

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Mariana Elias Machado

**Análise de adoção de ônibus elétricos  
para a linha “TICEN - UFSC”**

Florianópolis

2024



Mariana Elias Machado

**Análise de adoção de ônibus elétricos  
para a linha “TICEN - UFSC”**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido  
à Universidade Federal de Santa Catarina,  
como requisito necessário para obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Machado, Mariana Elias  
Análise de adoção de ônibus elétricos para a linha "TICEN  
- UFSC" / Mariana Elias Machado ; orientador, Telles  
Brunelli Lazzarin, 2024.  
72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Mobilidade elétrica. 3.  
Transporte Coletivo. 4. Ônibus Elétricos. I. Lazzarin,  
Telles Brunelli. II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Mariana Elias Machado

**Análise de adoção de ônibus elétricos para a linha “TICEN - UFSC”**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para a obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 23 de fevereiro de 2024.

---

Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Civil Danilo Panetta de Faria  
Universidade Federal de Santa Catarina



# Agradecimentos

Agradeço a Deus, por me guiar em cada passo.

Expresso minha gratidão especialmente à minha mãe, Lourdes, e também ao meu pai, Marcos, pelo apoio contínuo ao longo da minha jornada acadêmica e por me incentivarem em minhas escolhas.

Agradeço ao meu parceiro, Lauro, pelo carinho, companheirismo e pelo bom humor, que sempre tornam tudo mais leve.

Agradeço aos meus amigos e colegas de graduação, tanto pelos momentos de estudo e trabalho, quanto pelas ocasiões de descontração, que tornaram o percurso da graduação um pouco menos árduo.

A meu orientador, Professor Telles Brunelli Lazzarin, expresso minha gratidão por todo o auxílio prestado para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do departamento de Engenharia Elétrica e a todos os funcionários da UFSC pelo trabalho, que possibilita a realização de um sonho meu e de tantos outros estudantes, de alcançar uma formação em uma das melhores universidades federais do Brasil.





*“I embrace mistakes. They make you who you are.”*  
*(Beyoncé Knowles-Carter)*



# Resumo

A transição para tecnologias de transporte mais sustentáveis é uma prioridade global para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar os impactos das mudanças climáticas. Florianópolis enfrenta desafios significativos relacionados à mobilidade urbana, como congestionamentos, dependência de combustíveis fósseis e poluição do ar. Neste cenário, a introdução de ônibus elétricos na frota do transporte coletivo da cidade surge como uma solução promissora para enfrentar esses desafios. A adoção de ônibus elétricos pode proporcionar uma série de benefícios, incluindo a redução das emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes, a melhoria da qualidade do ar e a redução poluição sonora, contribuindo para o cumprimento de metas ambientais e climáticas estabelecidas em níveis municipal, estadual e nacional.

A fim de incentivar a implementação de ônibus elétricos no transporte coletivo da cidade de Florianópolis, o presente trabalho introduz conceitos relacionados a este tipo de transporte, lista modelos já utilizados no contexto brasileiro e propõe uma metodologia para desenvolvimento de estratégias para testes, utilizando como exemplo a linha "188 TICEN - UFSC", implementando ônibus elétricos para o quadro de horários executado em dias úteis pela referida linha.

**Palavras-chave:** Mobilidade elétrica. Transporte Coletivo. Ônibus Elétricos.



# Abstract

The transition to more sustainable transportation technologies is a global priority to reduce greenhouse gas emissions and mitigate the impacts of climate change. Florianópolis faces significant challenges related to urban mobility, such as congestion, dependence on fossil fuels and air pollution. In this scenario, the introduction of electric buses into the city's public transport fleet appears to be a promising solution to address these challenges. The adoption of electric buses can provide a number of benefits, including reduced emissions of greenhouse gases and other pollutants, improved air quality and reduced noise pollution, contributing to the achievement of environmental and climate targets set at municipal, state and national levels.

In order to encourage the implementation of electric buses in public transport in the city of Florianópolis, this paper introduces concepts related to this type of transport, lists models already used in the Brazilian context and proposes a methodology for developing test strategies, using the "188 TICEN - UFSC" line as an example, implementing electric buses for the timetable run on weekdays by this line.

**Keywords:** Electric mobility. Public transportation. Electric buses.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Partes de um motor de combustão interna. . . . .	27
Figura 2 – Partes de um motor síncrono de ímã permanente. . . . .	29
Figura 3 – Componentes e funcionamento de um ônibus elétrico híbrido. . . . .	31
Figura 4 – Configuração série convencional de um OEH. . . . .	32
Figura 5 – Configuração paralela de um OEH. . . . .	32
Figura 6 – Componentes e funcionamento de um ônibus elétrico com célula de combustível. . . . .	32
Figura 7 – Componentes e funcionamento de um ônibus elétrico com a bateria. . .	34
Figura 8 – Exemplo de trólebus em operação em São Paulo. . . . .	34
Figura 9 – Exemplo de carregamento condutivo na cidade de Gotemburgo, na Suécia.	36
Figura 10 – Exemplo de carregamento indutivo na cidade de Wenatchee, nos EUA.	37
Figura 11 – Rota da linha 188 TICEN - UFSC. . . . .	46
Figura 12 – Horários de chegada ao <i>campus</i> Trindade. . . . .	47
Figura 13 – Horários de partida do <i>campus</i> Trindade. . . . .	48
Figura 14 – Modelo BYD D9W 20.410 em teste em Ribeirão Preto, São Paulo. . . .	58
Figura 15 – Modelo BYD D11B 41.820 em testes em Curitiba, Paraná. . . . .	58
Figura 16 – Modelo Azure A12 BR em testes na capital de São Paulo. . . . .	59
Figura 17 – Modelo Eletra - Mercedes-Benz O500U piso baixo Padron em testes em Curitiba, Paraná. . . . .	60
Figura 18 – Modelo Eletra - Scania K310 piso baixo Padron em testes em Curitiba, Paraná. . . . .	61
Figura 19 – Modelo E-Millennium o-500 UDA-ELETRA em testes em Curitiba, Paraná. . . . .	62





# Lista de quadros

Quadro 1 – Siglas auxiliares para configurações de ônibus elétricos. . . . .	31
Quadro 2 – Horários da linha 188 TICEN - UFSC nos dias úteis. . . . .	45
Quadro 3 – Primeiro cenário para alocação de ônibus elétricos para a linha "188 TICEN - UFSC". . . . .	50
Quadro 4 – Segundo cenário para alocação de ônibus elétricos para a linha "188 TICEN - UFSC". . . . .	52
Quadro 5 – Terceiro cenário para alocação de ônibus elétricos para a linha "188 TICEN - UFSC". . . . .	54
Quadro 6 – Quarto cenário para alocação de ônibus elétricos para a linha "188 TICEN - UFSC". . . . .	56



# Lista de tabelas

Tabela 1	–	Relação entre número de viagens, quilômetros rodados e porcentagem utilizada da autonomia máxima para o primeiro cenário proposto. . . .	64
Tabela 2	–	Relação entre número de viagens, quilômetros rodados e porcentagem utilizada da autonomia máxima para o segundo cenário proposto. . . .	65
Tabela 3	–	Relação entre número de viagens, quilômetros rodados e porcentagem utilizada da autonomia máxima para o terceiro cenário proposto. . . .	66
Tabela 4	–	Relação entre número de viagens, quilômetros rodados e porcentagem utilizada da autonomia máxima para o quarto cenário proposto. . . .	67
Tabela 5	–	Número de usuários atendidos por período em cada cenário. . . . .	68



# Lista de abreviaturas e siglas

PMSM Motor Síncrono de Ímã Permanente

CC Corrente Contínua

OEH Ônibus Elétrico Híbrido

MCI Motor de Combustão Interna

OEB Ônibus Elétrico a Bateria

PEMFC Células de Combustível de Membrana Eletrolítica de Polímero

OECC Ônibus Elétricos de Célula de Combustível

MP Material Particulado

PTS Partículas Totais em Suspensão

MP10 Partículas Inaláveis

MP2,5 Partículas Inaláveis Finas

FMC Fumaça

TICEN Terminal de Integração do Centro

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

DPAE Departamento de Projetos em Engenharia e Arquitetura

SMTI Secretaria Municipal de Transporte e Infraestrutura

SIM Sistema Integrado de Mobilidade



# Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	26
1.1.1	Objetivo Geral	26
1.1.2	Objetivos Específicos	26
1.2	Organização	26
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	Motor a combustão e motor elétrico	27
2.2	Tecnologias de ônibus elétricos	30
2.2.1	Configurações de montagem de motor e bateria	30
2.2.2	Ônibus elétricos híbridos	30
2.2.3	Ônibus elétricos com célula de combustível	32
2.2.4	Ônibus elétricos a bateria	33
2.2.5	Trólebus	34
2.3	Tecnologias de baterias	35
2.4	Tipos de recarga	35
2.4.1	Estratégias de recarga	37
2.5	Aspectos ambientais	39
2.6	Aspectos socioeconômicos	39
2.7	O uso de ônibus elétricos no mundo	40
2.7.1	Ásia	40
2.7.2	Europa	40
2.7.3	Brasil	41
3	METODOLOGIA	43
3.1	Órgão Responsável	43
3.2	Linha para implementação em Florianópolis	44
3.3	Contexto dos usuários da linha	47
3.4	Estratégias para implementação de ônibus elétricos	48
3.4.1	Cenário 1	48
3.4.2	Cenário 2	51
3.4.3	Cenário 3	53
3.4.4	Cenário 4	55
3.5	Ônibus elétricos disponíveis no mercado brasileiro	57
3.5.1	BYD	57
3.5.2	TEVX Higer	59

3.5.3	Eletra . . . . .	60
4	RESULTADOS . . . . .	63
4.1	Cenário 1 . . . . .	63
4.2	Cenário 2 . . . . .	64
4.3	Cenário 3 . . . . .	65
4.4	Cenário 4 . . . . .	66
4.5	Comparações e recomendações . . . . .	67
5	CONCLUSÃO . . . . .	69
5.1	Recomendações para trabalhos futuros . . . . .	70
	REFERÊNCIAS . . . . .	71



# 1 INTRODUÇÃO

Segundo uma análise realizada pela Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), entre janeiro e fevereiro de 2023, 276 veículos elétricos foram vendidos em Santa Catarina, representando uma média de 4,5 veículos por dia. Mas, se por um lado esses números demonstram um cenário positivo para o estado, por outro, percebe-se que apenas parte dos problemas relacionados à sustentabilidade e mobilidade urbana está sendo tratado.

Trazendo a questão para o cenário local, dados do 6<sup>o</sup> Relatório Anual de Progresso dos Indicadores de Florianópolis (RAPI) apontam que a relação de carros por habitante é um dos fatores que contribuem para o congestionamento das rodovias de Florianópolis: um dos indicadores analisados para avaliar a mobilidade urbana da cidade estabelece que a relação seja inferior a 0,3 veículos/habitantes, enquanto a capital possui uma taxa de 0,63 veículos/habitantes, conforme o número de veículos particulares cadastrados no Detran. Uma possível solução para este problema passa por fornecer à cidade uma maior variedade de meios de transporte de qualidade. Nesse contexto, o incentivo ao uso de transporte coletivo pode desempenhar um papel fundamental.

De acordo com a Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU), um único ônibus consegue transportar a mesma quantidade de pessoas que 40 automóveis. E, além de melhorar a mobilidade urbana, a substituição de veículos individuais por ônibus oferece benefícios significativos ao meio ambiente, uma vez que os automóveis são responsáveis por cerca de 70% das emissões de gases de efeito estufa, enquanto os ônibus emitem apenas um quarto desse valor, conforme o estudo “Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros”, realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) em 2011. Contudo, a substituição dos ônibus a diesel por ônibus elétricos pode contribuir para uma redução ainda maior.

Um estudo realizado pela *International Council on Clean Transportation* (ICCT), em 2019, afirma que os ônibus elétricos podem reduzir as emissões de gases do efeito estufa em cerca de 70% a 85% em comparação aos ônibus a diesel convencionais. Nesse sentido, a adoção de ônibus elétricos surge como uma alternativa ainda mais promissora para os desafios relacionados tanto à sustentabilidade quanto à mobilidade urbana em Florianópolis.

Diante deste cenário, este Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica estuda os principais conceitos de ônibus elétricos e apresenta propostas de adoção de ônibus elétricos em uma rota específica da cidade, visando contribuir com um estudo de caso de mobilidade urbana com veículos elétricos no contexto de Florianópolis.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo fornecer uma análise inicial de substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos no transporte público de Florianópolis, a partir do estudo da linha "188 TICEN - UFSC".

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar os principais elementos (técnicos, desafios, vantagens e desvantagens) do uso de veículos elétricos na mobilidade urbana;
- Fomentar o debate entre mobilidade urbana, transporte coletivo e mobilidade elétrica;
- Propor estratégias para testes iniciais com ônibus elétricos na cidade de Florianópolis;
- Contribuir com a produção de conhecimento científico relacionado à mobilidade elétrica no Brasil.

## 1.2 Organização

O primeiro capítulo do presente trabalho apresenta sua motivação e seus objetivos. No segundo capítulo, são apresentados os conceitos teóricos relacionados a ônibus elétricos. O terceiro capítulo apresenta a metodologia proposta neste trabalho, aplicada à linha "188 TICEN - UFSC", enquanto o quarto capítulo apresenta os resultados comentados de sua implementação. Por fim, o quinto capítulo apresenta a conclusão deste trabalho e sugestões para temas de estudo relacionados ao assunto aqui tratado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

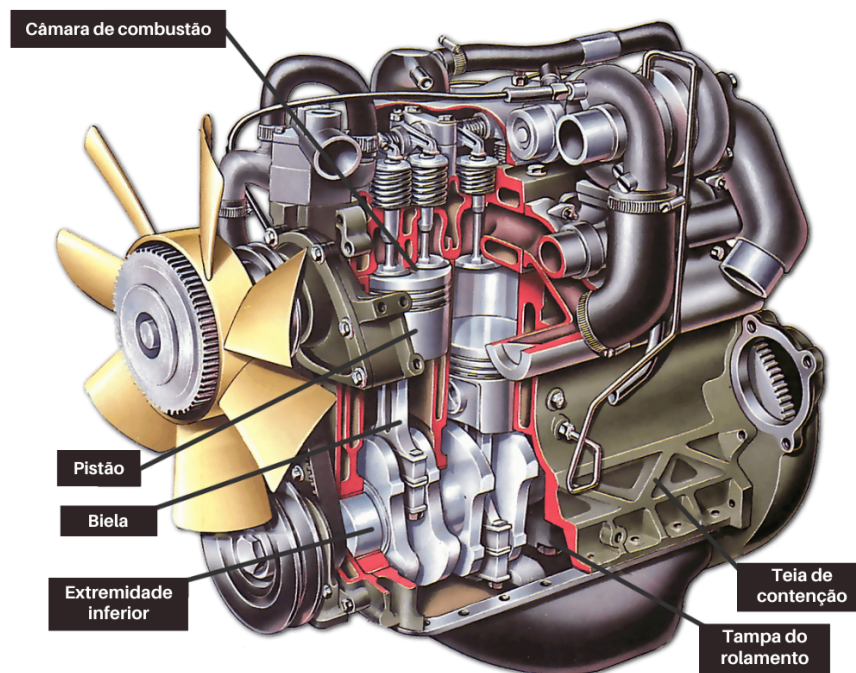
Para uma compreensão adequada da proposta desta análise, faz-se necessário, primeiramente, discorrer sobre conceitos relevantes relacionados a ônibus elétricos.

### 2.1 Motor a combustão e motor elétrico

O motor a combustão é usado para a propulsão de veículos desde o final do século XIX e desde então tem sido a tecnologia mais popular implementada no transporte.

Em um motor de combustão interna (ICE), a ignição e a combustão do combustível ocorrem dentro do próprio motor. Em seguida, o motor converte parcialmente a energia da combustão em trabalho. O motor consiste de um ou mais cilindros fixos e um ou mais pistões móveis. Os gases de combustão em expansão empurram o pistão, que, por sua vez, gira o virabrequim. Por fim, por meio de um sistema de engrenagens no trem de força, esse movimento aciona as rodas do veículo [1]. A Figura 1 apresenta alguns componentes de um motor a combustão.

Figura 1 – Partes de um motor de combustão interna.



Fonte: Traduzido e adaptado de [2].

Em comparação ao motor elétrico, as principais vantagens do motor a combustão são [3]:

- **Infraestrutura de abastecimento:** Em muitas regiões, a infraestrutura de abastecimento de combustível líquido (como gasolina e diesel) já está bem estabelecida, facilitando a recarga dos veículos movidos a combustão. Isso contrasta com a infraestrutura de recarga de veículos elétricos, que ainda está em desenvolvimento e pode ser menos acessível em algumas áreas.
- **Autonomia e tempo de recarga:** Os veículos movidos a combustão geralmente têm uma autonomia maior e podem ser reabastecidos em questão de minutos, enquanto os veículos elétricos podem levar mais tempo para recarregar, especialmente em sistemas de recarga de nível inferior. Isso pode ser visto como uma facilidade para aqueles que desejam viajar longas distâncias sem interrupções prolongadas.
- **Custo inicial:** Embora os custos de aquisição de veículos elétricos estejam diminuindo, os veículos movidos a combustão ainda podem ser mais acessíveis para muitos consumidores.
- **Desempenho em condições extremas:** Os motores a combustão podem ter um desempenho relativamente estável em uma variedade de condições climáticas, enquanto os veículos elétricos podem ter sua autonomia afetada por temperaturas extremas, especialmente em condições de frio intenso.
- **Experiência tradicional do usuário:** Para muitos motoristas, a experiência de dirigir um veículo movido a combustão é mais familiar e pode ser percebida como mais simples do que operar um veículo elétrico, principalmente em termos de recarga e comportamento de condução. Isso pode ser considerado uma facilidade para aqueles que ainda não estão familiarizados com a tecnologia elétrica.

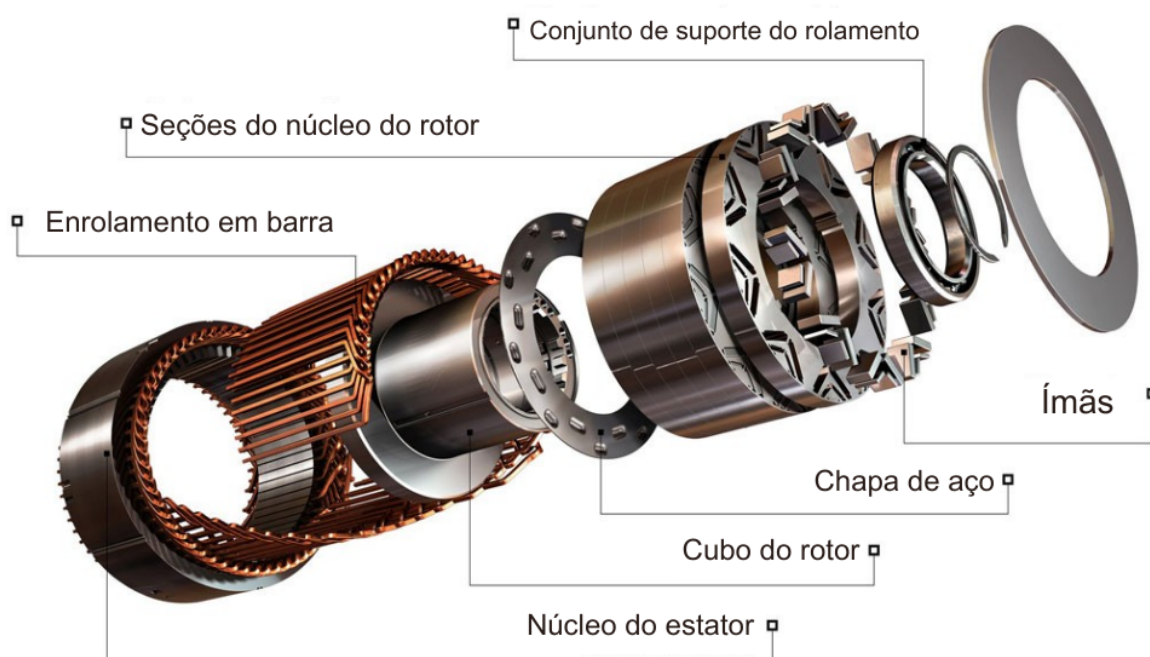
O motor elétrico surgiu em meados do século XIX e começou a se popularizar em meados do século XX. Já foi usado para propulsão de veículos elétricos em diferentes momentos da história, mas acabou não se popularizando por limitações tecnológicas, como a capacidade limitada das baterias e a falta de infraestrutura de recarga. Atualmente, o motor elétrico é utilizado em diversos itens do cotidiano, como máquinas de lavar, cafeteiras, computadores e até escovas de dente.

O motor elétrico possui um funcionamento mais simples em comparação com o motor a combustão. Enquanto o motor a combustão requer a queima de combustível dentro do motor para gerar energia, o motor elétrico funciona convertendo energia elétrica diretamente em energia mecânica. A Figura 2 apresenta um dos tipos de motor elétrico mais utilizados em ônibus elétricos: o motor síncrono de ímã permanente (PMSM).

O PMSM, como qualquer motor elétrico rotativo, consiste em um rotor e um estator. O estator é a parte fixa e o rotor é a parte rotativa. Pode-se dizer também que é um híbrido de um motor de indução e um motor de corrente contínua (CC) sem escovas. Apresenta um rotor de ímã permanente e enrolamentos no núcleo do estator, como um motor CC sem escovas, enquanto a semelhança com um motor de indução dá-se na construção do estator com enrolamentos projetados para criar uma densidade de fluxo senoidal no entreferro da máquina.

O motor PMSM opera com o mesmo princípio que o motor síncrono. Os motores PMSM começam como motores de indução de gaiola de esquilo. Um campo magnético rotativo é criado no entreferro quando o enrolamento trifásico do estator é energizado pela fonte de alimentação trifásica. Na velocidade síncrona, o campo do rotor trava magneticamente com os polos do estator, produzindo torque e permitindo que o rotor continue girando [4].

Figura 2 – Partes de um motor síncrono de ímã permanente.



**Fonte:** Traduzido e adaptado de [4].

Em relação ao motor a combustão, as seguintes vantagens podem ser elencadas [3]:

- **Eficiência energética:** O motor elétrico apresenta uma eficiência maior quando comparado ao motor a combustão. Enquanto motores do primeiro tipo podem alcançar até 90% de eficiência, os do segundo tipo, nos melhores casos, são até cerca de 40% eficientes [5], pois a maior parte de sua energia é perdida em forma de calor.

- **Impacto ambiental:** Enquanto os ônibus convencionais a diesel emitem na atmosfera ao menos 1,28 kg de CO<sub>2</sub> por quilômetro [6], os veículos elétricos não emitem poluentes atmosféricos durante sua operação, o que contribui para a melhoria da qualidade do ar e a redução da poluição sonora nas áreas urbanas. Isso é especialmente importante em cidades onde a qualidade do ar é uma preocupação crescente e onde as regulamentações ambientais estão se tornando mais rigorosas.
- **Menor dependência de combustíveis fósseis:** Os motores elétricos podem ser alimentados por uma variedade de fontes de energia, incluindo renováveis como energia solar, eólica e hidrelétrica. Isso reduz a dependência de combustíveis fósseis para a mobilidade, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa associadas ao transporte.
- **Manutenção simplificada:** Os motores elétricos têm menos peças móveis do que os motores a combustão, o que resulta em menos desgaste mecânico e necessidade de manutenção reduzida ao longo da vida útil do veículo. Além disso, a ausência de fluidos combustíveis e de óleo no motor elétrico simplifica ainda mais os procedimentos de manutenção, reduzindo os custos associados.
- **Condução silenciosa e suave:** Os veículos elétricos oferecem uma experiência de condução mais silenciosa e suave em comparação com os veículos movidos a combustão, devido à ausência de vibrações e ruídos do motor. Isso proporciona um ambiente mais confortável para os ocupantes do veículo e reduz a poluição sonora nas áreas urbanas.

## 2.2 Tecnologias de ônibus elétricos

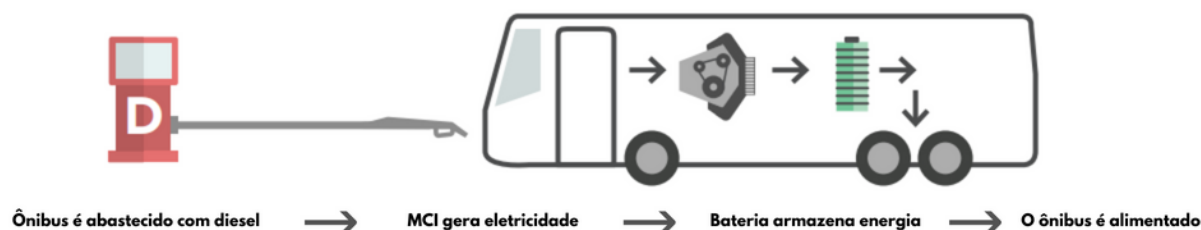
Os principais tipos de ônibus elétricos encontrados no mundo atualmente são os ônibus elétricos híbridos, elétricos com células de combustível e com bateria completa. Seus detalhes são apresentados nas próximas seções.

### 2.2.1 Configurações de montagem de motor e bateria

### 2.2.2 Ônibus elétricos híbridos

Os ônibus elétricos híbridos (OEHs) são compostos, principalmente, por um motor de combustão interna (MCI), geralmente movido a diesel, e um motor elétrico (ME). Possuem também um sistema de armazenamento de energia (baterias ou ultracapacitores), um gerador, um sistema de gerenciamento de energia e elementos de acoplamento para unir os sistemas mecânico e elétrico. A Figura 3 apresenta os componentes de um ônibus elétrico híbrido.

Figura 3 – Componentes e funcionamento de um ônibus elétrico híbrido.



**Fonte:** Traduzido de [7].

A principal vantagem dos OEHS, quando comparados a outros tipos de ônibus elétricos, é o fato de representarem uma transição mais confortável da tecnologia a diesel para a elétrica, pois apresentam poucas mudanças em relação aos ônibus tradicionais.

A configuração dos componentes de um OEH pode ser organizada em três formas principais: série, paralela e série-paralela (mista).

Para melhor entendimento destas configurações, o Quadro 1 apresenta as siglas presente nos diagramas das configurações série e paralela.

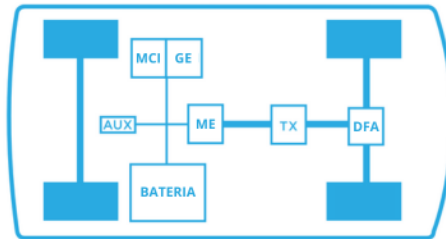
Quadro 1 – Siglas auxiliares para configurações de ônibus elétricos.

Sigla	Significado
AUX	Dispositivos auxiliares
ME	Motor elétrico
DFA	Diferencial automotivo
GE	Gerador
MCI	Motor de combustão interna
TX	Transmissão mecânica
ACT	Acoplamento limitador de torque

**Fonte:** Adaptado de [7].

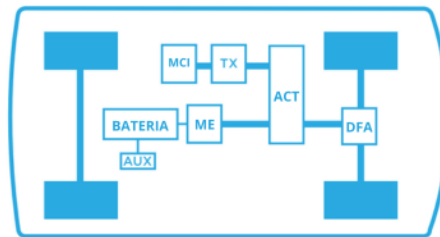
Em geral, a configuração em série, apresentada na Figura 4, é mais eficiente para operação em baixa velocidade, enquanto a configuração paralela, Figura 5, é mais eficiente em termos de energia para operação em maior velocidade [7].

Figura 4 – Configuração série convencional de um OEH.



**Fonte:** Traduzido de [7].

Figura 5 – Configuração paralela de um OEH.



**Fonte:** Traduzido de [7].

### 2.2.3 Ônibus elétricos com célula de combustível

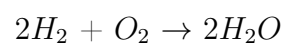
Existem vários tipos de células de combustível, porém as mais indicadas para o uso em veículos elétricos são as células de combustível de membrana eletrolítica de polímero (PEMFCs), também referidas na literatura como células de combustível de membrana de troca de prótons. A Figura 6 apresenta os componentes de um ônibus elétrico com célula de combustível.

Figura 6 – Componentes e funcionamento de um ônibus elétrico com célula de combustível.



**Fonte:** Traduzido de [7].

As células de combustível usam uma reação química entre o hidrogênio armazenado e oxigênio do ambiente para gerar eletricidade. No caso de uma célula de combustível de hidrogênio, a reação é:





Os primeiros ônibus elétricos de célula de combustível (OECC) possuíam suas células de combustível diretamente conectadas ao motor elétrico. Atualmente, esta configuração utiliza um *powertrain* híbrido, semelhante à configuração da Figura 4, onde o MCI é substituído por uma célula de combustível.

As vantagens da hibridização com células de combustível incluem uma redução na tamanho necessário da pilha de células de combustível, permitindo reduzir o custo do veículo e o acesso a tecnologia de frenagem regenerativa para aumentar a eficiência de combustível [7].

#### 2.2.4 Ônibus elétricos a bateria

Os ônibus elétricos a bateria (OEBs) podem ser divididos em duas categorias baseadas em autonomia e rotina de recarga. A primeira categoria é do "OEB de oportunidade", com autonomia mais curta, geralmente entre 30 e 70 quilômetros, com a possibilidade de recargas rápidas ao longo do dia, podendo ir de 80 a 100% de carga de cinco a dez minutos. A segunda categoria é do "OEB noturno", com autonomia mais longa, indicada para completar um dia de serviço, com uma recarga lenta durante a noite. Apesar disso, ônibus desta categoria também podem fazer recargas rápidas durante o dia.

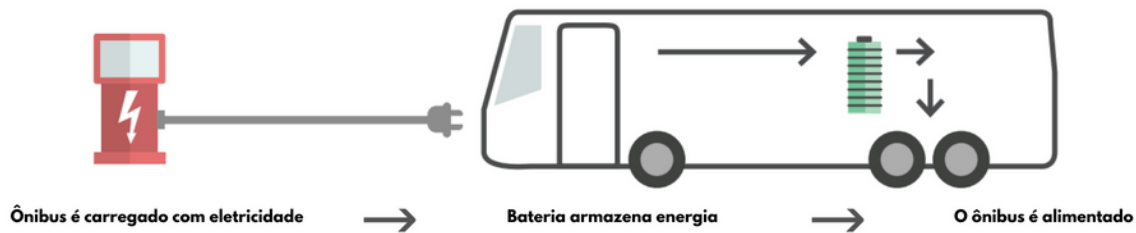
Um exemplo de OEB noturno é o da fabricante americana Proterra: seu OEB de maior autonomia, o E2 max, pode chegar percorrer 560 quilômetros, com um tempo de recarga de cinco horas.

As autonomies dos OEBs podem variar sob diferentes condições de operação: uso de ar-condicionado, volume médio de passageiros, frequência de paradas, tipo de condução do motorista e inclinação da rota são alguns exemplos de fatores que podem afetar significativamente o consumo de energia de um ônibus e, potencialmente, reduzir sua autonomia geral.

As duas principais consequências do aumento da autonomia (o que implica em aumentar o tamanho da bateria) são o aumento do preço de compra do veículo e seu aumento de massa. Este último é de grande relevância, uma vez que pode reduzir tanto a capacidade de passageiros do veículo, quanto a eficiência energética do veículo [7].

A Figura 7 a seguir apresenta a configuração de um OEB.

Figura 7 – Componentes e funcionamento de um ônibus elétrico com a bateria.



Fonte: Traduzido de [7].

### 2.2.5 Trólebus

Existe ainda um outro tipo de ônibus elétrico conhecido como trólebus. Este tipo de veículo utiliza dois coletores de corrente instalados sobre o teto em sua estrutura mecânica, onde ambos realizam movimentos horizontais e verticais independentes e são impulsionados por molas para prover o contato elétrico com a rede elétrica aérea de energia, que tem como principal finalidade o fornecimento de energia para diversos veículos em uma mesma linha [8].

Um trólebus pode circular em vias públicas, em meio aos demais veículos, mas seu trajeto é limitado a rodovias com a estrutura elétrica apropriada para sua alimentação, caso contrário, o veículo para. A Figura 8 apresenta um trólebus em operação na cidade de São Paulo.

Figura 8 – Exemplo de trólebus em operação em São Paulo.



Fonte: Diário do Transporte, 2020.

## 2.3 Tecnologias de baterias

A escolha do tipo de bateria para um ônibus elétrico depende de diversos fatores, incluindo custo, densidade de energia, peso, requisitos de autonomia, segurança e atualizações tecnológicas. As baterias de íon de lítio dominaram o mercado de ônibus elétricos devido ao seu desempenho geral e infraestrutura necessária.

Os tipos mais comuns de baterias usados em ônibus elétricos estão classificados a seguir [9].

1. **Baterias de Íon de Lítio (Li-ion):** as baterias de íon de lítio são o tipo mais usado em ônibus elétricos. São conhecidas por sua alta densidade de energia, o que permite maior autonomia de condução. As baterias de Li-ion são confiáveis e têm uma longa vida útil, tornando-as a escolha preferida da indústria de ônibus elétricos.
2. **Baterias de Fosfato de Ferro e Lítio (LiFePO<sub>4</sub>):** as baterias LiFePO<sub>4</sub> são uma subcategoria das baterias de íon de lítio. Têm como qualidade sua segurança, longa vida útil e estabilidade térmica. Essas baterias são amplamente usadas em ônibus elétricos de regiões onde a segurança é uma preocupação significativa.
3. **Baterias de Níquel-Metal Hidreto (NiMH):** as baterias de NiMH foram usadas em ônibus elétricos mais antigos e ônibus híbridos. Embora sejam menos comuns nos projetos mais atuais devido à sua menor densidade de energia em comparação com as baterias de íon de lítio, ainda são encontradas em alguns modelos de ônibus mais antigos.
4. **Baterias de Estado Sólido:** as baterias de estado sólido são consideradas uma tecnologia promissora que oferece alta densidade de energia, vida útil mais longa e segurança aprimorada. Estão sendo gradualmente incorporadas em ônibus elétricos e outros veículos elétricos, embora não sejam tão comuns quanto as baterias de íon de lítio até o momento.
5. **Supercapacitores:** supercapacitores são usados em alguns ônibus elétricos para complementar as baterias. Eles fornecem descarga rápida e carregamento durante o processo de frenagem regenerativa, ajudando a estender a vida útil da bateria. Embora não sejam o principal meio de armazenamento de energia, desempenham um papel importante na gestão de energia.

## 2.4 Tipos de recarga

As baterias de um ônibus elétrico podem ser carregadas quando o veículo está parado (carregamento estacionário) ou em movimento (carregamento dinâmico). O foco desta seção se dá no carregamento estacionário.

Duas principais tecnologias de carregamento estacionário podem ser usadas para carregar ônibus elétricos: carregamento condutivo (por contato direto) ou carregamento indutivo (sem fio). A substituição de baterias descarregadas por baterias totalmente carregadas também é uma possibilidade, embora ainda não seja comumente usada.

O carregamento condutivo, apresentado na Figura 9, requer o uso de pantógrafos, instalados dentro ou fora do veículo, ou até o encaixe do veículo em uma fonte de energia. Carregadores externos, como pantógrafos instalados em mastros, apresentam custos de infraestrutura mais baixos, pois um único carregador pode recarregar vários ônibus. Carregadores condutivos que transferem até 600 kW de potência estão atualmente disponíveis no mercado. O carregamento condutivo é mais robusto e confiável e é a tecnologia dominante nos dias de hoje.

Figura 9 – Exemplo de carregamento condutivo na cidade de Gotemburgo, na Suécia.



Fonte: [10].

Já os carregadores indutivos transferem energia para os veículos por meio de campos magnéticos, usando duas bobinas colocadas próximas uma da outra (sob o ônibus e sob a superfície da estrada) para transferir a energia. Atualmente, os carregadores indutivos fornecem potências de até 300 kW. Apesar de tempos de carregamento mais curtos e custos de manutenção menores, uma das principais desvantagens do carregamento indutivo é o custo de infraestrutura mais elevado e as potências mais baixas disponíveis no mercado atualmente. Como vantagem, os carregadores indutivos têm um impacto visual menor [11],

como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Exemplo de carregamento indutivo na cidade de Wenatchee, nos EUA.



Fonte: [12].

#### 2.4.1 Estratégias de recarga

O Guia de Eletromobilidade do Governo Federal aponta três estratégias de recarga para ônibus elétricos e pontos que precisam ser observados em cada uma [13]:

1. **Recarga na garagem:** Na recarga na garagem, os ônibus elétricos são alimentados durante um período específico, frequentemente através do carregamento condutivo. 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. Por outro lado, 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 duas e oito horas, dependendo da potência do carregador e da capacidade de armazenamento da bateria.

Se comparada à recarga de oportunidade, os custos para implementação da infraestrutura da recarga na garagem são mais favoráveis. Como os veículos podem ser carregados durante o período da noite e, conseqüentemente, por um intervalo mais longo, a potência necessária para os carregadores pode ser menor, bem como o

impacto na rede elétrica. No entanto, uma grande quantidade de veículos em carregamento simultâneo pode trazer impactos negativos na rede elétrica. Para minimizar esse impacto, recomenda-se que sejam implantados sistemas de recarga inteligente que avaliam o estado de carga de cada veículo e direcionam a energia sob demanda. Outra vantagem dessa estratégia é o custo de eletricidade, que durante a noite tende a ser menor. Outra vantagem deste carregamento é possibilitar maior flexibilidade em termos de rotas.

Para o melhor aproveitamento desta estratégia, é recomendado que a garagem esteja localizada perto das rotas de operação, para que a quilometragem improdutiva, ou seja, o trajeto até a garagem onde o ônibus não está em operação, seja minimizada. Já em termos de infraestrutura, a garagem deve possuir 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 executadas.

2. **Recarga de oportunidade:** Neste caso, o veículo é recarregado ao longo da rota, em locais predefinidos, como terminais ou pontos de ônibus. O tempo de carregamento varia conforme a potência da tecnologia adotada, no entanto, é inferior ao da recarga na garagem, variando de segundos a até alguns minutos para uma carga parcial. A 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 quanto as indutivas para realizar a transmissão de energia. O mais usual é a utilização de 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. 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.

3. **Recarga mista:** Esta estratégia é uma união entre a recarga na garagem e a recarga de oportunidade, onde o veículo pode ter um carregamento noturno na garagem, por exemplo, e recargas de oportunidade durante a operação diurna. A recarga mista possibilita uma redução na necessidade de que o ônibus saia da garagem com uma grande autonomia.

## 2.5 Aspectos ambientais

O impacto dos veículos a diesel nas emissões de carbono é apenas uma das razões para a migração para a tecnologia elétrica. Apesar de ônibus elétricos requererem um investimento inicial maior, durante a vida útil dos veículos os custos de operação e manutenção são mais baixos, o que acaba gerando economia e reduzindo as emissões de gases de efeito estufa que seriam liberadas no escapamento, uma vez que não há combustão. Quanto mais limpa for a matriz elétrica do local onde os veículos elétricos operam, menor será seu impacto climático.

No Brasil, pode ser mencionado o exemplo de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul: no cenário em que toda a frota seria eletrificada em 2023, haveria uma economia de R\$ 3,7 bilhões até o ano de 2050, e R\$ 9 bilhões, se considerados os custos inerentes da poluição na saúde da população de Porto Alegre, entre atendimento a doentes e mortes. Seriam evitadas ainda emissões de, ao menos, 3,5 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> no período 2023-2050 [14].

Já no cenário que considera a eletrificação total da frota em 2036, quando os atuais contratos de concessão se encerram, seriam economizados R\$ 1,5 bilhão e R\$ 4,25 bilhões, se somados custos relacionados ao sistema de saúde local até o ano de 2050. Nesse caso, seriam evitadas emissões de 1,7 milhão de toneladas de CO<sub>2</sub> [14].

## 2.6 Aspectos socioeconômicos

Um dos argumentos mais tangíveis para incentivar a adoção de ônibus elétricos com zero emissão é a saúde da população, pois além do impacto climático, é amplamente reconhecida a associação entre poluição do ar e doenças fatais e não fatais. Isso se deve ao fato da emissão de material particulado (MP), que causa doenças cardiovasculares e respiratórias, ter acentuado impacto local: aqueles que circulam nos ônibus e perto de corredores são especialmente afetados pelas partículas emitidas junto aos gases de escape pela frenagem e pelo desgaste de diferentes partes dos ônibus [15].

Emitido em altas quantidades pelos motores a diesel e um dos principais causadores de doenças, o MP é uma mistura de partículas sólidas e líquidas suspensas no ar. Há tipos de classificação: Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis (MP10), Partículas Inaláveis Finas (MP2,5) e Fumaça (FMC) [16]. O tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que quanto menores, maiores os efeitos provocados, pois penetram profundamente no sistema respiratório, com capacidade de atingir os alvéolos pulmonares.

Bogotá, capital da Colômbia, é um exemplo onde os ônibus elétricos têm se tornado um meio de transporte cada vez mais consolidado na cotidiano da população e como os

efeitos na saúde da população podem sofrer mudanças com esta adoção, conforme aponta o instituto de pesquisa WRI Brasil. Na cidade, estima-se que doenças e hospitalizações prevenidas pela eletrificação planejada podem evitar perdas anuais de cerca de US\$ 50 mil, entre custos diretos, como hospitalizações, e custos indiretos, como perda de dias de trabalho. Em um período acumulado de 30 anos, a cidade evitaria o custo acumulado de mais de 800 milhões de dólares [17].

No Brasil, estima-se que a poluição do ar nas principais regiões metropolitanas e capitais esteja ligada a cerca de 20,5 mil mortes ao ano em decorrência de doenças cardiovasculares e respiratórias e seja responsável por 5,2% das internações de crianças por doenças respiratórias e 8,3% por cento entre os adultos.

O impacto econômico também se dá pelos cerca de 130 mil casos de faltas ao trabalho em decorrência de doenças associadas à poluição, o que representa um custo anual aproximado de R\$ 30 milhões em hospitalizações e ausências no trabalho [18].

## 2.7 O uso de ônibus elétricos no mundo

### 2.7.1 Ásia

Apesar do uso de ônibus elétricos para transporte ter começado na Europa, ainda no século XIX, este meio de transporte começou a se tornar popular no século XXI graças à China: como parte dos esforços para combater a poluição do ar e reduzir as emissões de gases de efeito estufa, em 2009, o governo chinês iniciou projetos-piloto de ônibus elétricos em várias cidades, começando por Shenzhen. Em 2018, a cidade já havia conseguido eletrificar 100% de sua frota, com 16.359 ônibus circulando, sendo considerada a maior frota de ônibus ecológicos do mundo [19]. Os objetivos do governo chinês foram alcançados, visto que já em 2017 Shenzhen havia reduzido as emissões de carbono na cidade em 0,63 milhão de toneladas [20].

### 2.7.2 Europa

Vários países europeus têm aderido ao uso de ônibus elétricos no transporte público, sendo Suécia e Holanda os casos de maior destaque. Amsterdam, capital da Holanda, contava até 2018 com 100 ônibus elétricos, sendo considerada a maior frota de ônibus elétricos em operação na Europa até aquele ano. Os 100 ônibus elétricos articulados cobrem ao todo até 30.000 quilômetros por dia. Suas baterias são carregadas em 20 minutos, ou menos, em pontos de recarga ao longo da rota, o que permite um serviço operante por 24 horas [21].

Já Estocolmo, capital sueca, tem aumentado sua frota elétrica com o objetivo de se tornar uma cidade livre do uso de combustíveis fósseis até 2040. Até 2021, o país com



pouco mais de 10 milhões de habitantes contava com 500 ônibus elétricos híbridos em circulação [11].

### 2.7.3 Brasil

Conforme dados da plataforma E-Bus Radar, em 2022, as cidades brasileiras possuíam ao todo 385,5 mil ônibus em serviço, mas, dentro deste número, apenas 351 unidades eram elétricas, representando menos de 1% do total [22]. Até 2020, as cidades de São Paulo, Campinas, Santos, Bauru, Volta Redonda, Salvador e Brasília já haviam documentado testes com ônibus elétricos em suas frotas [23].

A cidade de Piracicaba, no estado de São Paulo, integrou seis ônibus elétricos à sua frota em 2018 e, desde então, já foram rodados mais de 2,84 milhões de quilômetros no total. Estima-se que cerca de 3 mil toneladas de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) deixaram de ser emitidos desde então, o que seria o equivalente ao plantio de 21.500 árvores [24].

A capital paranaense, Curitiba, iniciou testes com ônibus elétrico em maio de 2023, em uma linha com trajeto de 42,5 quilômetros, chegando a transportar 65 mil pessoas por dia. Para a condução do veículo, a prefeitura afirmou que 11 motoristas foram treinados e o teste durou 20 dias [25].



## 3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho propõe cinco etapas para a realização de testes iniciais de ônibus elétricos no transporte coletivo urbano de Florianópolis. Na primeira etapa, determina-se o órgão responsável pela gestão de funcionamento e pelas informações do sistema de transporte da cidade. A segunda etapa consiste na determinação da linha onde os veículos serão testados. Na terceira etapa, deve-se fazer uma análise do contexto dos usuários da linha onde os ônibus serão aplicados, de modo que a aplicação seja benéfica para este grupo. Na quarta etapa, são propostos cenários para os testes, visando atender ao contingente da demanda de usuários e determinar a quantidade de veículos necessária para a operação. A quinta e última etapa consiste no levantamento de modelos de ônibus elétricos disponíveis no contexto brasileiro, junto a suas especificações, para determinar quais modelos podem atender a demanda exigida.

Para demonstrar a aplicação da metodologia proposta, este trabalho utiliza como exemplo a linha “188 TICEN - UFSC”, integrante do sistema de transporte coletivo intermunicipal de Florianópolis. No entanto, antes de discorrer sobre a metodologia, cabe listar algumas premissas pertinentes tanto ao objeto de análise, quanto aos resultados deste trabalho:

- Os dados sobre operação das linhas de ônibus do município não são abertos, além de não serem de fácil acesso. Portanto, devido a dificuldade na obtenção de informações detalhadas, este trabalho utiliza informações indiretas para a proposição de cenários de implementação de testes de ônibus elétricos;
- A proposição dos cenários de teste não considera a otimização da frota de veículos;
- Os cenários propostos trabalham com os horários já executados na linha, portanto não apresentam sugestões de novos horários;
- A análise se limita apenas a aplicação na referida linha, portanto não há análise sobre o tempo ocioso de cada veículo.

### 3.1 Órgão Responsável

No tocante a transporte coletivo urbano, sempre há um órgão responsável pela gestão do sistema de transporte, que, além de gerir seu funcionamento, também concentra e analisa informações relevantes para a sua operação.

No caso de Florianópolis, a Secretaria Municipal de Transporte e Infraestrutura (SMTI) detém os dados e a responsabilidade pela administração do transporte coletivo

urbano da cidade, sendo, portanto, o órgão que realiza determinações e alterações nas linhas, horários, itinerários, nomenclaturas, pontos de ônibus, entre outras características do Sistema Integrado de Mobilidade (SIM).

## 3.2 Linha para implementação em Florianópolis

É de suma importância conhecer a trajetória a ser percorrida pelos ônibus elétricos, pois através deste processo é possível verificar as vantagens e os percalços na aplicação deste meio de transporte.

A fim de viabilizar a análise sobre a implementação de ônibus elétricos no sistema de transporte coletivo urbano de Florianópolis, optou-se por investigar a rota operada pela linha "188 TICEN - UFSC", exposta na Figura 11.

A seleção desta linha foi motivada, primordialmente, pela sua magnitude reduzida e variações topográficas. Adicionalmente, o fato de ser uma linha vinculada à universidade pode facilitar possíveis investigações sobre mobilidade elétrica no transporte coletivo urbano conduzidas por membros docentes e discentes da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), tendo em vista que 42,34% da comunidade universitária utiliza o transporte coletivo urbano como meio de deslocamento até o *campus* Florianópolis, onde mais da metade deste contingente utiliza esta linha, conforme apontado por pesquisa do Departamento de Projetos em Engenharia e Arquitetura (DPAE) da própria instituição, no período de agosto a setembro de 2022 [26].

Tanto o ponto de origem quanto o ponto de destino situam-se no Terminal Integrado do Centro (TICEN). A extensão total da rota é de 12,2 km [27], percorridos entre vinte e trinta minutos, dependendo das condições do tráfego local. O percurso abrange áreas planas e íngremes, com variação altimétrica entre 3 a 25 metros. São contempladas vinte e duas paradas para embarque e desembarque de passageiros, além do terminal de partida. Durante os dias letivos, este itinerário opera tanto em dias úteis, registrando noventa e cinco viagens diárias, quanto em fins de semana, com quarenta e seis viagens aos sábados e vinte e nove viagens aos domingos, conforme representado no Quadro 2. As partidas do TICEN são realizadas com intervalos que variam entre doze e quinze minutos.

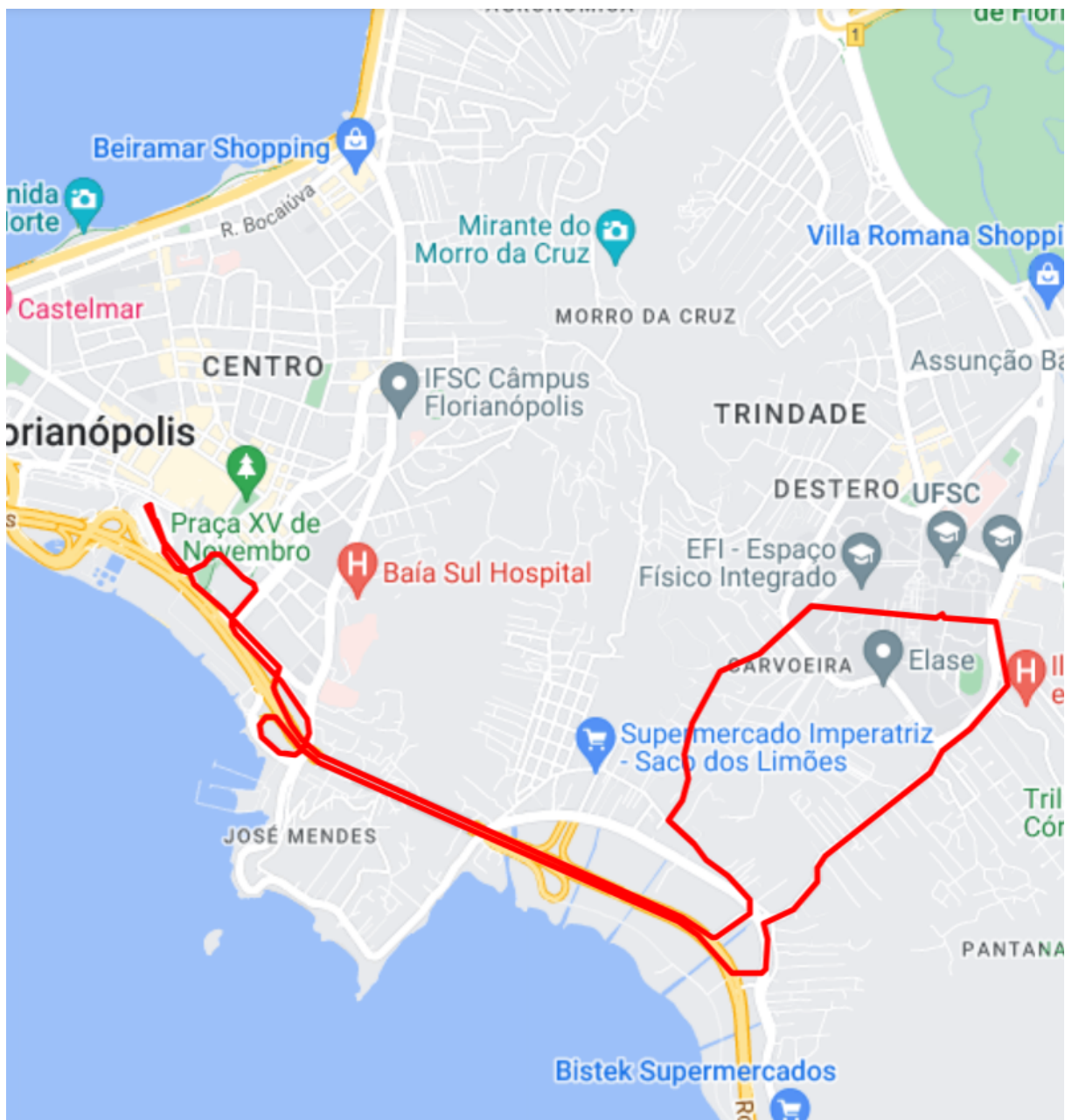
Conforme dados fornecidos pela SMTI, em outubro de 2023, a linha atendeu a 8413 usuários por dia útil. Tendo em vista esta informação, este trabalho foca em propor cenários para a utilização de ônibus elétricos operando em um dia útil.

Quadro 2 – Horários da linha 188 TICEN - UFSC nos dias úteis.

QUADRO DE HORÁRIOS - LINHA 188								
SAÍDA TICEN								
DUT	06:00	06:15	06:26	06:37	06:46	06:55	07:04	07:11
	07:19	07:27	07:36	07:44	07:54	08:04	08:14	08:24
	08:34	08:44	08:54	09:04	09:14	09:24	09:36	09:48
	10:00	10:15	10:30	10:45	10:55	11:05	11:12	11:19
	11:26	11:33	11:40	11:47	11:54	12:01	12:08	12:15
	12:22	12:30	12:40	12:50	13:00	13:12	13:24	13:36
	13:48	14:00	14:15	14:30	14:45	15:00	15:12	15:24
	15:36	15:48	16:00	16:11	16:22	16:33	16:44	16:55
	17:05	17:14	17:23	17:32	17:41	17:50	17:59	18:08
	18:18	18:28	18:35	18:45	18:55	19:05	19:15	19:30
	19:45	20:00	20:15	20:35	20:55	21:10	21:20	21:30
	21:40	21:50	22:05	22:20	22:40	23:00	23:20	

Fonte: Consórcio Fênix.

Figura 11 – Rota da linha 188 TICEN - UFSC.



Fonte: Consórcio Fênix, dezembro de 2023.

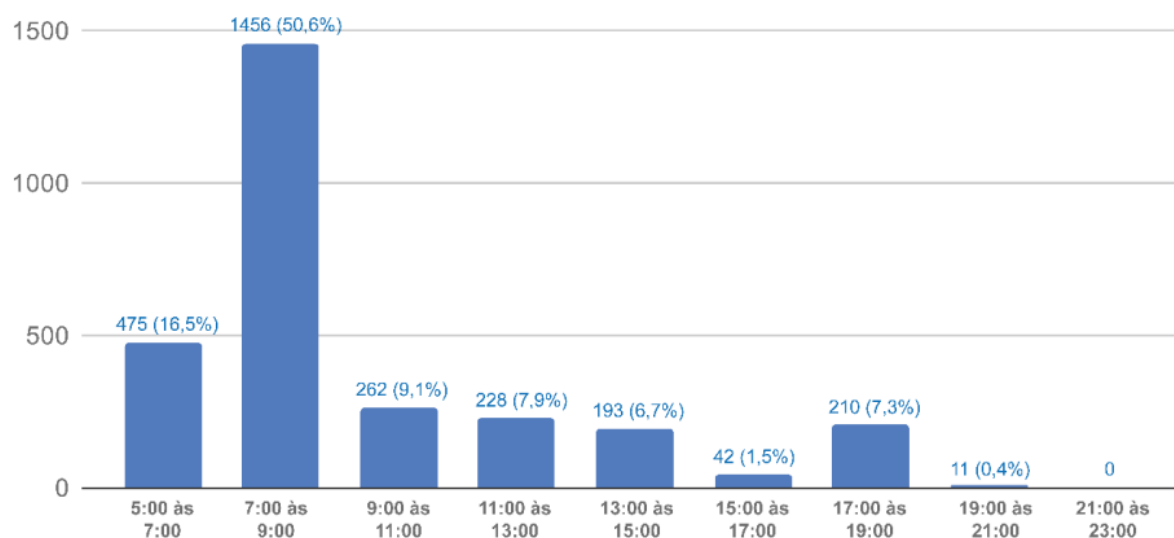
### 3.3 Contexto dos usuários da linha

O entendimento do contexto no qual os ônibus elétricos serão inseridos permite propor um uso mais eficiente do veículos e benéfico para o grupo a ser atendido.

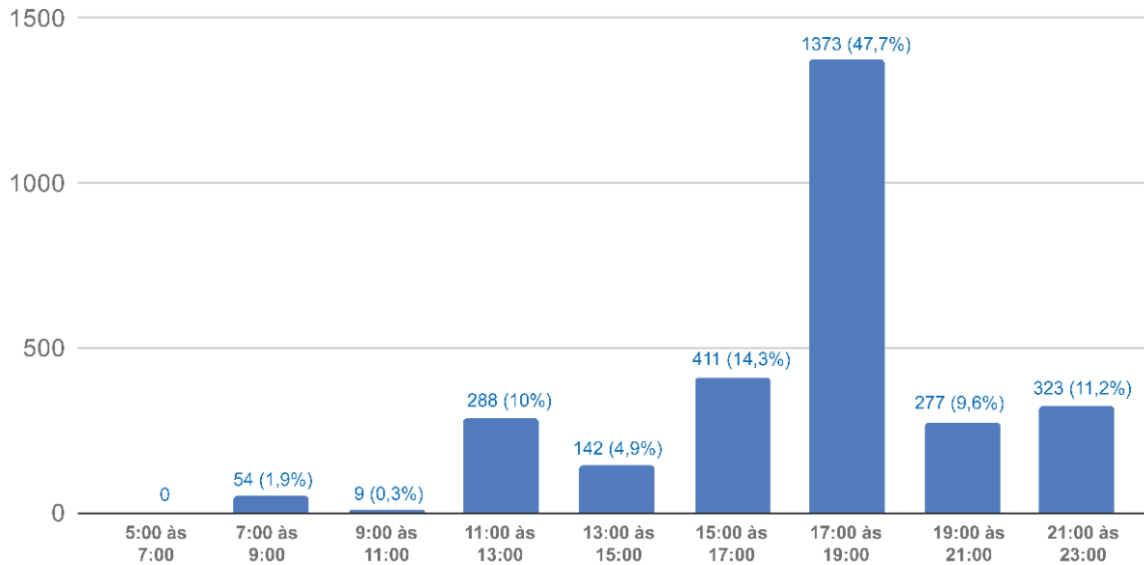
Tendo em vista que a maior parte dos usuários desta linha são membros da comunidade acadêmica e de prestação de serviços da UFSC, cabe a este estudo considerar o contexto de chegada e partida do *campus* Trindade da universidade.

A pesquisa conduzida pelo DPAE indicou que os momentos de chegada ao *campus* Trindade situam-se entre 07 h 00 min e 09 h 00 min, enquanto os momentos de partida abrangem o intervalo entre 17 h 00 min e 19 h 00 min, conforme apresentado nas Figuras 12 e 13. Com esses períodos identificados, detalha-se que os horários de atividades acadêmicas na UFSC compreendem o período matutino das 07 h 30 min às 11 h 50 min, o período vespertino das 13 h 30 min às 18 h 00 min, e o período noturno das 18 h 30 min às 22 h 00 min.

Figura 12 – Horários de chegada ao *campus* Trindade.



Fonte: [28].

Figura 13 – Horários de partida do *campus* Trindade.

Fonte: [28].

### 3.4 Estratégias para implementação de ônibus elétricos

Conhecendo a rota da linha e a rotina dos usuários, é possível propor os cenários para testes dos veículos elétricos no contexto analisado.

Para os testes de implementação de ônibus elétricos na linha “188 TICEN - UFSC” foram propostos quatro cenários com o uso de ônibus articulados e convencionais (também conhecidos como “Padron”) operando diariamente.

Com a inauguração do binário da UFSC em março de 2023, a expectativa de tempo total para a execução da rota situa-se entre 20 e 30 minutos [27]. No entanto, para a proposta dos cenários, foi atribuída uma margem de segurança, e o tempo total do trajeto foi definido entre 35 e 40 minutos, considerando a possibilidade de eventuais problemas no tráfego local e tempo hábil para coleta de informações, na chegada e na partida, sobre a carga disponível, a utilizada e eventuais relatos do motorista a respeito do veículo.

Alinhando as informações de tempo de chegada e partida do *campus* Florianópolis ao intervalo de tempo definido para a execução do trajeto, os horários foram distribuídos de forma a operarem respeitando o tempo mínimo total de 35 minutos para saída e retorno ao TICEN. Assim, o quadro de horários foi organizado e foi definida a quantidade de veículos necessária para implementar os quatro cenários detalhados a seguir.

#### 3.4.1 Cenário 1

No primeiro cenário, definiu-se que os veículos articulados devem ser utilizados durante os períodos de maior demanda de deslocamento entre o *campus* Trindade e o



centro da cidade, e vice-versa, abrangendo o período matutino das 07 h 00 min às 09 h 00 min; o período vespertino das 11 h 00 min às 13 h 00 min; e o período noturno das 16 h 00 min às 19 h 00 min.

Já a utilização dos veículos convencionais está prevista para os momentos de menor fluxo entre os pontos de origem e destino, compreendendo os horários entre 05 h 00 min e 07 h 00 min e 09 h 00 min e 11 h 00 min, no período matutino; entre 13 h 00 min e 16 h 00 min, no período vespertino; e entre 19 h 00 min e 23 h 00 min, no período noturno.

Para a execução deste cenário, faz-se necessária a incorporação de dez ônibus elétricos, onde seis são articulados e quatro convencionais. Nestas condições, os seis veículos articulados operam cinquenta viagens e os convencionais operam quarenta e cinco viagens.

O Quadro 3 relaciona o uso dos veículos e os períodos do dia propostos para o primeiro cenário, onde os ônibus de 1 a 6 representam veículos articulados e os ônibus de 7 a 10 representam veículos convencionais.

Quadro 3 – Primeiro cenário para alocação de ônibus elétricos para a linha "188 TICEN - UFSC".

CENÁRIO 1									
ARTICULADO						CONVENCIONAL			
ÔNIBUS 1	ÔNIBUS 2	ÔNIBUS 3	ÔNIBUS 4	ÔNIBUS 5	ÔNIBUS 6	ÔNIBUS 7	ÔNIBUS 8	ÔNIBUS 9	ÔNIBUS 10
<b>MATUTINO</b>						<b>MATUTINO</b>			
07:04	07:11	07:19	07:27	07:36	07:44	06:00	06:15	06:26	06:37
07:54	08:04	08:14	08:24	08:34	08:44	06:46	06:55	-	-
08:54	09:04	-	-	-	-	09:14	09:24	09:36	09:48
-	-	-	-	-	-	10:00	10:15	10:30	10:45
-	-	-	-	-	-	10:55	-	-	-
<b>VESPERTINO</b>						<b>VESPERTINO</b>			
11:05	11:12	11:19	11:26	11:33	11:40	13:12	13:24	13:36	13:48
11:47	11:54	12:01	12:08	12:15	12:22	14:00	14:15	14:30	14:45
12:30	12:40	12:50	13:00	-	-	15:00	15:12	15:24	15:36
-	-	-	-	-	-	15:48	-	-	-
<b>NOTURNO</b>						<b>NOTURNO</b>			
16:00	16:11	16:22	16:33	16:44	16:55	19:15	19:30	19:45	20:00
17:05	17:14	17:23	17:32	17:41	17:50	20:15	20:35	20:55	21:10
17:59	18:08	18:18	18:28	18:35	18:45	21:20	21:30	21:40	21:50
18:55	19:05	-	-	-	-	22:05	22:20	22:40	23:00
-	-	-	-	-	-	23:20	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4.2 Cenário 2

Visando reduzir a quantidade de veículos articulados em circulação nesta linha, o segundo cenário propõe que estes sejam implementados em períodos relacionados somente às atividades acadêmicas. Pela manhã, como a maior parte das aulas, dentro do período de maior demanda, iniciam entre 07 h 30 min e 08 h 20 min, os veículos articulados devem operar. Da mesma forma, considerando o momento de saída das aulas matutinas e chegada para as aulas vespertinas, os ônibus articulados devem voltar a circular entre 11 h 30 min e 13 h 00 min. Por fim, no período noturno, a circulação fica disposta para acontecer entre 16 h 40 min e 19 h 00 min.

Neste cenário, a utilização dos veículos convencionais está prevista para ocorrer entre 06 h 00 min e 07 h 00 min e 08 h 00 min e 11 h 20 min, no período matutino; entre 13 h 15 min e 15 h 45 min, no período vespertino; e entre 19 h 15 min e 23 h 00 min, no período noturno.

Para a execução deste cenário, faz-se necessária a incorporação de dez ônibus elétricos, onde seis são articulados e quatro convencionais. Nestas condições, os seis veículos articulados operam trinta e oito viagens, enquanto os quatro ônibus convencionais operam cinquenta e sete viagens.

O Quadro 4 relaciona o uso dos veículos e os períodos do dia, onde os ônibus de 1 a 6 representam veículos articulados e os ônibus de 7 a 10 representam veículos convencionais.

Quadro 4 – Segundo cenário para alocação de ônibus elétricos para a linha "188 TICEN - UFSC".

CENÁRIO 2									
ARTICULADO						CONVENCIONAL			
ÔNIBUS 1	ÔNIBUS 2	ÔNIBUS 3	ÔNIBUS 4	ÔNIBUS 5	ÔNIBUS 6	ÔNIBUS 7	ÔNIBUS 8	ÔNIBUS 9	ÔNIBUS 10
<b>MATUTINO</b>						<b>MATUTINO</b>			
07:04	07:11	07:19	07:27	07:36	07:44	06:00	06:15	06:26	06:37
07:54	08:04	-	-	-	-	06:46	06:55	08:14	08:24
-	-	-	-	-	-	08:34	08:44	08:54	09:04
-	-	-	-	-	-	09:14	09:24	09:36	09:48
-	-	-	-	-	-	10:00	10:15	10:30	10:45
-	-	-	-	-	-	10:55	11:05	11:12	11:19
<b>VESPERTINO</b>						<b>VESPERTINO</b>			
11:26	11:33	11:40	11:47	11:54	12:01	13:12	13:24	13:36	13:48
12:08	12:15	12:22	12:30	12:40	12:50	14:00	14:15	14:30	14:45
13:00	-	-	-	-	-	15:00	15:12	15:24	15:36
-	-	-	-	-	-	15:48	16:00	16:11	16:22
<b>NOTURNO</b>						<b>NOTURNO</b>			
16:33	16:44	16:55	17:05	17:14	17:23	19:15	19:30	19:45	20:00
17:32	17:41	17:50	17:59	18:08	18:18	20:15	20:35	20:55	21:10
18:28	18:35	18:45	18:55	19:05	-	21:20	21:30	21:40	21:50
-	-	-	-	-	-	22:05	22:20	22:40	23:00
-	-	-	-	-	-	23:20	-	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4.3 Cenário 3

A premissa do terceiro cenário é a mesma dos anteriores, onde os veículos articulados devem circular no período matutino das 07 h 00 min às 09 h 00 min; no período vespertino das 11 h 00 min às 13 h 00 min; e no período noturno das 16 h 00 min às 19 h 00 min. Porém, após a saída de um veículo articulado, o horário seguinte será conduzido por um veículo convencional.

Os ônibus elétricos convencionais continuarão executando o trajeto entre TICEN e *campus* Trindade em momentos de menor fluxo entre os pontos.

Para a execução deste cenário, faz-se necessária a incorporação de três ônibus elétricos articulados e quatro ônibus elétricos convencionais. Desta forma, os ônibus articulados realizarão vinte e seis viagens, enquanto os convencionais deverão realizar sessenta e nove viagens.

O Quadro 5 relaciona o uso dos veículos e os períodos do dia propostos para o terceiro cenário, onde os ônibus 1 a 3 representam veículos articulados e os ônibus de 4 a 7 representam veículos convencionais.

Quadro 5 – Terceiro cenário para alocação de ônibus elétricos para a linha "188 TICEN - UFSC".

<b>CENÁRIO 3</b>						
<b>ARTICULADO</b>			<b>CONVENCIONAL</b>			
ÔNIBUS 1	ÔNIBUS 2	ÔNIBUS 3	ÔNIBUS 4	ÔNIBUS 5	ÔNIBUS 6	ÔNIBUS 7
<b>MATUTINO</b>			<b>MATUTINO</b>			
07:04	07:19	07:36	06:00	06:15	06:26	06:37
07:54	08:14	08:34	06:46	06:55	07:11	07:27
08:54	-	-	07:44	08:04	08:24	08:44
-	-	-	09:04	09:14	09:24	09:36
-	-	-	09:48	10:00	10:15	10:30
-	-	-	10:45	10:55	-	-
<b>VESPERTINO</b>			<b>VESPERTINO</b>			
11:05	11:19	11:33	11:12	11:26	11:40	11:54
11:47	12:01	12:15	12:08	12:22	12:40	13:00
12:30	12:50	13:12	13:24	13:36	13:48	14:00
-	-	-	14:15	14:30	14:45	15:00
-	-	-	15:12	15:24	15:36	15:48
<b>NOTURNO</b>			<b>NOTURNO</b>			
16:00	16:22	16:44	16:11	16:33	16:55	17:14
17:05	17:23	17:41	17:32	17:50	18:08	18:28
17:59	18:18	18:35	18:45	19:05	19:15	19:30
18:55	-	-	19:45	20:00	20:15	20:35
-	-	-	20:55	21:10	21:20	21:30
-	-	-	21:40	21:50	22:05	22:20
-	-	-	22:40	23:00	23:20	-

Fonte: Elaborado pela autora.

#### 3.4.4 Cenário 4

Por fim, o quarto e último cenário apresenta a proposta de utilização apenas de ônibus elétricos convencionais, sendo necessários seis veículos para executar todos as viagens diárias, totalizando noventa e cinco viagens por dia, nos dias úteis.

O Quadro 6 relaciona o uso dos veículos para o quarto cenário.

Quadro 6 – Quarto cenário para alocação de ônibus elétricos para a linha "188 TICEN - UFSC".

<b>CENÁRIO 4</b>					
<b>CONVENCIONAL</b>					
<b>ÔNIBUS 1</b>	<b>ÔNIBUS 2</b>	<b>ÔNIBUS 3</b>	<b>ÔNIBUS 4</b>	<b>ÔNIBUS 5</b>	<b>ÔNIBUS 6</b>
<b>MATUTINO</b>					
06:00	06:15	06:26	06:37	06:46	06:55
07:04	07:11	07:19	07:27	07:36	07:44
07:54	08:04	08:14	08:24	08:34	08:44
08:54	09:04	09:14	09:24	09:36	09:48
10:00	10:15	10:30	10:45	10:55	-
<b>VESPERTINO</b>					
-	-	-	-	-	11:05
11:12	11:19	11:26	11:33	11:40	11:47
11:54	12:01	12:08	12:15	12:22	12:30
12:40	12:50	13:00	13:12	13:24	13:36
13:48	14:00	14:15	14:30	14:45	15:00
15:12	15:24	15:36	15:48	-	-
<b>NOTURNO</b>					
-	-	-	-	16:00	16:11
16:22	16:33	16:44	16:55	17:05	17:14
17:23	17:32	17:41	17:50	17:59	18:08
18:18	18:28	18:35	18:45	18:55	19:05
19:15	19:30	19:45	20:00	20:15	20:35
20:55	21:10	21:20	21:30	21:40	21:50
22:05	22:20	22:40	23:00	23:20	-

**Fonte:** Elaborado pela autora.



## 3.5 Ônibus elétricos disponíveis no mercado brasileiro

Para executar o transporte da linha “188 TICEN - UFSC”, serão listados oito ônibus elétricos já utilizados nas capitais brasileiras como São Paulo e Curitiba. A lista considera veículos articulados, com capacidade máxima entre 130 a 170 passageiros, e convencionais não-articulados, com capacidade máxima de 70 a 90 passageiros.

Em novembro de 2023, uma linha editorial do jornal Estadão listou os ônibus em testes no Brasil [29] e nas seções seguintes são listados alguns modelos que serão mencionados neste estudo, no capítulo seguinte, como sugestão para aplicação em cada um dos cenários propostos.

### 3.5.1 BYD

A fabricante chinesa BYD possui quatro modelos de ônibus elétricos disponíveis no Brasil, sendo dois convencionais e dois articulados. Os quatro possuem 250 km de autonomia e diferem em quantidade de motores, potência, tempo de carregamento, comprimento, capacidade de passageiros e tipo de piso. As especificações estão listadas a seguir, com dados retirados do catálogo de especificações técnicas do fabricante [30] [31] [32] [33]:

- BYD D9W 20.410 piso baixo e BYD D9A 20.410 piso alto convencionais:
  - 2 motores de 150 kW, com torque de 550 Nm, cada;
  - Carregamento AC de 4 a 5 horas e DC de 2 a 4 horas;
  - Comprimento de 12.265 mm para piso baixo e 12.120 mm para piso alto;
  - Capacidade máxima de 80 passageiros.
  
- BYD D11B 41.820 piso baixo e BYD D11B 41.820 piso alto articulados:
  - 4 motores de 110 kW, com torque de 550 Nm, cada;
  - Carregamento AC de 6 a 7 horas e DC de 2 a 3 horas;
  - Comprimento de 21.320 mm para piso baixo e 22.316 mm para piso alto;
  - Capacidade máxima de 171 passageiros.

A Figura 14 apresenta um ônibus elétrico do modelo BYD D9W 20.410 em testes em Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, em maio de 2021 [34]. Já na Figura 15, é possível ver o BYD D11B 41.820 em testes em Curitiba, Paraná, em junho de 2023 [35].

Figura 14 – Modelo BYD D9W 20.410 em teste em Ribeirão Preto, São Paulo.



Fonte: Estradão.

Figura 15 – Modelo BYD D11B 41.820 em testes em Curitiba, Paraná.



Fonte: Estradão.

### 3.5.2 TEVX Higer

Assim como a BYD, a TEVX Higer também tem sua origem e sede na China, e o modelo Higer Azure A12BR é o primeiro a ser exportado pela fabricante ao Brasil e América Latina. Dentre os veículos convencionais listados, é o que promete maior autonomia, podendo percorrer 270 km com uma única recarga. Possui piso baixo, além de um sistema de “ajoelamento” da suspensão, com o objetivo de auxiliar o acesso de passageiros com dificuldades de locomoção. Mais especificações do fabricante são detalhadas a seguir [36]:

- Higer Azure A12BR convencional:
  - 1 motor de 365 kW, com torque de 3700 Nm;
  - Carregamento DC de 2 a 4 horas;
  - Comprimento de 12.500 mm;
  - Capacidade máxima de 70 passageiros.

Este modelo, apresentado na Figura 16, começou a circular na capital de São Paulo em outubro de 2023 [37] e, em uma parceria com a ENGIE, em novembro do mesmo ano passou a circular no Aeroporto de Congonhas, também na capital [38], com adaptações para que os passageiros possam carregar suas bagagens, o que reduziu a capacidade máxima para 60 passageiros por viagem.

Figura 16 – Modelo Azure A12 BR em testes na capital de São Paulo.



Fonte: Estradão.

### 3.5.3 Eletra

A Eletra é uma fabricante brasileira de veículos elétricos atuante desde 2000. Localizada no ABC paulista, foi a primeira a produzir um ônibus com motor híbrido no Brasil. Em 2013, apresentou ao mercado seu primeiro ônibus puramente elétrico, sendo este um articulado de 18 metros, em testes na frota da Metra, no corredor ABD, em São Paulo. A fabricante nacional possui cinco veículos em testes no país, contando com quatro convencionais e um articulado. No entanto, apenas os três modelos com capacidade máxima superior a 70 passageiros serão considerados para este estudo. Além da capacidade de passageiros, os modelos diferem em autonomia e outras especificações apresentadas a seguir [39] [40] [41]:

- Eletra - Mercedes-Benz O500U piso baixo Padron, mostrado na Figura 17:
  - 1 motor de 395 kW, com torque de 3200 Nm;
  - Carregamento AC de 3,5 horas com carregador de 120 kW/h;
  - Comprimento de 12.150 mm;
  - Capacidade máxima de 70 passageiros;
  - Autonomia entre 200 e 250 km.

Figura 17 – Modelo Eletra - Mercedes-Benz O500U piso baixo Padron em testes em Curitiba, Paraná.



Fonte: Ônibus Brasil.

- Eletra - Scania K310 piso baixo Padron, mostrado na Figura 18:
  - 1 motor de 350 kW, com torque de 3900 Nm;
  - Carregamento AC de 3,5 horas com carregador de 120 kW/h;
  - Comprimento de 15.000 mm;
  - Capacidade máxima de 94 passageiros;
  - Autonomia entre 200 e 250 km.

Figura 18 – Modelo Eletra - Scania K310 piso baixo Padron em testes em Curitiba, Paraná.



Fonte: Ônibus Brasil.

- E-Millennium o-500 UDA piso baixo articulado, mostrado na Figura 19:
  - 1 motor de 200 kW, com torque de 1400 Nm;
  - Carregamento AC de 4 horas com carregador de 120 kW/h;
  - Comprimento de 21.490 mm;
  - Capacidade máxima de 144 passageiros;
  - Autonomia entre 160 e 180 km.

Figura 19 – Modelo E-Millennium o-500 UDA-ELETRA em testes em Curitiba, Paraná.



Fonte: Ônibus Brasil.

## 4 RESULTADOS

Conforme exposto no Estradão [29], um ônibus elétrico pode assumir valores entre R\$ 2,5 e R\$ 3 milhões por unidade. Para a análise dos cenários, assume-se que os veículos convencionais custam R\$ 2,5 milhões e os articulados R\$ 3 milhões cada.

Nas seções seguintes, são apresentados os resultados e análises de cada cenário proposto. É importante salientar que os cenários não consideram desvios da rota original e deslocamentos até a garagem, embora este último possa ser citado em alguns casos.

### 4.1 Cenário 1

Com o uso de dez ônibus elétricos, sendo seis convencionais e quatro articulados, estima-se que o custo de adoção do primeiro cenário seja de R\$ 28 milhões apenas para a aquisição dos veículos.

Caso sejam escolhidos modelos do fabricante BYD, o período matutino tem capacidade para atender até 3580 usuários, o período vespertino pode atender até 3760 usuários e o período noturno pode atender até 4760 usuários.

Para os modelos do fabricante Eletra, sendo o veículo convencional com maior capacidade, ou seja, 94 passageiros, o período matutino tem capacidade para atender até 3426 usuários, o período vespertino pode atender até 3526 usuários, enquanto o período noturno atende até 4478 usuários.

A Tabela 1 apresenta uma relação entre a quantidade de viagens realizada por cada ônibus, a quilometragem rodada e a porcentagem utilizada da autonomia máxima. Nota-se que, com a implementação dos veículos do fabricante BYD, é possível finalizar um dia de operação com um pouco mais da metade da autonomia máxima disponível, enquanto que, para veículos do fabricante Eletra, resta menos da metade, com alguns veículos tendo disponíveis apenas um terço da autonomia máxima em caso de carga completa.

Utilizando como referência o valor de emissão de 1,28 kg de CO<sub>2</sub> por quilômetro percorrido por cada ônibus convencional a diesel [6], a substituição por ônibus elétricos proposta neste cenário deixa de emitir 1,50 toneladas de dióxido de carbono na atmosfera.

Tabela 1 – Relação entre número de viagens, quilômetros rodados e porcentagem utilizada da autonomia máxima para o primeiro cenário proposto.

CENÁRIO 1				
Veículo	Qtd. Viagens	kms rodados	Autonomia utilizada	
			BYD	Eletra
ÔNIBUS 1	10	122,00	48,80%	71,76%
ÔNIBUS 2	10	122,00	48,80%	71,76%
ÔNIBUS 3	8	97,60	39,04%	57,41%
ÔNIBUS 4	8	97,60	39,04%	57,41%
ÔNIBUS 5	8	97,60	39,04%	57,41%
ÔNIBUS 6	8	97,60	39,04%	57,41%
ÔNIBUS 7	14	170,80	68,32%	75,91%
ÔNIBUS 8	11	134,20	53,68%	59,64%
ÔNIBUS 9	10	122,00	48,80%	54,22%
ÔNIBUS 10	10	122,00	48,80%	54,22%

**Fonte:** Elaborado pela autora.

## 4.2 Cenário 2

As condições do segundo cenário são as mesmas do primeiro cenário, diferindo na quantidade de viagens realizadas por cada veículo. Portanto, a adoção deste cenário também apresenta um custo de R\$ 28 milhões para a aquisição dos ônibus elétricos.

Caso sejam escolhidos modelos do fabricante BYD, no período matutino é possível atender até 3280 usuários, enquanto que o período vespertino pode atender até 3490 usuários e o período noturno pode atender até 4250 usuários.

Para os modelos do fabricante Eletra, nas mesmas condições do primeiro cenário, o período matutino tem capacidade para atender até 3408 usuários, o período vespertino pode atender até 3376 usuários e o período noturno tem capacidade para até 4046 usuários.

A Tabela 2 apresenta uma relação entre a quantidade de viagens realizada por cada ônibus, a quilometragem rodada e a porcentagem utilizada da autonomia máxima. Nota-se que, com a implementação dos veículos do fabricante BYD, os ônibus articulados conseguem finalizar um dia de operação com mais da metade da autonomia máxima disponível, enquanto que, para veículos do fabricante Eletra, resta aproximadamente a metade da autonomia máxima em caso de carga completa. Para ambos os fabricantes, os ônibus convencionais finalizam o dia de operação com cerca de um terço disponível da autonomia máxima.

Neste cenário, a substituição por ônibus elétricos deixa de emitir 1,47 toneladas de dióxido de carbono na atmosfera.



Tabela 2 – Relação entre número de viagens, quilômetros rodados e porcentagem utilizada da autonomia máxima para o segundo cenário proposto.

CENÁRIO 2				
Veículo	Qtd. Viagens	kms rodados	Autonomia utilizada	
			BYD	Eletra
ÔNIBUS 1	8	97,60	39,04%	57,41%
ÔNIBUS 2	7	85,40	34,16%	50,24%
ÔNIBUS 3	6	73,20	29,28%	43,06%
ÔNIBUS 4	6	73,20	29,28%	43,06%
ÔNIBUS 5	5	61,00	24,40%	35,88%
ÔNIBUS 6	5	61,00	24,40%	35,88%
ÔNIBUS 7	15	183,00	73,20%	81,33%
ÔNIBUS 8	14	170,80	68,32%	75,91%
ÔNIBUS 9	14	170,80	68,32%	75,91%
ÔNIBUS 10	14	170,80	68,32%	75,91%

**Fonte:** Elaborado pela autora.

### 4.3 Cenário 3

Com o uso de sete ônibus elétricos, sendo três convencionais e quatro articulados, estima-se que o custo de adoção do terceiro cenário seja de R\$ 19 milhões apenas para a aquisição dos veículos.

Com modelos do fabricante BYD, no período matutino é possível atender até 2950 usuários, enquanto que o período vespertino pode atender até 3130 usuários e o período noturno pode atender até 3860 usuários.

Já com modelos do fabricante Eletra, nas mesmas condições do primeiro cenário, o período matutino tem capacidade para atender até 3426 usuários, o período vespertino pode atender até 3176 usuários e o período noturno tem capacidade para até 3978 usuários.

A Tabela 3 apresenta uma relação entre a quantidade de viagens realizada por cada ônibus, a quilometragem rodada e a porcentagem utilizada da autonomia máxima. Nota-se que, com a implementação dos veículos do fabricante BYD, os ônibus articulados conseguem finalizar um dia de operação com mais da metade da autonomia máxima disponível, enquanto que, para veículos do fabricante Eletra, resta menos da metade da autonomia máxima em caso de carga completa. Para ambos os fabricantes, os ônibus convencionais finalizam o dia de operação com menos de um quinto da autonomia máxima disponível.

Neste cenário, a substituição por ônibus elétricos deixa de emitir 1,48 toneladas de dióxido de carbono na atmosfera.

Tabela 3 – Relação entre número de viagens, quilômetros rodados e porcentagem utilizada da autonomia máxima para o terceiro cenário proposto.

CENÁRIO 3				
Veículo	Qtd. Viagens	kms rodados	Autonomia utilizada	
			BYD	Eletra
ÔNIBUS 1	10	122,00	48,80%	71,76%
ÔNIBUS 2	8	97,60	39,04%	57,41%
ÔNIBUS 3	8	97,60	39,04%	57,41%
ÔNIBUS 4	18	219,60	87,84%	97,60%
ÔNIBUS 5	18	219,60	87,84%	97,60%
ÔNIBUS 6	17	207,40	82,96%	92,18%
ÔNIBUS 7	16	195,20	78,08%	86,76%

**Fonte:** Elaborado pela autora.

#### 4.4 Cenário 4

Com o uso de seis ônibus elétricos convencionais, estima-se que o custo de adoção do quarto cenário seja de R\$ 15 milhões, apenas para a aquisição dos veículos.

Para modelos do fabricante BYD, os períodos matutino e vespertino têm capacidade para atender até 2320 usuários cada e o período noturno pode atender até 2960 usuários.

Já com modelos do fabricante Eletra, nas mesmas condições do primeiro cenário, os períodos matutino e vespertino têm capacidade para atender até 2726 usuários cada e o período noturno tem capacidade para até 3478 usuários.

A Tabela 4 apresenta uma relação entre a quantidade de viagens realizada por cada ônibus, a quilometragem rodada e a porcentagem utilizada da autonomia máxima.

Nota-se que todos os veículos finalizam o dia de operação com autonomia disponível entre um quinto e um sexto, em relação à autonomia máxima.

Neste cenário, a substituição por ônibus elétricos deixa de emitir 1,48 toneladas de dióxido de carbono na atmosfera.

Tabela 4 – Relação entre número de viagens, quilômetros rodados e porcentagem utilizada da autonomia máxima para o quarto cenário proposto.

CENÁRIO 4				
Veículo	Qtd. Viagens	kms rodados	Autonomia utilizada	
			BYD	Eletra
ÔNIBUS 1	16	195,20	78,08%	86,76%
ÔNIBUS 2	16	195,20	78,08%	86,76%
ÔNIBUS 3	16	195,20	78,08%	86,76%
ÔNIBUS 4	16	195,20	78,08%	86,76%
ÔNIBUS 5	16	195,20	78,08%	86,76%
ÔNIBUS 6	15	183,00	73,20%	81,33%

**Fonte:** Elaborado pela autora.

## 4.5 Comparações e recomendações

Analisando os resultados apresentados nas seções 4.1, 4.2 e 4.3, é possível concluir que os cenários 1 a 3 conseguem atender à demanda de usuários por dia útil, com sobra de 1500 a 3600 vagas para usuários por dia, independente da escolha de ônibus de um determinado fabricante. Já para o cenário apresentado na seção 4.4, caso sejam escolhidos ônibus do fabricante BYD, não é possível atender o número de usuários total, visto que um dia de operação apenas com ônibus convencionais consegue suprir apenas 7600 usuários, 813 a menos que o necessário. Em caso de escolha dos modelos do fabricante Eletra, será possível atender 8930 usuários a todo, 517 a mais que o valor informado pela SMTI. Os valores totais de usuários por cenários são expostos na Tabela 5.

No que se refere a aproveitamento de autonomia, o cenário 3 apresenta melhor utilização do valor total, porém não é recomendada a escolha de ônibus convencionais do fabricante Eletra, visto que a autonomia total de 220km é utilizada quase inteiramente durante o dia, o que pode ser prejudicial caso o ponto de recarga não esteja localizado nas proximidades da garagem. No mesmo quesito, o cenário 4 apresenta um bom uso da autonomia total, com uso de cerca de 80% do valor disponível, além de possuir um valor mais balanceado entre todos os veículos testados.

Os cenários 1 e 2 apresentam um bom aproveitamento da autonomia, trabalhando com cerca de metade do valor total disponível. No entanto, o cenário 1, conforme exposto na Tabela 1, demonstra valores satisfatórios em casos de disponibilidade para realizar testes e implementação em outra linhas.

Analisados os quesitos mais relevantes, este estudo recomenda a escolha do cenário 1 para a realização de testes com ônibus elétricos na linha "188 TICEN - UFSC", com operação de veículos da BYD, que, apesar de menor capacidade para transporte de

passageiros nos ônibus convencionais, apresenta maior capacidade de usuários no total.

Tabela 5 – Número de usuários atendidos por período em cada cenário.

<b>BYD</b>				
	MATUTINO	VESPERTINO	NOTURNO	TOTAL
CENÁRIO 1	3580	3760	4760	12100
CENÁRIO 2	3280	3490	4250	11020
CENÁRIO 3	2950	3130	3860	9940
CENÁRIO 4	2320	2320	2960	7600
<b>ELETRA</b>				
	MATUTINO	VESPERTINO	NOTURNO	TOTAL
CENÁRIO 1	3426	3526	4478	11430
CENÁRIO 2	3408	3376	4046	10830
CENÁRIO 3	3076	3176	3978	10230
CENÁRIO 4	2726	2726	3478	8930

**Fonte:** Elaborado pela autora.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou elementos do uso de veículos elétricos no transporte coletivo urbano e propôs uma metodologia para a construção de estratégias para a adoção de ônibus elétricos no transporte coletivo de Florianópolis, iniciando os testes com a linha "188 TICEN - UFSC".

Embora o investimento inicial para aquisição de ônibus elétricos seja mais elevado, se comparado aquisição de ônibus a diesel, que custam entre R\$ 440.000,00 e R\$ 750.000,00, este trabalho demonstrou que há ganhos na substituição da segunda tecnologia pela primeira, principalmente em questões relacionadas a impactos ambientais e saúde da população. Esta mudança pode ser realizada de forma gradual, inserindo os ônibus elétricos nos diferentes contextos da cidade a partir de rotas específicas, utilizando os passos apresentados neste estudo e analisando diferentes quadros de implementação.

Para este trabalho, foram propostos cenários com diferentes alocações de veículos convencionais e articulados, de fabricantes diferentes. No contexto da comunidade acadêmica, foram propostos quatro cenários, sendo possível observar que, enquanto o primeiro cenário é o ideal para ser aplicado aos momentos do ano com período letivo ativo, onde há alta demanda, o quarto cenário, apesar de não recomendado para o quadro de horários realizado durante o período letivo, pode ser executado em período de férias, geralmente entre janeiro e março, fazendo com que veículos articulados não sejam alocados de maneira desnecessária. Também foi possível verificar que, durante os três períodos do dia, é possível atender o valor informado de usuários fornecido pela a Secretaria Municipal de Transportes e Infraestrutura (SMTI) com certa folga, possibilitando, inclusive, um aumento passageiros. Foi possível observar também que em quase todos os cenários houve "sobra" de autonomia, podendo motivar uma segunda fase de teste, onde os ônibus elétricos disponibilizados possam operar em mais de uma linha, tornando a aquisição ainda mais vantajosa.

Além de poder alocar os veículos em outras linhas, encontra-se no horizonte a possibilidade de aumento do quadro de horários das linhas sem causar graves impactos ambientais. O aumento da disponibilização de horários é uma constante reivindicação da população usuária do transporte coletivo de Florianópolis, então é possível concluir que esta iniciativa pode trazer mais conforto aos passageiros durante as viagens, o que, inclusive, pode ter como consequência incentivar a própria população a utilizar mais o transporte coletivo. Destaca-se ainda que, para os cenários apresentados, apenas a recarga na garagem seria o suficiente, o que traz mais vantagens à implementação de infraestrutura de recarga sem grandes mudanças.

Discutidas as análises realizadas para o caso da linha que conecta o centro da

cidade à universidade, pode-se afirmar que este trabalho apresenta um guia a ser seguido antes da aquisição de ônibus elétricos, permitindo que a escolha da quantidade de ônibus ou forma de operação seja previamente examinada dentro de um contexto específico.

Por fim, espera-se que este trabalho possa contribuir de alguma forma para que Florianópolis, intitulada “Ilha do Silício” por ser um polo de inovação, possa acompanhar as outras duas das três capitais do sul, que se encontram em fase de testes e devem iniciar a implementação de ônibus elétricos em suas frotas, enquanto a administração pública da capital catarinense não apresenta esse tema à população como uma de suas prioridades.

## 5.1 Recomendações para trabalhos futuros

Esta seção apresenta sugestões de temas que podem ser abordados a partir da presente análise, visando contribuir com o desenvolvimento de conhecimento científico para a mobilidade elétrica no transporte coletivo da cidade de Florianópolis:

- Propostas de uso dos ônibus elétricos em outras linhas durante os períodos ociosos;
- Propostas de uso dos ônibus elétricos com recargas parciais durante o dia;
- Estrutura da rede elétrica para atender à demanda de recarga de ônibus elétricos;
- Sugestão de pontos de recarga para diferentes estratégias de carregamento;
- Impactos do carregamento de ônibus elétricos no sistema elétrico e possíveis soluções;
- Estudos de modelos de negócio para eletrificação da frota do transporte coletivo de Florianópolis;
- Impacto na tarifa de uso do transporte coletivo com a substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos;
- Análise de simulação de desempenho para ônibus elétricos selecionados em rotas específicas;
- Variações na autonomia de ônibus elétricos em função do envelhecimento ou ciclo de recarga das baterias;
- Estudos comparativos sobre a substituição de ônibus a diesel por ônibus movidos a hidrogênio.

# Referências

- 1 INTERNAL Combustion Engine Basics. 2013. Disponível em: <<https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/internal-combustion-engine-basics>>. Citado na página 27.
- 2 ROSE, B. What are the main components of a diesel engine? *Medium*, 2023. Disponível em: <<https://medium.com/@Breadarose/what-are-the-main-components-of-a-diesel-engine-9c5177790ec5>>. Citado na página 27.
- 3 NEOCHARGE, E. *Diferença entre carro elétrico e carro a combustão interna*. Disponível em: <<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/diferenca-carro-eletrico-e-combustao#motor>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- 4 GYANIKI. *Everything You Need To Know About PMSM Motor: What, Why and How?* 2022. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/everything-you-need-know-pmsm-motor-what-why-how-gyaniki/>>. Citado na página 29.
- 5 CIRIACO, R. Carro elétrico dá banho em eficiência se comparado ao combustível sintético. *Inside Evs*, 2023. Disponível em: <<https://insideevs.uol.com.br/news/662433/carros-eletricos-combustiveis-sinteticos-eficiencia/>>. Citado na página 29.
- 6 CARVALHO, C. H. R. de. *Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros*. [S.l.], 2011. Disponível em: <[https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td\\_1606.pdf](https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 63.
- 7 CARTER, L.; VARGHESE, J. *Electric Bus Technology - Final Report*. [S.l.], 2017. Disponível em: <[https://www.mrcagney.com/uploads/documents/MRC\\_Electric\\_Bus\\_Report\\_\\_11072017.pdf](https://www.mrcagney.com/uploads/documents/MRC_Electric_Bus_Report__11072017.pdf)>. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 34.
- 8 BORTOLOTO, E. R.; BIZARRIA, F. C. P.; BIZARRIA, J. W. P. Proposta de automação aplicada em coletor de corrente para trólebus. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos20/403077.pdf>>. Citado na página 34.
- 9 TYPES, characteristics and performance influencing factors of electric bus batteries. 2023. Disponível em: <<https://www.tycorun.com/blogs/news/electric-bus-batteries#Types-and-characteristics-of-electric-bus-batteries>>. Citado na página 35.
- 10 OPPCHARGE in use. 2019. Disponível em: <<https://www.oppcharge.org>>. Citado na página 36.
- 11 GOROSABEL, O. L. de B.; XYLIA, M.; SILVEIRA, S. A framework for the assessment of electric bus charging station construction: A case study for stockholm's inner city. *Sustainable Cities and Society*, v. 78, p. 103610, 2022. ISSN 2210-6707. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670721008751>>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 41.

- 12 WIRELESS charging halves e-bus operating cost for Link Transit. 2022. Disponível em: <<https://www.electrive.com/2022/06/23/wireless-chargers-help-to-halve-operating-costs-for-link-transit/>>. Citado na página 37.
- 13 REGIONAL, M. do D. *Guia de Eletromobilidade: Orientações para estruturação de projetos no transporte coletivo por ônibus*. [S.l.], 2022. Disponível em: <[https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/Guia\\_Eletromobilidade.pdf](https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/Guia_Eletromobilidade.pdf)>. Citado na página 37.
- 14 BISOL, C. *Estudo aponta benefícios econômicos e ambientais de ônibus elétricos na Capital*. 2022. Disponível em: <<https://prefeitura.poa.br/smamus/noticias/estudo-aponta-beneficios-economicos-e-ambientais-de-onibus-eletricos-na-capital>>. Citado na página 39.
- 15 SIQUEIRA, E.; TAVARES, V.; SILVA, S. Ônibus elétricos no rio de janeiro, salvador e campinas podem gerar r\$ 1,5 bilhão em benefícios de saúde. *WRI Brasil*, 2023. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/onibus-eletricos-rio-de-janeiro-salvado-campinas-bilhao-beneficios-saude>>. Citado na página 39.
- 16 ECYCLE, E. Poluentes atmosféricos: principais tipos e efeitos. *eCycle*, 2023. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/poluentes-atmosfericos/>>. Citado na página 39.
- 17 SIQUEIRA, E.; CORRÊA, F. Adoção de ônibus elétricos em bogotá pode salvar vidas e reduzir emissões e custos. *WRI Brasil*, 2020. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/adocao-de-onibus-eletricos-em-bogota-pode-salvar-vidas-e-reduzir-emissoes-e-custos>>. Citado na página 40.
- 18 BETTI, L.; GARCIA, M.; CORRÊA, F. Ferramenta revela ganhos em saúde e economia da substituição de ônibus a diesel por elétricos. *WRI Brasil*, 2020. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/ferramenta-revela-ganhos-em-saude-e-economia-da-substituicao-de-onibus-diesel-por>>. Citado na página 40.
- 19 POON, L. How china took charge of the electric bus revolution. *Bloomberg*, 2018. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-10-09/what-mapping-every-tree-in-new-york-city-reveals>>. Citado na página 40.
- 20 SHENZHEN e-Mobility System. 2021. Disponível em: <<https://www.gihub.org/innovative-funding-and-financing/case-studies/shenzhen-e-mobility-system/#:~:text=Reduced%20pollution%3A%20Combustion%20engine%20buses,million%20tonnes%20of%20particulate%20matter.>> Citado na página 40.
- 21 ELECTRIC bus, main fleets and projects around the world. 2023. Disponível em: <<https://www.sustainable-bus.com/electric-bus/electric-bus-public-transport-main-fleets-projects-around-world/>>. Citado na página 40.



- 22 COSTA, D. Transporte público operado por ônibus elétrico avança no Brasil. *Mobilidade Estadão*, 2022. Disponível em: <<https://mobilidade.estadao.com.br/patrocinados/transporte-publico-por-onibus-eletrico-avanca-no-brasil/>>. Citado na página 41.
- 23 QUAIS cidades já têm ônibus elétricos no Brasil? 2020. Disponível em: <<https://summitmobilidade.estadao.com.br/guia-do-transporte-urbano/quais-cidades-ja-tem-onibus-eletricos-no-brasil/>>. Citado na página 41.
- 24 ÔNIBUS elétricos da BYD pouparam cerca de 3.000 toneladas de CO2 na atmosfera em 5 anos de operação na Viação Piracicabana. 2023. Disponível em: <<https://11nq.com/IwM75>>. Citado na página 41.
- 25 PR g1. *Ônibus elétrico com passageiros começa a ser testado em Curitiba; prefeitura quer transporte público sustentável até 2024*. 2023. Disponível em: <<https://acesse.one/nKrpj>>. Citado na página 41.
- 26 SOARES, M. *Relatório de Pesquisa de Modo de Deslocamento à UFSC*. [S.l.], 2023. Citado na página 44.
- 27 ITINERÁRIOS UFSC pós-binário. Disponível em: <<https://redeplanejamento.pmf.sc.gov.br/projetos/remob/src/uploads/Transporte%20Coletivo%20-%20Binário%20Pantanal%20Carvoeira.3f2f7006a370d147b88ba7353b89d6a2.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 48.
- 28 MAIORIA das pessoas vai de ônibus e de carro para os campi da UFSC, aponta pesquisa. 2023. Disponível em: <<https://encr.pw/qwGsK>>. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- 29 RAMOS, A. Ônibus elétrico já é realidade no Brasil; veja os modelos disponíveis. *Estradão*, 2023. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/onibus/onibus-eletrico-ja-e-realidade-no-brasil-veja-os-modelos-disponiveis/>>. Citado 2 vezes nas páginas 57 e 63.
- 30 CATÁLOGO de Especificações Técnicas do ônibus elétrico BYD D9W 20.410. 2022. BYD. Disponível em: <[https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/10/D9W-ATUALIZADO-2022\\_compressed.pdf](https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/10/D9W-ATUALIZADO-2022_compressed.pdf)>. Citado na página 57.
- 31 CATÁLOGO de Especificações Técnicas do ônibus elétrico BYD D9A 20.410. 2022. BYD. Disponível em: <[https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/10/D9A-ATUALIZADO-2022\\_compressed.pdf](https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/10/D9A-ATUALIZADO-2022_compressed.pdf)>. Citado na página 57.
- 32 CATÁLOGO de Especificações Técnicas do ônibus elétrico BYD D11B 41.820. 2022. BYD. Disponível em: <[https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/10/D11B-ATUALIZADO-2022\\_compressed.pdf](https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/10/D11B-ATUALIZADO-2022_compressed.pdf)>. Citado na página 57.
- 33 CATÁLOGO de Especificações Técnicas do ônibus elétrico BYD D11A 41.820. 2022. BYD. Disponível em: <[https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/10/D11A-ATUALIZADO-2022\\_compressed.pdf](https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/10/D11A-ATUALIZADO-2022_compressed.pdf)>. Citado na página 57.
- 34 ESTRADÃO, R. *Ônibus elétrico da BYD entra em testes em Ribeirão Preto*. 2021. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/onibus/onibus-eletrico-da-by-entra-em-testes-em-ribeirao-preto/>>. Citado na página 57.

- 35 ESTRADÃO, R. *Ônibus elétrico articulado entra em testes em Curitiba*. 2023. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/onibus/onibus-eletrico-articulado-entra-em-testes-em-curitiba/>>. Citado na página 57.
- 36 CATÁLOGO de Especificações Técnicas do ônibus elétrico Azure A12Br. 2023. Higer. Disponível em: <[https://www.tevx.com.br/\\_files/ugd/bf6ee2\\_53a3663603574c6b92cd0aa51099b829.pdf](https://www.tevx.com.br/_files/ugd/bf6ee2_53a3663603574c6b92cd0aa51099b829.pdf)>. Citado na página 59.
- 37 ESTRADÃO, R. *Ônibus elétrico Higer Azure começa a circular em São Paulo*. 2023. Disponível em: <<https://estradao.estadao.com.br/onibus/onibus-eletrico-higer-azure-comeca-a-circular-em-sao-paulo/>>. Citado na página 59.
- 38 VENDITTI, M. S. *Congonhas testa ônibus elétricos para transportar passageiros aos aviões*. 2023. Disponível em: <<https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/onibus-eletricos-farao-transporte-de-passageiros-em-congonhas/>>. Citado na página 59.
- 39 CATÁLOGO de Especificações Técnicas do ônibus elétrico Eletra - Mercedes-Benz O500U piso baixo Padron. 2023. Eletra. Disponível em: <<https://www.eletrabus.com.br/eletrico-puro/e-bus-121m/>>. Citado na página 60.
- 40 CATÁLOGO de Especificações Técnicas do ônibus elétrico Eletra - Scania K310 piso baixo Padron. 2023. Eletra. Disponível em: <<https://www.eletrabus.com.br/eletrico-puro/eletrico-puro-15m/>>. Citado na página 60.
- 41 CATÁLOGO de Especificações Técnicas do ônibus elétrico Eletra - Mercedes-Benz O500UDA piso baixo articulado. 2023. Eletra. Disponível em: <<https://www.eletrabus.com.br/eletrico-puro/e-bus-215m-articulado/>>. Citado na página 60.