



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO



Augusto Henrique Nogueira Nunes
Jeiel Carvalho de Souza Santos

Ferramenta Computacional para Avaliação de Desempenho de Ônibus Elétricos em Rotas Urbanas



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Augusto Henrique Nogueira Nunes e Jeiel Carvalho de Souza Santos

Título do trabalho: **Ferramenta Computacional para Avaliação de Desempenho de Ônibus Elétricos em Rotas Urbanas**

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 03/12/2024, às 09:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Augusto Henrique Nogueira Nunes, Discente**, em 03/12/2024, às 13:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jeiel Carvalho De Souza Santos, Discente**, em 03/12/2024, às 13:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5010636** e o código CRC **E4F586E4**.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA MECÂNICA E DE
COMPUTAÇÃO



Augusto Henrique Nogueira Nunes
Jeiel Carvalho de Souza Santos

Ferramenta Computacional para Avaliação de Desempenho de Ônibus Elétricos em Rotas Urbanas

Trabalho de conclusão de curso, apresentado à
disciplina PFC, do curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Goiás como requisito parcial
para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula

Universidade Federal de Goiás - UFG
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação

Goiânia – GO
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Nunes, Augusto Henrique Nogueira
Ferramenta Computacional para Avaliação de Desempenho de
Ônibus Elétricos em Rotas Urbanas [manuscrito] / Augusto Henrique
Nogueira Nunes, Jeiel Carvalho de Souza Santos. - 2024.
xix, 19 f.

Orientador: Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2024.
Bibliografia. Apêndice.
Inclui mapas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas.

1. Ônibus elétrico. 2. carga da bateria. 3. mobilidade elétrica. 4.
desempenho elétrico. 5. simulação. I. Santos, Jeiel Carvalho de Souza.
II. Paula, Geyverson Teixeira de, orient. III. Título.

CDU 621.3



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao(s) 03 dia(s) do mês de dezembro do ano de 2024 iniciou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “**Ferramenta Computacional para Avaliação de Desempenho de Ônibus Elétricos em Rotas Urbanas**”, de autoria de Augusto Henrique Nogueira Nunes e Jeiel Carvalho de Souza Santos, do curso de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. Os trabalhos foram instalados pelo Prof. Dr. Geyverson Teixeira de Paula com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Enes Gonçalves Marra e Me. Eng. Wilmar Alves Cruvinel de Lima . Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição dos estudantes. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de 10,0 (dez), tendo sido o TCC considerado aprovado.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Geyverson Teixeira De Paula, Professor do Magistério Superior**, em 03/12/2024, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Enes Goncalves Marra, Professor do Magistério Superior**, em 03/12/2024, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wilmar Alves Cruvinel De Lima, Discente**, em 03/12/2024, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5010608** e o código CRC **DDEEBD5B**.

Ferramenta Computacional para Avaliação de Desempenho de Ônibus Elétricos em Rotas Urbanas

Augusto Henrique Nogueira Nunes, Jeiel Carvalho de Souza Santos

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e Computação

Universidade Federal de Goiás

Goiânia, Goiás

Resumo - Este artigo tem como ponto focal apresentar os resultados de uma ferramenta computacional que baseada em modelos físicos e matemáticos têm por objetivo avaliar o desempenho de ônibus elétricos em rotas urbanas, visto que é notório o crescimento do uso de veículos elétricos coletivos na mobilidade urbana das grandes cidades. O desenvolvimento dessa ferramenta abrange aspectos construtivos (informações da bateria, massa do veículo, área do veículo) e aspectos funcionais (distância percorrida, velocidade média, tempo de funcionamento, altimetria do percurso, quantidade de passageiros) dos ônibus elétricos, cuja intenção é a criação de um cenário que simula o comportamento dos modelos de ônibus elétricos existentes atualmente com a maior aproximação à um sistema real. As análises do desempenho dos veículos são realizadas a partir da série de dados e gráficos referentes ao desempenho da carga da bateria que é o principal equipamento destes veículos.

Palavras-chaves - Ônibus elétrico, carga da bateria, mobilidade elétrica, desempenho elétrico, simulação, software

Abstract — This article's focal point is to present the results of a computational tool that, based on physical and mathematical models, aims to evaluate the performance of electric buses on urban routes, given that the growth in the use of collective electric vehicles in urban mobility in large cities is notable. The development of this tool covers constructive aspects (battery information, vehicle mass, vehicle area) and functional aspects (distance traveled, average speed, operating time, route altitude, number of passengers) of electric buses, whose intention is to create a scenario that simulates the behavior of currently existing electric bus models with a closer approximation to a real system. Vehicle performance analyzes are carried out based on a series of data and graphs relating to the performance of the battery charge, which is the main equipment of these vehicles.

Keywords - Electric bus, battery charge, electric mobility, electric performance, simulation, software

1. INTRODUÇÃO

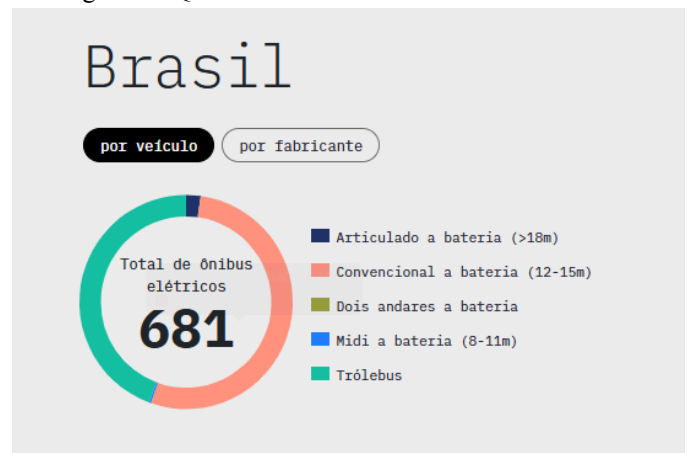
A mobilidade elétrica já é uma realidade no mundo todo e representa uma das mais significativas mudanças no movimento urbano nas últimas décadas. Devido a fatores ambientais que resultam na busca por alternativas sustentáveis e pela redução da emissão de gases poluentes, os veículos elétricos se tornaram protagonistas no cenário da mobilidade urbana. A princípio, a venda de veículos de passeio elétricos ou híbridos aconteceu de forma mais casual no cotidiano das famílias que buscam um transporte mais eficiente e ecológico, porém, com o passar do tempo, a popularização levou ao surgimento de veículos elétricos coletivos, um novo mercado para as empresas do ramo de

locomoção e uma alternativa interessante para governos que visam a transição energética e a necessidade de descarbonização dos meios de transporte.

Baseado nisso, a eletrificação das frotas de ônibus das cidades passou a ser implementada em diversas cidades ao redor do mundo e também no Brasil. Além disso, o governo federal em 2023 lançou o programa MOVER [1] com o intuito de incentivar a indústria automotiva a produzir veículos sustentáveis e desde então a substituição dos ônibus a combustão tradicionais pelos elétricos vem ocorrendo com maior ímpeto.

A Figura 1 abaixo evidencia a quantidade de ônibus elétricos no Brasil, fazendo distinção apenas por tipo de veículo.

Figura 1 - Quantidade de ônibus elétricos no Brasil



Fonte: E-Bus Radar [2]

No contexto brasileiro, segundo o E-Bus Radar [2], em julho de 2024, haviam 681 ônibus elétricos espalhados em 20 cidades. As cidades são: Bauru - SP, Brasília - DF, Cascavel - PR, Curitiba - PR, Diadema - SP, Goiânia - GO, Guarujá - SP, Maringá - PR, Mauá - SP, Porto Alegre - RS, Salvador - BA (cidade e região metropolitana), Santos - SP, São Bernardo do Campo - SP, São José dos Campos - SP, São Paulo - SP (cidade e região metropolitana), Sorocaba - SP, Vitória - ES (região metropolitana) e Volta Redonda - RJ. Ainda baseado no E-Bus, as fabricantes dos ônibus em operação no Brasil são: BYD, Eletra, HigerBus Company Limited, Marcopolo, Mercedes, Powertronics ou Volvo Buses.

Na Figura 2, é possível ver a relação das cidades com parte da sua frota eletrificada, o fabricante e a quantidade de veículos em operação.

Figura 2 - Relação de cidades e fabricantes de veículos elétricos em operação no Brasil.

RELAÇÃO DE CIDADES E FABRICANTES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM OPERAÇÃO NO BRASIL		
CIDADES	FABRICANTES	NÚMERO DE VEÍCULOS
BAURU	BYD	2
BRASÍLIA	BYD	6
CASCADEL	Hyger Bus	15
CURITIBA	BYD, Volvo Buses	6, 1
DIADEMA	BYD	6
GOIÂNIA	Eletra	12
GUARUJÁ	Eletra	4
MARINGÁ	BYD	3
MAUÁ	BYD	2
PORTO ALEGRE	Marcopolo, Eletra	8, 4
SALVADOR (cidade e região metropolitana)	Eletra, BYD	8, 20
SANTOS	BYD, Outros	1, 6
SÃO BERNARDO DO CAMPO	Eletra	1
SÃO JOSÉ DOS CAMPOS	BYD	12
SÃO PAULO (cidade e região metropolitana)	Eletra, Mercedes, BYD, Powertronics e Marcopolo	443, 62, 27, 24
SOROCABA	Eletra	1
VITÓRIA (região metropolitana)	Eletra	4
VOLTAREDONDA	BYD	3

Fonte: Próprio autor a partir das contribuições do E-Bus Radar [2]

Redirecionando o foco das cidades para os fabricantes, a Figura 3 apresenta os principais líderes de mercado no cenário brasileiro.

Figura 3 - Fabricantes com maior número de ônibus elétricos em operação no Brasil

FABRICANTES	NÚMERO DE VEÍCULOS
ELETRA	477
BYD	88
MERCEDEZ-BENZ	62
POWERTRONICS	23
HIGER BUS COMPANY LIMITED	15
MARCOPOLO	9
VOLVO BUSES	1
OUTROS	6

Fonte: Próprio autor a partir das contribuições do E-Bus Radar [2]

Atualmente, o maior número de ônibus elétricos são da Eletra, proveniente, principalmente, do grande número de veículos na cidade de São Paulo. Entretanto, percebe-se uma grande quantidade de fabricantes presentes no território nacional, um bom fator para a competitividade e possibilidade de diversos modelos que atendam as cidades brasileiras, propiciando oportunidade até às cidades menores.

Embora sejam encontrados ônibus elétricos nas cidades da Figura 2, o Brasil e o mundo em geral ainda possuem oportunidades em diversas localidades para implantação deste tipo de veículo e ideia, entretanto a autonomia destes veículos ainda é um grande desafio. A autonomia é descrita como o quanto um veículo pode circular antes de haver a necessidade de reabastecer, esse aspecto é totalmente vinculado à bateria, apesar de possuir diversos fatores influenciadores: estilo de condução (acelerações e frenagens), recursos de conforto (ar-condicionado, telas digitais, dentre outros) e o modo econômico.

A bateria ou dispositivos armazenadores de energia é o principal componente de um veículo elétrico, não é por

acaso que também é o de maior volume, peso e custo [3]. Enquanto os carros a combustão utilizam a energia proveniente da queima de combustíveis fósseis, os veículos elétricos utilizam a energia elétrica armazenada na bateria, que é responsável por fornecer a energia necessária para o funcionamento do motor elétrico e o tracionamento das rodas.

Ao analisar uma bateria, os pontos principais de inspeção são a tensão, a eficiência energética, a quantidade de ciclos de carga/descarga, a recarga das células e a densidade energética. No final do século XIX e início do século XX, as baterias de chumbo-ácido não atendiam bem os requisitos de maneira geral o que tornou os veículos elétricos pouco competitivos, mas com o passar da década de 1990, surgiu a tecnologia das baterias de íon de lítio que passou a gerar uma revolução, pois as baterias passaram a atender os requisitos de forma satisfatória, tornando os veículos elétricos competitivos. Hoje, a tecnologia continua a desenvolver estudos e baterias melhores, com maior densidade energética e durabilidade, contando ainda com menores pesos. Abaixo um quadro comparativo entre as tecnologias de bateria existentes para veículos elétricos, além das tecnologias chumbo-ácido e íon de lítio, há a existência da tecnologia níquel hidreto metálico (NiMH), uma tecnologia intermediária bastante utilizada em veículos elétricos híbridos devido a sua menor eficácia para veículos elétricos recarregáveis. A Figura 4 mostra informações dos três tipos de bateria, permitindo compará-las.

Figura 4 - Comparação entre tecnologias de baterias para veículos elétricos.

	Íon de Lítio	Níquel Hidreto Metálico NiMH	Chumbo-ácido
Densidade energética (Wh / kg)	100 - 300	40 - 120	30 - 40
Densidade da potência (W / kg)	1.000 - 5.000	300 - 1.000	180
Ciclo de vida	500 - 15.000	500 - 1.000	500 - 800
Eficiência de carga e descarga	95 - 99%	65 - 80%	70 - 92%
Taxa de descarga própria	1 - 5% / mês	~30% / mês	3 - 20% / mês
Tolerância a sobrecarga	Baixa	Baixa	Alta
Manutenção	Sem necessidade	60 - 90 dias	3 - 6 meses
Tempo de carga rápida	1 hora ou menos	2 - 4 horas	8 - 16 horas

Fonte: Neocharge [4]

A importância das baterias a torna a principal fonte de estudos na busca por soluções inovadoras e tecnológicas que permitam a mobilidade urbana moderna sustentável, eficiente e acessível, principalmente através de ônibus elétricos que cumpram seu potencial como uma alternativa que engloba todas essas características. É necessário ressaltar ainda que atualmente as baterias mais utilizadas para os veículos elétricos são as de Lítio-Ferro-Fosfato (LiFePO4), pois essas têm grande confiabilidade e segurança, possuem alta densidade de carga e sua manutenção é mínima. Sendo assim cumprem requisitos ideais para sua utilização na mobilidade elétrica.

Considerando que o foco dessas baterias é a sua utilização na mobilidade urbana, há ainda um impasse quanto à infraestrutura de recarga. No Brasil, mesmo nas cidades que estão eletrificando suas frotas de ônibus, há poucos pontos de carregamento, o que é insuficiente e

precisa ser expandido. Isso explicita outra dificuldade que são os impactos na rede de distribuição de energia elétrica, principalmente, ao se centralizar em garagens específicas os carregadores, levando ao gasto com melhoria da rede e investimentos em equipamentos como transformadores, além da obra civil. Algumas dúvidas ainda persistem sobre a autonomia desses veículos para cumprir seus trajetos diários, o tempo necessário para carregamento e se o desempenho seria ao menos equivalente ao dos ônibus tradicionais.

Em virtude do que foi citado anteriormente, o presente trabalho de conclusão de curso buscou desenvolver uma ferramenta computacional que proporcione uma simulação de desempenho para os ônibus elétricos, utilizando dados reais dos fabricantes BYD e Marcopolo que estão no Apêndice A e serão citados ao longo deste artigo. O objetivo da ferramenta é simular com precisão como se dará o desempenho dos ônibus ao longo das rotas urbanas para constatar se são uma boa alternativa para aquele percurso em específico, além de detalhar a energia gasta pela bateria viabilizando sua otimização. Por fim, busca-se proporcionar maior assertividade nas políticas públicas, selecionando o modelo de ônibus mais adequado e determinando os pontos ideais para a instalação de carregadores.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para avaliar o desempenho do ônibus elétrico baseado na sua bateria, foi desenvolvido uma ferramenta computacional via software Matrix Laboratory, mais conhecido como MATLAB, da MathWorks, na própria linguagem MATLAB, também conhecida como M-código ou simplesmente M. Essa ferramenta computacional utiliza modelos físicos e matemáticos em sua implementação permitindo simular diferentes cenários operacionais e prever o comportamento do veículo em termos de consumo energético, eficiência e autonomia. Assim, a ferramenta oferece suporte a análise detalhada do desempenho da bateria, possibilitando ajustes e otimizações no sistema elétrico do ônibus.

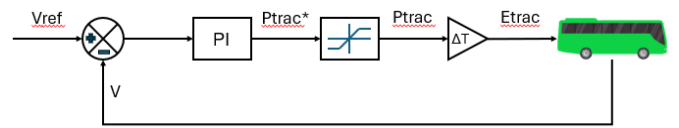
Além disso, o modelo permite comparar e atestar se o desempenho do ônibus atinge o desempenho exigido pela ABNT NBR 15570:2021 como por exemplo no item 9.2.1 em que determina-se que o veículo atinja velocidade de 40km/h, sendo em pista plana ou aclive de máximo 1% [6].

Na implementação consta como entrada para a ferramenta os parâmetros construtivos (massa do veículo, velocidade máxima, área frontal, coeficiente aerodinâmico, coeficiente de rolagem, carga total da bateria e quantidade de descarga da bateria) e os parâmetros de funcionamento (distância percorrida, variação de altitude do percurso, quantidade de paradas e quantidade de passageiros). A análise leva em consideração diversas energias (energia de arrasto, energia de rolagem, energia potencial, energia cinética, energia cinética diferencial, energia de frenagem, dentre outras) que são provenientes do funcionamento do ônibus a partir das informações de entrada.

A base das equações de energias implementadas são retiradas da palestra do professor Michael O'Keefe [7], que discute como seria possível reproduzir o consumo de energia dos veículos. Na figura 5 é possível visualizar o diagrama de blocos que serve como base e referência da

implementação.

Figura 5 - Diagrama de blocos da implementação



Fonte: Próprio autor

Este diagrama deduz a seguinte equação:

$$E_{trac_k} = P_{trac_k} * \Delta T \quad (1)$$

Expandindo a equação 1 obtém-se a equação 2:

$$E_{trac_k} = E_{air_k} + E_{scroll_k} + E_{kinetics_k} + E_{potencial_k} - E_{break_k} \quad (2)$$

Para a compreensão da equação 2 em sua totalidade é necessário o entendimento de cada tipo de energia presente. Abaixo é descrito cada tipo de energia.

- A Energia de Arrasto (E_{air}), amplamente debatida em mecânica dos fluidos, é a energia que está relacionada com a força de arrasto que é a força que se opõe à ao movimento de um objeto enquanto este se desloca em um fluido, neste caso, o ar. As principais variáveis que influenciam essa energia são a densidade do fluido (ρ), o coeficiente de arrasto (C) que depende da forma e da turbulência do objeto, a área da seção transversal do objeto perpendicular ao fluxo do fluido (A), a velocidade de movimento do objeto em relação ao fluido (v_k) e o tempo (ΔT), como visualizado na equação 3:

$$E_{air} = \frac{1}{2} * \rho * C * A * v_k^3 * \Delta T \quad (3)$$

$\rho = 1.190204 \text{ kg/m}^3$ (usando a média de temperatura e pressão do ar entre os meses de janeiro e outubro de 2024, segundo Tempo.com [8])

- A Energia de rolagem (E_{scroll}) está associada à força que um objeto exerce ao rolar por uma superfície, seja este objeto cilíndrico, esférico ou sustentado por rodas. Essa energia é importante na mecânica clássica, principalmente em sistemas onde o atrito e a resistência ao rolamento possuem papéis significativos que é o caso do movimento de veículos. Essa energia surge a partir da resistência ao movimento que o objeto possui devido à deformação da superfície e do objeto. É uma combinação das energias cinéticas de rotação e tradução contidas no movimento, possuindo influência do coeficiente de rolagem da área ($RRCo$), da massa do objeto (m), da aceleração da gravidade (g), da velocidade de movimento do objeto (v_k) e do tempo (ΔT) como descrito pela equação 4:

$$E_{scroll} = RRCo * m * g * v_k * \Delta T \quad (4)$$

$g = 9,7815 \text{ m/s}^2$ (informação retirada do anexo do artigo “Variação da Aceleração da Gravidade com a Latitude e Altitude” [9], tendo como base: latitude $-16,6799^\circ$ e altitude 749 metros)

A Energia cinética ($E_{kinetics}$) é a energia do movimento de um objeto. Essa energia depende de dois fatores: massa e velocidade, como visto na equação 5 e 6:

$$E_{kinetics} = \frac{1}{2} * m * v_k^2 \quad (5)$$

$$E_{kinetics} = \frac{1}{2} * m * (v_{k+1}^2 - v_k^2) \quad (6)$$

A Energia potencial ($E_{potencial}$) é a energia armazenada pela posição do objeto. Nesse caso, será gravitacional e relativa à altura em relação ao plano. As variáveis do cálculo dessa energia são a massa, a aceleração da gravidade e a altura visualizado na equação 7:

$$E_{potencial} = m * g * (h_{k+1} - h_k) \quad (7)$$

A altura varia de acordo com a velocidade, o tempo e a ângulo do plano como descrito na equação 8, e resultando na equação 9:

$$h_{k+1} - h_k = v_k * \Delta T * \sin \theta \quad (8)$$

$$E_{potencial} = m * g * v_k * \Delta T * \sin \theta \quad (9)$$

Energia de frenagem, ou energia de freio, é a energia que se dissipa quando um veículo desacelera, convertendo-se, por exemplo, em calor. Há um detalhe importante: essa energia pode ser recuperada e utilizada pelo motor do veículo elétrico para aumentar a carga da bateria.

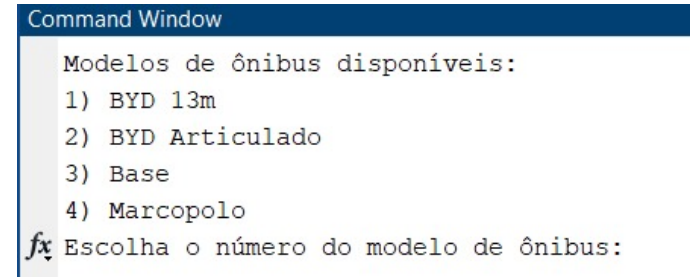
A partir da implementação da ferramenta computacional finalizada, foram obtidos os dados para identificação do correto funcionamento do modelo matemático e, posteriormente, estudo do desempenho do sistema em diferentes condições de operações. Para melhor organização e análise dividiu-se os resultados em seis testes distintos e um último teste com a bateria do ônibus iniciando o percurso com 50% de carga como descrito abaixo:

- Etapa 1: Sistema Parcial sem Parada (Modelo Base)
- Etapa 2: Sistema Parcial com Paradas (Modelo Base)
- Etapa 3: Sistema Parcial com Paradas e Altimetria (Modelo Base)
- Etapa 4: Sistema Completo (BYD - 13M)
- Etapa 5: Sistema Completo (Marcopolo - 13M)
- Etapa 6: Sistema Completo (BYD Articulado)
- Etapa 7: Sistema completo com bateria a 50% (BYD-13M)

Além disso, foi desenvolvida uma interface que

possibilita a escolha do modelo do ônibus (Base, BYD - 13M, Marcopolo ou BYD Articulado) de forma automática sem a necessidade de alteração manual do código como é possível visualizar na Figura 6:

Figura 6 - Interface da ferramenta computacional



Fonte: Próprio autor

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. ETAPA 1

Iniciando a apresentação dos resultados pela “Etapa 1: Sistema Parcial sem Paradas (Modelo Base)”, as informações do ônibus base estão evidenciadas e foram escolhidas de forma aleatória dentro de uma estimativa prévia dos modelos de ônibus utilizados atualmente.

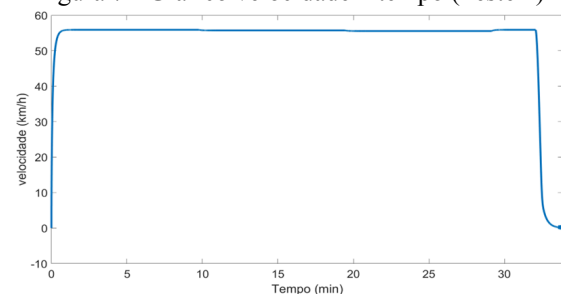
Tabela 1 - Informações do ônibus base

Ônibus Base	
Massa Máxima do Ônibus	25 x 10 ³ kg
Velocidade Máxima	60 km/h
Área Frontal	8,9505 m ²
Coefficiente Aerodinâmico	0,34
Coefficiente de Rolagem	0,009
Carga Total da Bateria	250 kWh

Fonte: Próprio autor

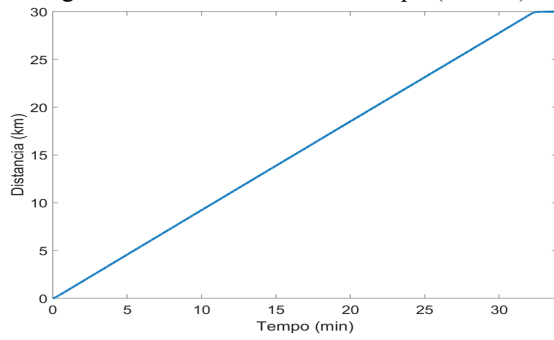
Com base nessas informações, foram obtidos os resultados gráficos abaixo baseado no modelo matemático básico de forma generalizada, no qual a única influenciadora relativa ao percurso atribuída é a distância que, de forma arbitrária, foi de 30 km. Os resultados estão evidenciados abaixo da Figura 7 à Figura 12.

Figura 7 - Gráfico velocidade x tempo (Teste 1)



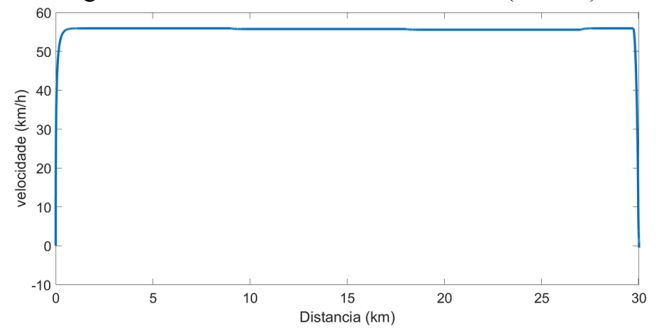
Fonte: Próprio autor

Figura 8 - Gráfico distância x tempo (Teste 1)



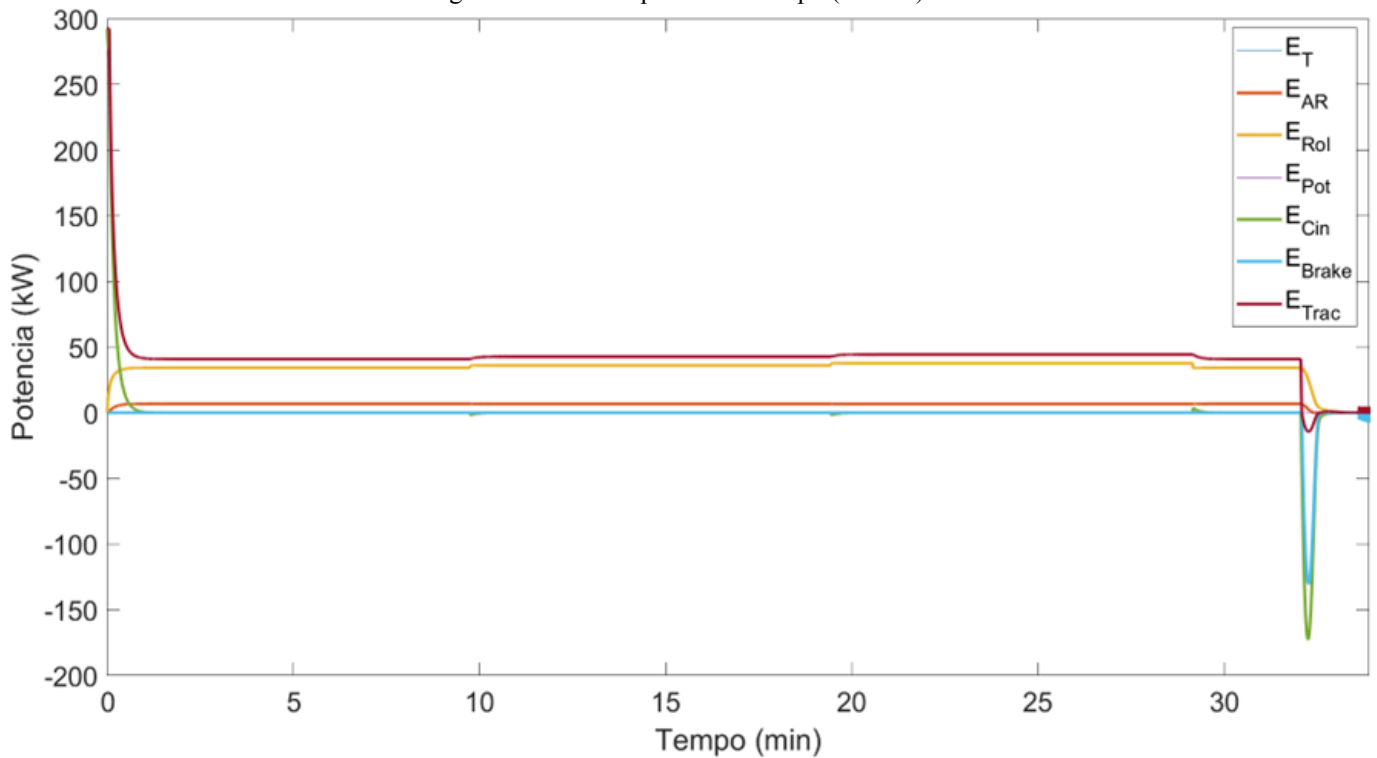
Fonte: Próprio autor

Figura 9 - Gráfico velocidade x distância (Teste 1)



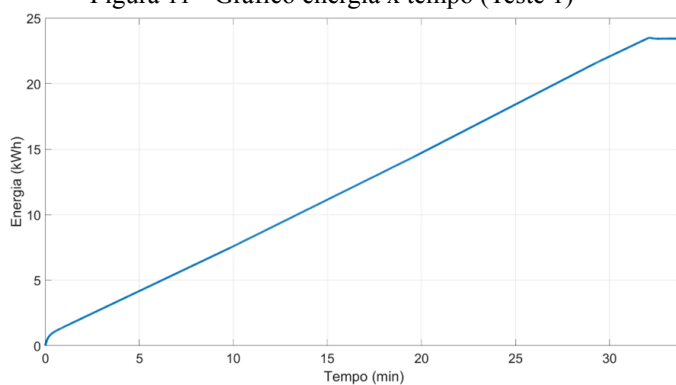
Fonte: Próprio autor

Figura 10 - Gráfico potência x tempo (Teste 1)



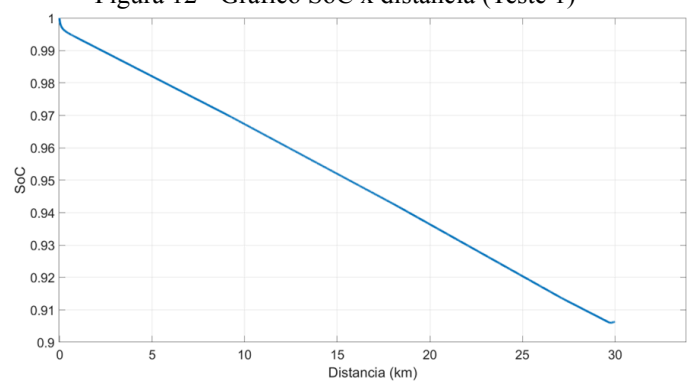
Fonte: Próprio autor

Figura 11 - Gráfico energia x tempo (Teste 1)



Fonte: Próprio autor

Figura 12 - Gráfico SoC x distância (Teste 1)



Fonte: Próprio autor

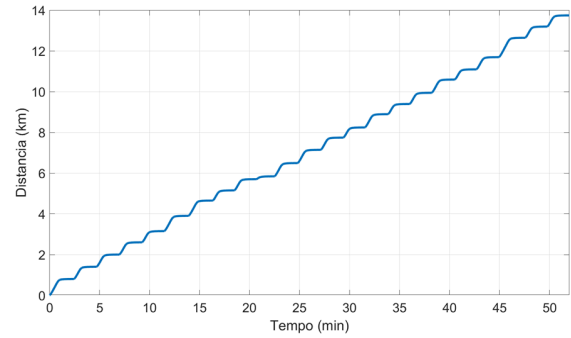
É possível verificar que neste teste a velocidade, energia consumida e descarga da bateria é contínua pois no modelo simplificado sem a presença de paradas não há alteração no decorrer do sistema. Outro ponto interessante é que só há recuperação advinda da energia de frenagem no último momento, que é a frenagem ao final do percurso dos

trinta quilômetros. A carga da bateria neste teste representada pelo State of Charge (SoC) diminui cerca de 9,4% com uma leve recuperação no instante final. Com isso, esse ônibus base possuiria uma autonomia de cerca de 320 km, lembrando que a velocidade é de forma permanente.

B. ETAPA 2

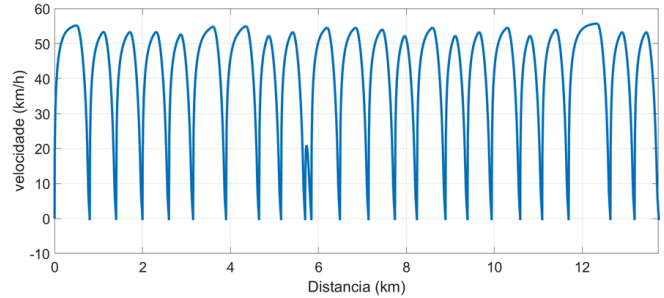
Aprimorando o sistema no “Teste 2: Sistema Parcial com Paradas (Modelo Base)”, foram implementadas as paradas tendo como referência o Eixo Anhanguera, via do transporte público da cidade de Goiânia que possui cerca de 13,5 km de extensão cruzando 24 estações (Apêndice B) que vai desde o Terminal Novo Mundo até o Terminal Padre Pelágio no sistema do Bus Rapid Transit (BRT). Este corredor é um dos principais eixos de mobilidade urbana da região, conectando bairros periféricos ao centro da cidade com eficiência. Caracteriza-se pelo uso de faixas exclusivas para ônibus, reduzindo significativamente o tempo de viagem. Além disso, sua infraestrutura moderna suporta veículos de alta capacidade, garantindo um transporte mais ágil e confortável para os milhares de passageiros que utilizam o serviço diariamente. Os resultados obtidos estão abaixo da Figura 13 à Figura 18:

Figura 14 - Gráfico distância x tempo (Teste 2)



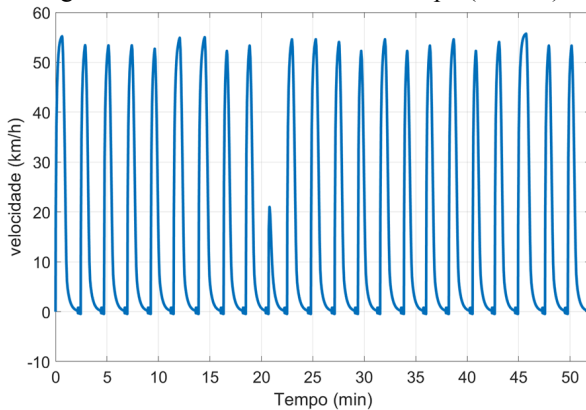
Fonte: Próprio autor

Figura 15 - Gráfico velocidade x distância (Teste 2)



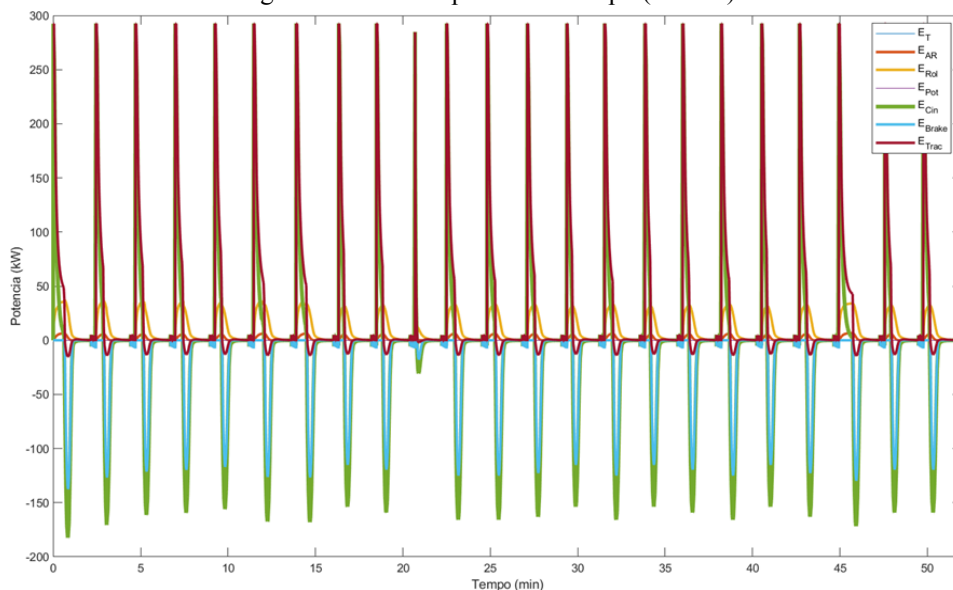
Fonte: Próprio autor

Figura 13 - Gráfico velocidade x tempo (Teste 2)



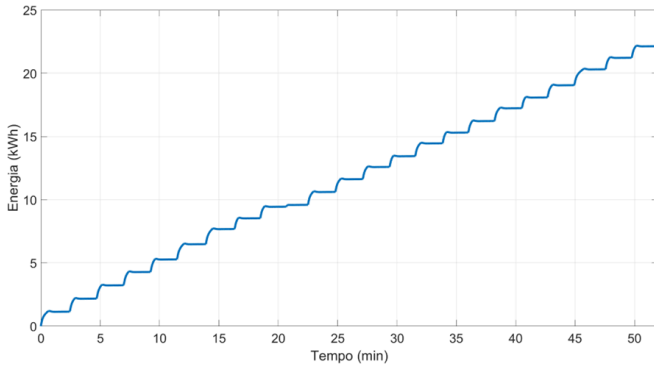
Fonte: Próprio autor

Figura 16 - Gráfico potência x tempo (Teste 2)



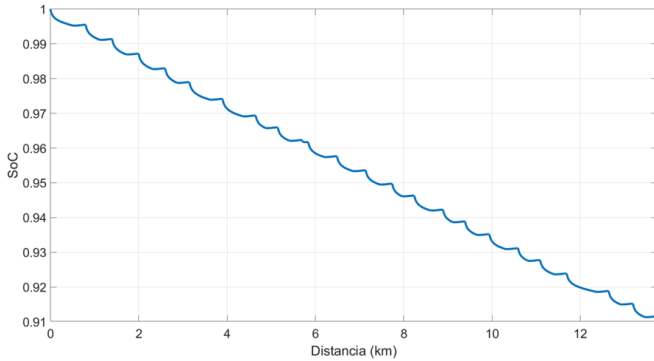
Fonte: Próprio autor

Figura 17 - Gráfico energia x tempo (Teste 2)



Fonte: Próprio autor

Figura 18 - Gráfico SoC x distância (Teste 2)



Fonte: Próprio autor

No teste 2 já há uma mudança considerável nos gráficos devido ao fator paradas. Primeiramente o gráficos da velocidade, energia consumida e descarga da bateria

deixam de ser contínuos pois contam com a influência das inúmeras acelerações e frenagens presentes. Ao analisar o gráfico das potências é possível visualizar que já há uma energia de frenagem (Ebreak - linha azul) que possui uma recuperação de energia. O gráfico da energia total gasta, figura 16, por ser um percurso em que as estações possuem uma distância similar entre elas, se assemelha à uma escada, mantendo-se constante no período parado e elevando nos períodos de aceleração e frenagem. Por fim, ao analisar a carga da bateria percebe-se que o gasto é por volta de 8,9%, o que geraria uma autonomia de em torno de 152 km.

C. ETAPA 3

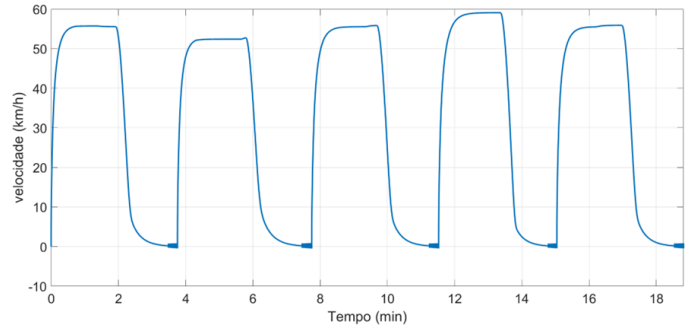
Continuando os testes, foi implantado a variável da altitude no código, o que tornou possível a realização do “Teste 3: Sistema Parcial com Paradas e Altimetria (Modelo Base)”. Neste caso, foram colocadas como paradas as informações do Apêndice D, onde há 5 estágio para

verificação da influência da altimetria no desempenho:

- Estágio 1: deslocamento plano de 0-2 km (0 a 3,8 minutos)
- Estágio 2: : deslocamento em subida de 2-4 km em angulação de 5° (3,8 a 7,8 minutos)
- Estágio 3: deslocamento plano de 4-6 km (7,8 a 11,6 minutos)
- Estágio 4: deslocamento em descida de 6-8 km em angulação de 5° (11,6 a 15 minutos)
- Estágio 5: deslocamento plano de 8-10 km (15 a 18,8 minutos)

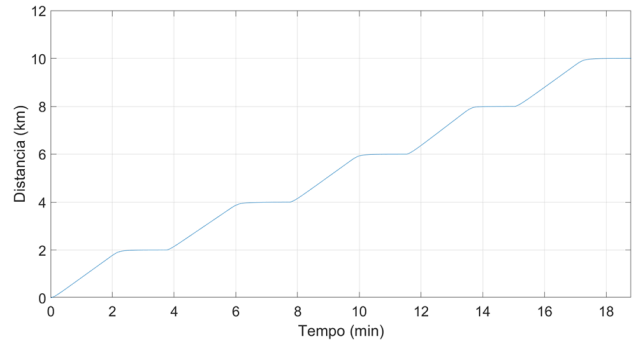
A partir da Figura 19 até a Figura 24, visualizamos os gráficos referentes ao teste 3.

Figura 19 - Gráfico velocidade x tempo (Teste 3)



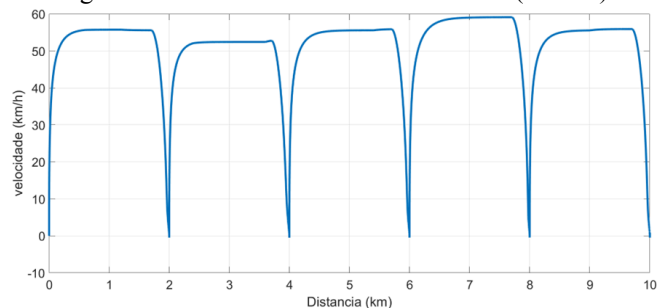
Fonte: Próprio autor

Figura 20 - Gráfico distância x tempo (Teste 3)



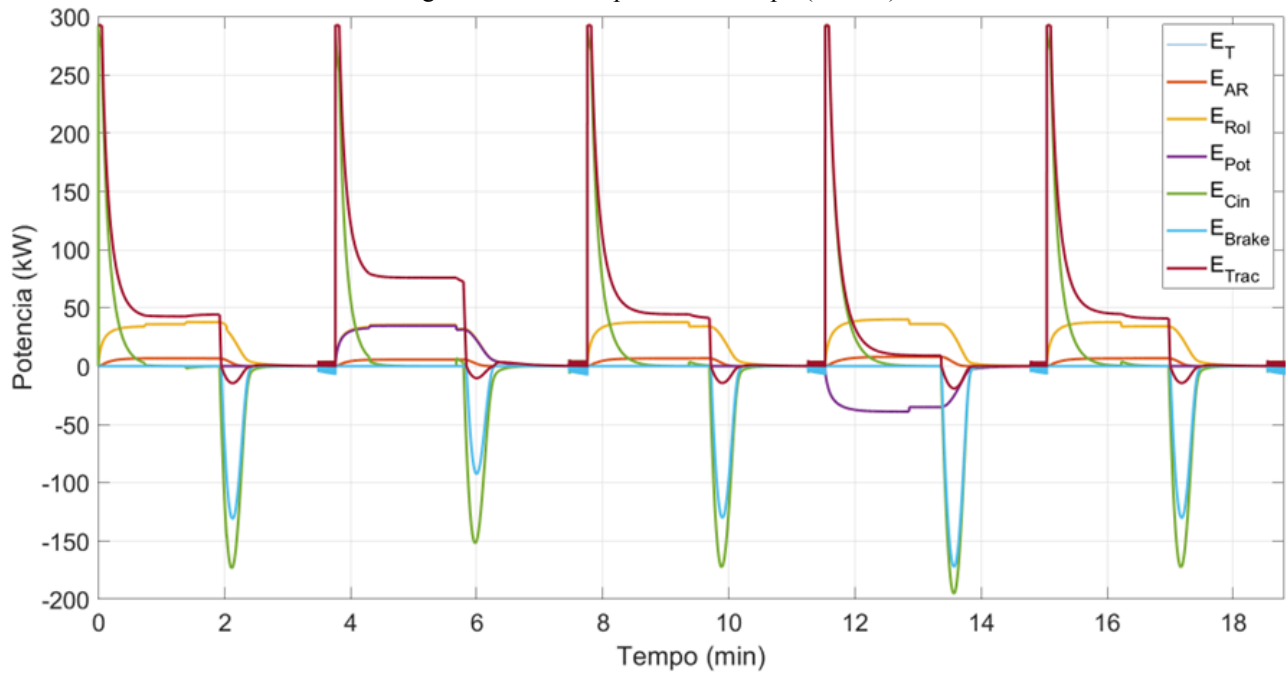
Fonte: Próprio autor

Figura 21 - Gráfico velocidade x distância (Teste 3)



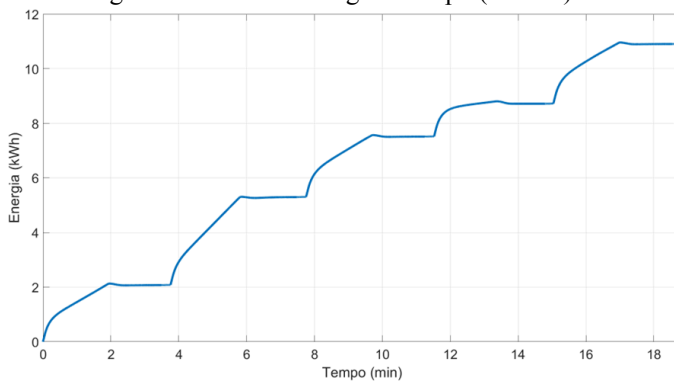
Fonte: Próprio autor

Figura 22 - Gráfico potência x tempo (Teste 3)



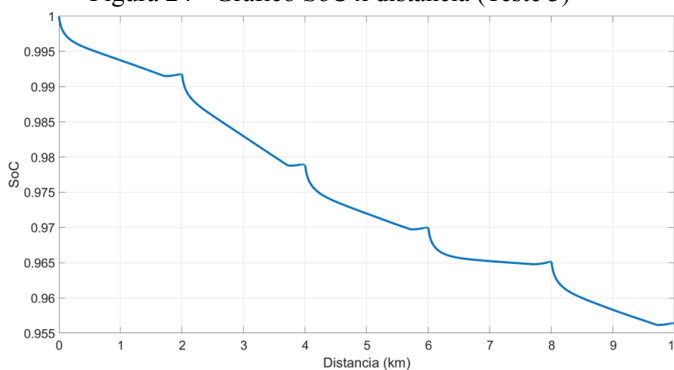
Fonte: Próprio autor

Figura 23 - Gráfico energia x tempo (Teste 3)



Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Gráfico SoC x distância (Teste 3)



Fonte: Próprio autor

Iniciando a análise pela velocidade é possível notar que no estágio 2 (subida) o ônibus elétrico alcança uma velocidade máxima menor, por volta de 50 km/h, enquanto no estágio 4 (descida) é alcançada a velocidade máxima permitida de quase 60 km/h. Com relação ao tempo pela distância, como explicitado na descrição dos estágios é possível verificar que o tempo de percurso se mantém idêntico nos estágios 1, 3 e 5, onde a altimetria é plana e

diferencia-se nos estágios de subida e descida sendo feito em maior e menor tempo, respectivamente.

Ao analisar os gráficos relativos à potência e energia, nota-se que no estágio de subida há um maior gasto de energia e no de descida um menor, tal fato se dá por dois motivos: a necessidade de aceleração e a questão de frenagem. No estágio de subida, além de ser necessário uma aceleração continuada, não há o uso dos freios que gera uma regeneração da energia, o que resulta no maior gasto e menor reaproveitamento, diferentemente do estágio de descida que se comporta totalmente oposto realizando poucas acelerações e com maior uso dos freios no controle da velocidade. O gráfico da função SoC ajuda a complementar essa informação ao mostrar, por exemplo, que na subida, o veículo gastou cerca de 1,45% da bateria enquanto na descida o gasto foi por volta de 0,5% apenas. Neste caso 3, a autonomia do modelo base seria de 227 km.

Posterior aos três testes iniciais que possuem por objetivo principal a validação do correto funcionamento do código, obteve-se o código do sistema completo que foi utilizado nos testes 4, 5 e 6. Estes testes têm por objetivo avaliar a integração e o funcionamento do sistema em condições reais de operação, sendo abrangente com as duas variáveis fundamentais: distância e altimetria. Para esses testes, o código foi implementado com as paradas referentes às estações do Eixo Anhanguera no qual possui as distâncias, iguais às utilizadas no teste 2, especificadas no Apêndice B e a altimetria das estações no Apêndice C. A diferença entre os testes se encontra no modelo de ônibus testado, escolhido pela interface indicada na Figura 5.

D. ETAPA 4

A “Etapa 4: Sistema Completo (BYD - 13M)” foi testada com o ônibus elétrico da marca BYD, modelo D9W, de 13 metros de comprimento, possui as informações construtivas especificadas na tabela abaixo.

Tabela 2 - Informações do ônibus BYD - 13M

Ônibus BYD - 13M (D9W)	
Massa Máxima do Ônibus	20,5 x 10 ³ kg
Velocidade Máxima	60 km/h
Área Frontal	7,2 m ²
Coefficiente Aerodinâmico	0,34
Coefficiente de Rolagem	0,01
Carga Total da Bateria	344 kWh

Fonte: Próprio autor a partir das contribuições da ficha técnica do fabricante [10]

Um ponto importante de destaque, os valores do coeficiente aerodinâmico e de rolagem se mantêm constantes em todos os testes por um motivo de não constar a informação nas fichas técnicas ou cartilhas do fabricantes, e não foi possível obtê-los via email enviado aos fabricantes.

Os resultados obtidos no teste estão especificados da Figura 25 até a Figura 30.

Figura 25 - Gráfico velocidade x tempo (Teste 4)

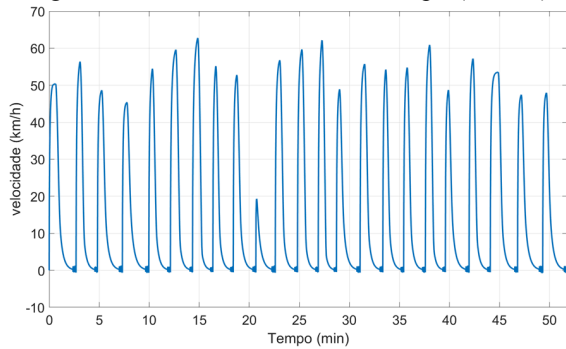
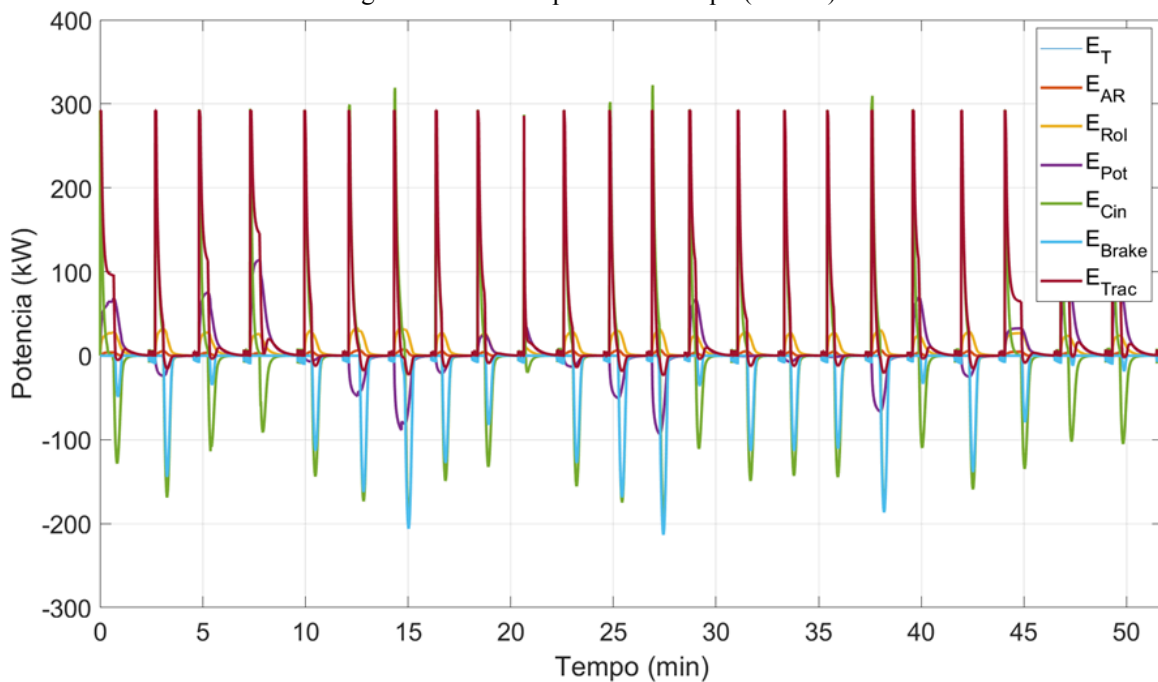
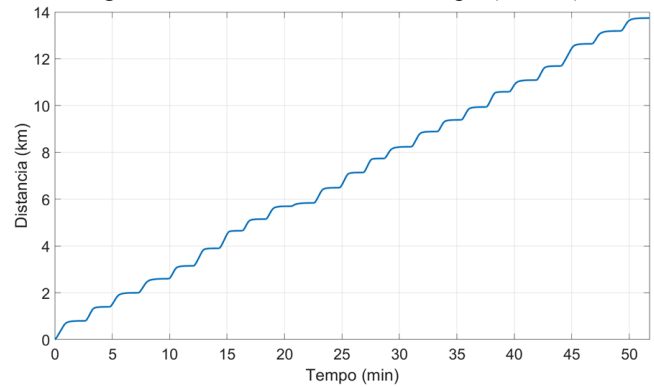


Figura 28 - Gráfico potência x tempo (Teste 4)



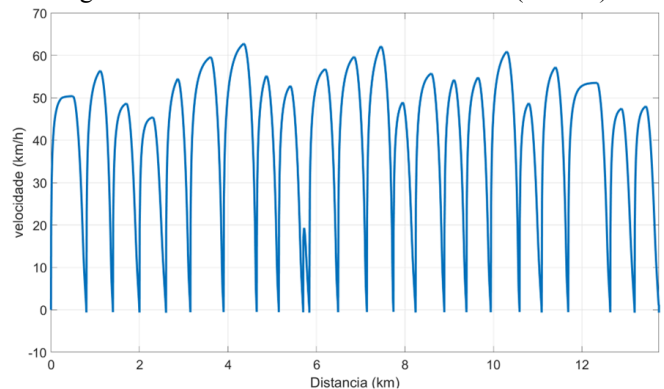
Fonte: Próprio autor

Fonte: Próprio autor
Figura 26 - Gráfico distância x tempo (Teste 4)



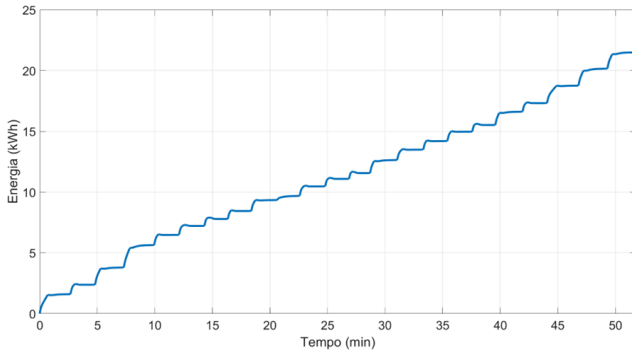
Fonte: Próprio autor

Figura 27 - Gráfico velocidade x distância (Teste 4)



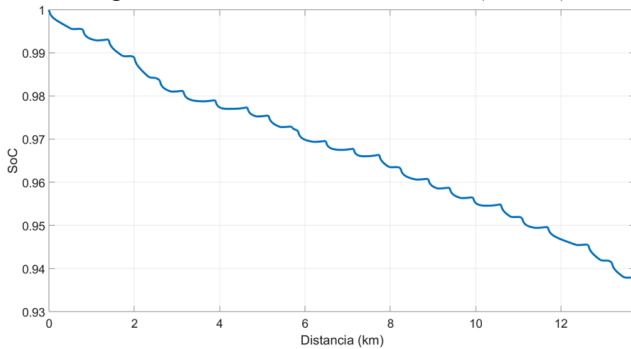
Fonte: Próprio autor

Figura 29 - Gráfico energia x tempo (Teste 4)



Fonte: Próprio autor

Figura 30 - Gráfico SoC x distância (Teste 4)



Fonte: Próprio autor

Neste teste 4, é possível perceber que a velocidade se altera bastante devido à ocorrência de momentos de subida, onde o ônibus é mais lento, e de descida, onde devido a ajuda da aceleração da gravidade o ônibus aumenta bastante sua velocidade, passando até dos 60km/h previamente estabelecido. A análise da carga da bateria ônibus nos mostra um gasto de cerca de 6,2% da carga, resultando na autonomia de 218 km, abaixo dos 250 km estimados pela BYD.

E. ETAPA 5

A “Etapa 5: Sistema Completo (Marcopolo - 13M)” foi testada com o ônibus elétrico da marca Marcopolo, modelo Ativvi, de 13 metros de comprimento, que possui as informações construtivas especificadas na tabela abaixo.

Tabela 3 - Informações do ônibus Marcopolo - 13M

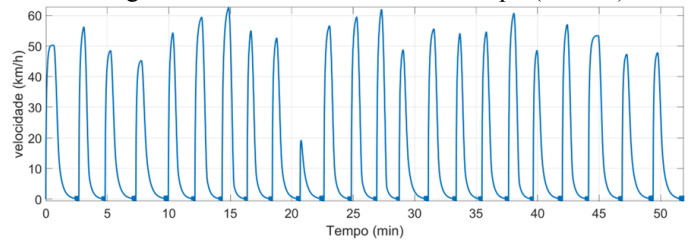
Ônibus Marcopolo - 13M (Ativvi)	
Massa Máxima do Ônibus	20,6 x 10 ³ kg
Velocidade Máxima	60 km/h
Área Frontal	9,3 m ²

Coefficiente Aerodinâmico	0,34
Coefficiente de Rolagem	0,009
Carga Total da Bateria	396,75 kWh

Fonte: Próprio autor a partir das contribuições da cartilha da fabricante [11]

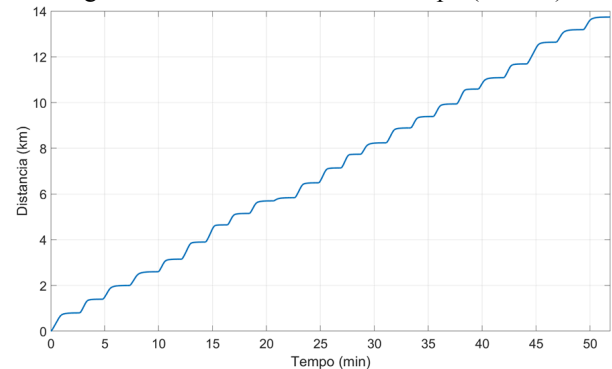
Os resultados obtidos no teste estão especificados entre a Figura 31 a Figura 36, e poderão ser comparados em especial com os resultados do teste 4, tendo em vista que os veículos das fabricantes distintas possuem o mesmo tamanho de comprimento (13 metros) e características similares.

Figura 31 - Gráfico velocidade x tempo (Teste 5)



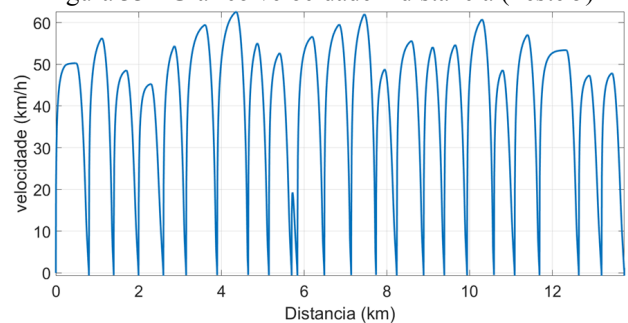
Fonte: Próprio autor

Figura 32 - Gráfico distância x tempo (Teste 5)



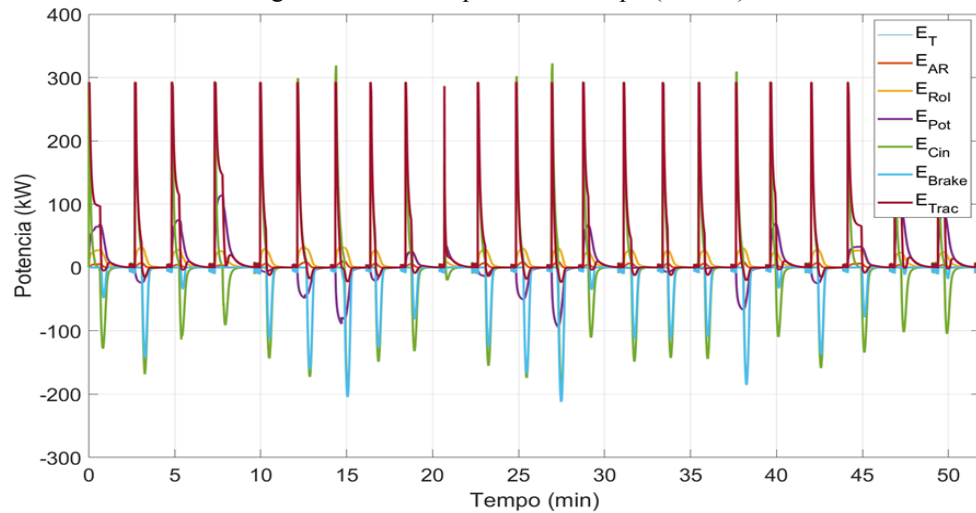
Fonte: Próprio autor

Figura 33 - Gráfico velocidade x distância (Teste 5)



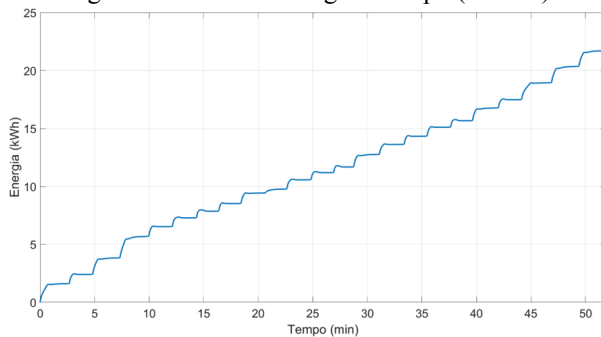
Fonte: Próprio autor

Figura 34 - Gráfico potência x tempo (Teste 5)



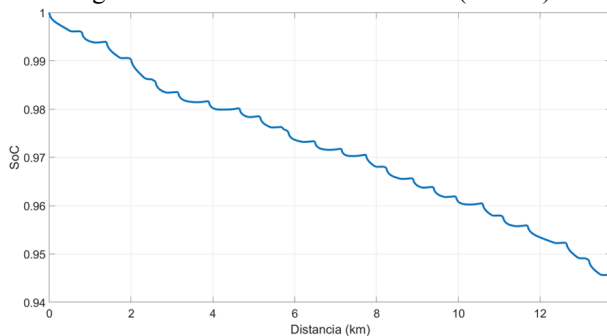
Fonte: Próprio autor

Figura 35 - Gráfico energia x tempo (Teste 5)



Fonte: Próprio autor

Figura 36 - Gráfico SoC x distância (Teste 5)



Fonte: Próprio autor

Ao analisar o teste 5 é possível concluir que a velocidade altera bastante, assim como no teste 4, passando até mesmo dos 60 km/h.. Há a regeneração devido à frenagem e o gasto de energia é bem evidente maior entre estações que

tem uma elevação na altimetria e menor entre estações que possuem uma diminuição na altimetria. Na Figura 35, a função SoC evidencia um percentual de 5,5% gasto da bateria, o que geraria uma autonomia de 245 km, bem similar ao exposto na cartilha do ônibus pela Marcopolo que estima em 250 km de acordo com uso e operação.

O modelo de ônibus escolhido para o último teste é totalmente distinto dos demais modelos. O Eixo Anhanguera, em Goiânia, conta com ônibus articulados em sua operação regular devido à alta demanda de passageiros,

sendo um dos pilares do transporte público no corredor. Por isso, o teste de número 6 incorpora este modelo para análise, embora os ônibus atualmente em operação sejam da fabricante Eletra. Como não foi possível a obtenção das informações detalhadas desses veículos, optou-se por testar um ônibus da BYD, buscando maior realismo para este artigo e mantendo a compatibilidade técnica com o sistema em estudo.

F. ETAPA 6

A “Etapa 6: Sistema Completo (BYD Articulado)” foi testada com o ônibus elétrico da marca BYD, modelo D11A, de dois compartimentos principais que, juntos, somam 23 metros de comprimento. Este modelo possui as informações construtivas especificadas na tabela abaixo, alinhando a tecnologia e a capacidade operacional para atender às exigências do corredor.

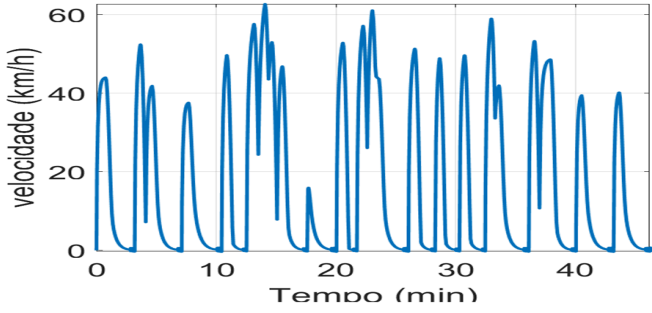
Tabela 2 - Informações do ônibus BYD Articulado

Ônibus BYD Articulado (D11A)	
Massa Máxima do Ônibus	41 x 10 ³ kg
Velocidade Máxima	60 km/h
Área Frontal	5,2 m ²
Coefficiente Aerodinâmico	0,34
Coefficiente de Rolagem	0,01
Carga Total da Bateria	516 kWh

Fonte: Próprio autor a partir das contribuições da ficha técnica do fabricante [12]

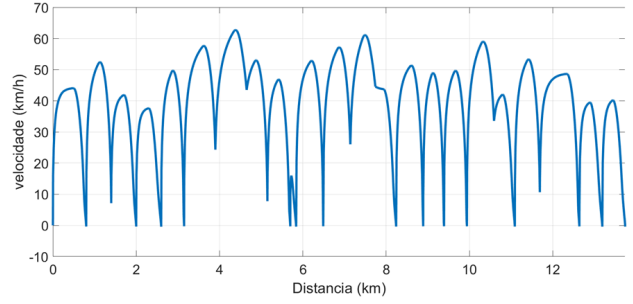
Os resultados estão descritos da Figura 37 à 42.

Figura 37 - Gráfico velocidade x tempo (Teste 6)



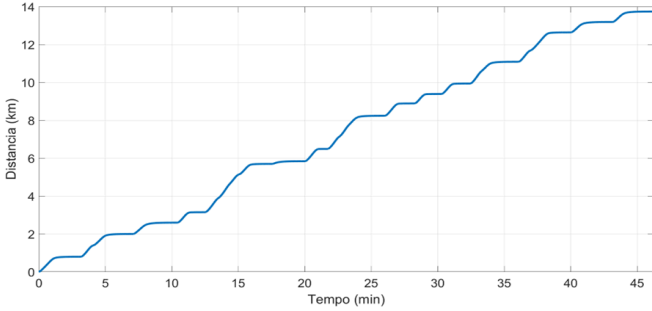
Fonte: Próprio autor

Figura 39 - Gráfico velocidade x distância (Teste 6)



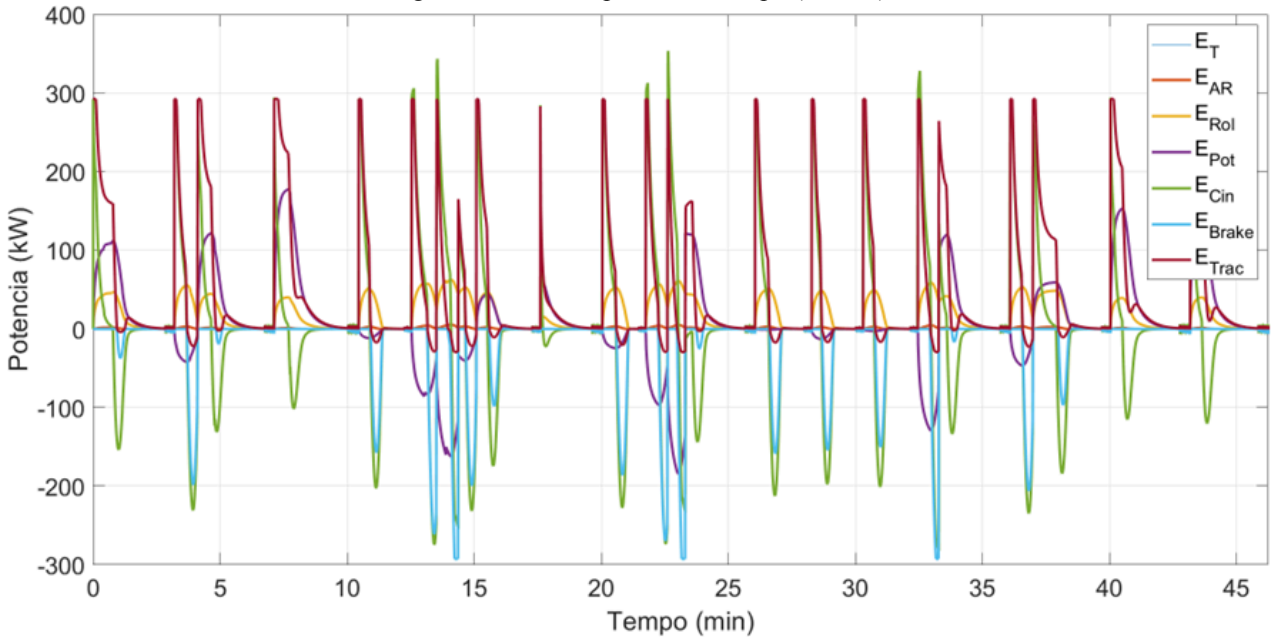
Fonte: Próprio autor

Figura 38 - Gráfico distância x tempo (Teste 6)



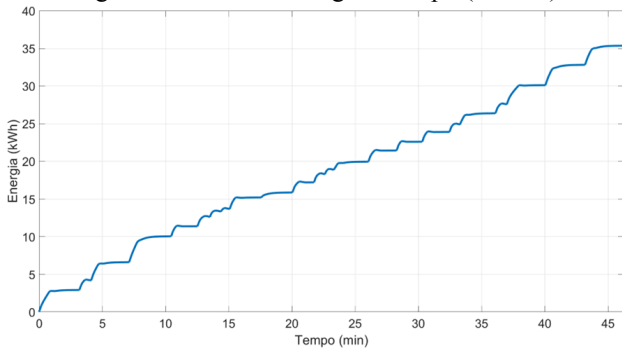
Fonte: Próprio autor

Figura 40 - Gráfico potência x tempo (Teste 6)



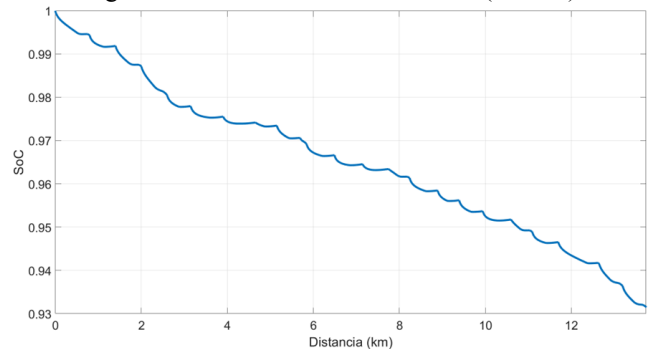
Fonte: Próprio autor

Figura 41 - Gráfico energia x tempo (Teste 6)



Fonte: Próprio autor

Figura 42 - Gráfico SoC x Distância (Teste 6)



Fonte: Próprio autor

A análise do teste 6 é particular e exclusiva por ser um modelo de veículo articulado, composto por dois compartimentos principais e a articulação. Nele percebe-se que há a ultrapassagem da velocidade dos 60km/h nos momentos de descida até mais que os não articulados. Porém, enquanto os ônibus não articulados conseguem alcançar cerca de 20km/h na subida mais íngreme, este modelo articulado se distancia desse valor, alcançando cerca de 16km/h. Tal fato gera uma diferenciação brusca no gráfico de potência e de energia em relação aos modelos anteriores por volta dos 15 minutos da análise. Interessante que a energia de frenagem, evidenciada na Figura 39, é muito maior no ônibus articulado, alcançando -300kW, cerca de 1,5 vezes maior essa energia do que nos demais modelos testados. Esse comportamento evidencia o impacto que o

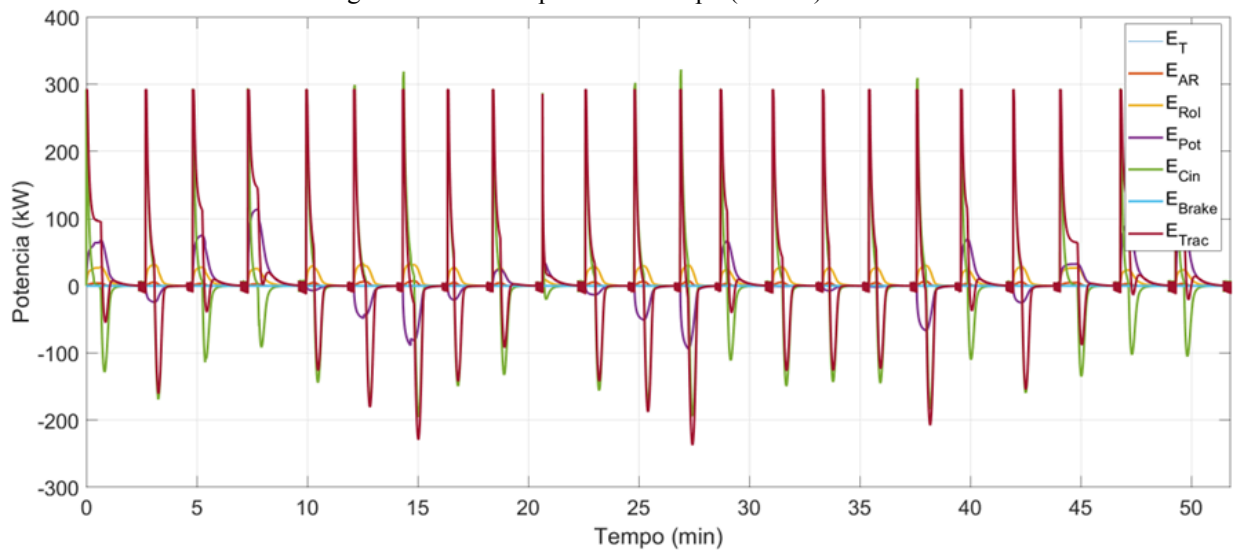
peso e o comprimento do veículo têm no desempenho durante as frenagens. Por fim, ao verificar a carga da bateria, é notável uma diminuição de 6,9% da carga, o que resulta em uma autonomia de 196 km, ficando bem abaixo dos 250 km estimados pela fabricante BYD (-21,6%).

G. ETAPA 7

Nesta etapa será apresentada apenas os resultados do ônibus BYD 13M iniciando o percurso com metade de sua carga de bateria.

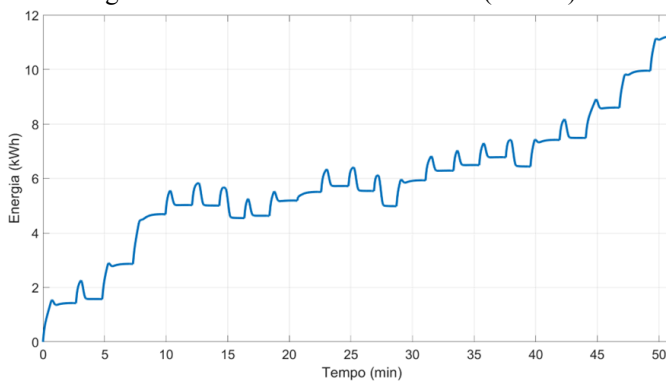
Nas figuras abaixo, 43 e 44, é possível verificar tal situação e analisar de forma visual.

Figura 43 - Gráfico potência x tempo (Teste 7)



Fonte: Próprio autor

Figura 44 - Gráfico SoC x Distância (Teste 7)

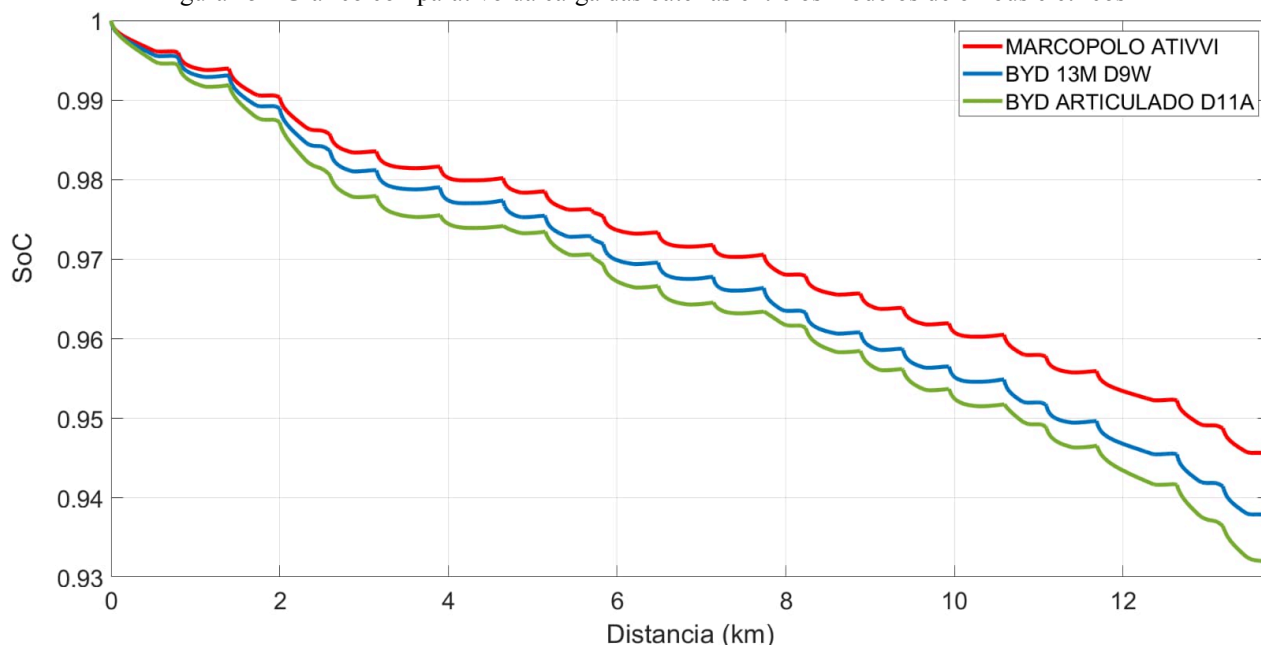


Fonte: Próprio autor

É possível observar, neste caso 7, que a carga da bateria, sendo menor, permite um ganho regenerativo mais eficiente durante a frenagem, comparado aos momentos em que a bateria está completamente carregada (100%). Isso ocorre porque, com menor nível de carga, há maior capacidade disponível para absorver a energia recuperada. Assim, o sistema aproveita melhor o potencial regenerativo, otimizando o desempenho energético.

Concluindo a seção de “Resultados e Discussão” ao comparar os resultados obtidos a partir da carga da bateria dos testes 4, 5 e 6, é possível sobrepor as linhas como evidenciado na Figura 45.

Figura 45 - Gráfico comparativo da carga das baterias entre os modelos de ônibus elétricos



Fonte: Próprio autor

Os formatos dos gráficos permanecem semelhantes, mas ao analisar a carga da bateria de maneira mais detalhada, percebe-se um consumo ligeiramente maior em quilowatt-hora pelo ônibus Marcopolo - 13M. Esse aumento é compensado pela maior capacidade de sua bateria. O modelo Marcopolo apresenta um consumo de 5,5% da carga total, o que considerando sua bateria de 396,75, corresponde a 21,82 kWh de energia consumida no percurso. Por outro lado, o ônibus BYD -13M, com um consumo de 6,2% da carga e uma bateria de 344 kWh, gastaria 21,33 kWh no mesmo trajeto. Isso significa que o modelo BYD consome 0,5 kWh a menos por viagem no corredor do Eixo Anhanguera em Goiânia, resultando em uma redução de 2,25% no gasto de energia em comparação ao Marcopolo - 13M, destacando a importância da eficiência energética proporcionada pela capacidade da bateria e o impacto direto no desempenho do veículo.

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que ao analisar os resultados com o devido detalhamento, o modelo BYD - 13M se apresenta como uma alternativa mais eficiente em termos de consumo energético para este tipo de percurso, pois, apesar de consumir uma porcentagem maior da carga da bateria ele gasta menos energia por viagem, o que pode representar benefícios a longo prazo, especialmente em termos de custos operacionais e sustentabilidade, devido ao menor impacto no uso de energia. Por outro lado, o Marcopolo - 13M é mais eficaz, visto que relacionado à capacidade do ônibus de atingir o seu objetivo - no caso, completar o percurso - ele possui uma bateria maior e apresentando o consumo já evidenciado anteriormente possibilita uma maior autonomia. Ademais, infere-se também que os outros modelos testados (base e BYD articulado) também apresentaram desempenho satisfatório, uma vez que os resultados foram semelhantes e cumpriram com seus respectivos objetivos: comprovar o

correto funcionamento da ferramenta computacional e reproduzir condições próximas à realidade.

É possível concluir também baseado nos gráficos que todos os dados de entrada como massa, área frontal, capacidade da bateria, dentre outros, influenciam diretamente a simulação e o desempenho da bateria. Estes parâmetros têm um impacto significativo na autonomia e no consumo de energia dos ônibus elétricos, demonstrando claramente a relação entre as variáveis físicas e o desempenho do veículo.

Por fim, ainda conclui-se que a ferramenta desenvolvida atinge seu objetivo, proporcionando uma análise robusta do desempenho do sistema, porém é uma ferramenta que deve ser incrementada com mais fatores de influência como a variação de massa do ônibus de acordo com a oscilação de passageiros proveniente da entrada e saída de pessoas transportadas entre as estações (implicaria no não uso da massa máxima do ônibus), o controle de conforto térmico, análise de diferentes perfis de motoristas dos ônibus, dentre outros. A incorporação desses aspectos pode proporcionar uma simulação mais precisa e adaptada à realidade operacional. O desenvolvimento desse software é fundamental para a aplicação das políticas públicas, auxiliando na tomada de decisões estratégicas e na transição para um sistema de transporte mais sustentável e eficiente. Contribuindo para tornar o ônibus elétrico uma realidade viável e acessível nos municípios, promovendo a modernização da infraestrutura urbana e o avanço da mobilidade limpa com a redução das emissões de poluentes.

REFERÊNCIAS

- [1] Programa MOVER, "Programa MOVER" [Online]. Disponível em: <https://www.programa-mover.com/programa-mover/>. Acesso em: 23 nov. 2024.
- [2] EBusRadar, "Cidades," EBusRadar. [Online]. Disponível em: <https://ebusradar.org/#cidades>. Acesso em:

23 nov. 2024.

[3] J. Larminie and J. Lowry, **Electric Vehicle Technology Explained**, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2012.

[4] NeoCharge, "Bateria de veículo elétrico," NeoCharge. [Online]. Disponível em:

<https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/bateria-veiculo-eletrico>. Acesso em: 26 nov. 2024.

[5] Vinnig, "Saiba mais sobre a bateria de lítio," Vinnig. [Online]. Disponível em:

<https://www.vinnig.com.br/saiba-mais-sobre-a-bateria-de-litio>. Acesso em: 26 nov. 2024.

[6] ABNT, **Transporte — Especificação técnica para fabricação de veículos acessíveis de categoria M3 com características urbanas para transporte coletivo de passageiros, *NBR 15570, 2021.*

[7] ClojureTV, "Michael O'Keefe - Predicting Vehicle Usage with Clojure," YouTube, Jan. 09, 2014. [Online]. Disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=joOGH-JtHNY>. Acesso em: 23 nov. 2024.

[8] TEMPO.COM, "Previsão do tempo para Goiânia," [Online]. Disponível em:

<https://www.tempo.com/goiania-sactual.htm>. Acesso em: 17 nov. 2024.

[9] W. Lopes, "Variação da aceleração da gravidade com a latitude e altitude," **Caderno Brasileiro de Ensino de Física, * vol. 25, n° 3, pp. 561–568, 2008.*

[10] BYD Brasil, "D9W," BYD Brasil. [Online]. Disponível em:

<https://bydbrasil.com.br/wp-content/uploads/2024/07/D9W.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2024.

[11] Marcopolo, "Cartilha Attivi," Marcopolo. [Online]. Disponível em:

<https://materiais.marcopolo.com.br/cartilha-attivi>. Acesso em: 23 nov. 2024.

[12] BYD Brasil, "D11A," BYD Brasil. [Online]. Disponível em:

<https://bydbrasil.com.br/wp-content/uploads/2024/07/D11A.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2024.

[13] Google Maps, "Rota entre o Terminal Novo Mundo e o Terminal Padre Pelágio, Goiânia, GO," [Online]. Disponível em:

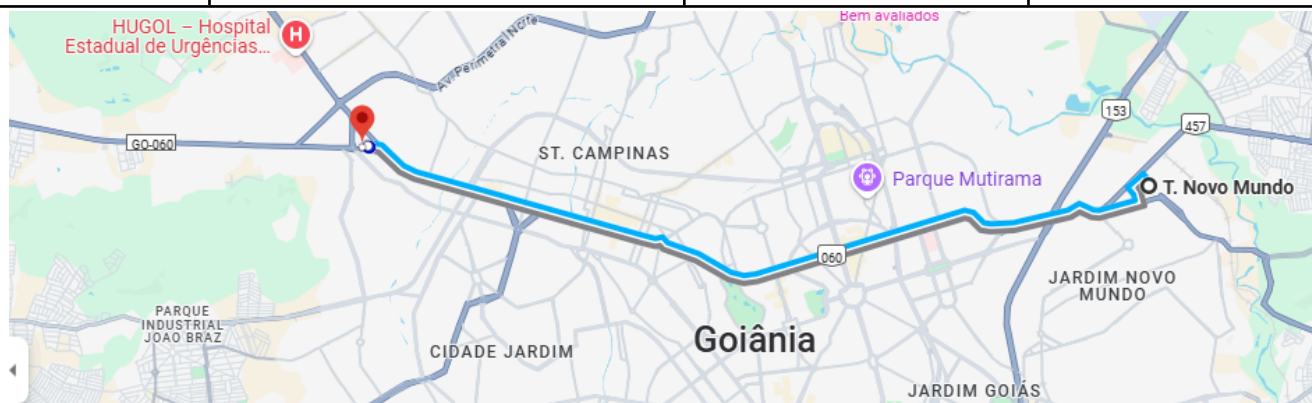
<https://maps.app.goo.gl/NBsjoya427CjfiH49>. Acesso em: 23 nov. 2024.

APÊNDICE A - MODELOS DOS ÔNIBUS ELÉTRICOS

MODELO	D9W	ATTIVI	D11A
FABRICANTE	BYD	MARCOPOLO	BYD
COMPRIMENTO	13 metros	13 metros	23 metros
MASSA MÁXIMA DO ÔNIBUS	20,5 x 10 ³ kg	20,6 x 10 ³ kg	41 x 10 ³ kg
VELOCIDADE MÁXIMA	60 km/h	60 km/h	60 km/h
ÁREA FRONTAL	7,2 m ²	9,3 m ²	5,2 m ²
COEFICIENTE AERODINÂMICO	0,34	0,34	0,34
COEFICIENTE DE ROLAGEM	0,01	0,009	0,01
CARGA TOTAL DA BATERIA	344 kWh	396,75 kWh	516 kWh

APÊNDICE B - DISTÂNCIAS ENTRE AS ESTAÇÕES DO EIXO ANHANGUERA

NÚMERO DA ESTAÇÃO	ESTAÇÕES	DISTÂNCIA DA ORIGEM (ESTAÇÃO 0) (m)	DISTÂNCIA DA ESTAÇÃO ANTERIOR (m)
0	Terminal Novo Mundo	0	0
1	Estação Anhanguera	800	800
2	Estação Palmito	1400	600
3	Estação Vila Morais	2000	600
4	Estação Vila Bandeirantes	2600	600
5	Terminal Praça da Bíblia	3150	550
6	Estação Universitária	3900	750
7	Estação Botafogo	4650	750
8	Estação Rua 20	5150	500
9	Estação Rua 7	5700	550
10	Estação Rua 8	5840	140
11	Estação Jôquei Clube	6490	650
12	Estação HGG	7140	650
13	Estação Lago das Rosas	7740	600
14	Estação Hemocentro	8240	500
15	Terminal Praça A	8890	650
16	Estação Campinas	9390	500
17	Estação José Hermano	9940	550
18	Estação Cascavel	10590	650
19	Terminal Dergo	11090	500
20	Estação Anicuns	11690	600
21	Estação Capuava	12640	950
22	Estação Iquego	13190	550
23	Terminal Padre Pelágio	13740	550



Mapa do trajeto do Eixo Anhanguera em Goiânia. Fonte: Google Maps

APÊNDICE C - ALTIMETRIA ENTRE AS ESTAÇÕES DO EIXO ANHANGUERA

NÚMERO DA ESTAÇÃO	ESTAÇÕES	ALTIMETRIA EM RELAÇÃO À ESTAÇÃO ANTERIOR (m)	ALTIMETRIA EM RELAÇÃO À ESTAÇÃO ANTERIOR (°)
0	Terminal Novo Mundo	0	0
1	Estação Anhanguera	17,2	1,232
2	Estação Palmito	-4,06	-0,388
3	Estação Vila Morais	14,68	1,402
4	Estação Vila Bandeirantes	23,83	2,274
5	Terminal Praça da Bíblia	-1,12	-0,120
6	Estação Universitária	-9,71	-0,742
7	Estação Botafogo	-17,45	-1,333
8	Estação Rua 20	-3,43	-0,393
9	Estação Rua 7	4,69	0,489
10	Estação Rua 8	4,61	1,886
11	Estação Jóquei Clube	-2,73	-0,241
12	Estação HGG	-9,89	-0,872
13	Estação Lago das Rosas	-16,24	-1,550
14	Estação Hemocentro	12,3	1,409
15	Terminal Praça A	-0,1	-0,009
16	Estação Campinas	-1,2	-0,137
17	Estação José Hermano	-0,26	-0,027
18	Estação Cascavel	-12,79	-1,127
19	Terminal Dergo	12,82	1,469
20	Estação Anicuns	-4,73	-0,452
21	Estação Capuava	10,38	0,626
22	Estação Iquego	19,18	1,997
23	Terminal Padre Pelágio	17,65	1,838

APÊNDICE D - DISTÂNCIAS E ALTIMETRIA USADAS NO TESTE 3: SISTEMA PARCIAL COM PARADAS E ALTIMETRIA (MODELO BASE)

NÚMERO DA ESTAÇÃO	DISTÂNCIA DA ORIGEM (ESTAÇÃO 0) (m)	DISTÂNCIA DA ESTAÇÃO ANTERIOR (m)	ALTIMETRIA EM RELAÇÃO À ESTAÇÃO ANTERIOR (m)	ALTIMETRIA EM RELAÇÃO À ESTAÇÃO ANTERIOR (°)
0	0	0	0	0
1	2	2	0	0
2	4	2	17,5	5
3	6	2	0	0
4	8	2	-17,5	-5
5	10	2	0	0