Y-K. Recent research trends in Li-S batteries. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 6, n. 25, p. 11582-11605, Jun. 2018. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ta/c8ta01483c#!divAbstract>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [59]. BERCKMANS, G.; MESSAGIE, M.; SMEKENS, J.; OMAR, N.; VANHAVERBEKE, L.; VAN MIERLO, J. Cost projection of state of the art lithium-ion batteries for electric vehicles up to 2030. **Energies** 2017, v. 10, n. 9. 20 p., Sep. 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/9/1314>>. Acesso em: 24 jul 2020.
- [60]. BATTERY UNIVERSITY. **How do lithium batteries work?** Jun. 2018. Disponível em: <https://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [61]. AHMADI, L.; YIP, A.; FOWLER, M.; YOUNG, S. B.; FRASER, R. A. Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, n. 6, p. 64–74, Jun. 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138814000071>>. Acesso: 24 jul 2020.
- [62]. WALKER, S. B.; YOUNG, S. B.; FOWLER, M. **Repurposing electric vehicle batteries for energy storage to support the smart grid**. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. Disponível em: <http://canrev.ieee.ca/cr73/Repurposing_Electric_Vehicle_Batteries_for_Energy_Storage_to_Support_the_Smart_Grid.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [63]. GALARZA, S. **From pilots to scale** – lessons from electric bus deployments in Santiago de Chile. Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator, 2020. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/db408b53-276c-47d6-8b05-52e53b1208e1/e-bus-case-study-Santiago-From-pilots-to-scale-Zebra-paper.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [64]. RANDHAHN, A.; KNOTE, T. Deployment of Charging Infrastructure for Battery Electric Buses. In: MULLER, B.; MEYER, G. **Towards User-Centric Transport in Europe 2**. Berlin: Springer Nature, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38028-1_12>. Acesso em: 4 maio 2020.

- [65]. D'AGOSTO, M. A.; GONÇALVES, D. N. S.; GOES, G. V.; BANDEIRA, R. A. M.; COSTA, M. G. **Normas e regulamentos para a mobilidade elétrica no enquadramento do Brasil** – análise internacional e propostas de N&R para o contexto brasileiro. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<http://www.promobe.com.br/library/normas-e-regulamentos-para-a-mobilidade-eletrica-no-enquadramento-do-brasil>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [66]. DE BELEN, M. M. **Electrification of public transport: methodologies and tools to assess its feasibility around the world and transferability across Europe**. Master's Degree in Transport Systems Engineering (Faculty of Civil and Industrial Engineering), Sapienza Università di Roma, 2018. Disponível em: <https://web.uniroma1.it/cdaingtrasporti/sites/default/files/Thesis_DeBelen_MTRR_18gen18.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [67]. OLSSON, O.; GRAUERS, A.; PETTERSSON, S. **Method to analyze cost effectiveness of different electric bus systems**. In: 29th International Electric Vehicle Symposium, EVS 2016, p. 604-615. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1159796&dswid=6239>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [68]. LUNDSTRÖM, A-C.; HOLMSTRÖM, M. N.; TORSTENSSON, E.; ERIKSSON, M. **Electric buses for Swedish public transport services: a survey of Trafikförvaltningen Stockholm, Skånetrafiken and Västtrafik based on four perspectives**. Swedish Transport Administration, Solna, Suécia, 2019. Disponível em: <<https://www.trafikverket.se/contentassets/445611d179bf44938793269fe58376b6/dokument/eng-electric-buses-for-swedish-public-transport-services-1.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [69]. BUS & COACH BUYER. **Europe's biggest all electric fleet**. Sep. 2016. Disponível em: <https://www.busandcoachbuyer.com/europes-biggest-electric-fleet/?cookies_accepted=1>. Acesso em: 11 ago. 2020.
- [70]. ELEMENT ENERGY. **A study of the impact of electrification of Auckland's bus depots on the local electricity grid**. Financing Sustainable Cities Initiative, Jun. 2018. Disponível em: <<https://www.c40cff.org/knowledge-library/a-study-of-the-impact-of-electrification-of-aucklands-bus-depots-on-the-local-electricity-grid>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [71]. BEROIZA, G. A. B. **Preparing for a zero-emission fleet at RET**. Dissertação de mestrado. Rotterdam School of Management, Erasmus University, Roterdã, 2017. Disponível em: <https://www.rsm.nl/fileadmin/Images_NEW/ECFEB/pdf/Guillermo_Beuchat_2017__Preparing_for_a_zero_emission_fleet.pdf>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [72]. SUH, I-S.; LEE, M.; KIM, J.; OH, S. T.; WON, J-P. Design and experimental analysis of an efficient HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system on an electric bus with dynamic on-road wireless charging. **Energy**, v. 81, p. 262-273, Mar, 2015. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544214014054>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [73]. FARRINGTON, R; RUGH, J. **Impact of vehicle air conditioning on fuel economy, tailpipe emissions, and electric vehicle range**. Conference paper, National Renewable Energy Laboratory (NREL), US Department of Energy, Oct. 2000. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy00osti/28960.pdf>>. Acesso em: 24 jul 2020.

- [74]. ZHOU, B.; WU, Y.; ZHOU, B.; WANG, R.; KE, W.; ZHANG, S.; HAO, J. Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. **Energy**, n. 96, p. 603-613, Feb. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544215016837>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [75]. GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. A.; QUEIROZ, R. C. O impacto do Termo de Ajustamento de Conduta no transporte coletivo urbano por ônibus do município do Rio de Janeiro. **Revista dos Transportes Públicos**, Associação Nacional de Transportes Públicos, ano 40, 2018. Disponível em: <<http://files.antp.org.br/2018/4/19/rtp148-2.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [76]. LAJUNEN, A. **Energy-optimal velocity profiles for electric city buses**. International Conference on Automation Science and Engineering, Nov. 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6653956>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [77]. LI, W.; STANULA, P.; EGEDE, P.; KARA, S.; HERRMANN, C. Determining the main factors influencing the energy consumption of electric vehicles in the usage phase. **Procedia CIRP**, v. 48, p. 352-357, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711600651X>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [78]. BUILD YOUR DREAMS. **Bus 12m eBus**. BYD, [s. d.]. Disponível em: <<https://bydeurope.com/pdp-bus-model-12>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [79]. PERROTTA, D.; MACEDO, J. L.; ROSSETTI, R. J. F.; AFONSO, J. L.; KOKKINOGENIS, Z.; RIBEIRO, B. Driver attitude and its influence on the energy waste of electric buses. In: BEHRISCH M., KRAJZEWICZ D., WEBER M. (Ed.) **Simulation of Urban Mobility**. SUMO 2013. Lecture Notes in Computer Science, v. 8594, p 99-108, 2014. Springer, Berlin, Heidelberg. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45079-6_8#citeas>. Acesso em: 24 jul. 2014.
- [80]. MUELLER, S.; ROHR, S.; SCHMID, W.; LIENKAMP, M. Analysing the influence of driver behaviour and tuning measures on battery aging and residual value of electric vehicles. **EVS30 Symposium**, Stuttgart, 2017. Disponível em: <<https://pdfs.semanticscholar.org/1381/22ab0db733c0fcc8a019988f42d486ed5350.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [81]. ICLODEAN, C.; CORDOS, N.; TODORUT, A. Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions. **Energies** 2019, v. 12, 4535, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/23/4535>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [82]. FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. **BYD electric bus test**. Report Number: LTI-BT-R1307, The Thomas D. Larson, Pennsylvania Transportation Institute, The Pennsylvania State University, 2014. Disponível em: <<http://apps.altoonabustest.psu.edu/buses/reports/441.pdf?1423598436>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [83]. FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. **New Flyer XE40 test**. Report Number: LTI-BT-R1405, The Thomas D. Larson, Pennsylvania Transportation Institute, The Pennsylvania State University, July 2015. Disponível em: <<http://apps.altoonabustest.psu.edu/buses/reports/458.pdf?1441118410>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

- [84]. FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. **Proterra BE40 test**. Report Number: LTI-BT-R1406, The Thomas D. Larson, Pennsylvania Transportation Institute, The Pennsylvania State University, May 2015. Disponível em: <<http://apps.altoonabustest.psu.edu/buses/reports/454.pdf?1432817806>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [85]. NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Guidebook for Deploying Zero-Emission Transit Buses**. Washington, DC: The National Academies Press, 2020. Disponível em: <<https://www.nap.edu/catalog/25842/guidebook-for-deploying-zero-emission-transit-buses>>. Acesso em: 10 ago. 2020.
- [86]. RUDOLPH, F.; WERLAND, S. **Public procurement of sustainable urban mobility measures**. Wuppertal Institut. Bruxelas. 2019. Disponível em: <<https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/7398>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [87]. BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Transportes e da Mobilidade Urbana. **Política Nacional de Mobilidade Urbana**. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12587.htm>. Acesso em: 17 jul. 2020.
- [88]. BRASIL. Ministério da Economia. **Legislação Rota 2030**. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota2030/105-assuntos/competitividade-industrial/3780-legislacao-rota#:~:text=Decreto%20n%C2%BA%209,557%2C%20de%208,tribut%C3%A1rio%20de%20autope%C3%A7as%20n%C3%A3o%20produzidas.>>. Acesso em: 3 set. 2020.
- [89]. C40. **Low Emission Vehicles** – good practice guide. C40 Cities Climate Leadership Group, 2016. Disponível em: <http://c40-production-images.s3.amazonaws.com/good_practice_briefings/images/7_C40_GPG_LEV.original.pdf?1456788962>. Acesso em: 14 jul. 2020.
- [90]. INTELLIGENT TRANSPORT. **Shenzhen's transition to the world's largest fully-electric fleet**. Article, feb. 2020. Disponível em: <<https://www.intelligenttransport.com/transport-articles/96209/shenzhens-transition-to-the-worlds-largest-fully-electric-fleet>>. Acesso em: 17 jul. 2020.
- [91]. THE GUARDIAN. **Shenzhen's silent revolution: world's first fully electric bus fleet quietens Chinese megacity**. Article, dec. 2018. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/cities/2018/dec/12/silence-shenzhen-world-first-electric-bus-fleet>>. Acesso em: 17 jul 2020.
- [92]. ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. **Simulador de emissões de ônibus urbanos**. ANTP, [s. d.]. Disponível em: <<http://www.antp.org.br/simulador-de-emissoes-de-onibus-urbanos/apresentacao.html>>. Acesso em: 2 set. 2020.
- [93]. WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Costs and emissions appraisal tool for transit buses**. Ross Center for Sustainable Cities program. Washington, D. C., 2019. Disponível em: <<https://www.wri.org/publication/transit-buses-tool#:~:text=The%20Costs%20and%20Emissions%20Appraisal,is%20financially%20viable%20and%20worthwhile>>. Acesso em: 4 set. 2020.
- [94]. BRASIL. Ministério Do Meio Ambiente. **Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. MMA, 2013. Disponível em: <<https://iema-sitestaging.s3.amazonaws.com/2014-05-27inventario2013.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2020.

- [95]. ARGONNE NATIONAL LABORATORY. **Autonomie vehicle system simulation tool**. Energy Systems Division, [s. d.]. Disponível em: <<https://www.anl.gov/es/autonomie-vehicle-system-simulation-tool>>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- [96]. UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS; SHAKTI SUSTAINABLE ENERGY FOUNDATION. **National framework for electric bus performance evaluation**. Summary Report, 2020. Disponível em: <<https://india.uitp.org/sites/default/files/Performance%20evaluation%20toolkit.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2020.
- [97]. WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **Sete passos** – Como construir um plano de mobilidade urbana. 2 ed. WRI Brasil, 2017. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/pt/publicacoes/sete-passos-como-construir-um-plano-de-mobilidade-urbana>>. Acesso em: 4 jul. 2020.
- [98]. EMBARQ BRASIL. **Passo a passo para a construção de um plano de mobilidade corporativa**. 1a. ed., set. 2015. Disponível em: <<https://wricidades.org/research/publication/passo-passo-para-constru%C3%A7%C3%A3o-de-um-plano-de-mobilidade-corporativa>>. Acesso em: 17 ago. 2020.
- [99]. SÃO PAULO. **Lei Nº 14.933/2009**: Política de Mudança do Clima de São Paulo. Diário Oficial Cidade de São Paulo, 2009. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/s/sao-paulo/lei-ordinaria/2009/1493/14933/lei-ordinaria-n-14933-2009-institui-a-politica-de-mudanca-do-clima-no-municipio-de-sao-paulo>>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [100]. CORTESE, T. T. P. **Mudanças climáticas na cidade de São Paulo**: avaliação da política pública municipal. Tese de doutorado (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública, Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6134/tde-31072013-105505/publico/TESE_TTPC_2013.pdf>. Acesso em: 2 set. 2020.
- [101]. SÃO PAULO. **COMFROTA-SP**. Comitê Gestor do Programa de Acompanhamento da Substituição de Frota por Alternativas Mais Limpas, objetivos, out. 2019. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/participacao_social/comfrotasp/index.php?p=285426>. Acesso em: 9 jul. 2020.
- [102]. SÃO PAULO. **Editais de licitação** – delegação, por concessão, da prestação e exploração do serviço de transporte coletivo público de passageiros, na cidade de São Paulo. Dez. 2018. Disponível em: <<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/transportes/edital/index.php?p=247319>>. Acesso em: 3 set. 2020.
- [103]. DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Quinze ônibus elétricos da Transwolff começam a operar nesta terça-feira, 19**. Nov. 2019. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2019/04/21/trolebus-70-anos-um-meio-de-transporte-que-e-viavel-para-os-dias-de-hoje-e-para-o-futuro>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [104]. SUSTAINABLE BUS. **RATP on the way to a 2025 clean fleet in Paris**. Interview with Nicolas Cartier. Sep. 2019. Disponível em: <<https://www.sustainable-bus.com/news/ratp-on-the-way-to-a-2025-clean-fleet-in-paris-interview-with-nicolas-cartier>>. Acesso em: 24 jul. 2020.

- [105]. FRANCE 24. **Paris orders 800 new electric buses to fight smog**. Abr. 2019. Disponível em: <<https://www.france24.com/en/20190409-paris-orders-800-new-electric-buses-fight-smog>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [106]. RÉPUBLIQUE FRANÇAISE. **Versement mobilité transport**. Service public, jun. 2019. Disponível em: <<https://www.service-public.fr/professionnels-entreprises/vosdroits/F31031>>. Acesso em: 3 set. 2020.
- [107]. PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos** (Guia PMBOK). 5. ed. Newtown Square, EUA: Project Management Institute, Inc., 2013.
- [108]. EMBARQ. **De lá pra cá** – um guia criativo de marketing BRT para atrair e cativar usuário. Maio 2011. Disponível em: <<https://wricidades.org/research/publication/de-c%C3%A1-para-l%C3%A1>>. Acesso em: 17 ago. 2020.
- [109]. ZERO EMISSION BUS RAPID-DEPLOYMENT ACCELERATOR. **Accelerating a market transition in Latin America: new business models for electric bus deployment**. Feb. 2020. Disponível em: <https://c40.my.salesforce.com/sfc/p/#36000001Enhz/a/1Q000000Mp9R/bErpG_NKI5sYJ07u6DOAkPbiO_4hxdjiWU4hvJfJjss>. Acesso em: 3 set. 2020.
- [110]. STRINGER, D.; MA, J. **Where 3 million electric vehicle batteries will go when they retire**. Bloomberg Businessweek, June 2018. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/features/2018-06-27/where-3-million-electric-vehicle-batteries-will-go-when-they-retire>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [111]. CEDER, A. **Public transit planning and operation: modeling, practice and behavior**. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
- [112]. HÄLL, C. H.; CEDER, A.; EKSTRÖM, J.; QUTTINEH, N-H. Adjustments of public transit operations planning process for the use of electric buses. **Journal of Intelligent Transportation Systems – Technology, Planning, and Operations**, v. 23, n. 3, 2019. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/15472450.2018.1488131?scroll=top&needAccess=true>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [113]. INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **Strategies for deploying zero-emission bus fleets: development of real-world drive cycles to simulate zero-emission technologies along existing bus routes**. Washington, D. C., Apr. 2020. Disponível em: <<https://theicct.org/sites/default/files/publications/Drive-cycle-devo-ZE%20bus-042020.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [114]. WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **Ferramentas para gestão da qualidade** – Programa QualiÔnibus. 1 ed. WRI Brasil, 2018. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/sites/default/files/QualiOnibus_FerramentasQualidade_jan2019.pdf>. Acesso em: 4 set. 2020.
- [115]. EUDY, L.; PROHASKA, R.; KELLY, K.; POST, M. **Foothill Transit battery electric bus demonstration results**. Technical Report, National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO, Jan. 2016. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65274.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2020.

- [116]. EUDY, L.; JEFFERS, M. **Foothill Transit battery electric bus demonstration results: second report**. Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, June 2017. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/67698.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [117]. EUDY, L.; JEFFERS, M. **Foothill Transit agency** – battery electric bus progress report. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Sep. 2018. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/files/u/publication/foothill_transit_beb_progress_rpt_9-2018.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [118]. LIU, D. **The U.S. electric bus transition: an analysis of funding and financing mechanisms**. 2019. 46 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Duke University, Durham, Carolina do Norte, 2019. Disponível em: <<https://dukespace.lib.duke.edu/dspace/bitstream/handle/10161/18464/The%20U.S.%20Electric%20Bus%20Transition%20-%20An%20Analysis%20of%20Funding%20and%20Financing%20Mechanisms.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [119]. WORLD RESOURCES INSTITUTE. **Financing electric and hybrid-electric buses: 10 questions city decision-makers should ask**. Working Paper. Washington, D. C., 2019. Disponível em: <www.wri.org/publication/financing-electric-buses>. Acesso em: 20 maio 2020.
- [120]. LI, X.; CASTELLANOS, S.; MAASSEN, A. Emerging trends and innovations for electric bus adoption – a comparative case study of contracting and financing of 22 cities in the Americas, Asia-Pacific, and Europe. **Research in Transportation Economics**, v. 69, p. 470-481, Set. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0739885917302330>>. Acesso em: 4 maio 2020.
- [121]. BRASIL. **Decreto nº 10.387**, de 5 de junho de 2020. Diário Oficial da União – Seção 1 – Edição extra – A – 5/6/2020, Página 1 (Publicação Original). Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2020/decreto-10387-5-junho-2020-790284-publicacaooriginal-160823-pe.html>>. Acesso em: 24 jul. 2020.
- [122]. FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE BANCOS; CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Guia para emissão de Títulos Verdes no Brasil 2016**. FEBRABAN e CEBEDS, 2016. Disponível em: <https://portal.febraban.org.br/pagina/3188/52/pt-br/guia-titulos-verdes>>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- [123]. CLIMATE BONDS INITIATIVE. **Green bonds** – Global state of the market 2019. CBI, 2020. Disponível em: <<https://www.climatebonds.net/resources/reports/green-bonds-global-state-market-2019>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

- [124]. CLIMATE BONDS INITIATIVE. **América Latina e Caribe** – análise de mercado das finanças verdes 2019. CBI, 2019. Disponível em: <<https://www.climatebonds.net/resources/reports/latin-america-caribbean-green-finance-state-market-2019>>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- [125]. CLIMATE BONDS INITIATIVE; BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO. **Oportunidades de investimento em infraestrutura verde** – Brasil 2019. CBI e BID, 2019. Disponível em: <https://www.climatebonds.net/files/reports/cbi_giio_2019_por_final_01_web_final.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- [126]. CLIMATE BONDS INITIATIVE. **Títulos de dívida e mudanças climáticas** – análise de mercado 2017. Edição Brasil, CBI, 2017. Disponível em: <<https://www.climatebonds.net/resources/reports/edi%C3%A7%C3%A3o-brasil-t%C3%ADtulos-de-d%C3%ADvida-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas-an%C3%A1lise-de-mercado-2017>>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- [127]. KAMINKER, C.; MAJOWSKI, C.; BONELLI, R. **Green bonds** – ecosystem, issuance process and regional perspectives. Brazil Edition, 2017. Disponível em: <<https://cebds.org/en/publicacoes/green-bonds-ecosystem-issuance-process-and-regional-perspectives>>. Acesso em: 18 ago. 2020.
- [128]. STEER. **Chile's experience with electromobility**: The introduction of electric buses in Santiago. Report, 2020.
- [129]. GOBIERNO DE CHILE. **Estrategia nacional de electromovilidad** – un camino para los vehículos eléctricos. Ministerio de Energia, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Ministerio del Medio Ambiente, 2017. Disponível em: <https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_electromovilidad-8dic-web.pdf>. Acesso em: 2 set. 2020.
- [130]. DIRECTORIO DE TRANSPORTE PÚBLICO METROPOLITANO. **Satisfacción de los usuarios con operadores y el sistema vs percepción de buses del nuevo estándar** – resumen ejecutivo. DTPM, Abril 2019. Disponível em: <http://www.dtpm.cl/descargas/estudios/Satisfacci%C3%B3n-Nuevo-Est%C3%A1ndar_vF.pdf>. Acesso em: 1 set. 2020.
- [131]. COORDINATION OFFICE CHARGING INTERFACE. **Combined Charging System 1.0 Specification** - CCS 1.0. COCI, version 1.2.1, 2015. Disponível em: <https://tesla.o.auroraobjects.eu/Combined_Charging_System_1_0_Specification_V1_2_1.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2020.

ANEXOS



ANEXO 1

Tipos de carregadores

QUADRO A1-1. Tipos de carregadores *plug-in*

Tipo	Entrada	Velocidade e corrente	Características	Região de utilização
Tipo 2 (Mennekes)		Lenta (CA)	Tem sete pinos (L1, L2, L3, N, PE, CP, PP). Utilizado para correntes monofásicas de 16 A e trifásicas de até 63 A, voltagem de 100 V a 500 V e potências de 3,7 kW até 50 kW.	Europa, Nova Zelândia, América Latina
CHAdeMO		Rápida (CC)	Tem dois pinos grandes para alimentação da energia elétrica e outros dois pinos auxiliares. Utilizado para cargas de alta tensão (até 500 V) e altas correntes (125 A).	Japão, Europa e Estados Unidos
GB/T 20234.2* e 202234.3**		Lenta (CA)* e rápida (CC)**	Tem sete pinos e utiliza uma corrente que varia de 16 A a 32 A e uma voltagem de 250 V a 400 V.	China

FONTE: Elaborado pelos autores.

QUADRO A1-2. Tipos de carregadores *plug-in* Combo

Tipo	Entrada	Características	Região de utilização
Combo 1		Sistema de cinco pinos principais, com dois pinos dedicados extras, que possibilita uma carga em CC de 200 A.	América do Sul, Europa, África do Sul, Índia e Austrália
Combo 2		Tem sete pinos principais e outros dois pinos auxiliares. Apresenta uma voltagem de 500 V e uma CC de 200 A.	Américas, Coreia do Sul, Taiwan e China

FONTE: Adaptado de [13]

ANEXO 2

Diagnóstico do sistema de transporte coletivo por ônibus

PLANILHA A2-1. Coleta de indicadores das linhas do sistema de transporte coletivo por ônibus

Inserir logo

PLANILHA DE COLETA DE INDICADORES DAS LINHAS DO SISTEMA DE TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS

Cidade:	Técnico responsável:
Região de análise:	Supervisor:
Instituição responsável:	

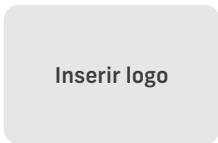
Data de coleta:	Observações:
Data de revisão:	

		Nome da linha	Nome da linha	Nome da linha	Nome da linha
Extensão	Extensão total [km]				
	Distância morta percorrida [km]				
Frota operante	Micro-ônibus				
	Miniônibus				
	Midiônibus				
	Básico				
	Padron				
	Articulado/ Super articulado				
	Biarticulado				

		Nome da linha	Nome da linha	Nome da linha	Nome da linha
Características da linha	Número de pontos de ônibus				
	Distância média entre pontos de ônibus [m]				
	Tempo total de viagem [min]				
	Intervalo entre viagens na hora-pico [min]				
Velocidades	Velocidade comercial [km/h]				
	Velocidade operacional [km/h]				
Número de viagens	Quantidade de viagens diárias				
	Quantidade de viagens na hora-pico				
Demanda	Demanda diária da linha				
	Demanda da linha na hora-pico				
	Passageiros transportados por veículo				
Inclinações (greides)	Inclinação máxima [%]				
	Inclinação média [%]				

FONTE: Elaborado pelos autores.

PLANILHA A2-2. Coleta de indicadores das garagens do sistema de transporte coletivo por ônibus



PLANILHA DE COLETA DE INDICADORES DAS GARAGENS DO SISTEMA DE TRANSPORTE COLETIVO POR ÔNIBUS

Cidade:	Técnico responsável:
Região de análise:	Supervisor:
Instituição responsável:	

Data de coleta:	Observações:
Data de revisão:	

	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem
Área [m²]					
Quantidade de veículos					
Distância até a subestação de energia [km]					

	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem	Garagem
Nível de tensão [V]					
Potência instalada [kW]					
Demanda contratada de energia [kW]					



FONTE: Elaborado pelos autores.

ANEXO 3

Análise de emissões

Equações utilizadas para a análise das emissões:

Poluentes	Equações
CO ₂ (ton/ano)	<p>Emissões anuais de CO₂ = $N \times d \times CC \times e_{CO_2}$</p> <p>N = número de veículos; d = distância anual percorrida por veículo; CC = consumo de combustível; e_{CO₂} = fator de emissão do CO₂.</p>
MP (ton/ano)	<p>Emissões anuais de MP = $N \times d \times CC \times e_{MP}$</p> <p>N = número de veículos; d = distância anual percorrida por veículo; CC = consumo de combustível; e_{MP} = fator de emissão do MP.</p>
NO _x (ton/ano)	<p>Emissões anuais de NO_x = $N \times d \times CC \times e_{NO_x}$</p> <p>N = número de veículos; d = distância anual percorrida por veículo; CC = consumo de combustível; e_{NO_x} = fator de emissão do NO_x.</p>

FONTE: Elaborado pelos autores.

ANEXO 4

Estudo de mercado

PLANILHA A2-2. Coleta de indicadores das garagens do sistema de transporte coletivo por ônibus

Inserir logo

ESTUDO DE MERCADO

Cidade:	Fabricante:	Supervisor:
Técnico responsável:	Instituição responsável:	

Data de coleta:	Observações:
Data de revisão:	

Categoria	Variável	Descrição	Valor
Ficha técnica do veículo	Peso	Peso total vazio (kg)	
		Peso bruto (kg)	
	Dimensões	Comprimento/altura/largura	
		Distância entre eixos	
		Velocidade máxima do veículo	
		Distância do solo	
		Capacidade de superar inclinação (%)	
		Capacidade interior do veículo	Sentados
		Em pé	
	Descrição do sistema de propulsão	Geral	Descrição do sistema
Tipo			
Baterias		Potência máxima suportada pela bateria (kW)	
		Capacidade (kWh)	
		Tempo de carga completa (h)	
Suspensão		Descrição do sistema	
Indicadores de desempenho	Eficiência	Consumo energético (kWh/km)	
		Autonomia sem A/C (km)	
		Autonomia com A/C (km)	

Categoria	Variável	Descrição	Valor
Características, custos e prazos de entrega	Veículo	Custo do veículo (R\$)	
		Custo para entrega na cidade (R\$)	
		Tempo de entrega	
		Capacidade de entrega (veículos/ano)	
	Sistema de recarga	Sistema de recarga (condutiva – plug-in ou pantógrafo – ou indutiva)	
		Recarga de oportunidade (bateria suporta alta taxa de energia em um tempo curto)	
		Vida útil do sistema de recarga (ciclos)	
		Potência (kW)	
	Conjunto de baterias	Custo do carregador (R\$)	
		Vida útil das baterias (anos ou ciclos)	
Motor	Características gerais	Custo do conjunto de baterias	
		Posição (dianteiro/traseiro/eixo)	
		Valor de potência máxima do motor (kW)	
Garagem/Ponto de recarga	Requerimento	Descrição do modelo do motor	
		Capacidade nominal instalada necessária	
Programa de manutenção	Características gerais	Descrição completa dos serviços	
		Frequência (eventos por ano)	
		Componentes que serão incluídos no programa de manutenção	
Fabricante	Área de atuação	Custos estimados (R\$/km)	
		Região onde se comercializa o veículo	
		Países que já operam veículos da marca	
		Cidades que já operam veículos da marca	
		Interesse de entrada no mercado da cidade em análise	

FONTE: Elaborado pelos autores.

ANEXO 5

Protocolos de testes

PLANILHA A5-1. Estrutura para aplicação dos testes de tipo

Inserir logo

ESTRUTURA PARA APLICAÇÃO DOS TESTES DE TIPO

Cidade:	Identificação do veículo:	Reponsável pelos testes:
Técnico responsável:	Supervisor:	

Data de coleta:	Observações:
Data de revisão:	

Testes em ônibus em geral

Variável	Metodologia*	Dado
Testes estáticos		
Tipologia		
Capacidade		
Estanqueidade		
Bloqueio de portas		
Pontos cegos		
Sistema pneumático		
Verificação de fiação, tubulações e instalações		
Medição de ruído		
Testes dinâmicos		
Manobrabilidade		
Direção		
Aceleração		
Velocidade		
Arranque em declive		
Capacidade de frenagem		
Funcionamento do trem motriz		
Suspensão		
Testes dinâmicos com peso		

Testes em ônibus elétricos

Variável	Metodologia*	Dado
Funcionamento completo do veículo em operação		
Funcionamento completo do veículo		
Continuidade da fiação		
Cumprimento de normas		
Potência aplicada às baterias e à fiação		
Parâmetros de componentes (temperatura, voltagem, potência)		
Parâmetros do veículo		
Segurança e desempenho dos componentes		
Autonomia		

*A ser definida pelos responsáveis pelos testes.

FONTE: Elaborado pelos autores.

PLANILHA A5-2. Estrutura para aplicação dos testes de série

Inserir logo

ESTRUTURA PARA APLICAÇÃO DOS TESTES DE TIPO

Cidade:	Identificação do veículo:	Reponsável pelos testes:
Técnico responsável:	Supervisor:	

Data de coleta:	Observações:
Data de revisão:	

Testes em ônibus em geral

Variável	Metodologia*	Dado
Testes estáticos		
Tipologia		
Sistema pneumático		
Teste de abertura e fechamento de portas		
Estanqueidade		
Verificação de fiação, tubulações e instalações		
Funcionamento das setas		
Funcionamento das luzes		
Funcionamento do sistema de ventilação dos passageiros		
Funcionamento do sistema de ventilação do condutor		
Funcionamento do sistema contra neblina		
Verificação do alinhamento dos eixos		

Testes dinâmicos

Funcionamento completo do veículo em operação		
Aceleração		
Capacidade de frenagem		
Funcionamento do trem motriz		
Suspensão		

Testes em ônibus elétricos

Variável	Metodologia*	Dado
Segurança e desempenho dos componentes		
Continuidade da fiação		
Potência aplicada às baterias e à fiação		
Autonomia		
Funcionamento do sistema de recarga		

**A ser definida pelos responsáveis pelos testes.*

FONTE: Elaborado pelos autores.





MOBILIDADE
URBANA DE
BAIXO CARBONO