

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GUSTAVO RODRIGUES DE SOUZA**

**SIMULAÇÃO DE UM TERMINAL DE TRANSPORTE URBANO  
OPERANDO COM ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO: AVALIAÇÃO DO  
CONSUMO DE ENERGIA E ESTRATÉGIAS DE RECARGA**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2021**

**GUSTAVO RODRIGUES DE SOUZA**

**SIMULAÇÃO DE UM TERMINAL DE TRANSPORTE URBANO  
OPERANDO COM ÔNIBUS ELÉTRICO HÍBRIDO: AVALIAÇÃO  
DO CONSUMO DE ENERGIA E ESTRATÉGIAS DE RECARGA**

**Simulation of an Urban Transport Terminal Operating with  
Hybrid Electric Bus: Energy Consumption Assessment and  
Recharging Strategies**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Área de concentração: Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Lüders

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es).

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



GUSTAVO RODRIGUES DE SOUZA

**SIMULAÇÃO DE UM TERMINAL DE TRANSPORTE URBANO OPERANDO COM ÔNIBUS ELÉTRICO  
HÍBRIDO: AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA E ESTRATÉGIAS DE RECARGA**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia De Computação.

Data de aprovação: 15 de Dezembro de 2021

Prof Ricardo Luders, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Marcelo De Oliveira Rosa, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Semida Silveira, Doutorado - Kth, Royal Institute Of Technology

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 10/02/2022.

Dedico este trabalho a minha família e aos meus  
amigos, pelos momentos de ausência.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas e/ou instituições às quais presto minha homenagem. Certamente, esses parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

A minha família, pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos e pela confiança depositada.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Ao Projeto *Smart City Concepts in Curitiba* pela oportunidade de desenvolver esta dissertação, tendo recebido apoio de universidades brasileiras e suecas, da empresa sueca Combitech, do CISB (Centro de Pesquisa e Inovação Sueco-Brasileiro), e da Vinnova (Agência de Inovação da Suécia).

Enfim, a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeira Lei: Um robô não pode ferir um ser humano ou, por omissão, permitir que um ser humano sofra algum mal. Segunda Lei: Um robô deve obedecer as ordens que lhe sejam dadas por seres humanos, exceto nos casos em que tais ordens contrariem a Primeira Lei. Terceira Lei: Um robô deve proteger sua própria existência desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira e Segunda Leis (ASIMOV, Isaac, 1950).

## RESUMO

SOUZA, Gustavo Rodrigues. **Simulação de um Terminal de Transporte Urbano Operando com Ônibus Elétrico Híbrido: Avaliação do Consumo de Energia e Estratégias de Recarga.** 2021. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Recentemente, a substituição da matriz energética de combustíveis fósseis para energia limpa tem recebido grande atenção no transporte público. Várias cidades brasileiras têm destinado recursos para aquisição de ônibus elétricos ou elétrico-híbridos com capacidade de recarga por uma fonte externa (“*plug-in*”). Neste contexto, existe um grande desafio na avaliação do consumo de energia e estabelecimento de estratégias para recarga dos ônibus. Nesta dissertação, um modelo de simulação da literatura do funcionamento de um ônibus elétrico-híbrido é utilizado para avaliar o consumo de energia do ônibus a partir de um ciclo de condução dado. Um ciclo de condução é determinado por um perfil de velocidade durante o trajeto realizado pelo ônibus. A partir de dados de GPS adquiridos durante a movimentação dos ônibus do transporte público de Curitiba, um perfil de velocidade é construído para diferentes linhas de ônibus do terminal Pinheirinho. Cerca de 5.500 ciclos de condução são então obtidos para os ônibus de 21 linhas de ônibus do terminal. O objetivo é avaliar por simulação o consumo de energia elétrica dos ônibus e obter o “*State of Charge*” (SOC) das baterias de cada ônibus ao retornar ao terminal. A partir desta informação, um outro modelo de simulação (de eventos discretos) foi desenvolvido para simular a operação do terminal Pinheirinho de Curitiba, substituindo-se os ônibus de 11 linhas do terminal por ônibus elétrico-híbridos. Na simulação de eventos discretos, uma estação de recarga instalada dentro do terminal permite que as baterias dos ônibus elétrico-híbridos sejam recarregadas. Dois cenários de recarga das baterias são avaliados quando os ônibus entram no terminal: i) SOC abaixo de 30%; ii) recarga de oportunidade, quando o SOC está entre 30-50% e o tempo de parada do ônibus no terminal é maior que 10 min. Os resultados mostram que os indicadores de desempenho para o cenário 2 são um pouco melhores do que para cenário 1. Como indicadores de desempenho tem-se: tempo médio de recarga, tempo médio de espera para recarga, tempo médio de permanência no terminal e tamanho da fila gerada pela utilização da estação de recarga. Particularmente, o cenário 2 é capaz de distribuir melhor as recargas ao longo do dia, reduzindo o tamanho da fila da estação de recarga em determinados períodos do dia.

**Palavras-chave:** Transporte de baixo carbono. Eletromobilidade. Ônibus elétrico híbrido. Simulação de eventos discretos. Pesquisa operacional.

## ABSTRACT

SOUZA, Gustavo Rodrigues. **Simulation of an Urban Transport Terminal Operating with Hybrid Electric Bus: Energy Consumption Assessment and Recharging Strategies**. 2021. 76 p. Dissertation (Master's Degree in Electrical and Computer Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Recently, the replacement of fossil fuel energy matrix for clean energy has received great attention in public transport. Several Brazilian cities have provided resources for the acquisition of electric or hybrid electric buses whose battery recharge can be made by an external source (plug-in). In this context, there is a great challenge in evaluating energy consumption and establishing strategies for recharging buses. In this dissertation, a simulation model from the literature for the operation of a hybrid-electric bus is used to evaluate the energy consumption of the bus from a given driving cycle. A driving cycle is determined by a speed profile during the journey taken by the bus. From GPS data acquired during the movement of buses in the public transport of Curitiba, a speed profile is built for different bus lines of Pinheirinho terminal. About 5,500 driving cycles are then obtained for buses of 21 lines of the terminal. The objective is to simulate the electric energy consumption of buses and obtain the State of Charge (SOC) of the batteries for each bus returning to the terminal. Based on this information, another (discrete event) simulation model was developed to simulate the operation of Pinheirinho terminal in Curitiba, by replacing buses of 11 bus lines of the terminal by hybrid electric ones. In the discrete event simulation, a charging station installed inside the terminal allows recharging batteries of the hybrid electric buses. Two scenarios of battery recharge are evaluated when buses enter the terminal: i) SOC below 30%; ii) opportunity recharge, when SOC is between 30-50% and the bus stop time at the terminal is greater than 10 min. The results show that the performance indicators for scenario 2 are slightly better than for scenario 1. The performance indicators are: average recharge time, average waiting time for recharge, average time spent in the terminal and size of the queue generated by using the charging station. In particular, scenario 2 is able to better distribute recharges throughout the day, reducing the length of the charging station queue at certain times of the day.

**Keywords:** Low-carbon transportation. Electromobility. Hybrid electric bus. Discrete event simulation. Operations research.



## LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Lógica utilizada na simulação dos ônibus no terminal. . . . .	44
Algoritmo 2 – Simulação da estação de recarga - cenário 1 (SOC abaixo de 30%) . . .	45
Algoritmo 3 – Simulação da estação de recarga - cenário 2 (recarga de oportunidade) .	46

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas da metodologia utilizada para a obtenção dos resultados de simulação. . . . .	15
Figura 2 – Vista aérea do terminal de ônibus Pinheirinho de Curitiba . . . . .	17
Figura 3 – Ônibus elétrico-híbrido com configuração em paralelo, na qual ambos os motores elétrico e de combustão interna ( <i>Internal Combustion Engine (ICE)</i> ) podem tracionar o veículo. . . . .	28
Figura 4 – Modelo de simulação do Ferramenta de simulação e análises de modelos dinâmicos (Simulink) dividido em blocos funcionais (A-I) capazes de simular cada componente do veículo separadamente. . . . .	29
Figura 5 – Transições entre os modos de operação do ônibus. . . . .	31
Figura 6 – Modelo Matlab descrito. . . . .	33
Figura 7 – Diagrama do sistema de monitoração dos ônibus do transporte de Curitiba. . . . .	36
Figura 8 – Tabelas do banco de dados da URBS. . . . .	37
Figura 9 – Planta baixa do terminal de ônibus Pinheirinho em Curitiba. . . . .	41
Figura 10 – Tela do pacote de simulação Simio representando o terminal Pinheirinho. . . . .	42
Figura 11 – Exemplo de diferentes ciclos de condução de dois ônibus da linha 632. . . . .	50
Figura 12 – Exemplo de diferentes ciclos de condução de dois ônibus da linha 632, segundo a distância percorrida. . . . .	51
Figura 13 – <i>Boxplot</i> do tempo de duração das viagens por linha de ônibus. . . . .	51
Figura 14 – <i>Boxplot</i> do tempo de parada no terminal por linha de ônibus. . . . .	53
Figura 15 – <i>Boxplot</i> do SOC por linha de ônibus. . . . .	53
Figura 16 – Ciclo de condução mais longo e elevação do trajeto da linha 632 . . . . .	54
Figura 17 – Ciclo de condução mais curto e elevação do trajeto da linha 632 . . . . .	54
Figura 18 – Modelo 2 de regressão linear: tempo de viagem (min) x SOC (%) . . . . .	56
Figura 19 – Modelo 2 de regressão linear: distância (km) x SOC (%) . . . . .	57
Figura 20 – Tamanho médio da fila para uso da estação de recarga para o cenário 1. . . . .	59
Figura 21 – Tamanho médio da fila para uso da estação de recarga para o cenário 2. . . . .	60
Figura 22 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus das linhas 617, 630 e 632 para o cenário 1. . . . .	61
Figura 23 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus das linhas 633, 635 e 636 para o cenário 1. . . . .	62
Figura 24 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus das linhas 637, 639 e 644 para o cenário 1. . . . .	63
Figura 25 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus das linhas 655 e 681 para o cenário 1. . . . .	64
Figura 26 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus da linha 681 para os cenários 1 e 2. . . . .	64
Figura 27 – Horário de uso da estação de recarga por linha para o cenário 1. . . . .	65
Figura 28 – Horário de uso da estação de recarga por linha para o cenário 2. . . . .	65
Figura 29 – Horário da recarga de oportunidade por linha para o cenário 2. . . . .	66
Figura 30 – Perfil de elevação da linha 528 . . . . .	75
Figura 31 – Perfil de elevação da linha 617 . . . . .	75
Figura 32 – Perfil de elevação da linha 630 . . . . .	75
Figura 33 – Perfil de elevação da linha 632 . . . . .	75
Figura 34 – Perfil de elevação da linha 633 . . . . .	75

Figura 35 – Perfil de elevação da linha 635 . . . . .	75
Figura 36 – Perfil de elevação da linha 636 . . . . .	75
Figura 37 – Perfil de elevação da linha 637 . . . . .	75
Figura 38 – Perfil de elevação da linha 638 . . . . .	76
Figura 39 – Perfil de elevação da linha 639 . . . . .	76
Figura 40 – Perfil de elevação da linha 640 . . . . .	76
Figura 41 – Perfil de elevação da linha 641 . . . . .	76
Figura 42 – Perfil de elevação da linha 644 . . . . .	76
Figura 43 – Perfil de elevação da linha 649 . . . . .	76
Figura 44 – Perfil de elevação da linha 650 . . . . .	76
Figura 45 – Perfil de elevação da linha 655 . . . . .	76
Figura 46 – Perfil de elevação da linha 659 . . . . .	76
Figura 47 – Perfil de elevação da linha 680 . . . . .	76
Figura 48 – Perfil de elevação da linha 681 . . . . .	76
Figura 49 – Perfil de elevação da linha 684 . . . . .	76
Figura 50 – Perfil de elevação da linha 690 . . . . .	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista não exaustiva dos principais simuladores de veículos. . . . .	21
Tabela 2 – Parâmetros do ônibus elétrico híbrido <i>plug-in</i> . . . . .	32
Tabela 3 – Descrição das tabelas de dados utilizadas. . . . .	37
Tabela 4 – Ferramentas computacionais utilizadas. . . . .	38
Tabela 5 – Exemplo de tabela horária por linha (L) e número do ônibus (C). . . . .	41
Tabela 6 – Número de viagens por linha de ônibus e faixa horária do dia durante as três semanas de 02-20/09/2019. . . . .	49
Tabela 7 – Informações dos ciclos de condução por linha de ônibus (distância, tempo médio de viagem, tempo médio de parada no terminal, altitude média do trajeto) e resultados de simulação do consumo médio de energia elétrica SOC (% da carga total da bateria) e da porcentagem média de condução em modo à combustão Pcomb (%), com desvios padrão indicados nos subíndices. . . . .	52
Tabela 8 – Perfil de elevação dos trajetos das linhas de ônibus. . . . .	54
Tabela 9 – Variação do SOC devida ao aumento de peso do ônibus da linha 632. . . . .	55
Tabela 10 – Dados para o modelo de regressão linear 1 e 2 para estimação do SOC médio a partir da distância, tempo médio de viagem e porcentagem média de condução em modo à combustão Pcomb, com desvios padrão indicados nos subíndices. . . . .	56
Tabela 11 – Tempo médio (min) de recarga TR1 e TR2 ( $\pm$ intervalo de confiança de 95%) por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente. . . . .	58
Tabela 12 – Tempo médio (min) de permanência TP1 e TP2 ( $\pm$ intervalo de confiança de 95%) dos ônibus no terminal, fator de espera (%) FE1 e FE2 e fator máximo de espera (%) FM1 e FM2 por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente. . . . .	58
Tabela 13 – Número de ônibus, SOC médio SOC1 e SOC2, e número de recargas RC1 e RC2 por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente. . . . .	61

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### SIGLAS

GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICE	<i>Internal Combustion Engine</i>
PSD	<i>Power Split Device</i>
SOC	<i>State of Charge</i>
URBS	Urbanização de Curitiba S.A.

### ACRÔNIMOS

JSON	Formato de arquivo para troca de informações, do inglês <i>JavaScript Object Notation</i>
SHEV-SP	<i>Simscape Hybrid Electric Vehicle Series Parallel</i>
Simulink	Ferramenta de simulação e análises de modelos dinâmicos

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO . . . . .	16
1.2	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO . .	17
1.2.1	Objetivos Específicos . . . . .	17
1.3	CONTRIBUIÇÕES . . . . .	18
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO . . . . .	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> . . . . .	<b>20</b>
2.1	SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS . . . . .	20
2.2	ESTAÇÕES DE RECARGA . . . . .	23
2.3	SUMÁRIO DO CAPÍTULO . . . . .	25
<b>3</b>	<b>SIMULAÇÃO DO ÔNIBUS ELÉTRICO-HÍBRIDO</b> . . . . .	<b>26</b>
3.1	DESCRIÇÃO GERAL DOS TIPOS DE ÔNIBUS E ARQUITETURAS	26
3.2	MODELO DE SIMULAÇÃO . . . . .	28
3.2.1	Lógica de controle e modos de operação . . . . .	30
3.3	IMPLEMENTAÇÃO DA SIMULAÇÃO . . . . .	32
3.4	SUMÁRIO DO CAPÍTULO . . . . .	33
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS CICLOS DE CONDUÇÃO DOS ÔNIBUS</b> .	<b>35</b>
4.1	CONCEITOS INICIAIS . . . . .	35
4.2	BASE DE DADOS DO TRANSPORTE DE CURITIBA . . . . .	36
4.3	CONSTRUÇÃO DO CICLO DE CONDUÇÃO . . . . .	38
4.4	SUMÁRIO DO CAPÍTULO . . . . .	39
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÃO DO TERMINAL PINHEIRINHO</b> . . . . .	<b>40</b>
5.1	DADOS DE ENTRADA . . . . .	40
5.2	SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DO TERMINAL . . . . .	42
5.3	SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RECARGA . . . . .	43
5.4	INDICADORES DE DESEMPENHO DA OPERAÇÃO DO TERMINAL	45
5.5	SUMÁRIO DO CAPÍTULO . . . . .	46
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>48</b>
6.1	CICLOS DE CONDUÇÃO . . . . .	48
6.1.1	Consumo de energia e SOC . . . . .	50
6.1.2	Perfil de elevação . . . . .	52
6.1.3	Influência do peso total dos ônibus no consumo de energia . . . . .	54
6.1.4	Modelo de regressão linear para o consumo de energia . . . . .	55
6.2	SIMULAÇÃO DO TERMINAL PINHEIRINHO . . . . .	56
6.3	SUMÁRIO DO CAPÍTULO . . . . .	62
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>70</b>

<b>APÊNDICE A – PERFIL DE ELEVÇÃO DOS TRAJETOS DAS LI- NHAS DE ÔNIBUS CONSIDERADAS . . . . .</b>	<b>75</b>
--	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

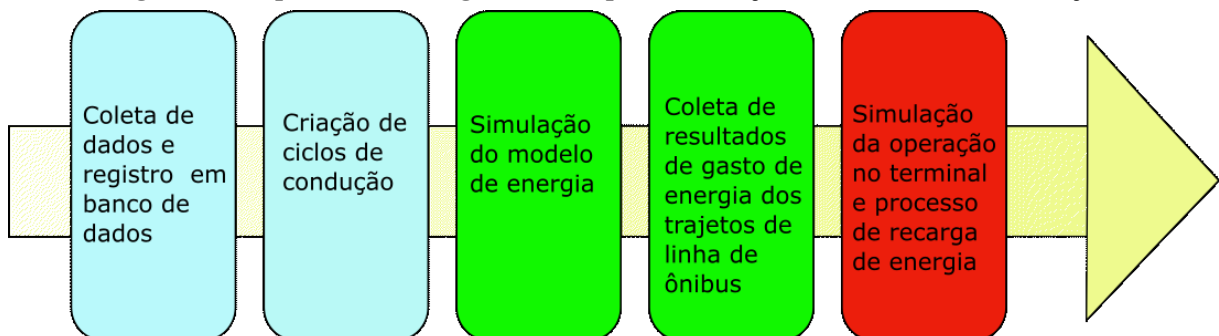
Recentemente, tem havido um grande interesse na substituição de combustíveis fósseis por tecnologias limpas, particularmente no transporte público. Esta dissertação foi desenvolvida no contexto do Projeto *Smart City Concepts in Curitiba*<sup>1</sup>. Este projeto tem por objetivo geral o desenvolvimento de estratégias que possam reduzir a emissão de gases de efeito estufa no contexto das Cidades Inteligentes (ALBINO *et al.*, 2015).

Para tanto, estudos, métodos e análises são desenvolvidos com previsão de transferência de conhecimento para a sociedade. Some-se a isso, a grande disponibilidade de dados abertos fornecidos pela cidade de Curitiba nas mais diferentes áreas, cujo espelho é mantido pela UFPR<sup>2</sup>. Esses dados são fundamentais para que as soluções encontradas estejam ajustadas às reais condições dos serviços públicos ofertados pela cidade.

Neste contexto, identificou-se a necessidade de avaliar o potencial de substituição dos ônibus convencionais movidos à diesel por ônibus elétrico híbridos. Porém, esta avaliação apresenta diversas dificuldades, tais como: ausência de dados diretos de consumo de energia dos ônibus elétrico híbridos e incerteza no impacto dos tempos de recarga das baterias na programação horária dos ônibus.

Estas dificuldades foram mitigadas nesta dissertação pelo uso de resultados de simulação, tanto da operação do ônibus elétrico híbrido quanto da operação de um terminal de ônibus de Curitiba. Este último fornece um estudo de maior escala para a avaliação dos impactos dessa substituição na programação horária dos ônibus. A Figura 1 resume as etapas da metodologia utilizada nesta dissertação.

**Figura 1 – Etapas da metodologia utilizada para a obtenção dos resultados de simulação.**



Fonte: Autoria própria

<sup>1</sup> <https://smartcityconcepts.chalmers.se/>

<sup>2</sup> <http://dadosabertos.c3sl.ufpr.br/curitiba/>



De acordo com a Figura 1, a primeira etapa corresponde ao acesso ao banco de dados da URBS (Urbanização de Curitiba), que possui informações sobre as linhas e a movimentação dos ônibus do transporte de Curitiba. Os ciclos de condução da segunda etapa são obtidos da monitoração da movimentação dos ônibus, que são dados de entrada para a simulação do modelo de energia dos ônibus da terceira etapa, juntamente com a arquitetura e parâmetros do ônibus elétrico-híbrido. Este modelo de simulação utilizado para avaliar o consumo de energia do ônibus elétrico-híbrido é baseado em (AMRHEIN; KREIN, 2005; DIXON *et al.*, 2015), permitindo que o consumo de energia seja obtido a partir de ciclos de condução dos ônibus. Como resultado da quarta etapa, tem-se o consumo de energia e o tempo de permanência por linha de ônibus do terminal considerado. Estes resultados são os dados de entrada da simulação da operação do terminal na quinta e última etapa da Figura 1. A simulação do terminal de ônibus foi desenvolvida nesta dissertação com uso do pacote Simio<sup>3</sup>, considerando dois cenários de recarga das baterias. Um dos cenários denominado de recarga de necessidade (quando é necessária para a autonomia de viagem do ônibus) e outro de oportunidade (quando o tempo de parada permite recarga com folga). A simulação da operação do terminal fornece, como resultado principal, uma avaliação dos tempos de recarga dos ônibus, que pode ser usada para verificar distúrbios na tabela de horários programados dos ônibus.

Portanto, esta dissertação é uma integração de técnicas de simulação que permitem avaliar o desempenho da operação do terminal com ênfase em indicadores que reflitam o tempo necessário para recarga, o tempo disponível para recarga e o tempo de espera para recarga. Esses indicadores servirão de base para avaliar as linhas de ônibus mais adequadas para a substituição por ônibus elétrico-híbridos.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

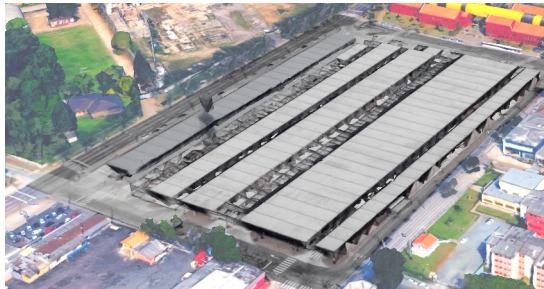
Em relatórios recentes, o Ministério da Economia brasileiro afirma que 51% das emissões de gases de efeito estufa no Brasil se devem ao transporte. Isso significa que, se há uma disposição a enfrentar desafios para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, é preciso encontrar soluções inteligentes para o transporte. Porém, as soluções não se encontram apenas no setor dos transportes. Na cidade de Curitiba, empresas que operam o transporte público, gestores públicos e universidades têm se reunido para desenvolver conceitos e ferramentas, bem como novas estratégias, que possam abrir o caminho para um futuro de baixo carbono.

---

<sup>3</sup> <https://www.simio.com>

O terminal Pinheirinho de passageiros de ônibus de Curitiba foi escolhido para esta dissertação pois é uma área de grande concentração de ônibus e pessoas, agregando cerca de 40 linhas de ônibus servidas por ônibus convencionais e de grande capacidade (expressos). Uma vista aérea do terminal é mostrada na Figura 2. Além disso, o terminal Pinheirinho tem as condições necessárias de infraestrutura para instalação de uma estação de recarga de baterias, tanto do ponto de vista de fonte próxima de energia elétrica disponível quanto de espaço físico.

**Figura 2 – Vista aérea do terminal de ônibus Pinheirinho de Curitiba**



**Fonte: GoogleMaps**

## 1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

O objetivo principal desta dissertação é desenvolver um modelo de simulação da operação do terminal Pinheirinho de Curitiba, substituindo-se o ônibus convencional à combustão por ônibus elétrico híbrido em algumas linhas do terminal. A partir da simulação do terminal, deve-se avaliar o impacto na operação devido à introdução de uma estação de recarga dentro do terminal, capaz de realizar a recarga das baterias durante a operação dos ônibus.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

1. Caracterizar dos ciclos de condução a partir dos dados de movimentação dos ônibus fornecidos pela URBS;
2. Avaliar por simulação o consumo de energia dos ônibus a partir dos ciclos de condução obtidos;
3. Simular a operação diária do terminal levando em conta as operações de recarga das baterias dos ônibus;

4. Avaliar dois cenários distintos de recarga das baterias: i) necessidade e ii) oportunidade. Há necessidade quando a carga da bateria está abaixo de 30% e oportunidade quando não há necessidade, mas o tempo disponível de parada no terminal é suficiente para a recarga;
5. Analisar o desempenho da operação do terminal com ênfase nos indicadores de utilização da estação e seu impacto no tempo de permanência do ônibus no terminal, tamanho da fila de espera para uso da estação e número de recargas ao longo do dia.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES

A contribuição principal da dissertação está na metodologia de construção dos ciclos de condução e avaliação do consumo de energia dos ônibus elétrico híbridos. Além disso, tem-se a avaliação por simulação do impacto na operação do terminal com a introdução da estação de recarga, capaz de recarregar as baterias dos ônibus elétrico híbridos durante a operação. Não menos importante é a avaliação de dois cenários de recarga que consideram necessidade e oportunidade de recarga das baterias.

Como contribuição aplicada, tem-se a avaliação da operação do terminal Pinheirinho de Curitiba nas condições descritas acima. Assim, os resultados obtidos poderão ser úteis para o planejamento da substituição dos ônibus convencionais a diesel por ônibus elétrico híbridos por parte dos gestores públicos. Além disso, a mesma metodologia apresentada nesta dissertação pode ser aplicada em outros terminais de ônibus da cidade.

Parte dos resultados desta dissertação foram publicados em (SOUZA *et al.*, 2019):

- SOUZA, Gustavo R.; LÜDERS, Ricardo; FONSECA, Keiko V. O.; SILVEIRA, Semida. Simulação de um ônibus elétrico híbrido plug-in para avaliação do consumo de energia em diferentes ciclos de condução do transporte público de Curitiba. *In: Congresso 2019 SAE Brasil*. São Paulo: SAE BRASIL, 2019. p. 1–10.

### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O Capítulo 2 é uma revisão da literatura sobre simuladores de veículos elétrico híbridos e sobre características das estações de recarga. O Capítulo 3 detalha o simulador utilizado para avaliar o consumo de energia dos ônibus elétrico híbridos a partir de ciclos de condução dos ônibus. O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para caracterizar os ciclos de condução

a partir dos dados de movimentação dos ônibus fornecidos pela URBS. O Capítulo 5 mostra detalhes de desenvolvimento do modelo de simulação da operação do terminal Pinheirinho e da estação de recarga no pacote de simulação de eventos discretos Simio. O Capítulo 6 traz os resultados e discussões do trabalho com as conclusões no Capítulo 7.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo reúne referências relevantes da literatura sobre simuladores para veículos em geral e, particularmente, para veículos elétricos e elétricos híbridos na Seção 2.1. Na Seção 2.2, são apresentadas características das estações de recarga em geral, importantes para justificar as escolhas feitas no modelo de simulação do terminal de ônibus Pinheirinho.

### 2.1 SIMULAÇÃO DE VEÍCULOS

Recentemente, existe um grande interesse na substituição de combustíveis fósseis por tecnologias limpas, particularmente no transporte público. Para tanto, é necessário conhecer detalhes do consumo de energia em diferentes condições de operação. Isso é obtido, frequentemente, por simulação computacional da dinâmica destes veículos.

Os modelos utilizados em simuladores podem ser agrupados segundo a metodologia de cálculo das variáveis dinâmicas envolvidas. Modelos do tipo *backward-facing* determinam as variáveis a partir de um ciclo de condução (perfil de velocidade do veículo) fornecido externamente. Este perfil de velocidade é imposto ao veículo, sendo que variáveis como velocidade angular e torque nas rodas são calculadas para atender este perfil. Simuladores que usam a abordagem *backward-facing* respondem a seguinte questão (MARKEL *et al.*, 2002): assumindo que o veículo segue o perfil de velocidade desejado, qual deve ser o comportamento de cada componente. Em geral, estes simuladores utilizam taxas de amostragem de tempo menores e, portanto, requerem maior capacidade computacional de simulação.

Já simuladores do tipo *forward-facing* utilizam um modelo dinâmico do veículo respeitando uma sequência de causalidade das ações impostas por um condutor. Ou seja, são construídos para seguir um determinado perfil de velocidade do veículo a partir de um modelo do condutor, que fornece os torques desejados de aceleração e desaceleração do veículo. Assim, duas diferenças em relação ao *backward-facing* são fundamentais no simulador *forward-facing*: i) é necessário modelar o comportamento do condutor; ii) o perfil de velocidade do veículo não é imposto, mas calculado a partir das ações do condutor. Portanto, pequenos desvios entre o perfil de velocidade desejado e observado são esperados em simuladores do tipo *forward-facing*, sendo sua maior deficiência o elevado tempo computacional (MARKEL *et al.*, 2002). Uma visão geral das técnicas de simulação pode ser encontrada em (GAO *et al.*, 2007), assim como uma compa-

ração detalhada entre estratégias *backward-* e *forward-facing* é apresentada em (ASSADIAN *et al.*, 2013).

Uma quantidade razoável de simuladores computacionais têm sido desenvolvidos para veículos elétricos e híbridos, tais como PSIM (*Power electronics Simulator*), V-Elph, HEVSIM, ADVISOR (*ADvanced VehIcle SimulatOR*), Matlab/Simulink, entre outros. A Tabela 1 apresenta um resumo dos simuladores considerados nesta revisão.

**Tabela 1 – Lista não exaustiva dos principais simuladores de veículos.**

Simulador	Tipo de veículo	Modelo de simulação	Abordagem	Tempo de computação
PSIM	híbrido	<i>forward-facing</i>	dinâmico	alto
V-Elph	híbrido	<i>forward-facing</i>	dinâmico	alto
ADVISOR	combustão, elétrico, híbrido	<i>backward-</i> e <i>forward-facing</i>	regime	baixo
HEVSIM	combustão, elétrico, híbrido	<i>backward-</i> e <i>forward-facing</i>	regime ou quase regime	baixo
SHEV-SP*	híbrido	<i>backward-</i> e <i>forward-facing</i>	regime, quase regime ou dinâmico	alto
EVERLASTING	elétrico	<i>backward-facing</i>	dinâmico	baixo
PSAT	elétrico	<i>forward-facing</i>	dinâmico	alto

\*(DIXON *et al.*, 2015).

**Fonte: Autoria própria**

De acordo com (GAO *et al.*, 2007), os modelos utilizados em simuladores podem ser classificados ainda como em regime (*steady-state*), quase em regime (*quasi-steady*) ou dinâmicos. Por exemplo, o ADVISOR é um simulador em regime, PSAT é quase em regime e PSIM é dinâmico.

Os simuladores PSIM (ONODA; EMADI, 2004) e V-Elph (BUTLER *et al.*, 1999) são bons exemplos de simuladores baseados em componentes e subsistemas modelos de acordo com leis físicas. Estes modelos são úteis para simulações precisas da dinâmica dos veículos em diferentes escalas de tempo, além de permitirem o desenvolvimento de controladores. O PSIM foi originalmente desenvolvido para simular conversores eletrônicos de potência e acionamentos de motores. A partir de diferentes módulos propostos para o PSIM, este simulador é capaz de modelar, simular, projetar e analisar diferentes veículos convencionais, elétricos ou híbridos, assim como diferentes motores de combustão interna - , transmissões (automática e manual), diferenciais, sistemas mecânicos, baterias, células combustíveis, conjuntos fotovoltaicos, ultracapacitores e controladores.

O simulador HEVSIM é um pacote de software desenvolvido em Matlab/Simulink na Wuhan University of Technology (HOU; GUO, 2008) para estudar questões relacionadas ao

projeto de veículos elétricos e elétrico-híbridos, tais como eficiência energética e emissões.

O simulador ADVISOR foi desenvolvido no *U.S. National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Segundo (MARKEL *et al.*, 2002), o ADVISOR utiliza uma combinação única de estratégias *backward-* e *forward-facing*. Ele é baseado em modelos na forma de tabelas de consulta e mapas de eficiência, sendo usado principalmente para quantificar a economia de combustível, desempenho e emissões de veículos usando tecnologias alternativas na configuração híbrida (WIPKE; CUDDY, a; WIPKE; CUDDY, b; WIPKE *et al.*, 1999).

Em (ANBARAN *et al.*, 2014), um simulador desenvolvido em Matlab/Simscape obtém configurações iniciais a partir do ADVISOR. De forma muito semelhante, o simulador desenvolvido em Matlab/Stateflow de (ALI *et al.*, 2014) é capaz de modelar o chaveamento entre modos elétrico e elétrico híbrido de operação do veículo sob diferentes condições de condução.

Especificamente no contexto de ônibus elétricos ou elétricos híbridos, uma revisão de tecnologias e demandas de recarga para ônibus elétricos é apresentada em (DENG *et al.*, 2021). Em (BECKERS *et al.*, 2019), é apresentado um simulador para a estimação de consumo de energia para ônibus elétricos urbanos. O demonstrador (simulador) do projeto H2020 EVERLASTING (*Electric Vehicle Enhanced Range, Lifetime And Safety Through INGenious battery management*) baseia-se na modelagem dinâmica do ônibus, usando como entrada o perfil de velocidade e respectiva aceleração do ônibus. Segundo os autores, este demonstrador EVERLASTING será capaz de prever com precisão a demanda de potência e consumo de energia do ônibus para uma determinada rota a ser seguida. Os resultados produzidos pelo EVERLASTING são comparados com os coletados de um ônibus circulando em uma aplicação real. Um simulador desenvolvido em MATLAB/Simulink é apresentado em (PERROTTA *et al.*, 2012) para um ônibus urbano. De forma similar ao EVERLASTING, este simulador baseia-se em modelos dinâmicos dos ônibus, tendo ciclos de condução como entrada, assim como modelos matemáticos para a energia absorvida em baterias e supercapacitores. Os resultados se concentram na análise da absorção de energia pelas baterias e supercapacitores devido à frenagem.

Há ainda trabalhos na literatura que propõem modelos obtidos a partir de um grande volume de dados (*data-driven models*) para avaliar o desempenho de ônibus ou veículos elétricos, eventualmente associados com simuladores. Em (PROHASKA *et al.*, 2016), uma frota de ônibus elétricos com carga rápida de bateria é avaliada a partir de 148.000 km de dados operacionais, incluindo eventos de condução e recarga. Um estudo do consumo em frotas de ônibus urbanos elétricos e híbridos usando o ADVISOR como simulador é apresentado em (LAJUNEN, 2014)

considerando diferentes configurações (diesel, híbrido série e série-paralelo, elétrico puro com diferentes configurações de bateria). Em (FENG *et al.*, 2017), dados de GPS de rotas de ônibus são capturados e processados para serem usados como dados de entrada para modelos de ônibus desenvolvidos no simulador PSAT. Um modelo desenvolvido em Matlab/Simulink é verificado contra dados reais de uma rota de ônibus de 9,1 km em operação na cidade de Espoo, Finlândia. Em (KIVEKAS *et al.*, 2018), um método para sintetizar ciclos de condução é proposto a fim de analisar o impacto da variação dos ciclos de condução e número de passageiros na variação do consumo de um ônibus elétrico operando no subúrbio de Espoo. Resultados de consumo de energia baseados em dados reais de grandes redes de transporte público localizadas em Cingapura são apresentados em (GALLET *et al.*, 2018). Em (CAUWER *et al.*, 2015), modelos de regressão linear múltipla associam parâmetros cinéticos do veículo elétrico ao consumo de energia. Estes modelos são obtidos a partir de dados coletados da operação de um veículo Nissan Leaf 2012 rodando na região periférica da cidade de Bruxelas, Bélgica.

Esta dissertação tem por base o simulador de (DIXON *et al.*, 2015) que unifica as estratégias *forward-* e *backward-facing*. O simulador utilizado foi desenvolvido no Matlab/Simscape e disponibilizado pela empresa MathWorks no projeto *Simscape Hybrid Electric Vehicle Series Parallel* (SHEV-SP)<sup>1</sup>. Os resultados da simulação permitem avaliar o consumo de energia elétrica dos ônibus a partir de dados construtivos e de monitoração dos ônibus em um sistema real de transporte coletivo operando na cidade de Curitiba. A monitoração *on-line* dos ônibus permite avaliar a influência de diferentes ciclos de condução em diversas linhas de ônibus.

## 2.2 ESTAÇÕES DE RECARGA

Os ônibus movidos à energia elétrica (total ou parcialmente) apresentam um grande desafio em relação à recarga das baterias (XYLIA; SILVEIRA, 2018). Segundo (ROGGE *et al.*, 2015), os sistemas usados em estações de recarga de ônibus são de acoplamento que necessita ou não contato direto entre a estação e ônibus. Geralmente, o sistemas sem contato possuem maior limitação de transferência de potência. Os sistemas de recarga são projetados para a máxima transferência de energia no tempo de acoplamento entre estação e ônibus. As estações de recarga que são comercializadas seguem uma faixa de padronizada de potência entre 100 kW até 600kW. Através de dados apresentados em (BERGLUND; HANSSON, 2016), uma estrutura tem transferência de capacidade de energia entre a estação de recarga e as baterias do ônibus de

<sup>1</sup> <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28441-hybrid-electric-vehicle-model-in-simulink>



até 450kW no tempo de 4 minutos.

Para (MOHAMED *et al.*, 2017), o formato da estação de recarga em relação ao dimensionamento de potência é base para definir formas distintas de operação na recarga dos ônibus. Com isso, a estação de recarga opera em modo rápido, modo de oportunidade de tempo e modo noturno. O modo rápido e modo de oportunidade de tempo são para opções durante a operação do ônibus e o modo noturno para intervalos nos quais o ônibus esteja fora do horário de operação. As opções de carga para ônibus em operação necessitam de estações de recarga com maior potência instalada em comparação com a opção de carga do ônibus fora de operação. Neste trabalho, a opção de escolha de modo de operação é pelo modo de carga rápida.

Já nos trabalhos de (ZHANG, 2019),(GAO *et al.*, 2017) e (LEEMPUT *et al.*, 2012) houve a consideração em analisar os impactos da estação de recarga no sistema de distribuição de energia e localização urbana na cidade. Para (ZHANG, 2019) há um potencial de uso de mais de uma estação de recarga no algoritmo proposto de lógica de uso da estação de recarga. Ao avaliar as condições de sistema de energia e o modelos de ônibus para efetuar recarga, o trabalho de (HE *et al.*, 2019a) fez considerações para determinar o tempo de recarga em diferentes condições de demanda de energia dos ônibus com relação a potência disponível pela estação de recarga. Com isso, as informações presente em (HE *et al.*, 2019a) e (BERGLUND; HANSSON, 2016) são importantes ao trabalho na consideração de opção por uso de única estação de recarga de 300kW para carga dos modelos de ônibus híbridos. Essa configuração de estação de recarga e os modelos de ônibus, resultam no tempo de 6 minutos para máxima transferência de energia entre o sistema e ônibus híbrido.

Em (WANG *et al.*, 2014), um estudo de avaliação econômica sobre a infraestrutura necessária de uma estação de recarga apresenta dados financeiros sobre depreciação das baterias, custo de energia e manutenção de estações. Em especial, cenários com mais estações de recarga e com menor potência têm o custo relativo por estação menor do que menos estações com maior potência. Há trabalhos de análise em especial sobre o número de estação em relação a quantidade ônibus e seu impacto no tempo de recarga das baterias, devido a concorrência do recursos para alocação adequada no número de ônibus que utilizam a estação de recarga. Esse contexto de verificação é presente nos trabalhos de (SINHUBER *et al.*, 2010) e (KE *et al.*, 2016). Por último, (HE *et al.*, 2019b) verificou as condições de alocação dos ônibus na utilização da estação juntamente com a definição de localização da estação como fator de melhoria de eficiência e redução da concorrência dos ônibus pelo mesmo recurso.

## 2.3 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta trabalhos relacionados da literatura sobre simuladores de veículos. Existem dois tipos de simuladores: *forward-facing* e *backward-facing*. Alguns detalhes dos simuladores PSIM, V-Elph, HEVSIM, ADVISOR, PSAT, EVERLASTING e SHEV-SP foram apresentados. Esta dissertação utiliza o simulador Matlab/Simulink para avaliar o consumo de energia dos ônibus a partir dos ciclos de direção dos ônibus obtidos para o sistema de transporte de Curitiba, conforme a Seção 2.1

Ainda neste capítulo, uma breve revisão dos trabalhos sobre estações de recarga de energia. Avaliando sobre o tempo de recarga de ônibus, a relação de capacidade de transferência de energia, relação de demanda de energia para os ônibus e impactos na concorrência pelo uso da estação.

### 3 SIMULAÇÃO DO ÔNIBUS ELÉTRICO-HÍBRIDO

Este capítulo apresenta os detalhes da simulação utilizada para avaliar o consumo de energia dos ônibus. Após uma breve introdução sobre os diversos modelos de ônibus com motores elétrico e à combustão na Seção 3.1, detalhes do modelo de simulação utilizado é apresentado na Seção 3.2. Na Seção 3.3 são apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas.

#### 3.1 DESCRIÇÃO GERAL DOS TIPOS DE ÔNIBUS E ARQUITETURAS

Os ônibus convencionais possuem o motor à combustão, que usa combustíveis fósseis. O diesel é o combustível fóssil amplamente utilizado atualmente em ônibus. A eficiência na transformação de energia é alta para o diesel, mas há um grande desperdício da energia que se perde na forma de calor durante o processo químico de queima do combustível. A perda de energia em forma de calor pode chegar a patamares de 48% segundo (CHAN *et al.*, 2010).

Os ônibus elétricos se apresentam como novas opções para o transporte público coletivo, sendo que determinadas arquiteturas construtivas se ajustam mais facilmente aos sistemas de transporte existentes. As arquiteturas de ônibus elétricos se dividem basicamente em ônibus elétrico à bateria, híbrido (não *plug-in*) e elétrico híbrido *plug-in*.

Os ônibus elétrico à bateria são compostos de um motor elétrico e um banco de baterias como o conjunto de tração. A fonte de energia do conjunto é exclusivamente formado pelo banco de baterias. O fluxo de energia é proveniente do banco de baterias para o motor elétrico, sendo o motor elétrico responsável pela geração de energia mecânica que chega até as rodas. Esse modelo de ônibus tem a limitação de operação pela grande quantidade de cargas necessárias a serem feitas durante a sua operação devido à fonte de alimentação ser exclusivamente da energia das baterias. Note que o ônibus elétrico à bateria é sempre *plug-in*, pois depende da recarga das baterias por uma fonte externa.

Os ônibus híbridos são compostos pelo motor à combustão interna, motor elétrico e banco de baterias, podendo ter um gerador que depende da topologia a ser utilizada pela ônibus. Os ônibus híbridos são divididos nas topologias: série, paralelo e série-paralelo.

Na topologia série, um gerador é acoplado ao motor à combustão que gera energia elétrica através do gerador para o motor elétrico. O motor elétrico funciona ininterrupto em duas condições, podendo ter energia fornecida pelo banco de baterias ou pelo gerador acoplado ao

motor à combustão. A potência das baterias é acionada para os momentos em que há demanda por torque adicional com intuito de fazer com que o ônibus saia do estado de inércia para movimentação. Em momentos de modo contínuo ou cruzeiro, com variação reduzida de velocidade, o motor à combustão atua de forma única como meio de injeção de potência para o motor elétrico que envia a energia mecânica para as rodas. A topologia série é conhecida por ter perdas maiores nas transferências de energia e necessitar de banco de baterias maiores por optar entre duas fontes de energia, de maneira distinta. Essa desvantagem faz com que os dispositivos de propulsão sejam dimensionados para maiores capacidade e potência, o que resulta em aumento de custos (CHAN, 2007).

Na topologia paralelo, o motor elétrico e o motor à combustão têm a opção de funcionamento conjunto. O gerador nesta topologia é uma alternativa no caso de aproveitamento da energia de frenagem como meio de carga para o banco de baterias. A melhor eficiência do ônibus híbrido paralelo é devido à associação de ambos os motores. Como resultado, tem-se motores de menor potência em comparação com a topologia série (CHAN, 2007).

A topologia série-paralelo combina ambas as topologias série e paralelo. No mesmo conjunto de elementos, há diferentes modos de funcionamento: modo elétrico (série), modo mecânico (paralelo), modo carga, modo comum e modo regenerativo. Nos modos elétrico e mecânico ocorre o funcionamento exclusivo do motor elétrico e do motor à combustão, respectivamente. No modo carga, o motor elétrico é o responsável pela tração e carga do banco de baterias, com o aproveitamento máximo do motor elétrico para as duas funções. No modo comum, os dois motores trabalham em conjunto com o objetivo de atingir maior torque momentâneo em uma situação de saída da inércia do ônibus. Por fim, o modo regenerativo aproveita a energia de frenagem para carregar o banco de baterias (EMADI *et al.*, 2005).

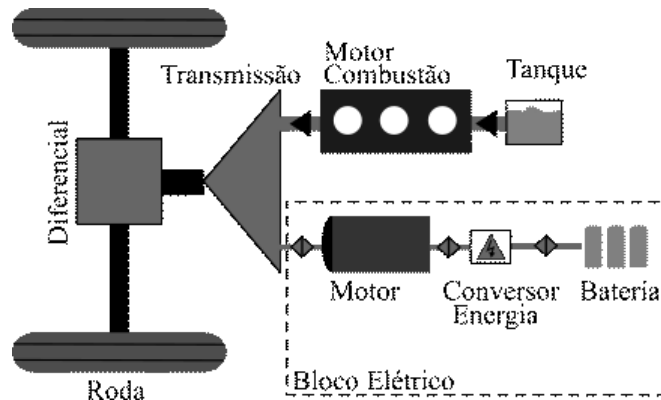
Finalmente, o ônibus elétrico híbrido *plug-in* tem as características do ônibus híbrido, ou seja, pode ter topologia série, paralelo ou série-paralelo. Porém, as baterias podem ser carregadas através de uma conexão externa (*plug-in*) ligada a uma estação de recarga (CHAN *et al.*, 2010).

A estratégia de gerenciamento de energia tem papel importante para definir os momentos em que cada fonte de energia é utilizada de forma conjunta ou separada. O banco de baterias segue uma restrição em relação ao limite mínimo de carga (*State of Charge - SOC*), que não deve ser inferior a 30%. Ao atingir esse limite, o ônibus utiliza a energia da combustão até que uma nova carga de energia elétrica seja feita nas baterias. Os processos de carga e descarga das baterias são conhecidos como ciclos de energia, durante os quais as baterias reduzem sua vida

útil.

A configuração de ônibus utilizada neste trabalho é do tipo elétrico-híbrido/paralelo, conforme mostrado na Figura 3.

**Figura 3 – Ônibus elétrico-híbrido com configuração em paralelo, na qual ambos os motores elétrico e de combustão interna (ICE) podem tracionar o veículo.**



Fonte: Autoria própria

Esta configuração apresenta vantagens, tais como um número reduzido de componentes eletrônicos e um menor caminho entre as fontes de energia até os eixos das rodas. O menor caminho resulta no aumento da eficiência de transformação da energia armazenada (elétrica ou fóssil) até a tração do ônibus (KASSERIS; HEYWOOD, 2007). A Figura 3 mostra a sequência de fluxo de energia para tração do ônibus em que os motores se posicionam em paralelo, permitindo o funcionamento individual ou em conjunto.

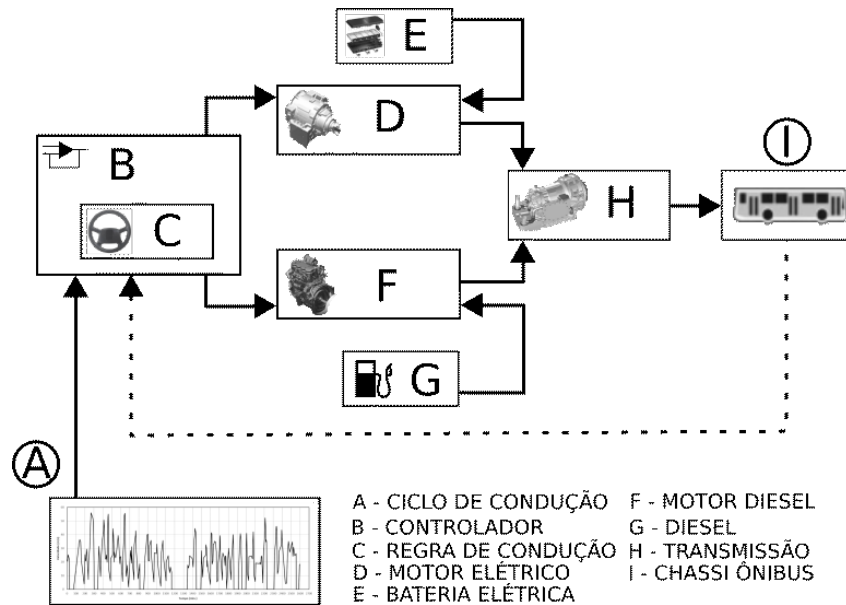
### 3.2 MODELO DE SIMULAÇÃO

A Figura 4 mostra os blocos funcionais do modelo de simulação do pacote Matlab/Simulink (AMRHEIN; KREIN, 2005). Neste modelo, vários pacotes individuais ou bibliotecas de itens mecânicos, físicos e elétricos são utilizados na simulação de cada bloco.

A disposição em blocos da Figura 4 permite que cada bloco possa ser alterado ou parametrizado de forma independente. Parâmetros da simulação podem ser selecionados diretamente em arquivos de configuração. Assim, o ciclo de condução, características dimensionais do ônibus e condições de controle de operação podem ser alterados. A troca de dados e variáveis entre os componentes internos do ônibus se dá pela ligação entre os blocos, segundo seu sentido de fluxo, proporcionando a integração dos cálculos realizados no ambiente computacional, tais como tensão e corrente elétrica, torque, velocidade, entre outros (BUTLER *et al.*, 1999).

A função de cada bloco é descrita abaixo:

Figura 4 – Modelo de simulação do Simulink dividido em blocos funcionais (A-I) capazes de simular cada componente do veículo separadamente.



Fonte: Autoria própria

- Bloco A: contém o ciclo de condução, fornecido externamente na forma de tabela com colunas de tempo e velocidade;
- Bloco B: compara o perfil de velocidade do ciclo de condução com a velocidade requerida pelo bloco I;
- Bloco C: lógica de controle do acionamento dos motores elétrico, à combustão interna ou ambos. Esta lógica é definida no *Stateflow* (JIAXUE *et al.*, 2009), que é um pacote do *Matlab* para modelar lógica de controle por meio de máquinas de estados, laços de condições, eventos e variáveis externas;
- Bloco D: bloco motor/gerador elétrico acoplado diretamente à transmissão (bloco H), utilizando energia da bateria (bloco E);
- Bloco E: fonte de energia elétrica composta por um banco de baterias do tipo lithium-ion.
- Bloco F: motor de combustão interna acoplado diretamente à transmissão (bloco H), utilizando energia do combustível fóssil (bloco G);
- Bloco G: fonte de energia de combustível fóssil (diesel);

- Bloco H: transmissão composta pelo acoplamento ao eixo diferencial do veículo e caixa de engrenagens *Power Split Device* (PSD), que é o ponto de conexão entre as fontes de tração do motor elétrico e motor de combustão interna (LIU *et al.*, 2005);
- Bloco I: estrutura e características físicas dimensionais do ônibus;

Os blocos D e F têm a finalidade de gerar a força de tração do ônibus. Os motores podem operar de forma isolada ou em conjunto para geração de torque e movimentar a estrutura física do ônibus durante o percurso a ser realizado. Os ciclos de condução definem o perfil de velocidade do ônibus e o resultado da diferença entre este perfil e a velocidade atual do ônibus gera a aceleração necessária para que haja movimento. A determinação da aceleração define o torque para a movimentação do ônibus de forma a seguir o ciclo de condução. O valor de torque é essencial para que o modelo de energia permita definir a quantidade de energia e os momentos de funcionamento dos motores elétrico e de combustão interna ICE. Além do torque, o bloco de controle de condução define os períodos em que cada motor deve estar em funcionamento no decorrer do ciclo de condução. No bloco de transmissão, o eixo recebe o torque proveniente do motor elétrico e do motor de combustão interna com relações nominais diferentes para cada modelo e com ajustes de relação que variam de acordo com a demanda de energia no momento. O motor de combustão interna (ICE) é acoplado ao PSD antes de ser conectado ao eixo do bloco de transmissão. As diferenças entre a conexão entre os motores com o eixo de transmissão fazem com que a relação da velocidade angular de cada motor seja ajustada adequadamente variando-se a relação de engrenagens. No final, o bloco diferencial ajusta a relação de velocidade angular presente no eixo de transmissão para atuar diretamente nas rodas do ônibus. As características físicas do ônibus são representadas pelos parâmetros dimensionais (altura, peso, comprimento, entre outros), sendo que a transferência de energia para as rodas e a determinação da velocidade requerida é computada por último nos cálculos matemáticos da simulação, servindo de comparação com o perfil de velocidade do ciclo de condução fornecido (CHENG *et al.*, 2010).

### 3.2.1 Lógica de controle e modos de operação

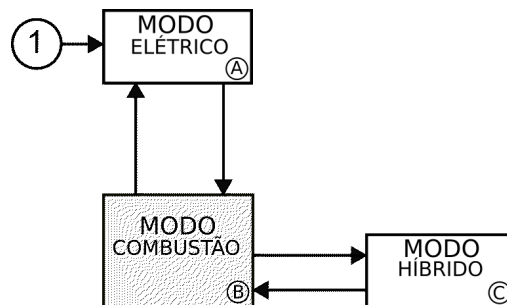
A lógica de controle do bloco C da Figura 4 tem por objetivo determinar, de acordo com parâmetros de desempenho (*State of Charge* (SOC), torque e velocidade angular), os momentos de alternância entre os modos elétrico, combustão interna e híbrido durante a operação. As regras

de controle visam o melhor aproveitamento das fontes de energia do ônibus (eletricidade ou diesel).

Os resultados da simulação para o consumo de energia são diretamente dependentes de três fatores (JIAXUE *et al.*, 2009): i) consistência entre os parâmetros do ônibus e seus componentes internos; ii) aderência dos modelos do motor elétrico e bateria com os dispositivos reais utilizados; iii) ajuste das regras de controle de operação, com objetivo de economia de energia (SOC) e redução de emissão de poluentes.

Os modos de operação do ônibus se alternam de acordo com as regras estabelecidas pela lógica de controle, conforme a Figura 5.

**Figura 5 – Transições entre os modos de operação do ônibus.**



**Fonte: Autoria própria**

As regras de transição dos três modos de operação da Figura 5 são:

- **Modo elétrico:** o ônibus inicia a movimentação usando apenas a energia proveniente das baterias. O motor elétrico é o único responsável pela tração do ônibus, quando há paradas e retomadas de movimento. O modo elétrico torna-se inativo quando o modo de combustão interna entra em operação. Em todos os modos de funcionamento do motor elétrico é necessário que o nível de SOC seja igual ou superior ao limite mínimo de 30%;
- **Modo de combustão interna:** o ônibus faz a transição do modo elétrico para combustão interna quando a velocidade angular requerida for superior à velocidade angular de repouso do motor à combustão. O ônibus sempre opera em modo de combustão interna, caso o nível de energia das baterias estiver abaixo de um limite mínimo;
- **Modo híbrido:** a transição do modo de combustão interna para modo híbrido é feita quando o torque requisitado for superior ao valor máximo que o motor à combustão pode suprir. A atuação conjunta dos motores elétrico e à combustão para tração do ônibus ocorre nos momentos de maior aceleração. O funcionamento em paralelo de ambos os motores reduz



o consumo de combustível e a consequente emissão de poluentes. Assim, o modo híbrido é ativado com nível de SOC igual ou superior ao limite mínimo de 30%, torque requisitado superior ou igual ao disponibilizado pelo motor à combustão e velocidade angular maior do que a velocidade angular de repouso do motor à combustão.

### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO DA SIMULAÇÃO

O software utilizado nesta dissertação para simular o comportamento de um ônibus híbrido *plug-in* foi obtido do projeto SHEV-SP. O simulador do SHEV-SP é disponibilizado pela MathWorks no portal da empresa<sup>1</sup>, cujo projeto está disponível no *Github*<sup>2</sup>. A metodologia de simulação implementada é uma simplificação do modelo de (DIXON *et al.*, 2015).

A Tabela 2 mostra os parâmetros de configuração do ônibus elétrico híbrido *plug-in* utilizado na simulação em grupos de componentes: chassi, motor elétrico, motor à combustão, transmissão e bateria (STOCKAR *et al.*, 2011; CHEN *et al.*, 2016). A maior parte dos parâmetros está no grupo de componentes do chassi do ônibus.

**Tabela 2 – Parâmetros do ônibus elétrico híbrido *plug-in*.**

Parâmetro	Valor
Peso	23.200 kg
Área frontal	7,75 m <sup>2</sup>
Comprimento	12,10 m
Altura	4,25 m
Coefficiente de arrasto	0,70
Altura do centro de gravidade	0,98 m
Tensão nominal da bateria	525 V
Capacidade da bateria	102 Ah
Relação torque (motor elétrico)	600 Nm (2000 rpm)
Potência máxima (motor elétrico)	105 kW
Relação torque (motor diesel)	830 Nm (2000 rpm)
Potência máxima (motor diesel)	150 kW
Relações da transmissão	6,23/3,87/2,41/1,48/1,00/0,84

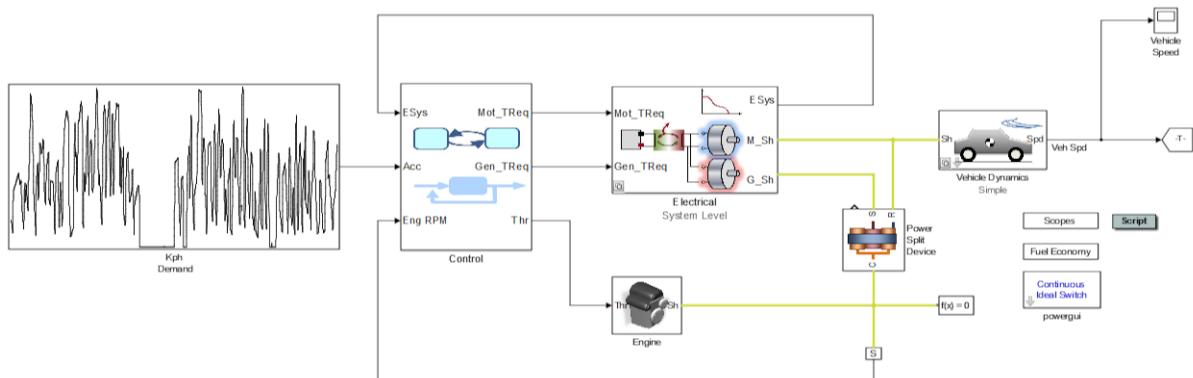
**Fonte: (DREIER *et al.*, 2020)**

A simulação no SHEV-SP é integrada e iterativa entre os blocos que compõem o modelo. A Figura 6 mostra o diagrama Matlab/Simulink da simulação, similar ao da Figura 4, que permite configurar individualmente os blocos dos diferentes componentes do ônibus usando os parâmetros da Tabela 2. O fluxo de entrada é composto pelo ciclo de condução e pela configuração de parâmetros do ônibus. Os blocos de controle, motor elétrico, motor à combustão, transmissão e chassi vêm em seguida. As informações de saída de cada bloco servem como

<sup>1</sup> <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28441-hybrid-electric-vehicle-model-in-simulink>

<sup>2</sup> <https://github.com/mathworks/Simscape-HEV-Series-Parallel>

**Figura 6 – Modelo Matlab descrito.**



**Fonte: Autoria própria**

variáveis de entrada para os blocos seguintes. Parte das variáveis simuladas é realimentada para o bloco de controle, que recalcula os torques necessários. Isso permite avaliar o consumo de energia e a mais diversas condições de operação do ônibus (FATHY *et al.*, 2006).

Nesta dissertação, dá-se ênfase aos resultados de consumo de energia elétrica pelo ônibus, que se traduz no percentual de energia da bateria do ônibus dado pelo SOC. Os resultados obtidos são baseados na utilização de um grande número de ciclos de condução dos ônibus do terminal Pinheirinho em diferentes dias. Assim, o perfil de consumo dos ônibus dado pelo SOC permite caracterizar estatisticamente o consumo de energia elétrica nas diferentes linhas de ônibus, conforme o Capítulo 6.

### 3.4 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Este capítulo mostra os detalhes do modelo de simulação utilizado para obter o consumo de energia do ônibus elétrico híbrido *plug-in*. O simulador utilizado foi obtido do projeto SHEV-SP, disponibilizado pela empresa Mathworks para o pacote Matlab/Simulink. A metodologia de simulação implementada é uma simplificação do modelo de (DIXON *et al.*, 2015).

O modelo de simulação é dividido em blocos funcionais correspondentes ao motor elétrico, gerador, bateria, motor à combustão, transmissão e propriedades físicas do veículo. É descrita também uma lógica de controle que permite chavear entre os modos de operação elétrico, combustão interna e híbrido. Este modelo é genérico o suficiente para simular o comportamento de diversos tipos de veículos a partir de um ciclo de condução fornecido externamente. Nesta dissertação, o modelo de simulação foi parametrizado de acordo com os dados do ônibus elétrico híbrido *plug-in* utilizado para testes em Curitiba.

Os ciclos de condução utilizados na simulação foram coletados das diversas viagens dos ônibus em circulação no terminal Pinheirinho, conforme a metodologia do Capítulo 4. Assim, o consumo de energia elétrica simulado dos ônibus é dado pelo SOC, que permite caracterizar estatisticamente o consumo de energia elétrica nas diferentes linhas de ônibus do terminal Pinheirinho, conforme os resultados do Capítulo 6.

## 4 CARACTERIZAÇÃO DOS CICLOS DE CONDUÇÃO DOS ÔNIBUS

Este capítulo apresenta os dados e a metodologia adotada para a obtenção dos ciclos de condução dos ônibus a partir da monitoração da operação do transporte. Inicialmente, alguns conceitos sobre ciclos de condução são apresentados na Seção 4.1. Os dados e o sistema de monitoração do transporte de Curitiba são apresentados na Seção 4.2 e a metodologia adotada na Seção 4.3.

### 4.1 CONCEITOS INICIAIS

Atualmente, a maioria dos equipamentos de supervisão ônibus de sistema de transportes estão interligados aos centros de controle e gerenciamento de tráfego das cidades através de comunicação sem fio de dados. Com isso, a posição dos ônibus pode ser facilmente registrada e obtida através de dados de *Global Positioning System* (GPS) presentes nos equipamentos de supervisão (CHEN *et al.*, 2016).

Um ciclo de condução é a composição de valores de velocidade em um determinado período de tempo. O ciclo de condução recebe influência de agentes externos como condições climáticas, características da via de circulação e comportamento do condutor. Uma grande quantidade de ciclos de condução foi definida ou especificada por agências governamentais de países ou blocos econômicos (LEEMPUT *et al.*, 2012). Essas agências definiram padrões de ciclos de condução para serem utilizados em testes de diferentes veículos automotivos. Na maioria dos testes, a preocupação é na avaliação dos resultados de indicadores de poluição. A coleta de dados, por agências governamentais, de velocidade em períodos de tempo tem como objetivo verificar as evidências de impactos significativos de performance (consumo, poluição, desgastes mecânicos e etc) causados por diferentes condições dos ciclos de condução (STAACKMANN *et al.*, 1997).

O perfil de velocidade durante o tempo é criado ao transformar as informações de latitude e longitude em distância, entre pontos de coletas de dados de localização durante o intervalo de tempo. O conjunto de informações de velocidade e tempo durante uma jornada que o ônibus percorre forma o que é definido como ciclo de condução.

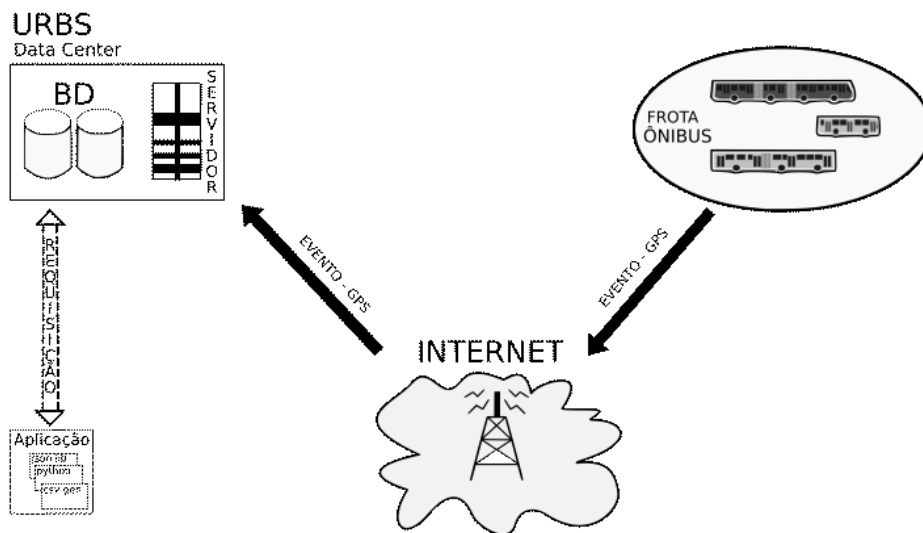
O esforço de análise em relação à obtenção dos ciclos de condução é valioso para enriquecer com informações de parâmetros do ônibus e permite criar correlações entre cada

ciclo de condução e consumo de energia, por exemplo. E esses dados são importantes para o gerenciamento de frota e planejamento do sistema para redução de custos e melhorias ao atendimento de metas estabelecidas, como redução de poluição tempo de espera e ocioso dos veículos. De certa forma, os ciclos de condução são base fundamental para utilização do modelo de simulação dos ônibus híbridos que é parte deste trabalho.

#### 4.2 BASE DE DADOS DO TRANSPORTE DE CURITIBA

O sistema de transporte da cidade de Curitiba, administrado pela Urbanização de Curitiba S.A. (URBS), monitora e armazena informações sobre as linhas de ônibus que circulam pela cidade. As informações correspondem à posição geográfica dos ônibus no decorrer do dia. A Figura 7 mostra uma visão geral do envio de dados dos ônibus até o *data center* da URBS.

**Figura 7 – Diagrama do sistema de monitoração dos ônibus do transporte de Curitiba.**



**Fonte: Autoria própria**

Os pacotes de informações transmitidos de cada ônibus trafegam pela internet através da conexão de dados de uma operadora de telefonia celular. Esses pacotes, ao chegarem no sistema de gerenciamento, são armazenados em um banco de dados. Dentre os dados disponíveis, há informações das linhas, pontos de ônibus, itinerários, posição dos veículos, número de veículos, data/hora e outros.

A URBS gera diariamente um conjunto de informações sobre o sistema de transporte urbano de Curitiba. As tabelas disponibilizadas são mostradas na Figura 8, com destaque para a tabela *veiculos* que contém os dados georreferenciados dos ônibus.

Figura 8 – Tabelas do banco de dados da URBS.

trechositinerario		pontoslinhas		tabelaVeiculo	
cod linha	nome	nome	cod linha	cod linha	nome linha
nome linha	lat	num	nome linha	num	nome linha
cod categoria	lon	lat	veiculo	lat	veiculo
nome categoria	seq	lon	horario	seq	horario
cod empresa	grupo	seq	tabela	grupo	tabela
nome empresa	sentido	grupo	cod ponto	sentido	cod ponto
cod pto parada th	tipo	tipo		tipo	
nome pto parada th	itinerary id	itinerary id		itinerary id	
nome pto abreviado	cod	cod		cod	
seq pto th th					
cod itinerario					
pto especial					
cod pto trecho a					
seq ponto trecho a					
cod pto trecho b					
seq ponto trecho b					
extensao trecho ate b					
tipo trecho					
stop code					
stop name					
codixo urbs					

veiculos		pois		tabelalinha	
veic	poi name	hora	hora	hora	hora
lat	poi category	ponto	ponto	ponto	ponto
lon	poi lat	dia	dia	dia	dia
dthr	poi lon	num	num	num	num
cod linha	poi desc	tabela	tabela	tabela	tabela
		atual	atual	atual	atual
		cod	cod	cod	cod

linhas		shapelinhas	
cod	sho	sho	sho
nome	lat	lat	lat
somente cartao	lon	lon	lon
categoria servico	cod	cod	cod
nome cor			

Fonte: Autoria própria

Para este trabalho, as tabelas *pois*, *linhas*, *tabelalinha* e *veiculos* são utilizadas para a construção dos ciclos de condução. Os dados destas tabelas são disponibilizados em arquivos JSON - Formato de arquivo para troca de informações, do inglês *JavaScript Object Notation* (JSON). As tabelas *pois*, *linhas*, *tabelalinha* não sofrem mudanças diárias, sendo descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição das tabelas de dados utilizadas.

Tabela	Descrição
<i>pois</i>	Contém as coordenadas do terminal considerado;
<i>tabelalinha</i>	Contém as coordenadas dos pontos de parada das linhas; o cruzamento com a tabela anterior permite identificar as linhas que servem o terminal;
<i>linhas</i>	Contém os dados que descrevem as linhas de ônibus; o cruzamento com as tabelas anteriores permite complementar a informação das linhas que servem o terminal;
<i>veiculos</i>	Contém os eventos de posição dos ônibus com data e horário.

Fonte: Autoria própria

Ao final do processamento das informações das três primeiras tabelas da Tabela 3, todas as linhas de ônibus que servem o terminal, assim como todos os pontos de início e final de linha, são identificados.

Finalmente, a tabela *veiculos* permite cruzar as informações com as outras tabelas para identificar todas as viagens de ônibus que partem e chegam no terminal. Porém, tem-se apenas a informação de posição dos ônibus ao longo do dia. Nenhuma informação de velocidade está disponível. A partir desses dados de posição registrados com data e horário, é possível estimar a velocidade dos ônibus e os ciclos de condução, conforme a Seção 4.3.

### 4.3 CONSTRUÇÃO DO CICLO DE CONDUÇÃO

A partir dos dados de monitoração da movimentação do ônibus, é possível obter o ciclo de condução de cada viagem de ônibus de uma determinada linha. O ciclo de condução assim obtido é utilizado como entrada para a simulação do consumo de energia apresentada no Capítulo 3. Esta seção descreve a abordagem adotada para a obtenção da velocidade dos ônibus a partir dos dados de posicionamento a uma taxa de amostragem adequada para o simulador do Capítulo 3.

Basicamente, os ciclos de condução são formados por pares de dados (velocidade, tempo) de cada viagem de ônibus. A velocidade é calculada pela razão entre o espaço percorrido e o tempo decorrido para percorrê-lo. Tempos de parada do ônibus são identificados e descontados, ou seja, considera-se apenas o tempo de efetivo movimento do ônibus para o cálculo da velocidade. Entretanto, os valores de velocidade assim obtidos podem estar espaçados irregularmente no tempo, pois dependem do horário no qual foram registradas as posições consecutivas do ônibus. Há casos em que os intervalos de tempo são de minutos e outros de poucos segundos. Este *trace* de velocidade do ônibus não é adequado para ser usado como entrada do simulador do Capítulo 3. É necessário utilizar valores de velocidade em um intervalo regular de amostragem de tempo.

Para isso, utiliza-se uma interpolação linear entre os dados de velocidade inicialmente obtidos. Além disso, os diversos ciclos de condução (viagens) do ônibus ao longo do dia são determinados comparando-se a posição atual do ônibus com a posição do terminal. Assim, é possível identificar ciclos de condução de acordo com o início e retorno do ônibus ao terminal. Após a interpolação dos valores de velocidade e determinação das viagens, obtém-se o ciclo de condução desejado com valores de velocidade a cada 1 s. Por fim, os dados processados são gravados em um banco de dados para melhor acesso e consulta dos resultados.

**Tabela 4 – Ferramentas computacionais utilizadas.**

Pacote	Descrição
Python	Linguagem de programação
Pycharm	Ambiente gráfico de interface para desenvolvimento de aplicações
Pandas	Biblioteca de manipulação especializada em estrutura de dados
Postgresql	Banco de dados com modelo objeto-relacional de dados

**Fonte: Autoria própria**

As ferramentas computacionais da Tabela 4 foram utilizadas no processamento dos dados. A linguagem de programação *Python* e sua biblioteca de funções *Pandas* são especializadas

na manipulação das estruturas de dados, tornando mais adequada a pesquisa de dados nos arquivos originais da URBS em formato JSON. A interface de desenvolvimento *Pycharm* foi o ambiente de processamento e desenvolvimento das aplicações em *Python*, com destaque para a facilidade de uso e configuração de pacotes adicionais. O banco de dados *Postgresql*<sup>1</sup> permitiu que os resultados do processamento dos ciclos de condução fossem persistidos em formato de banco de dados para geração e consulta em formato adequado para a utilização na simulação do modelo de consumo de energia.

#### 4.4 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Os ciclos de condução são necessários para a simulação do consumo de energia elétrica dos ônibus elétrico-híbridos. Neste capítulo, os conceitos iniciais sobre ciclos de condução da literatura são apresentados, assim como a fonte e a estrutura dos dados de monitoração da operação do transporte de Curitiba. A partir dos dados georreferenciados de posicionamento dos ônibus, uma metodologia para a construção dos ciclos de condução é proposta. Basicamente, dados de posição dos ônibus são transformados em um perfil de velocidade com taxa de amostragem adequada para uso no simulador do Capítulo 3.

---

<sup>1</sup> <https://www.postgresql.org/>



## 5 SIMULAÇÃO DO TERMINAL PINHEIRINHO

Este capítulo apresenta o modelo de simulação do Terminal Pinheirinho de Curitiba. O Terminal Pinheirinho possui grande importância na cidade de Curitiba pela sua localização em região populosa e pelo número de linhas que opera. Com base nas simulações implementadas, vários cenários simulados consideram a substituição dos ônibus movidos a diesel por ônibus elétrico-híbridos, os quais são avaliados sob o ponto de vista do consumo de energia e política de recarga das baterias. Na seção 5.1, são apresentados detalhes do Terminal Pinheirinho que servem como dados de entrada para a simulação. O modelo de simulação é descrito na Seção 5.2, mostrando detalhes dos elementos e da lógica utilizados para gerar os eventos da operação do terminal no pacote de simulação Simio<sup>1</sup> (*Simulation Modeling framework based on Intelligent Objects*). Este pacote é um software de simulação de eventos discretos acrescido de funcionalidades para a interação e troca de informação entre os objetos da simulação. A Seção 5.3 trata especificamente da simulação das operações de recarga no terminal. A Seção 5.4 apresenta os indicadores de desempenho gerados pela simulação e utilizados para avaliar atrasos, filas e nível de energia das baterias.

### 5.1 DADOS DE ENTRADA

O terminal Pinheirinho possui 40 linhas de ônibus separadas em grupos caracterizados pelo tipo de ônibus que servem o transporte público de Curitiba. Os tipos de ônibus disponíveis vão desde um modelo básico para linhas alimentadoras, que percorrem o trajeto do terminal para os bairros, até modelos maiores que fazem a ligação entre terminais.

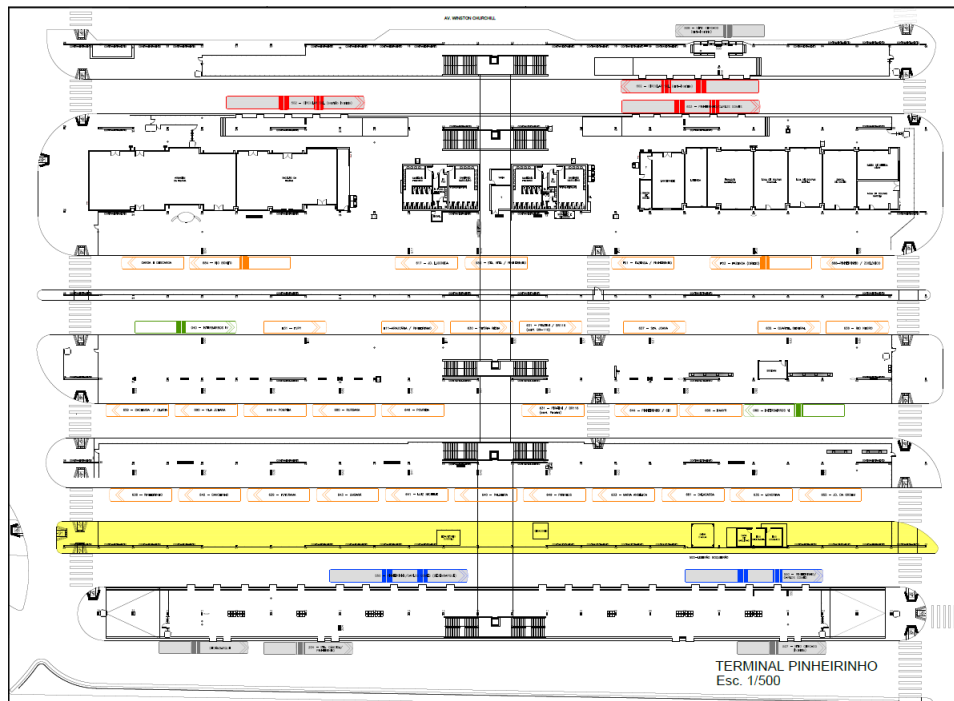
A planta do terminal Pinheirinho é mostrada na Figura 9, contendo os locais de embarque e desembarque de passageiros de cada linha de ônibus. Pode-se distinguir seis vias de circulação de ônibus (identificadas pelas faixas de pedestres à esquerda e direita). Visualizando a Figura 9 de baixo para cima, tem-se a primeira via dos ônibus biarticulados, com capacidade para transportar até 250 passageiros, que fazem a ligação direta com os terminais Hauer, Sítio Cercado, Central, Carmo, Central e Juvevê. Da segunda via em diante, até a sexta via, tem-se as linhas alimentadoras que conectam o terminal aos bairros da região.

A programação horária dos ônibus é fornecida conforme o exemplo da Tabela 5, com

---

<sup>1</sup> <https://www.simio.com/>

**Figura 9 – Planta baixa do terminal de ônibus Pinheirinho em Curitiba.**



Fonte: URBS

os horários de saída de cada ônibus do terminal. A Tabela 5 mostra um exemplo da programação horária por dia das linhas (L) 635, 642, 655, 640 e 639, assim como o número do ônibus (C) que serve a linha no horário de saída indicado dos ônibus. A mesma tabela de horários é utilizada para os dias da semana de segunda à sexta-feira. Sábados, domingos e feriados possuem tabelas horárias diferenciadas devido à demanda reduzida de passageiros. A Tabela 5 mostra apenas uma parte do total de tabelas de programação horária de 221 ônibus em circulação por dia no terminal (segunda a sexta-feira).

**Tabela 5 – Exemplo de tabela horária por linha (L) e número do ônibus (C).**

L/C	Horários de saída									
635/2	05:55	06:40	07:26	08:12	16:38	17:24	18:10	18:56		
642/1	05:30	06:40	07:26	08:12	16:38	17:24	18:10	18:56	18:10	18:56
655/2	06:27	07:23	08:15							
640/2	05:57	06:43	07:29	08:16	17:04	17:52	18:40	19:28		
639/5	06:00	06:56	08:01	09:05	17:38	18:51	19:57			

Fonte: Autoria própria

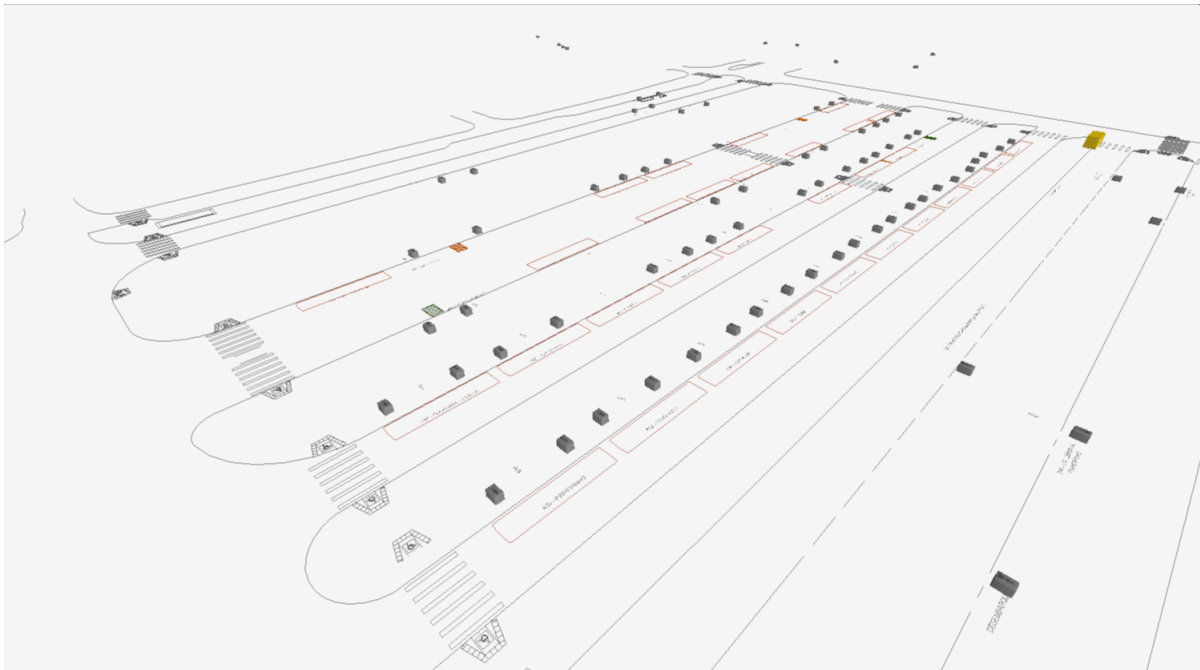
Além dos dados de programação horária dos ônibus, é preciso fornecer os dados do tempo de viagem e consumo da bateria, de acordo com os resultados das Figuras 13 e 15 da Seção 6.1.1, obtidos a partir dos ciclos de condução de cada linha. O tempo de parada dos ônibus no terminal é obtido pela diferença entre o tempo de entrada (consequência do tempo de viagem) e saída do terminal, conforme a Figura 14 da Seção 6.1.1. A distribuição de probabilidade do

tempo de permanência dos ônibus de cada linha é importante para avaliar se há condições de realizar recargas de energia com base nas janelas de tempo oportunizadas.

## 5.2 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DO TERMINAL

A planta do Terminal Pinheirinho mostrada na Figura 9 é representada na simulação pela Figura 10, que contém os locais de embarque e desembarque de passageiros (quadrados escuros) de cada linha de ônibus, assim como a localização da estação de recarga (bloco em amarelo no canto superior direito). Esse *layout* foi seguido para permitir o desenho dos elementos da simulação no Simio. A divisão das vias de circulação dentro terminal mostrada na Figura 10 possui a localização exata do ponto de parada de cada linha de ônibus do terminal.

**Figura 10 – Tela do pacote de simulação Simio representando o terminal Pinheirinho.**



**Fonte: Autoria própria**

O modelo de simulação de eventos discretos implementado no Simio é um experimento estocástico complexo, no qual entidades ou agentes interagem entre si a partir da ocorrência de eventos assíncronos determinados por uma lógica de geração e comportamento das entidades. O modelo pode ser visto como uma rede de servidores que modelam ações ou serviços que requerem um determinado tempo para serem concluídos. As entidades que não podem ser atendidas por um servidor ocupado aguardam em filas pela liberação do serviço. A partir deste mecanismo geral de funcionamento da simulação, medidas de desempenho são obtidas da simulação, tais

como tempos de serviço, tamanhos de fila e tempos de espera, dentre outros.

Em geral, um modelo de simulação de eventos discretos pode ser descrito a partir de: i) um conjunto de dados de entrada (descrito na seção 5.1); ii) um conjunto de entidades ou agentes que executam e sofrem ações disparadas pela ocorrência de eventos; iii) um conjunto de ações que realizam tarefas que demandam um certo período de tempo para serem concluídas e requerem determinados recursos para serem executadas; iv) uma sequência de eventos que determina as ações a serem executadas em diversas situações (lógica do modelo).

Para a simulação do Terminal Pinheirinho, tem-se a entidade básica do tipo ônibus. Essa entidade é um objeto de transporte que se movimenta na área definida para o terminal. Diferentes linhas definem diferentes trajetos de circulação dos ônibus dentro do terminal, assim como os respectivos pontos de parada. As entidades ônibus possuem como atributos a velocidade de circulação, a linha de ônibus à qual pertence e os pontos de entrada e de saída do terminal.

O modelo de simulação do terminal Pinheirinho requer as seguintes ações sobre as entidades do tipo ônibus: i) criação; ii) movimentação dentro do terminal; iii) espera para embarque/desembarque até o próximo horário de saída. No início da simulação, os ônibus são criados e aguardam o horário de entrada no terminal em uma lista de ônibus com horários programados para cada linha. Uma vez dentro do terminal, os ônibus circulam até os pontos de parada da linha para embarque/desembarque e aguardam o próximo horário de saída. Este ciclo se repete para cada viagem do ônibus.

A lógica resumida da simulação do terminal Pinheirinho é dada pelo Algoritmo 1. As entidades do tipo ônibus são geradas para cada linha de acordo com a tabela de horários programados (linhas 3-6 do Algoritmo 1) e tempo de viagem. Em seguida, os ônibus entram no terminal, aguardam o tempo para embarque/desembarque de passageiros e o horário de saída programado (linhas 8-10 do Algoritmo 1). Este ciclo se repete a cada nova viagem do ônibus. O tempo de viagem de cada linha é gerado aleatoriamente a partir dos ciclos de condução de cada linha. No final do dia, a lista de ônibus gerados está completa, de acordo com a tabela de horários programados.

### 5.3 SIMULAÇÃO DA OPERAÇÃO DE RECARGA

Um dos objetivos desta dissertação é avaliar cenários de recarga de ônibus elétrico-híbridos em um terminal utilizando uma estação de recarga de energia. A estação de recarga está localizada dentro do terminal e os ônibus compartilham sua estrutura. Na simulação, a estação

**Algoritmo 1 – Lógica utilizada na simulação dos ônibus no terminal.**

```

1: Início
2: para HorarioAtual!=TempoFinal faça
3:   Lê TabelaHorario // programação diária dos ônibus
4:   Gera TempoViagem // a partir dos ciclos de condução
5:   se HorarioAtual==(TabelaHorario + TempoViagem) então
6:     se PrimeiraViagem==TRUE então
7:       Cria entidade ônibus na respectiva linha
8:     finaliza se
9:     Insere o ônibus no terminal
10:    Executa embarque/desembarque e aguarda horário de saída
11:    Deixa o terminal no horário de saída programado para uma nova viagem
12:  finaliza se
13: finaliza para

```

**Fonte: Autoria própria**

de recarga é vista como um servidor para o qual os ônibus demandam serviços de recarga das baterias. Assim, a estação de recarga possui uma política de atendimento e uma fila, que ordena o atendimento dos ônibus que estão aguardando para uso da estação.

Basicamente, a inclusão da estação de recarga introduz uma nova ação sobre as entidades do tipo ônibus. Após a chegada no terminal, os ônibus elétrico-híbridos têm o nível do SOC avaliado para decidir por uma recarga das baterias. Além disso, novas possibilidades de circulação dentro do terminal são criadas para permitir o deslocamento do ônibus desde o ponto de desembarque até a estação de recarga.

Nesta dissertação, são simulados dois cenários para recarga das baterias dos ônibus: i) quando um ônibus chega ao terminal com nível de carga da bateria abaixo de um determinado limiar; ii) quando o tempo de permanência no terminal é suficiente para recarga, sendo denominada recarga de oportunidade.

Para o cenário 1, o ônibus elétrico-híbrido será submetido à recarga para  $SOC < 30\%$ , devido à faixa recomendada para carga e descarga da bateria entre 20-80% (DREIER *et al.*, 2020), acrescida de uma margem de segurança de 10%. A lógica de simulação para este cenário é mostrada no Algoritmo 2. A decisão de fazer recarga das baterias ocorre após o desembarque (linha 5 do Algoritmo 2). Assim, se a estação de recarga estiver ocupada, o ônibus aguarda no ponto de desembarque de passageiros (linha 7 do Algoritmo 2). Assim que a estação é desocupada, o ônibus se desloca (sem passageiros) até a estação de recarga. O tempo de recarga é considerado proporcional ao nível de SOC e a bateria é completamente carregada durante a recarga. A fila de uso da estação de recarga é do tipo FIFO (*First-In First-Out*). Terminada a operação de recarga, o ônibus segue até o embarque, aguarda o próximo horário de saída do terminal e inicia nova viagem (linhas 12-14 do do Algoritmo 2).

No cenário 2, além de um limite mínimo para o SOC (superior ao do cenário 1), o tempo disponível para recarga é também avaliado. A estratégia empregada neste cenário é a de recarregar a bateria quando há tempo suficiente (acima de um determinado limite) para a recarga, mesmo que o nível do SOC não seja crítico, ou seja, não requeira recarga imediata sob pena de esgotar completamente a bateria em uma próxima viagem. A lógica de simulação para o cenário 2 é mostrada no Algoritmo 3. Embora similar ao cenário 1, a recarga ocorre para SOC menor que 50% e tempo de espera maior que 10 min (linha 5 do Algoritmo 3). Esses valores foram escolhidos com base em um tempo típico de recarga de 6 min acrescido de uma margem de tempo para embarque/desembarque. O mesmo tipo de fila FIFO do cenário 1 é utilizado.

**Algoritmo 2 – Simulação da estação de recarga - cenário 1 (SOC abaixo de 30%)**

```

1: Início
2: para HorárioAtual!=TempoFinal faça
3:   se LocalOnibus==PontoDesembarque então
4:     Executa desembarque
5:     Atualiza SOC // a partir do consumo simulado dos ciclos de condução
6:     se SOC < 30% então
7:       se EstaçãoRecarga==Ocupada então
8:         Aguarda no desembarque liberar estação
9:       finaliza se
10:      Transfere o ônibus para a estação e carrega bateria
11:    finaliza se
12:    Executa embarque e aguarda horário de saída
13:    Deixa o terminal para uma nova viagem
14:  finaliza se
15: finaliza para

```

**Fonte: Autoria própria**

Em ambos os cenários de simulação, os ônibus aguardam no ponto de desembarque e apenas seguem para a estação de recarga quando a estação está liberada. A fila de atendimento controla a ordem de recarga dos ônibus, porém não há acúmulo de ônibus na entrada da estação.

#### 5.4 INDICADORES DE DESEMPENHO DA OPERAÇÃO DO TERMINAL

Os resultados da simulação são utilizados para avaliar o desempenho da operação do terminal Pinheirinho ao substituir os ônibus de determinadas linhas por ônibus elétrico-híbridos. Para tanto, são utilizados os seguintes indicadores, obtidos dos dados coletados durante a simulação:

1. tempo médio de recarga da bateria dos ônibus;
2. tempo médio de parada dos ônibus no terminal;

### Algoritmo 3 – Simulação da estação de recarga - cenário 2 (recarga de oportunidade)

```

1: Início
2: para HorárioAtual!=TempoFinal faça
3:   se LocalOnibus==PontoDesembarque então
4:     Executa desembarque
5:     Atualiza SOC // a partir do consumo simulado dos ciclos de condução
6:     se SOC < 50% e TempoParada > 10 min então
7:       se EstaçãoRecarga==Ocupada então
8:         Aguarda no desembarque liberar estação
9:       finaliza se
10:      Transfere o ônibus para a estação e carrega bateria
11:    finaliza se
12:    Executa embarque e aguarda horário de saída
13:    Deixa o terminal para uma nova viagem
14:  finaliza se
15: finaliza para

```

**Fonte: Autoria própria**

3. tamanho da fila de espera para utilização da estação de recarga;
4. valor médio do SOC por linha de ônibus;
5. número de recargas por linha de ônibus.

O tempo médio de recarga é importante para estabelecer a viabilidade da operação com ônibus elétrico-híbrido, uma vez que o tempo de recarga não deve impactar no tempo de parada programada no terminal. Isso é avaliado pelo tempo médio de parada dos ônibus no terminal. O tamanho da fila para o uso da estação de recarga define se a política de recarga está adequada para atender os ônibus. Esta política é adequada quando evita a formação de filas extensas em determinados horários que possam inviabilizar a operação do terminal.

O valor médio do SOC define o nível de energia que os ônibus operam no sistema. Níveis elevados de SOC indicam pouco risco de desabastecimento, mas podem indicar uma política conservativa de recarga das baterias. Isso tem impacto direto no número de recargas por linha de ônibus, pois demandam utilização da estação de recarga.

## 5.5 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta o modelo de simulação proposto para o Terminal Pinheirinho. Este modelo captura os principais aspectos da operação do terminal, usando como dados de entrada a programação horária dos ônibus, assim como os tempos de viagem, consumo da bateria e tempo de parada dos ônibus no terminal, obtidos dos ciclos de condução do Capítulo 4. A simulação foi implementada no pacote de simulação de eventos discretos Simio. Neste pacote,

os ônibus são implementados como entidades. Cada ônibus segue uma programação horária que determina o horário de entrada no terminal e o percurso de circulação dentro do terminal até os pontos de embarque e desembarque de passageiros. O ônibus então aguarda o próximo horário de saída e o ciclo se repete quando ocorre o retorno para o terminal. A operação da estação de recarga também foi simulada para dois cenários de operação: i) quando um ônibus chega ao terminal com nível de carga da bateria abaixo de um determinado limiar; ii) quando o tempo de permanência no terminal é suficiente para recarga, sendo denominada recarga de oportunidade. Os seguintes indicadores de desempenho da operação são obtidos da simulação: i) tempo médio de recarga dos ônibus; ii) tempo médio de espera dos ônibus para recarga; iii) tamanho da fila de espera para utilização da estação de recarga; iv) valor médio do SOC por linha de ônibus; v) número de recargas por linha de ônibus. Estes indicadores serão utilizados para avaliar o impacto da substituição dos ônibus padrão pelos ônibus elétrico-híbridos, cujos resultados serão apresentados no Capítulo 6.



## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da simulação do Terminal Pinheirinho quando determinadas linhas de ônibus passam a operar com ônibus elétrico-híbridos. Para tanto, são mostrados os resultados obtidos a partir dos ciclos de condução dos ônibus com os dados da URBS na Seção 6.1. Aproximadamente 5.500 ciclos de condução foram obtidos dos dados de três semanas coletados entre 02-20/09/2019. Os resultados de simulação do consumo de energia dos ônibus a partir dos ciclos de condução são mostrados na Seção 6.1.1. As Seções 6.1.2 e 6.1.3 analisam a influência, nos resultados de consumo de energia elétrica, do perfil de elevação do trajeto dos ônibus e do aumento do peso dos ônibus devido aos passageiros. Além disso, um modelo de regressão linear é proposto na Seção 6.1.4 para o consumo de energia elétrica do ônibus elétrico-híbrido em função da distância e tempo de viagem de uma linha de ônibus. Na seção 6.2 são mostrados os resultados da simulação do terminal com ônibus elétrico-híbridos para dois cenários de operação da estação de recarga. Ênfase é dada nos indicadores de utilização da estação por linha de ônibus com efeito sobre o tempo de permanência do ônibus no terminal, tamanho da fila de espera para uso da estação e número de recargas ao longo do dia.

### 6.1 CICLOS DE CONDUÇÃO

Os ciclos de condução são caracterizados pelo perfil de velocidade de cada ônibus em cada linha. A partir dos ciclos de condução, é possível simular o consumo de energia dos ônibus elétrico-híbridos, conforme o Capítulo 3. Como cada linha de ônibus requer várias viagens ao longo do dia sob diferentes condições, o consumo de energia é caracterizado pelo SOC médio das baterias ao retornar para o terminal (supondo que os ônibus saem do terminal com as baterias completamente carregadas).

A Tabela 6 mostra os dados utilizados para a caracterização dos ciclos de condução das linhas de ônibus do terminal Pinheirinho. Os dados foram coletados durante um período de 3 semanas, entre 02-20/09/2019, de segunda à sexta-feira. O número diferente de viagens de cada linha se deve à diferente programação horária dos ônibus de cada linha, que são afetadas pela distância do trajeto, duração do trajeto e número de ônibus de cada linha.

A Figura 11 mostra dois ciclos de condução da linha 632 do terminal Pinheirinho, sendo que a viagem correspondente à curva em azul levou mais tempo para ser completada. Pode-se

**Tabela 6 – Número de viagens por linha de ônibus e faixa horária do dia durante as três semanas de 02-20/09/2019.**

Linha	Número de viagens			Total
	7:00-9:00	12:00-14:00	17:00-19:00	
528	100	68	24	192
617	144	144	68	356
630	88	172	48	308
632	52	92	68	212
633	94	148	80	322
635	80	84	80	244
636	64	76	48	188
637	48	152	48	248
638	44	124	72	240
639	90	123	69	282
640	90	123	69	282
641	60	78	60	198
644	60	120	56	236
649	90	129	72	291
650	104	130	88	291
655	96	165	72	322
659	52	92	60	204
680	104	176	76	356
681	56	100	52	208
684	98	164	74	336
690	84	116	44	244

**Fonte: Autoria própria**

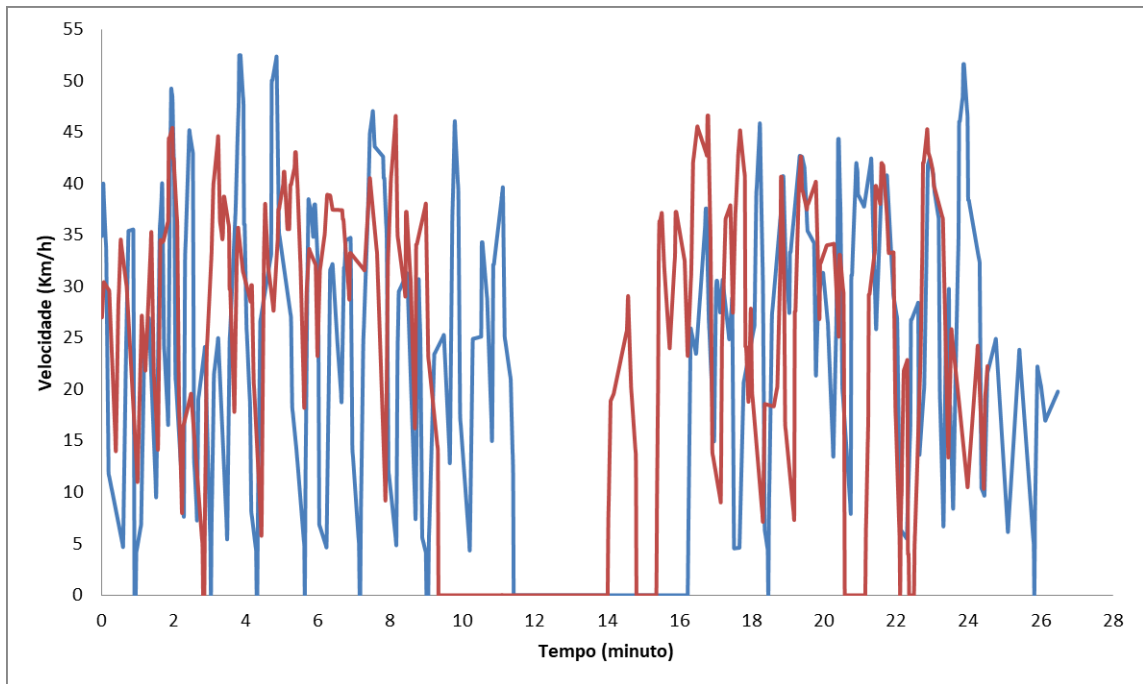
perceber uma grande variação entre um ciclo e outro em termos de velocidade e instantes de parada nos pontos de uma mesma linha de ônibus. A diferença entre os ciclos de condução da Figura 11 é resultado, por exemplo, do tráfego urbano ou da maneira de condução de cada motorista. Se o motorista tiver uma direção mais agressiva, o ciclo de condução apresenta variações rápidas de velocidade em virtude de acelerações bruscas geradas pelo condutor.

A linha 632 possui uma distância total de 8,6 km e leva em torno de 12 min para ser percorrida. Isso pode ser verificado na Figura 11 quando o ônibus para no ponto final da linha (antes de retornar ao terminal) com velocidade nula, aproximadamente na metade da viagem de ida e volta do ônibus ao terminal.

Na Figura 11, os ciclos de condução estão representados em função do tempo de percurso da linha. Portanto, existe um efeito de deslocamento horizontal entre os ciclos azul e vermelho, devido às diferentes condições nas quais as viagens são feitas. Esse efeito pode ser reduzido ao representar o ciclo de condução em função da distância percorrida no trajeto da linha, conforme mostrado na Figura 12. Ao retirar a informação de tempo, nota-se que os perfis de velocidade são similares para as mesmas distâncias percorridas.

A linha 632 é uma linha de ônibus com trajeto curto quando comparada com as demais linhas do terminal Pinheirinho. Assim, a linha 632 é a escolha adequada para avaliar o impacto

**Figura 11 – Exemplo de diferentes ciclos de condução de dois ônibus da linha 632.**



**Fonte: Autoria própria**

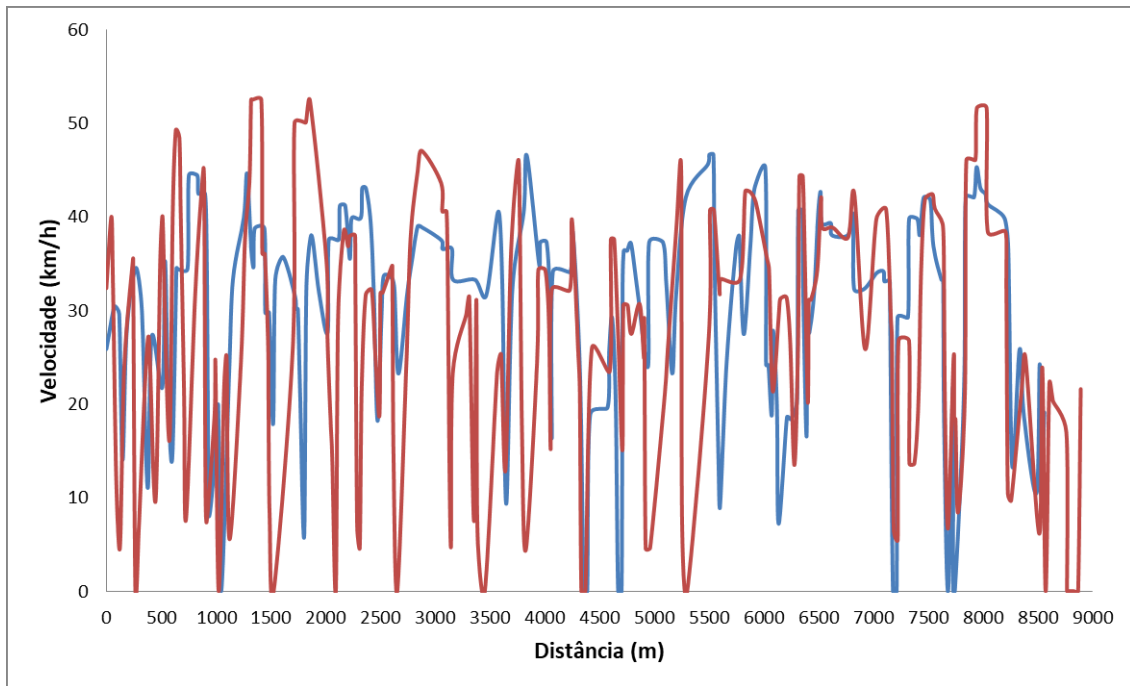
do perfil de elevação do trajeto da linha e da variação de peso do ônibus devido aos passageiros nos resultados de consumo de energia, conforme descrito nas Seções 6.1.2 e 6.1.3.

### 6.1.1 Consumo de energia e SOC

A Tabela 7 mostra as informações dos ciclos de condução (viagens) por linha de ônibus obtidos dos dados coletados da URBS. Para cada linha de ônibus, são mostrados a distância de ida e volta ao terminal (km), o tempo médio de viagem (min), o tempo médio de parada no terminal (min) e a altitude média do trajeto percorrido. Os valores médios da Tabela 7 possuem os correspondentes desvios padrão como subíndice. Além disso, os resultados do consumo de energia elétrica dos ônibus para as várias linhas são obtidos pelo modelo de simulação do Capítulo 3, a partir dos ciclos de condução dos ônibus. Esses resultados são dados pelo valor médio do SOC (%) e pelo percentual médio Pcomb (%) de operação do ônibus em modo à combustão. O valor médio do SOC é computado após o retorno do ônibus ao terminal, considerando que a carga das baterias está completa ao deixar o terminal.

Conforme a Tabela 7, as linhas 641 e 690 apresentam os maiores percentuais de condução no modo à combustão. Provavelmente, isso ocorre devido a essas linhas apresentarem longos trechos de maior velocidade sem muitas paradas. Este padrão de condução favorece a

**Figura 12 – Exemplo de diferentes ciclos de condução de dois ônibus da linha 632, segundo a distância percorrida.**

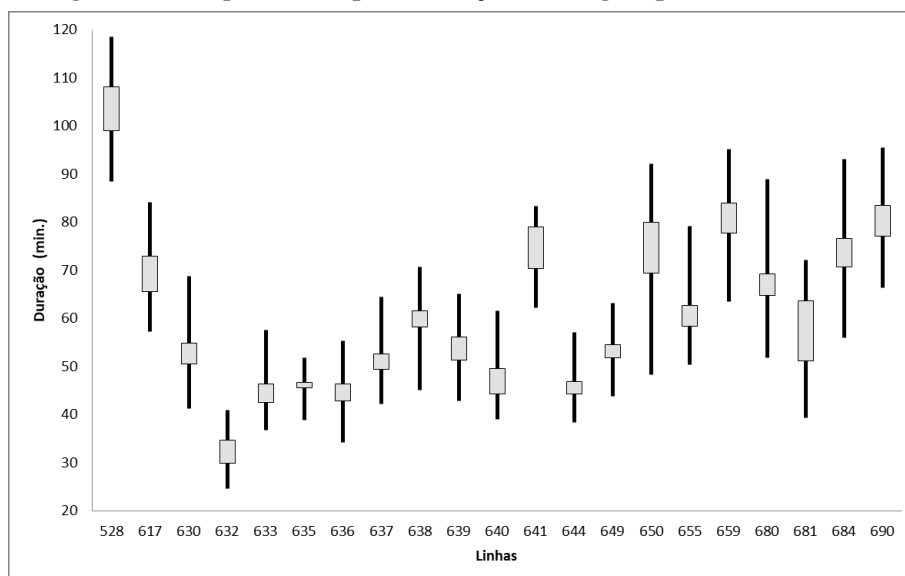


**Fonte: Autoria própria**

manutenção da operação do ônibus no modo à combustão.

As Figuras 13, 14 e 15 mostram os *boxplots* do tempo de duração das viagens, do tempo de parada no terminal e do SOC para cada linha de ônibus, respectivamente. O tempo de duração das viagens inclui o tempo de parada no ponto final da linha.

**Figura 13 – Boxplot do tempo de duração das viagens por linha de ônibus.**



**Fonte: Autoria própria**

As Figuras 13 e 15 mostram que viagens longas têm um maior consumo de energia

**Tabela 7 – Informações dos ciclos de condução por linha de ônibus (distância, tempo médio de viagem, tempo médio de parada no terminal, altitude média do trajeto) e resultados de simulação do consumo médio de energia elétrica SOC (% da carga total da bateria) e da porcentagem média de condução em modo à combustão Pcomb (%), com desvios padrão indicados nos subíndices.**

Linha	Distância (km)	Tempo viagem (min)	Tempo parada (min)	Altitude (m)	SOC (%)*	Pcomb (%)
528	34,7	103,8 <sub>6,2</sub>	8,1 <sub>5,6</sub>	907,5 <sub>18,6</sub>	58,8 <sub>5,5</sub>	13,1 <sub>0,6</sub>
617	24,7	69,2 <sub>5,2</sub>	6,0 <sub>3,8</sub>	919,0 <sub>16,1</sub>	71,8 <sub>2,5</sub>	8,2 <sub>1,3</sub>
630	19,9	52,2 <sub>5,0</sub>	4,2 <sub>3,3</sub>	913,3 <sub>18,1</sub>	78,8 <sub>3,4</sub>	16,2 <sub>2,2</sub>
632	8,9	31,7 <sub>3,4</sub>	4,5 <sub>3,3</sub>	922,5 <sub>07,7</sub>	90,8 <sub>0,8</sub>	2,6 <sub>0,5</sub>
633	12,1	44,9 <sub>2,8</sub>	6,4 <sub>3,0</sub>	910,9 <sub>15,2</sub>	77,2 <sub>0,9</sub>	9,7 <sub>2,9</sub>
635	14,3	46,0 <sub>1,8</sub>	5,6 <sub>3,1</sub>	921,8 <sub>08,2</sub>	79,8 <sub>1,1</sub>	15,2 <sub>3,1</sub>
636	12,6	44,5 <sub>4,0</sub>	4,6 <sub>2,4</sub>	922,4 <sub>07,7</sub>	81,1 <sub>2,5</sub>	6,2 <sub>0,4</sub>
637	13,7	51,1 <sub>2,9</sub>	3,9 <sub>2,8</sub>	916,0 <sub>12,1</sub>	75,8 <sub>2,3</sub>	12,4 <sub>2,8</sub>
638	17,1	59,5 <sub>4,5</sub>	6,4 <sub>3,3</sub>	920,0 <sub>11,8</sub>	79,7 <sub>2,1</sub>	10,5 <sub>0,7</sub>
639	16,6	53,8 <sub>4,1</sub>	6,5 <sub>3,3</sub>	922,4 <sub>09,6</sub>	79,6 <sub>2,3</sub>	12,4 <sub>2,7</sub>
640	15,0	47,0 <sub>4,2</sub>	5,7 <sub>2,8</sub>	926,7 <sub>07,6</sub>	81,1 <sub>3,4</sub>	13,9 <sub>1,9</sub>
641	25,5	74,0 <sub>5,5</sub>	7,3 <sub>3,0</sub>	922,8 <sub>10,2</sub>	81,8 <sub>0,7</sub>	35,1 <sub>1,4</sub>
644	16,2	45,8 <sub>2,9</sub>	4,4 <sub>2,2</sub>	916,3 <sub>13,8</sub>	86,6 <sub>0,9</sub>	6,5 <sub>0,4</sub>
649	16,0	53,4 <sub>3,5</sub>	6,8 <sub>3,4</sub>	911,8 <sub>13,6</sub>	78,5 <sub>1,8</sub>	5,8 <sub>1,9</sub>
650	28,8	74,8 <sub>7,7</sub>	5,4 <sub>3,7</sub>	913,0 <sub>17,0</sub>	73,2 <sub>3,0</sub>	9,3 <sub>1,0</sub>
655	23,4	61,2 <sub>4,4</sub>	6,7 <sub>3,5</sub>	921,2 <sub>16,1</sub>	79,7 <sub>2,8</sub>	26,0 <sub>0,9</sub>
659	34,4	80,3 <sub>6,8</sub>	4,8 <sub>2,6</sub>	918,6 <sub>13,1</sub>	77,0 <sub>4,3</sub>	7,6 <sub>2,8</sub>
680	24,6	66,8 <sub>5,4</sub>	6,5 <sub>3,4</sub>	922,7 <sub>10,9</sub>	73,7 <sub>3,2</sub>	20,2 <sub>1,3</sub>
681	19,5	57,3 <sub>8,1</sub>	7,0 <sub>3,5</sub>	918,7 <sub>13,7</sub>	73,4 <sub>5,4</sub>	12,1 <sub>3,7</sub>
684	25,9	72,7 <sub>6,7</sub>	6,1 <sub>2,7</sub>	917,6 <sub>18,0</sub>	74,8 <sub>4,7</sub>	6,9 <sub>2,0</sub>
690	31,7	80,2 <sub>5,5</sub>	5,6 <sub>2,7</sub>	910,3 <sub>23,1</sub>	80,8 <sub>2,3</sub>	38,3 <sub>2,9</sub>

\* consumo após retorno ao terminal, considerando que o ônibus deixa o terminal com carga total da bateria.

**Fonte: Autoria própria**

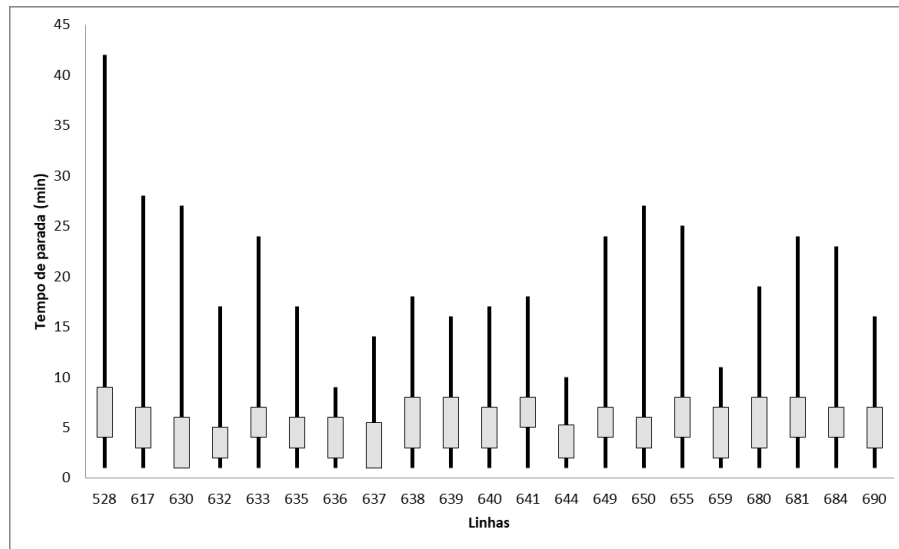
(como era de se esperar). Além disso, viagens curtas apresentam menor variabilidade no cálculo do SOC. Os tempos de parada no terminal da Figura 14 mostram-se concentrados no intervalo de zero a 10 min, com grande parte apresentando elevados valores máximos.

### 6.1.2 Perfil de elevação

As simulações do consumo de energia foram feitas sem levar em conta diferentes elevações nos trajetos dos ônibus. Ou seja, foi considerado um trajeto plano. Entretanto, considera-se que o efeito do perfil de elevação do trajeto está representado no ciclo de condução do ônibus e, portanto, não deve afetar significativamente os resultados.

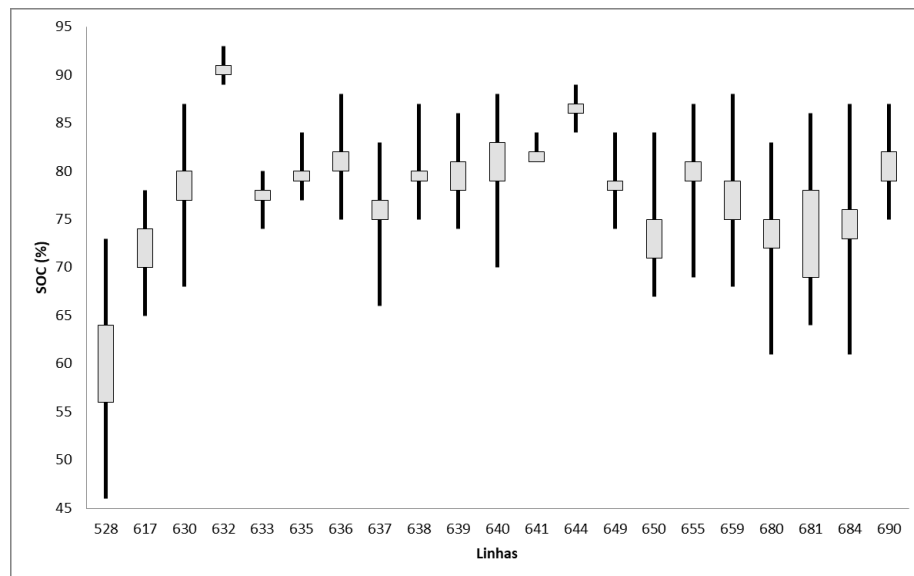
As Figuras 16 e 17 mostram dois ciclos de condução (mais longo e mais curto) dos ônibus da linha 632 e o respectivo perfil de elevação do trajeto em função da distância percorrida. Locais de maior inclinação positiva (subida) ou negativa (descida), assim como instantes de parada do ônibus, podem ser identificados. Esses locais de maior inclinação indicam maiores alternâncias da velocidade do ônibus. Assim, descidas agressivas causam o aumento de veloci-

**Figura 14 – Boxplot do tempo de parada no terminal por linha de ônibus.**



Fonte: Autoria própria

**Figura 15 – Boxplot do SOC por linha de ônibus.**

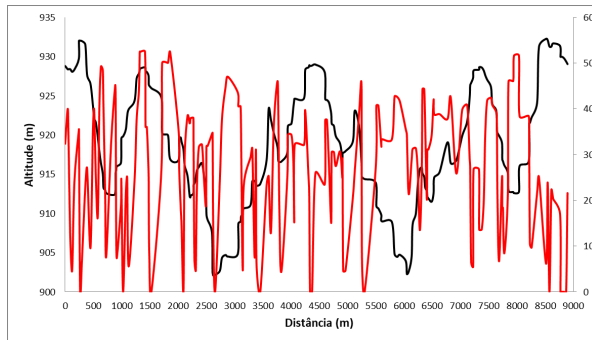


Fonte: Autoria própria

dade e subidas agressivas causam redução da velocidade do ônibus, dependendo muito mais do número de paradas do que do perfil de elevação.

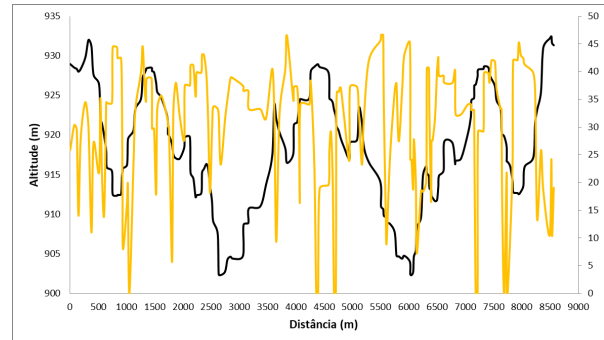
A Tabela 8 mostra os dados do perfil de elevação das linhas de ônibus consideradas. Note que existe muita similaridade entre as elevações e inclinações dos diferentes trajetos, embora ocorram em diferentes posições ao longo do trajeto - detalhes dos perfis podem ser encontrados no Apêndice A. Assim, espera-se que o consumo médio simulado dos ônibus, embora não leve em conta a elevação dos trajetos, seja igualmente influenciado por uma eventual polarização dos resultados. Isso permite uma comparação adequada dos resultados.

**Figura 16 – Ciclo de condução mais longo e elevação do trajeto da linha 632**



Fonte: Autoria própria

**Figura 17 – Ciclo de condução mais curto e elevação do trajeto da linha 632**



Fonte: Autoria própria

**Tabela 8 – Perfil de elevação dos trajetos das linhas de ônibus.**

Linha	Elevação máx/mín (m)	Inclinação positiva/negativa máx(%)
528	936/877	+8,8/-8,7
617	940/878	+8,3/-8,5
630	936/876	+7,4/-7,7
632	933/902	+8,5/-8,0
633	935/888	+10,9/-11,2
635	935/901	+8,1/-8,3
636	935/921	+8,2/-8,5
637	934/895	+8,1/-8,0
638	936/895	+5,2/-5,8
639	936/900	+6,9/-6,6
640	939/907	+8,4/-8,4
641	936/900	+5,7/-5,9
644	935/890	+10,7/-11,3
649	935/891	+9,4/-9,3
650	942/875	+9,8/-9,8
655	940/876	+7,5/-8,8
659	942/886	+6,9/-6,6
680	942/897	+8,0/-7,2
681	938/894	+9,4/-9,7
684	940/874	+8,5/-8,3
690	942/869	+7,3/-7,2

Fonte: Autoria própria

A partir dessa análise simplificada, uma melhor investigação futura da influência do perfil de elevação nos resultados simulados do consumo de energia deverá ser realizada.

### 6.1.3 Influência do peso total dos ônibus no consumo de energia

Esta seção tem por objetivo avaliar o impacto nos resultados do consumo de energia quando o peso dos ônibus é levado em consideração. Este peso é devido a uma parcela fixa correspondente ao peso próprio do ônibus acrescido de uma parcela variável devida ao número de passageiros. Assim, um acréscimo de 100% no peso do ônibus correspondente a dobrar seu

peso próprio com passageiros. Para tanto, foi utilizado o ciclo de condução da linha 632 sujeito a diferentes acréscimos de peso, conforme a Tabela 9. A linha 632 foi escolhida para análise, pois é uma linha curta e pouco sujeita a variações do SOC devidas a diferentes ciclos de condução. Isso permite isolar melhor o efeito do peso total do ônibus no consumo de energia.

**Tabela 9 – Variação do SOC devida ao aumento de peso do ônibus da linha 632.**

Variação peso (%)	SOC (%)	Variação SOC (%)
0	93,85	0
+10	93,83	-0,02
+20	93,51	-0,36
+30	93,08	-0,81
+80	90,51	-3,56
+100	89,04	-5,12

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 9 mostra que a variação do SOC é de menos de 1% a mais de consumo (variação negativa) quando o peso do ônibus aumenta até 30%. Por exemplo, para um ônibus convencional de 16 toneladas, a capacidade máxima de 70 passageiros corresponde a um acréscimo de 35% no seu peso próprio. Embora os resultados sejam válidos apenas para a linha 632, grande parte das linhas do terminal Pinheirinho escolhidas para circular com ônibus elétrico-híbridos são similares à linha 632, conforme será detalhado na Seção 6.2. Portanto, considera-se que os resultados não sofrem influência significativa do peso dos passageiros.

#### 6.1.4 Modelo de regressão linear para o consumo de energia

Um modelo de regressão linear múltipla é proposto para estimar o SOC a partir dos ciclos de condução dos ônibus.

A Tabela 10 mostra os dados utilizados para os modelos 1 e 2 de regressão. O modelo 1 é um modelo de três variáveis independentes: distância, tempo de viagem e porcentagem média de condução em modo à combustão. Um valor  $R^2 = 0,8048$  e  $p\text{-value} = 2,898 \cdot 10^{-6}$  foi obtido para o modelo 1. Entretanto, os dados das linhas de ônibus 641 e 690 são considerados *outliers* devido aos elevados valores de Pcomb. As linhas 641 e 690 têm comportamentos atípicos, pois usam mais o modo à combustão, conforme mencionado na Seção 6.1.1, distorcendo o resultado do consumo elétrico.

Assim, foi proposto um modelo de regressão 2 sem os dados das linhas 641 e 690, usando apenas duas variáveis independentes (distância e tempo de viagem). Neste caso, um valor  $R^2 = 0,8332$  e  $p\text{-value} = 5,991 \cdot 10^{-7}$  foi obtido para o modelo 2. Os gráficos das Figuras 18



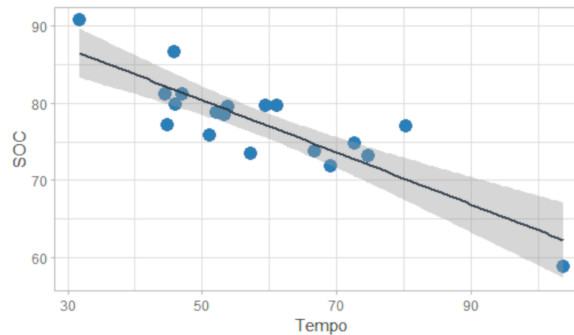
**Tabela 10 – Dados para o modelo de regressão linear 1 e 2 para estimação do SOC médio a partir da distância, tempo médio de viagem e porcentagem média de condução em modo à combustão Pcomb, com desvios padrão indicados nos subíndices.**

Linha	Distância (km)	Tempo viagem (min)	SOC(%)	Pcomb(%)
528	34,7	103,8 <sub>6,2</sub>	58,8 <sub>5,5</sub>	13,1 <sub>0,6</sub>
617	24,7	69,2 <sub>5,2</sub>	71,8 <sub>2,5</sub>	8,2 <sub>1,3</sub>
630	19,9	52,2 <sub>5,0</sub>	78,8 <sub>3,4</sub>	16,2 <sub>2,2</sub>
632	8,9	31,7 <sub>3,4</sub>	90,8 <sub>0,8</sub>	02,6 <sub>0,5</sub>
633	12,1	44,9 <sub>2,8</sub>	77,2 <sub>0,9</sub>	09,7 <sub>2,9</sub>
635	14,3	46,0 <sub>1,8</sub>	79,8 <sub>1,1</sub>	15,2 <sub>3,1</sub>
636	12,6	44,5 <sub>4,0</sub>	81,1 <sub>2,5</sub>	06,2 <sub>0,4</sub>
637	13,7	51,1 <sub>2,9</sub>	75,8 <sub>2,3</sub>	12,4 <sub>2,8</sub>
638	17,1	59,5 <sub>4,5</sub>	79,7 <sub>2,1</sub>	10,5 <sub>0,7</sub>
639	16,6	53,8 <sub>4,1</sub>	79,6 <sub>2,3</sub>	12,4 <sub>2,7</sub>
640	15,0	47,0 <sub>4,2</sub>	81,1 <sub>3,4</sub>	13,9 <sub>1,9</sub>
641	25,5	74,0 <sub>5,5</sub>	81,8 <sub>0,7</sub>	35,1 <sub>1,4</sub>
644	16,2	45,8 <sub>2,9</sub>	86,6 <sub>0,9</sub>	06,5 <sub>0,4</sub>
649	16,0	53,4 <sub>3,5</sub>	78,5 <sub>1,8</sub>	05,8 <sub>1,9</sub>
650	28,8	74,8 <sub>7,7</sub>	73,2 <sub>3,0</sub>	09,3 <sub>1,0</sub>
655	23,4	61,2 <sub>4,4</sub>	79,7 <sub>2,8</sub>	26,0 <sub>0,9</sub>
659	34,4	80,3 <sub>6,8</sub>	77,0 <sub>4,3</sub>	07,6 <sub>2,8</sub>
680	24,6	66,8 <sub>5,4</sub>	73,7 <sub>3,2</sub>	20,2 <sub>1,3</sub>
681	19,5	57,3 <sub>8,1</sub>	73,4 <sub>5,4</sub>	12,1 <sub>3,7</sub>
684	25,9	72,7 <sub>6,7</sub>	74,8 <sub>4,7</sub>	06,9 <sub>2,0</sub>
690	31,7	80,2 <sub>5,5</sub>	80,8 <sub>2,3</sub>	38,3 <sub>2,9</sub>

Fonte: Autoria própria

e 19 mostram os resultados de regressão do modelo 2.

**Figura 18 – Modelo 2 de regressão linear: tempo de viagem (min) x SOC (%)**



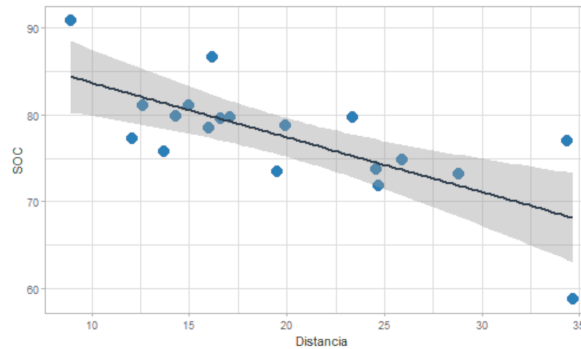
Fonte: Autoria própria

Embora estes resultados não tenham sido utilizados diretamente na simulação do terminal Pinheirinho, um modelo deste tipo pode auxiliar em uma fase de planejamento, ao avaliar o SOC a partir de dados obtidos anteriormente à implantação das linhas de ônibus.

## 6.2 SIMULAÇÃO DO TERMINAL PINHEIRINHO

A simulação do terminal Pinheirinho considera que 11 linhas operam com ônibus elétrico híbridos. O critério de escolha dessas 11 linhas baseia-se no percurso máximo de trajeto

**Figura 19 – Modelo 2 de regressão linear: distância (km) x SOC (%)**



**Fonte: Autoria própria**

de 40 km ida/volta devido à autonomia do modo elétrico, segundo dados de 2019 da empresa Volvo (DREIER *et al.*, 2020). Além disso, foram feitos experimentos de simulação que indicaram um maior impacto no atraso da programação diária dos ônibus quando mais de 11 linhas de ônibus demandam recarga das baterias.

O tempo de viagem e consumo de energia dos ônibus de cada linha foram obtidos a partir dos ciclos de condução, conforme a Seção 6.1. Assim, o tempo e o consumo de energia de cada viagem são variáveis aleatórias amostradas das distribuições experimentais de probabilidade construídas com os dados coletados da URBS e com os dados simulados do consumo de energia, respectivamente. Os resultados foram gerados a partir de 30 replicações da simulação. Assim, os valores médios obtidos correspondem a uma média de 30 valores independentes, utilizados para calcular um intervalo de confiança de 95%.

As simulações consideram ainda que o terminal Pinheirinho possui apenas uma estação de recarga das baterias, sendo considerados dois cenários de recarga: i) recarga de necessidade, quando o SOC está abaixo de 30%; ii) recarga de oportunidade, quando o SOC está abaixo de 50% e o tempo de parada do ônibus no terminal é maior que 10 min, conforme descrito no Capítulo 5. A concorrência dos ônibus das linhas pela utilização da estação de recarga gera uma fila que se altera ao longo do dia, dependendo da quantidade de ônibus no terminal e do SOC das baterias dos ônibus.

A Tabela 11 mostra o tempo médio de recarga TR1 e TR2 por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente. Os tempos encontram-se na faixa de 4 a 5 min para o cenário 1 e de 3 a 5 min para o cenário 2.

A Tabela 12 permite avaliar o tempo de permanência dos ônibus no terminal Pinheirinho. Este tempo é impactado pela operação de recarga, que pode atrasar o instante de saída do ônibus do terminal. A Tabela 12 mostra o tempo médio de permanência TP1 e TP2 dos ônibus no

**Tabela 11 – Tempo médio (min) de recarga TR1 e TR2 ( $\pm$  intervalo de confiança de 95%) por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente.**

Linha	TR1 (min)	TR2 (min)
617	4 $\pm$ 0,82	4 $\pm$ 0,72
630	4 $\pm$ 0,74	3 $\pm$ 0,61
632	4 $\pm$ 0,40	4 $\pm$ 0,35
633	5 $\pm$ 1,26	5 $\pm$ 1,08
635	5 $\pm$ 1,12	4 $\pm$ 0,94
636	5 $\pm$ 1,01	5 $\pm$ 0,88
637	5 $\pm$ 0,93	5 $\pm$ 0,74
639	5 $\pm$ 1,32	5 $\pm$ 1,22
644	4 $\pm$ 0,53	4 $\pm$ 0,48
655	5 $\pm$ 1,72	5 $\pm$ 1,39
681	5 $\pm$ 1,33	5 $\pm$ 1,16

**Fonte: Autoria própria**

terminal, o fator de espera FE1 e FE2 e o fator máximo de espera FM1 e FM2 por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente. O fator de espera FE1 (FE2) é a relação entre o tempo médio de espera pelo uso da estação de recarga e o tempo médio de trajeto da linha para o cenário 1 (cenário 2). O fator máximo de espera FM1 (FM2) é a relação entre o tempo mínimo de espera pelo uso da estação de recarga e o tempo máximo de trajeto da linha para o cenário 1 (cenário 2).

**Tabela 12 – Tempo médio (min) de permanência TP1 e TP2 ( $\pm$  intervalo de confiança de 95%) dos ônibus no terminal, fator de espera (%) FE1 e FE2 e fator máximo de espera (%) FM1 e FM2 por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente.**

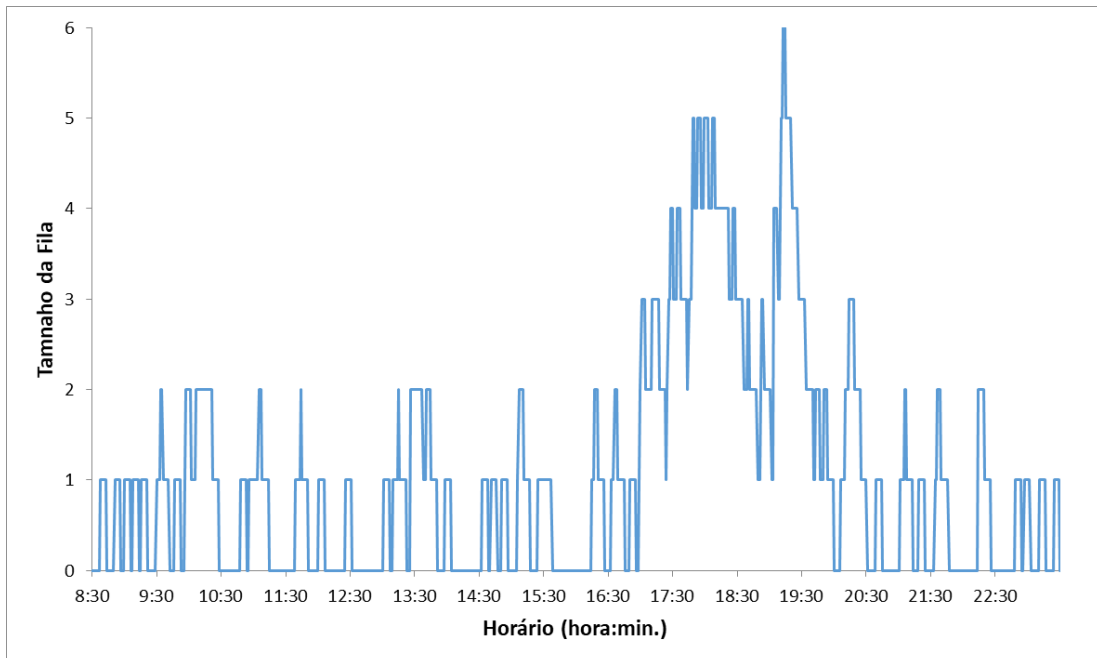
Linha	TP1 (min)	TP2 (min)	FE1 (%)	FE2 (%)	FM1 (%)	FM2 (%)
617	9 $\pm$ 1,40	9 $\pm$ 1,12	13	13	40	28
630	7 $\pm$ 1,21	6 $\pm$ 0,98	14	12	49	37
632	8 $\pm$ 2,88	7 $\pm$ 2,62	25	22	125	117
633	6 $\pm$ 1,12	6 $\pm$ 0,97	13	13	43	38
635	11 $\pm$ 1,77	9 $\pm$ 1,38	23	20	74	46
636	9 $\pm$ 1,29	8 $\pm$ 1,22	21	18	53	50
637	6 $\pm$ 1,62	6 $\pm$ 1,67	12	12	55	40
639	7 $\pm$ 1,02	7 $\pm$ 0,91	13	13	48	33
644	11 $\pm$ 2,21	10 $\pm$ 1,85	24	22	84	68
655	9 $\pm$ 2,71	8 $\pm$ 1,90	15	13	82	44
681	7 $\pm$ 1,12	8 $\pm$ 1,57	12	14	36	41

**Fonte: Autoria própria**

A Tabela 12 apresenta os tempos de permanência dos ônibus no terminal para o cenário 2 menores ou iguais ao cenário 1, indicando certa vantagem da recarga de oportunidade sobre a de necessidade. Em relação à espera pelo uso da estação, os ônibus da linha 632 estão sujeitos aos maiores tempos de espera em relação ao tempo de trajeto, tanto a partir dos valores médios FE1 e FE2 quanto dos fatores máximos FM1 e FM2. A linha 632 é uma linha curta de 8,9 km e tempo de viagem de 31,7 min, conforma a Tabela 7 e, portanto, dispõe de uma janela curta para recarga.

A fila formada pelo uso da estação de recarga modifica-se ao longo do dia. A Figura 20 mostra a evolução do tamanho médio da fila ao longo do dia para o cenário 1. O horário de maior acúmulo de ônibus para uso da estação se verifica entre 17:00 e 19:30.

**Figura 20 – Tamanho médio da fila para uso da estação de recarga para o cenário 1.**



**Fonte: Autoria própria**

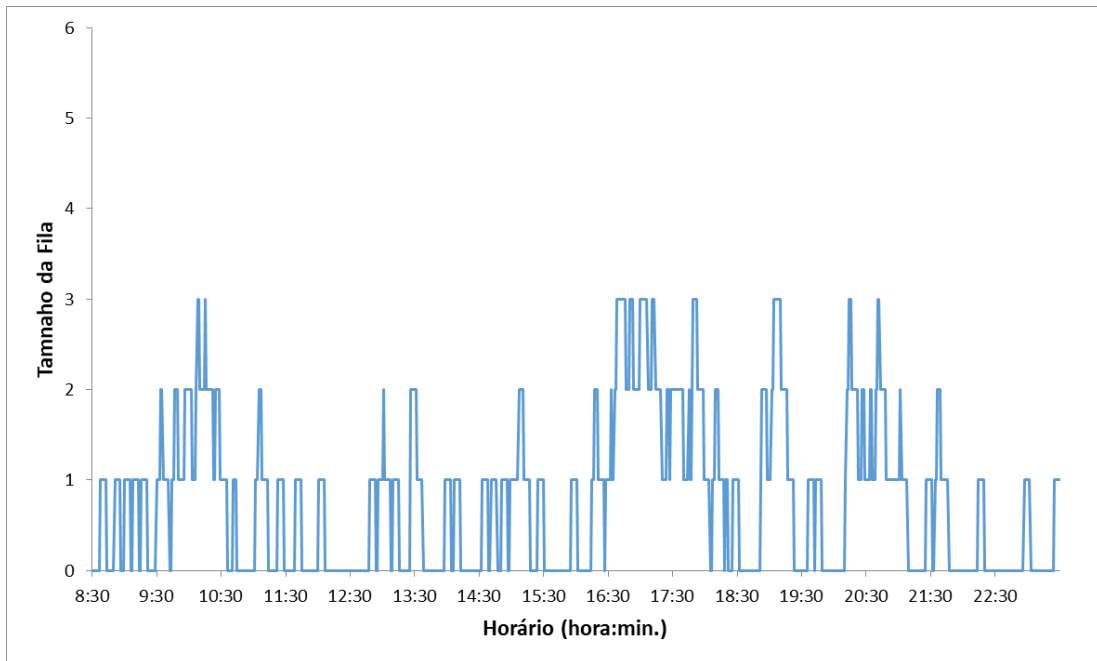
A Figura 21 mostra a evolução do tamanho médio da fila para uso da estação de recarga ao longo do dia para o cenário 2. Diferentemente da Figura 20, a recarga de oportunidade do cenário 2 contribui para um espalhamento da curva ao longo do dia. Neste caso, os picos do acúmulo de ônibus esperando para uso da estação entre 17:00 e 19:30 são suavizados. Porém, o tamanho da fila é acrescido entre 10:00 e 10:30.

Os ônibus que utilizam a estação de recarga têm seus níveis de energia variando de acordo com o consumo de cada trajeto. Após atingir o nível mínimo, uma recarga é efetuada para que o nível da bateria retorne ao valor máximo de 100%. As cargas e descargas das baterias dos ônibus são realizadas várias vezes durante o dia.

As Figuras 22, 23, 24 e 25 mostram os ciclos de carga e descarga da bateria de um ônibus de cada linha para o cenário 1. Os pontos do gráfico correspondem aos instantes de coleta dos dados, quando o ônibus está parado no terminal. As linhas pontilhadas apenas conectam os pontos para facilitar a leitura, mas não representam dados válidos entre os pontos efetivamente medidos.

Pode-se notar em todos os gráficos dos ciclos de carga e descarga que, sempre que o

**Figura 21 – Tamanho médio da fila para uso da estação de recarga para o cenário 2.**



**Fonte: Autoria própria**

SOC for menor que 30% ao chegar ao terminal, uma operação de recarga ocorre, elevando o nível de carga da bateria para 100%.

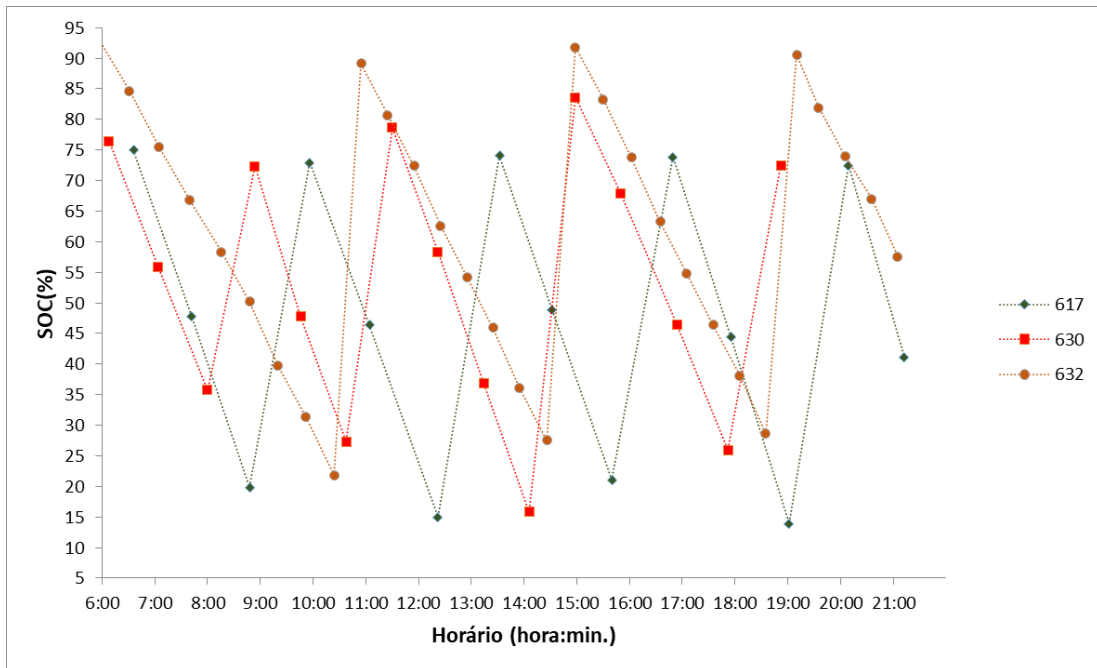
A quantidade de ciclos de carga e descarga das baterias depende do perfil de consumo de energia da linha de ônibus. Linhas com maior consumo de energia têm um número maior de ciclos. Por exemplo, na Figura 22, o ônibus da linha 632 necessita de três recargas ao longo do dia, enquanto os ônibus das linhas 617 e 630 fazem quatro recargas.

Os ciclos de carga e descarga dos ônibus que utilizam a estação de recarga são semelhantes na maioria dos casos para os cenários 1 e 2. Porém, há diferenças quando a regra de oportunidade do cenário 2 é utilizada, conforme mostra a Figura 26.

Essa diferença é percebida próximo de 15:00, quando o ônibus utiliza a opção de recarga por oportunidade, mesmo com SOC acima de 30% (porém, abaixo de 50% pela regra de oportunidade). Ao adiantar a recarga, houve um aumento no número de viagens da linha 681 até a próxima recarga. Este é um caso de uso da oportunidade de recarga para reduzir a concorrência pela utilização da estação de recarga.

A Tabela 13 mostra os resultados da energia elétrica média armazenada (SOC) e número de recargas por linha de ônibus para os cenários 1 e 2. Tanto o número de recargas quanto o SOC médio são semelhantes em ambos os cenários, não havendo diferenças significativas em termos de recargas e nível de energia elétrica das baterias por linha.

**Figura 22 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus das linhas 617, 630 e 632 para o cenário 1.**



Fonte: Autoria própria

**Tabela 13 – Número de ônibus, SOC médio SOC1 e SOC2, e número de recargas RC1 e RC2 por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente.**

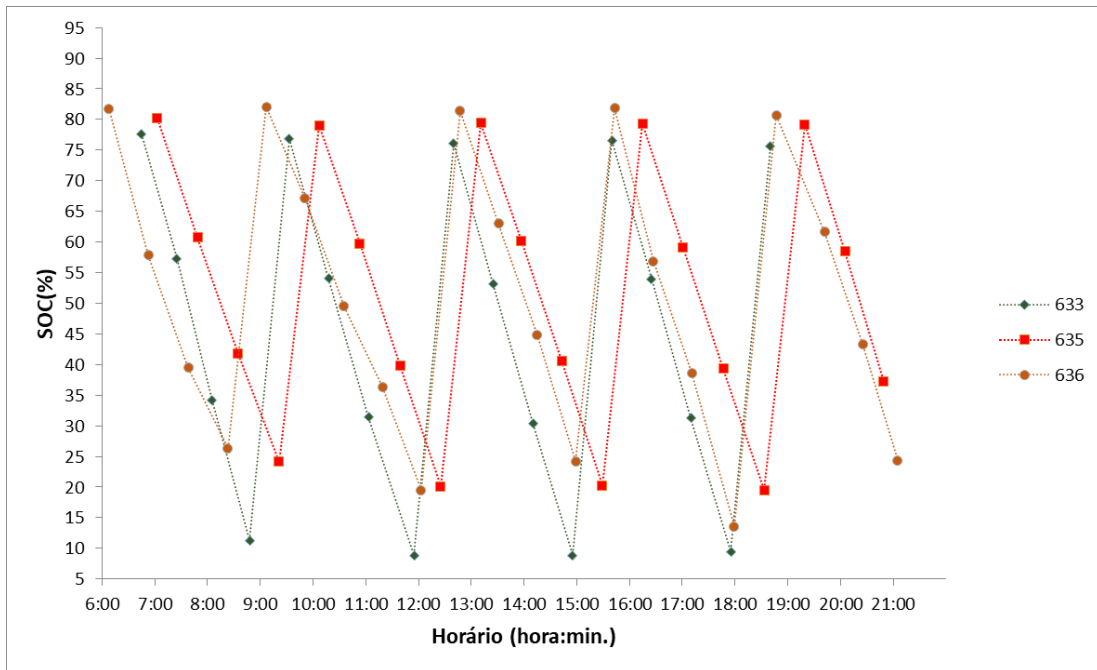
Linha	# Ônibus	SOC1(%)	SOC2(%)	# RC1	# RC2
617	6	61,54	59,91	12	12
630	4	59,52	56,45	10	8
632	1	64,31	63,89	3	3
633	4	54,75	54,96	13	13
635	2	61,14	60,52	5	5
636	3	61,16	61,46	11	9
637	2	61,37	60,03	8	8
639	7	61,02	62,33	13	13
644	1	61,09	60,88	3	3
655	2	64,12	61,85	3	3
681	2	58,39	61,19	4	4

Fonte: Autoria própria

As Figuras 27 e 28 mostram os horários nos quais a estação de recarga foi utilizada por linha para os cenários 1 e 2, respectivamente. Embora não haja diferenças significativas, percebe-se uma maior distribuição das recargas ao longo do dia por linha de ônibus, reduzindo o congestionamento da estação, conforme observado na Figura 20.

A Figura 29 mostra os horários nos quais a recarga de oportunidade foi utilizada, ou seja, quando não havia necessidade de recarga (SOC acima de 30%), mas havia tempo suficiente para recarga.

**Figura 23 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus das linhas 633, 635 e 636 para o cenário 1.**

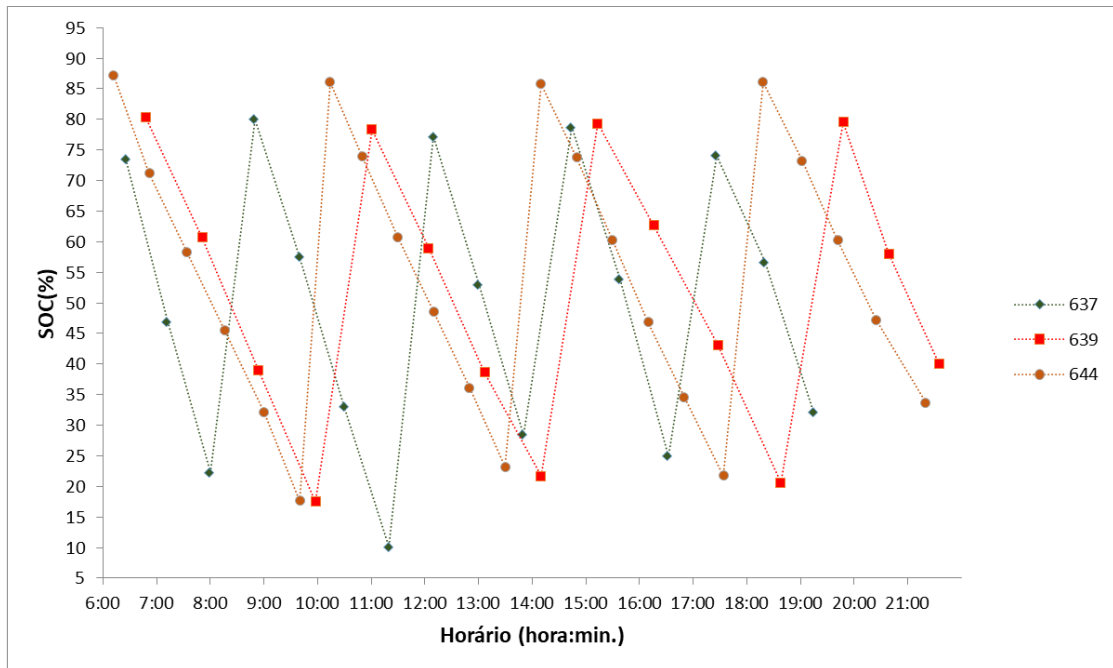


**Fonte: Autoria própria**

### 6.3 SUMÁRIO DO CAPÍTULO

Este capítulo apresenta os resultados de simulação do terminal Pinheirinho. Para tanto, os ciclos de condução das viagens de ônibus das linhas consideradas são caracterizados a partir dos dados de movimentação dos ônibus fornecidos pela URBS. Os tempos médios de viagem e parada no terminal são então avaliados para cada linha. Com os ciclos de condução, é possível obter por simulação o consumo médio de energia associado a cada linha do terminal. As linhas 641 e 690 apresentam os maiores percentuais de condução no modo à combustão. Provavelmente, isso ocorre devido a essas linhas apresentarem longos trechos de maior velocidade sem muitas paradas. Este padrão de condução favorece a manutenção da operação do ônibus no modo à combustão. As simulações do consumo de energia foram feitas sem levar em conta diferentes elevações dos trajetos dos ônibus. Entretanto, considera-se que o efeito do perfil de elevação do trajeto está representado no ciclo de condução do ônibus e, portanto, não deve afetar significativamente os resultados. A influência do peso total dos ônibus (peso próprio mais passageiros) no consumo de energia indica que um aumento de 30% no peso total do ônibus provoca um aumento de menos de 1% no consumo de energia. Assim, considera-se que os resultados apresentados não sofrem influência significativa do peso dos passageiros. Um modelo de regressão linear é também proposto para estimar o consumo de energia (SOC) a partir da

**Figura 24 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus das linhas 637, 639 e 644 para o cenário 1.**



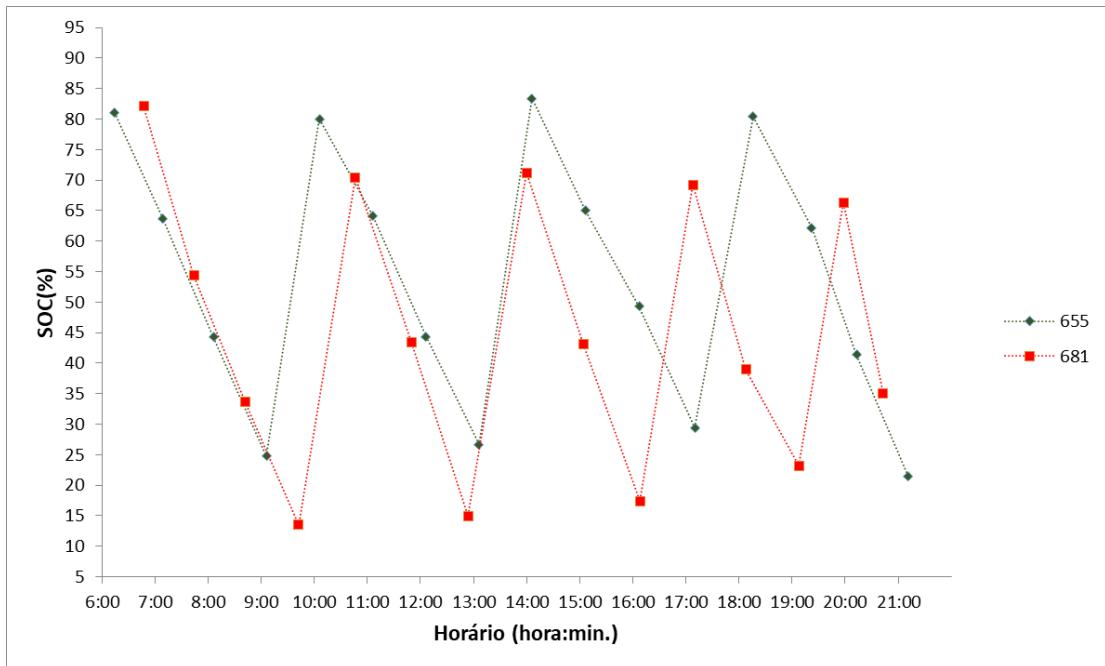
**Fonte: Autoria própria**

distância e tempo de viagem do trajeto de uma linha de ônibus. Embora estes resultados não tenham sido utilizados diretamente na simulação do terminal Pinheirinho, um modelo deste tipo pode auxiliar em uma fase de planejamento, ao avaliar o SOC a partir de dados obtidos anteriormente à implantação das linhas de ônibus.

Os resultados de simulação do terminal Pinheirinho consideram que uma estação de recarga posicionada dentro do terminal é responsável pela recarga das baterias. Para tanto, 11 linhas de ônibus do terminal são selecionadas para operar com ônibus elétrico híbrido. O critério de escolha dessas 11 linhas baseia-se no percurso máximo de trajeto de 40 km ida/volta, além de uma avaliação experimental que indica um maior impacto no atraso da programação diária dos ônibus quando mais de 11 linhas demandam recarga das baterias. Dois cenários de recarga são considerados: i) recarga de necessidade, quando o SOC está abaixo de 30%; ii) recarga de oportunidade, quando o SOC está abaixo de 50% e o tempo de parada do ônibus no terminal é maior que 10 min. Os resultados da simulação do terminal mostram uma vantagem da recarga de oportunidade em relação à de necessidade, com menores tempos de parada no terminal e uma melhor distribuição do tamanho da fila ao longo do dia.

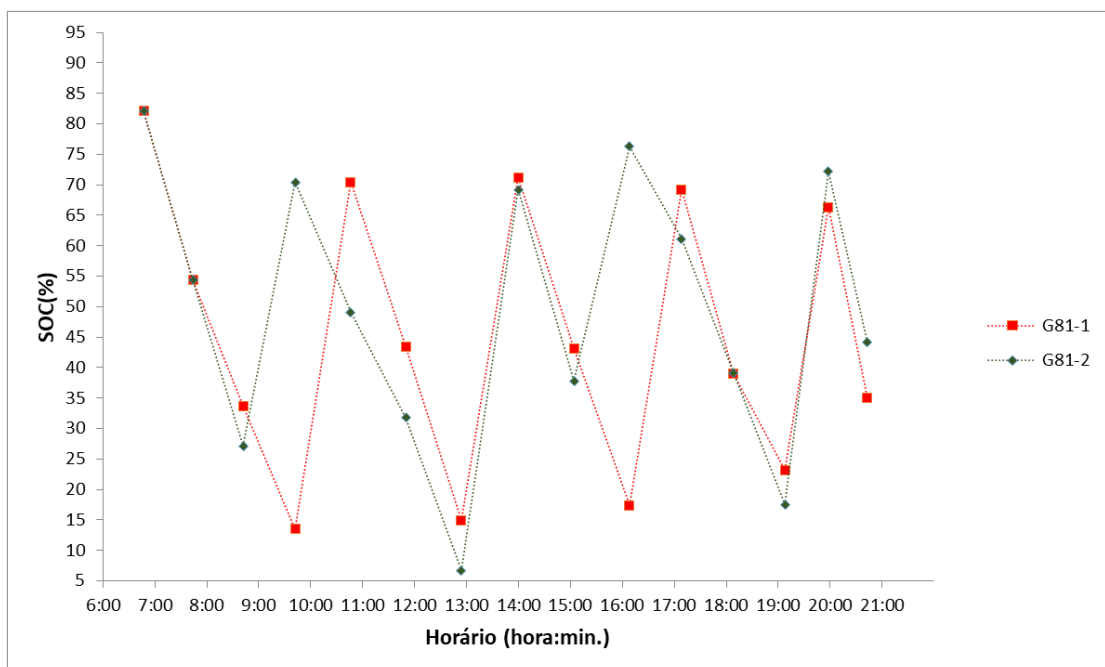


**Figura 25 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus das linhas 655 e 681 para o cenário 1.**



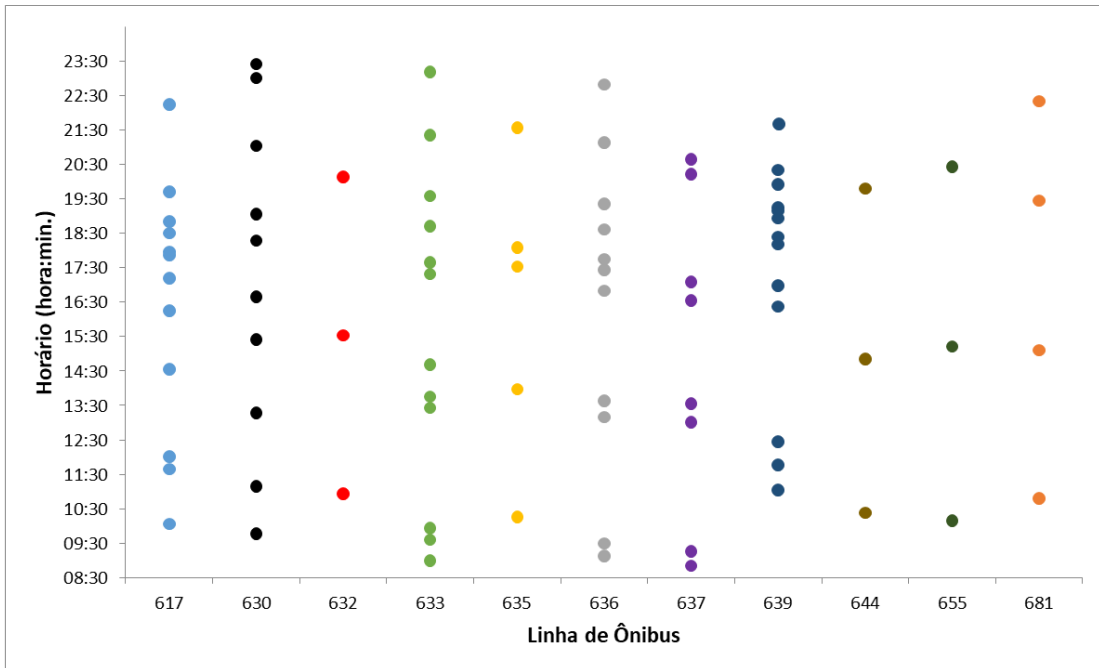
Fonte: Autoria própria

**Figura 26 – Variação do SOC ao longo do dia devido aos ciclos de carga e descarga das baterias dos ônibus da linha 681 para os cenários 1 e 2.**



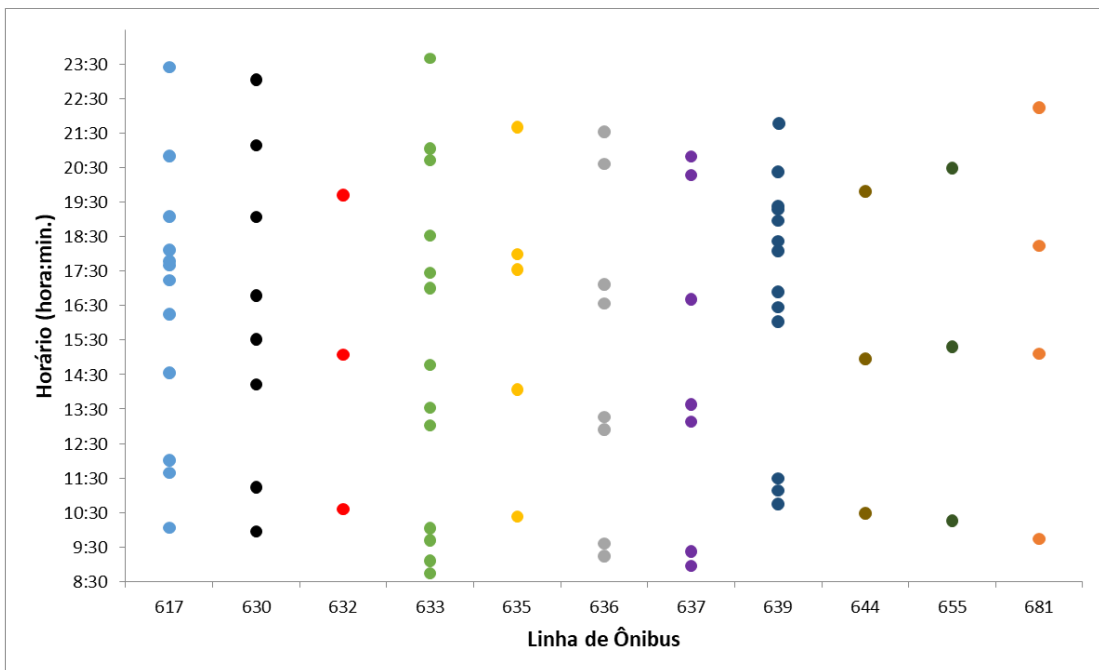
Fonte: Autoria própria

**Figura 27 – Horário de uso da estação de recarga por linha para o cenário 1.**



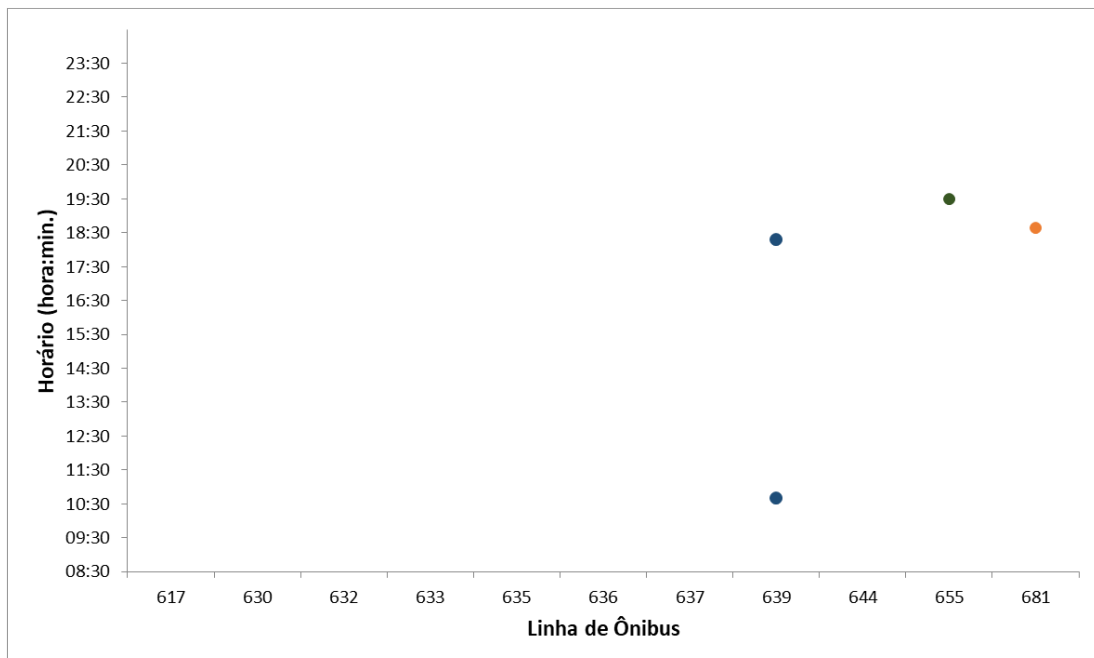
Fonte: Autoria própria

**Figura 28 – Horário de uso da estação de recarga por linha para o cenário 2.**



Fonte: Autoria própria

**Figura 29 – Horário da recarga de oportunidade por linha para o cenário 2.**



**Fonte: Autoria própria**

## 7 CONCLUSÃO

Um modelo de simulação da operação do terminal Pinheirinho de Curitiba foi proposto nesta dissertação, substituindo-se o ônibus convencional à combustão por ônibus elétrico híbrido em 11 linhas do terminal. O critério de escolha dessas 11 linhas baseia-se no percurso máximo de trajeto de 40 km ida/volta, além de uma avaliação experimental inicial que indicou um maior impacto no atraso da programação diária dos ônibus quando mais de 11 linhas demandam recarga das baterias. A simulação é capaz de capturar a dinâmica de entrada e saída dos ônibus no terminal, impactada pela introdução de uma estação de recarga no interior do terminal capaz de recarregar as baterias dos ônibus elétrico híbrido durante a operação. Indicadores de utilização da estação de recarga são obtidos da simulação, tais como o tempo de permanência do ônibus no terminal, tamanho da fila de espera para uso da estação e número de recargas ao longo do dia. Para tanto, a simulação pode ser dividida em duas partes: i) simulação do consumo de energia da bateria dos ônibus; ii) simulação da dinâmica do terminal.

A contribuição principal da dissertação está tanto na metodologia de construção dos ciclos de condução e respectiva simulação do consumo de energia quanto na avaliação do impacto na operação do terminal com a introdução do ônibus elétrico híbrido, cuja recarga é feita dentro do terminal. Não menos importante é a avaliação de dois cenários de recarga que consideram necessidade e oportunidade de recarga das baterias.

Um modelo de simulação da literatura é utilizado para simular o consumo de energia da bateria a partir dos ciclos de condução construídos com os dados de movimentação dos ônibus fornecidos pela URBS. Os ciclos de condução permitem obter informações de tempos de viagem e de parada no terminal, sujeitos à forma de conduzir do motorista e às condições de tráfego. O consumo de energia se traduz no *State of Charge* (SOC) da bateria do ônibus ao retornar ao terminal, após percorrer o trajeto da linha de ônibus correspondente (com carga completa da bateria ao sair do terminal).

A obtenção dos ciclos de condução retirados dos dados do sistema de telemetria da URBS é base fundamental para estimar gasto de energia dos ônibus de cada linha. Sem os dados de velocidade dos ciclos de condução, não haveria como qualificar o consumo de energia. Vale ressaltar que os dados de geoposicionamento dos ônibus no sistema de telemetria não possuem um intervalo contínuo de coleta, nem delimitações de início e fim da coleta de dados de cada viagem. Assim, foram necessárias aproximações para construir os ciclos de condução, de forma

a se adequar às necessidades do simulador dos ônibus elétrico híbridos.

Os resultados simulação do consumo de energia mostram que o SOC das baterias dos ônibus situam-se entre 59% e 91% ao retornar ao terminal. Como esperado, valores menores de SOC (maior consumo) ocorrem para trajetos mais longos. Entretanto, há diferenças na porcentagem média de condução em modo à combustão. Por exemplo, as linhas 641 e 690 apresentam os maiores percentuais de condução no modo à combustão. Provavelmente, isso ocorre devido a essas linhas apresentarem longos trechos de maior velocidade sem muitas paradas. Este padrão de condução favorece a manutenção da operação do ônibus no modo à combustão.

As simulações do consumo de energia foram feitas sem levar em conta as elevações dos trajetos dos ônibus. Da mesma forma, o número de passageiros não foi considerado. Após uma análise simplificada, considerou-se que o efeito do perfil de elevação do trajeto está representado no ciclo de condução do ônibus e, portanto, não seria necessário considerá-lo separadamente. Em uma outra análise, a influência do peso total dos ônibus (peso próprio mais passageiros) no consumo de energia mostrou um aumento de menos de 1% no consumo de energia para um aumento de 30% no peso total do ônibus. Assim, considera-se que os resultados apresentados não devem ser significativamente afetados pelo perfil de elevação do trajeto, nem pelo peso dos passageiros. Entretanto, uma melhor investigação sobre esses pontos ainda é necessária.

Os resultados dos ciclos de condução mostram que há uma relação direta entre distância percorrida e tempo de viagem com o consumo de energia elétrica da bateria (quanto maiores distância e tempo de percurso, maior o consumo). Um modelo de regressão linear foi então obtido, capaz de estimar o SOC a partir da distância percorrida e tempo de viagem de uma linha de ônibus. Embora estes resultados não tenham sido utilizados diretamente na simulação do terminal Pinheirinho, um modelo deste tipo pode auxiliar em uma fase de planejamento, ao avaliar o SOC a partir de dados obtidos anteriormente à implantação das linhas de ônibus.

A simulação do terminal Pinheirinho foi feita para dois cenários de recarga das baterias dos ônibus: i) recarga de necessidade, quando o SOC está abaixo de 30%; ii) recarga de oportunidade, quando o SOC está abaixo de 50% e o tempo de parada do ônibus no terminal é maior que 10 min.

Os resultados da simulação do terminal Pinheirinho mostram que o tempo médio de recarga para ambos os cenários são semelhantes, em torno de 3-5 min. Porém, os tempos de permanência no terminal são diferentes para os cenários 1 e 2 devido às diferentes configurações

da fila que se forma para uso da estação de recarga. Em geral, o cenário 2 apresenta tempos de permanência menores ou iguais ao cenário 1, situando-se entre 6 e 10 min. Neste caso, o cenário 2 apresenta vantagem em relação ao cenário 1, pois apresenta um menor tempo de permanência no terminal para a maioria das linhas e uma melhor distribuição da fila de espera ao longo do dia.

Como trabalhos futuros, podem-se considerar a adaptação do modelo de consumo de energia para outros parâmetros construtivos de ônibus ou mesmo outros modelos de simulação propostos na literatura. Além disso, outras políticas de operação da estação de recarga podem ser propostas e analisadas, evitando a formação de picos de espera pelo uso da estação. Outra possibilidade a ser investigada futuramente, é o desenvolvimento de uma estratégia de otimização para a escolha das linhas de ônibus a serem eletrificadas. Para tanto, pode ser utilizada a otimização com simulação, na qual a função de custo a ser minimizada (ou maximizada) é avaliada por simulação.

## REFERÊNCIAS

ALBINO, Vito; BERARDI, Umberto; DANGELICO, Rosa Maria. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives. **Journal of urban technology**, Taylor & Francis, v. 22, n. 1, p. 3–21, 2015.

ALI, A M; KAMEL, H M; SHARAF, A M; HEGAZY, S A. A comparative investigation of a rule based energy management algorithm for hybrid electric vehicles. *In: 15th International Workshop on Research and Education in Mechatronics (REM)*. Egypt: Elsevier, 2014. p. 1–7.

AMRHEIN, M.; KREIN, P. T. Dynamic simulation for analysis of hybrid electric vehicle system and subsystem interactions, including power electronics. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 54, n. 3, p. 825–836, 2005.

ANBARAN, Sajad A; IDRIS, N R N; JANNATI, M; AZIZ, M J; ALSOFYANI, I. Rule-based supervisory control of split-parallel hybrid electric vehicle. **2014 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)**, p. 7–12, 10 2014.

ASSADIAN, F.; MOHAN, G.; LONGO, S. Comparative analysis of forward-facing models vs backward-facing models in powertrain component sizing. **Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013)**, Institution of Engineering and Technology, 2013.

BECKERS, C. J. J.; BESSELINK, I J M; FRINTS, J J M; NIJMEIJER, H. Energy consumption prediction for electric city buses. **13th ITS European Congress**, p. 1–12, 2019.

BERGLUND, M.; HANSSON, J. **Flash-charging is just the ticket for clean transportation**. 2016. Online; acesso em 21/06/2020. Disponível em: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106713A9015&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.

BUTLER, K.; MEHRDAD, E.; KAMATH, P. A matlab-based modeling and simulation package for electric and hybrid electric vehicle design. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 48, p. 1770–1778, 1999.

CAUWER, Cedric De; MIERLO, Joeri Van; COOSEMANS, Thierry. Energy consumption prediction for electric vehicles based on real-world data. **Energies**, MDPI AG, v. 8, p. 8573–8593, 8 2015. ISSN 19961073.

CHAN, C. C. The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 95, n. 4, p. 704–718, 2007.

CHAN, C. C.; BOUSCAYROL, Alain; CHEN, Keyu. Electric, hybrid, and fuel-cell vehicles: Architectures and modeling. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 59, n. 2, p. 589–598, 2010.

CHEN, Zheng; LI, Liang; YAN, Bingjie; YANG, Chao; MARTÍNEZ, Clara Marina; CAO, Dongpu. Multimode energy management for plug-in hybrid electric buses based on driving cycles prediction. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 10, p. 2811–2821, Oct 2016. ISSN 1558-0016.

CHENG, Caizhen; MCGORDON, Andrew; JONES, R. Peter; JENNINGS, Paul A. Comprehensive forward dynamic hev powetrain modelling using dymola and matlab/simulink. *In: 6th IFAC Symposium Advances in Automotive Control*. Munich: IFAC, 2010. p. 536–541.

DENG, Ruilong; LIU, Yuan; CHEN, Wenzhuo; LIANG, Hao. A survey on electric buses — energy storage, power management, and charging scheduling. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 22, n. 1, p. 9–22, 2021.

DIXON, George; STOBART, Richard; STEFFEN, Thomas. Unified backwards facing and forwards facing simulation of a hybrid electric vehicle using matlab simscape. **SAE Technical Papers**, 4 2015.

DREIER, Dennis; RUDIN, Björn; HOWELLS, Mark. Comparison of management strategies for the charging schedule and all-electric operation of a plug-in hybrid-electric bi-articulated bus fleet. **Public Transport**, Springer, v. 12, p. 363–404, 6 2020. ISSN 16137159.

EMADI, Ali; RAJASHEKARA, Kaushik; WILLIAMSON, Sheldon S.; LUKIC, Sedjan M. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 54, n. 3, p. 763–770, 2005.

FATHY, Hosam K.; FILIPI, Zoran S.; HAGENA, Jonathan; STEIN, Jeffrey L. Review of hardware-in-the-loop simulation and its prospects in the automotive area. **Modeling and Simulation for Military Applications**, 2006.

FENG, Xianyong; LEWIS, Michael; HEARN, Clay. Modeling and validation for zero emission buses. **2017 IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo, ITEC 2017**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., p. 501–506, 7 2017.

GALLET, Marc; MASSIER, Tobias; HAMACHER, Thomas. Estimation of the energy demand of electric buses based on real-world data for large-scale public transport networks. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 230, p. 344–356, 11 2018. ISSN 03062619.



GAO, David W.; MI, Chris; EMADI, Ali. Modeling and simulation of electric and hybrid vehicles. **Proceedings of the IEEE**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 95, p. 729–745, 2007. ISSN 00189219.

GAO, Zhiming; LIN, Zhenhong; LACLAIR, Tim J.; LIU, Changzheng; LI, Jan-Mou; BIRKY, Alicia K.; WARD, Jacob. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. **Energy**, v. 122, n. C, p. 588–600, 2017.

HE, Yi; SONG, Ziqi; LIU, Zhaocai. Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier, v. 48, p. 101530, 2019. ISSN 2210-6707.

HE, Yi; SONG, Ziqi; LIU, Zhaocai. Fast-charging station deployment for battery electric bus systems considering electricity demand charges. **Sustainable Cities and Society**, v. 48, p. 101530, 2019. ISSN 2210-6707.

HOU, Jun; GUO, Xuexun. **Modeling and simulation of hybrid electric vehicles using HEVSIM and ADVISOR**, p. 1–5, 2008.

JIAXUE, Wang; QINGNIAN, Wang; JISHUN, Liu; XIAOHUA, Zeng. **International Conference on Mechatronics and Automation**, p. 2457–2461, 2009.

KASSERIS, Emmanuel P.; HEYWOOD, John B. Comparative analysis of automotive powertrain choices for the next 25 years. **SAE 2007 Transactions Journal of Materials and Manufacturing**, p. 776–790, 2007.

KE, Bwo-Ren; CHUNG, Chen-Yuan; CHEN, Yen-Chang. Minimizing the costs of constructing an all plug-in electric bus transportation system: A case study in penghu. **Applied Energy**, v. 177, p. 649–660, 2016. ISSN 0306-2619.

KIVEKAS, Klaus; VEPSALAINEN, Jari; TAMMI, Kari. Stochastic driving cycle synthesis for analyzing the energy consumption of a battery electric bus. **IEEE Access**, v. 6, p. 55586–55598, 2018. ISSN 21693536.

LAJUNEN, Antti. Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Elsevier Ltd, v. 38, p. 1–15, 2014. ISSN 0968090X.

LEEMPUT, N.; BREUCKER, S. De; ENGELLEN, K.; ROY, J. Van; GETH, F.; DRIESEN, J. Electrification of trucks and buses in an urban environment through continuous charging. **2012 IEEE International Electric Vehicle Conference**, p. 1–8, March 2012.

LIU, Jinming; PENG, Huei; FILIPI, Zoran. **Modeling and Analysis of the Toyota Hybrid System**, p. 134–139, 2005.

MARKEL, T; BROOKER, A; HENDRICKS, T; JOHNSON, V; KELLY, K; KRAMER, B; O'KEEFE, M; SPRIK, S; WIPKE, K. Advisor: a systems analysis tool for advanced vehicle modeling. **Journal of Power Sources**, v. 110, n. 2, p. 255 – 266, 2002. ISSN 0378-7753. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775302001891>.

MOHAMED, Moataz; FARAG, Hany; EL-TAWEEL, Nader; FERGUSON, Mark. Simulation of electric buses on a full transit network: Operational feasibility and grid impact analysis. **Electric Power Systems Research**, v. 142, n. C, p. 163–175, 2017.

ONODA, Shigeru; EMADI, Ali. Psim-based modeling of automotive power systems: Conventional, electric, and hybrid electric vehicles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 53, p. 390–400, 3 2004. ISSN 00189545.

PERROTTA, Deborah; TEIXEIRA, Alexandre; SILVA, Helena; RIBEIRO, Bernardo; AFONSO, Joao. Electrical bus performance modeling for urban environments. **SAE Technical Papers**, SAE International, p. 34–45, 2012. ISSN 26883627.

PROHASKA, Robert; KELLY, Kenneth; EUDY, Leslie. Fast charge battery electric transit bus in-use fleet evaluation. **2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC 2016**, 2016.

ROGGE, Matthias; WOLLNY, Sebastian; SAUER, Dirk Uwe. Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport—a feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. **Energies**, v. 8, n. 5, p. 4587–4606, 2015. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/4587>.

SINHUBER, Philipp; ROHLFS, Werner; SAUER, Dirk Uwe. Conceptual considerations for electrification of public city buses — energy storage system and charging stations. **2010 Emobility - Electrical Power Train**, p. 1–5, 2010.

SOUZA, Gustavo R.; LÜDERS, Ricardo; FONSECA, Keiko V. O.; SILVEIRA, Semida. Simulação de um ônibus elétrico híbrido plug-in para avaliação do consumo de energia em diferentes ciclos de condução do transporte público de Curitiba. *In: Congresso 2019 SAE Brasil*. São Paulo: SAE BRASIL, 2019. p. 1–10.

STAACKMANN, M.; LIAW, Bor Yann; YUN, D. Y. Y. Dynamic driving cycle analyses using electric vehicle time-series data. **IECEC-97 Proceedings of the Thirty-Second Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (Cat. No.97CH6203)**, v. 3, p. 2014–2018 vol.3, July 1997.

STOCKAR, Stephanie; MARANO, Vincenzo; CANOVA, Marcello; RIZZONI, Giorgio; GUZZELLA, Lino. Energy-optimal control of plug-in hybrid electric vehicles for real-world driving cycles. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 60, n. 7, p. 2949–2962, 2011.

WANG, Ning; LI, Yun; LIU, Yafei. Economic evaluation of electric bus charging infrastructure. **17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, p. 2799–2804, 2014.

WIPKE, K.B.; CUDDY, M.R. **ADVISOR (Advanced Vehicle Simulator)**. Disponível em: <http://adv-vehicle-sim.sourceforge.net/>.

WIPKE, K.B.; CUDDY, M.R. **Using an advanced vehicle simulator (ADVISOR) to guide hybrid vehicle propulsion system development**. Disponível em: <http://www.hev.doe.gov>.

WIPKE, K.B.; CUDDY, M.R.; BURCH, S.D. Advisor 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 48, n. 6, p. 1751–1761, 1999.

XYLIA, Maria; SILVEIRA, Semida. The role of charging technologies in upscaling the use of electric buses in public transport: Experiences from demonstration projects. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier Ltd, v. 118, p. 399–415, 12 2018. ISSN 09658564.

ZHANG, Chengwei. Charging schedule optimization of electric bus charging station considering departure timetable. **8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019)**, p. 1–5, 2019.

## APÊNDICE A – PERFIL DE ELEVAÇÃO DOS TRAJETOS DAS LINHAS DE ÔNIBUS CONSIDERADAS

Os perfis abaixo foram obtidos do *Google Earth*.

**Figura 30 – Perfil de elevação da linha 528**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 31 – Perfil de elevação da linha 617**



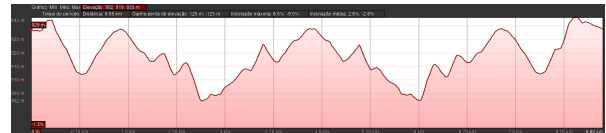
Fonte: GoogleEarth

**Figura 32 – Perfil de elevação da linha 630**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 33 – Perfil de elevação da linha 632**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 34 – Perfil de elevação da linha 633**



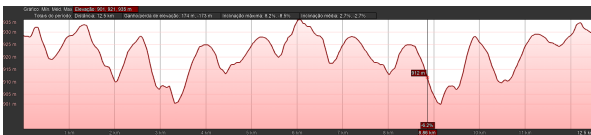
Fonte: GoogleEarth

**Figura 35 – Perfil de elevação da linha 635**



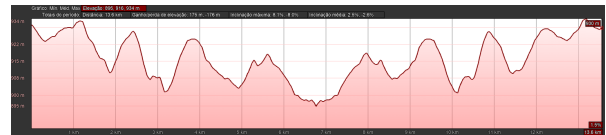
Fonte: GoogleEarth

**Figura 36 – Perfil de elevação da linha 636**



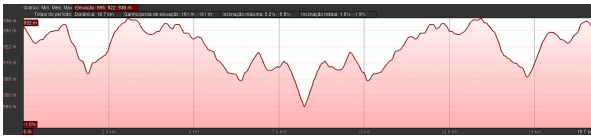
Fonte: GoogleEarth

**Figura 37 – Perfil de elevação da linha 637**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 38 – Perfil de elevação da linha 638**



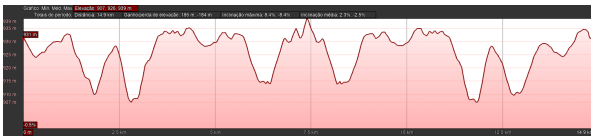
Fonte: GoogleEarth

**Figura 39 – Perfil de elevação da linha 639**



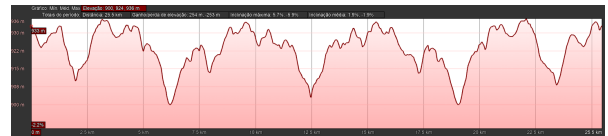
Fonte: GoogleEarth

**Figura 40 – Perfil de elevação da linha 640**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 41 – Perfil de elevação da linha 641**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 42 – Perfil de elevação da linha 644**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 43 – Perfil de elevação da linha 649**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 44 – Perfil de elevação da linha 650**



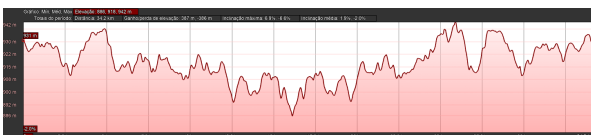
Fonte: GoogleEarth

**Figura 45 – Perfil de elevação da linha 655**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 46 – Perfil de elevação da linha 659**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 47 – Perfil de elevação da linha 680**



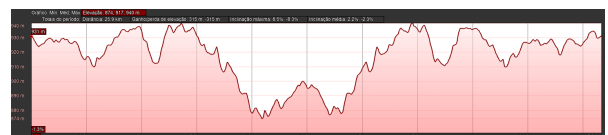
Fonte: GoogleEarth

**Figura 48 – Perfil de elevação da linha 681**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 49 – Perfil de elevação da linha 684**



Fonte: GoogleEarth

**Figura 50 – Perfil de elevação da linha 690**



Fonte: GoogleEarth