

RENATO ANTUNES BASTOS

Análise da eficiência energética de um carro elétrico na cidade de São Paulo

Renato Antunes Bastos

Análise da eficiência energética de um carro elétrico na cidade de São Paulo

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coorientador: Prof. Dr. José Luz Silveira

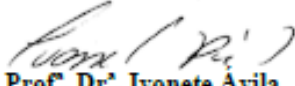
B327a	Bastos, Renato Antunes Análise da eficiência energética de um carro elétrico na cidade de São Paulo / Renato Antunes Bastos – Guaratinguetá, 2021. 108 f : il. Bibliografia: f. 106-108 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna Coorientador: Prof. Dr. José Luz Silveira 1. Veículos elétricos. 2. Simulação (Computadores digitais). 3. GPS (Linguagem de programação de computador). I. Título. CDU 621.337(043)
-------	---

RENATO ANTUNES BASTOS

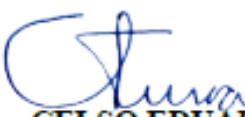
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

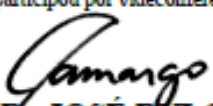
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO**

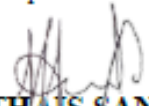
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


PROF. DR. CELSO EDUARDO TUNA
Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência


PROF. DR. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU
participou por videoconferência


PROFA. DRA. THAIS SANTOS CASTRO
UNESP/FEG
participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

RENATO ANTUNES BASTOS

NASCIMENTO	03.01.1985 – Campinas / SP
FILIAÇÃO	Avelino Bastos Flávia Helena Antunes Bastos
2004/2010	Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
2019/2021	Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, pela minha inteligência, pela minha família e pelos meus amigos;

à minha esposa *Mariana* e à minha filha *Gabriela* por estarem do meu lado sempre, me incentivando nos momentos difíceis e tendo paciência durante a minha ausência;

aos meus orientadores, *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna e Prof. Dr. Jose Luz Silveira*, que jamais deixaram de me incentivar. Sem a orientação, dedicação e auxílio deles, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais *Avelino e Flávia*, que sempre incentivaram meus estudos;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, pela presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e pela alegria no atendimento.

RESUMO

O dióxido de gás carbono (CO₂) representa um risco para o meio ambiente e para a saúde da população. A sua elevada concentração na atmosfera acarreta o aumento dos gases de efeito estufa, que colaboram para o aquecimento do planeta. O setor dos transportes é o maior contribuidor para esse cenário atualmente. Isso se dá em razão ao elevado número de veículos presentes nos centros urbanos, e à sua grande dependência na queima dos combustíveis fósseis para gerar energia. Dessa forma, os veículos elétricos vêm se tornando uma alternativa de transporte sustentável para diminuir a emissão dos gases CO₂ na atmosfera, pois utilizam as baterias como fonte de energia em substituição aos combustíveis fósseis. Porém, no Brasil, o uso dessa tecnologia ainda é pouco difundido, mesmo o país possuindo a 6ª maior frota de veículos do mundo. As principais razões são o alto custo dos veículos e a sua restrita autonomia. O trabalho tem como principal objetivo determinar o consumo de energia (kWh/km) de um veículo elétrico para a cidade de São Paulo, que é o maior centro urbano do Brasil e a principal fonte de emissão de gases CO₂ para o setor dos transportes. Os resultados obtidos são comparados a outros países, a fim de confirmar a viabilidade de implementação do modelo na região. De forma geral, o trabalho é dividido em duas etapas. A primeira delas consiste na obtenção dos ciclos de velocidade para a cidade de São Paulo (SP-1, SP-2 e SP-3) e outros países, de acordo com as suas características de trânsito. Enquanto a segunda etapa utiliza um *software* de simulação computacional para medir o consumo de energia do veículo elétrico a partir dos ciclos de velocidade definidos. O SP-3, que representa um baixo índice de trânsito em São Paulo, resultou em um consumo do veículo elétrico de 0,10 kWh/km e uma autonomia de 323 km, o que o torna o ciclo de velocidade mais eficiente do trabalho. Já o SP-1 e o SP-2, que retratam um maior índice de trânsito na cidade, apresentaram um respectivo consumo de 0,12 kWh/km / 0,14 kWh/km e uma autonomia de 272 km / 235 km. Apesar de serem inferior ao SP-3, eles ainda assim possuem melhor desempenho, que outros ciclos de velocidade do trabalho. Portanto, é possível constatar ao fim das análises que os veículos elétricos são uma alternativa de transporte satisfatória para a cidade de São Paulo do ponto de vista do consumo energético. E, ainda, que vale a pena ser investidos novos esforços para o seu crescimento na região.

PALAVRAS-CHAVE: Veículos elétricos. Características de trânsito da cidade de São Paulo. Dados de GPS. Simulação computacional.

ABSTRACT

Carbon dioxide emissions represents a risk for the environment and the wellness of the population in large urban areas. The high concentration of CO₂ gases in the atmosphere results in the increase of the greenhouse effect and consequently to the global warming of the planet. The transport segment is one of the key contributors for this scenario, mainly because of the high number of vehicles concentrated in urban environments and its great dependency on burning fossil fuels to propel the vehicles. In many countries, electric cars (BEV) have already become an important transport alternative to reduce CO₂ gases emission, since they use batteries as a source of energy instead of petroleum derived fuels. However, in Brazil the use of this technology is still very limited, even though the country presents the 6th largest automotive fleet of the world. The main reasons are because of the high cost of electric cars locally and the vehicle's low autonomy in kilometers. The objective of this project is to measure the energy consumption (kWh/km) of an electrical vehicle, assuming São Paulo city traffic characteristics, which is the largest urban area in Brazil and the main CO₂ source of transportation segment. The results obtained are also compared against other countries, to confirm the vehicle implementation feasibility in the region. Therefore, the work is divided in two different stages. The first one consists in obtaining the drive cycles for São Paulo city (SP-1, SP-2 and SP-3) and other countries, according to their traffic aspects. The second stage uses computer simulation, to measure the electric vehicle's energy efficiency based on the drive cycles behaviour. SP-3, which represents a low traffic rate in São Paulo, resulted in an energy consumption of 0.10 kWh/km and an autonomy of 323 km, which makes it the most efficient cycle in the work. On the other hand, SP-1 and SP-2, which represents a higher traffic rate, had a larger energy consumption of 0.12 kWh/km / 0.14 kWh/km and a lower autonomy range of 272 km / 235 km. Despite being inferior to SP-3, they still present a better performance than several others drive cycles considered in this work. So, it is possible to define at the end of the analysis, that electric vehicles are a satisfactory transport alternative for São Paulo city, regarding the energy consumption point of view. And, it is still worth investing new efforts for its growth in the region.

KEYWORDS: Battery electrical vehicles. São Paulo city traffic characteristics. GPS data. Software simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Curva de aquecimento global do planeta entre os anos de 1860 a 2020.....	17
Figura 2. Consumo de Energia no mundo para o setor dos transportes (10^{15} Btu).....	18
Figura 3. Emissões de CO ₂ per capita no mundo 2017 ($\times 10^3$ kg CO ₂ /hab).	19
Figura 4. Taxa de Emissão de CO ₂ nos Estados Unidos 2019 ($\times 10^6$ kgCO ₂).....	19
Figura 5. Emissão de gases CO ₂ ($\times 10^3$ kg) no Brasil em 2019 por setor.	20
Figura 6. Participação dos combustíveis para o setor dos transportes (%).	21
Figura 7. Mapa da região metropolitana da cidade de São Paulo (RMSP).....	22
Figura 8. Composição da frota de veículos no município de São Paulo 2018 por categoria. ...	22
Figura 9. Perfil de trânsito dos veículos para diferentes regiões do mundo.....	23
Figura 10. Número de caminhões circulantes na RMSP em dias de semana.	25
Figura 11. Fluxo de automóveis e caminhões na macro região de São Paulo.....	26
Figura 12. Uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica no Brasil (%).	28
Figura 13. Possíveis configurações de um veículo elétrico a bateria.	29
Figura 14. Ilustração de um veículo BEV.....	29
Figura 15. Exemplo de configuração dos sistemas de um veículo elétrico.....	30
Figura 16. Características do sinal da corrente elétrica (CC / CA).	31
Figura 17. Tipos de carregadores de um BEV.	32
Figura 18. Módulos da bateria AV do Nissan Leaf (24kWh, modelo 2011).	33
Figura 19. Ilustração conceitual de uma bateria íon-lítio.....	34
Figura 20. Comparação entre diferentes tecnologias de armazenamento de energia.	35
Figura 21. Demanda do fluxo de energia em um BEV.	38
Figura 22. Principais componentes de um motor elétrico CA Indutivo.....	39
Figura 23. Curvas de desempenho (torque e potência) de um BEV.	40
Figura 24. Curvas de torque de um BEV vs. ICE.....	40
Figura 25. Arrasto aerodinâmico durante o deslocamento de um veículo	42
Figura 26. Curva de resistência ao rolamento do pneu em relação a velocidade do veículo...	44
Figura 27. Influência do peso do veículo devido a inclinação do trajeto.....	44
Figura 28. Tela de entrada da ferramenta com os parâmetros de entrada.	46
Figura 29. Tela secundária da ferramenta com o ciclo de velocidade do modelo.	46
Figura 30. Tela final da ferramenta com os resultados obtidos.	47
Figura 31. Curvas de velocidade dos ciclos padrões.	49
Figura 32.Ciclo WLTP de velocidade.	51

Figura 33. 24 rotas da cidade de São Paulo utilizadas como referência para o trabalho.	52
Figura 34. Exemplo Rota 03 do relatório CET (2017) (Sentido: Centro/Bairro).....	55
Figura 35. Gráfico Multi-Vari do perfil de trânsito da cidade de São Paulo.....	57
Figura 36. Gráfico histograma da velocidade média (Y_2).....	60
Figura 37. Gráfico Boxplot da variação das corridas para os 12 grupos definidos.....	64
Figura 38. Respostas em frequência de filtros Butterworth de diversas ordens.....	66
Figura 39. Exemplo de aplicação do filtro Butterworth.	66
Figura 40. Exemplo dos trechos de velocidades obtidos para as corridas do Critério 1.....	68
Figura 41. Ciclos de velocidade de São Paulo para os 3 critérios disponíveis.....	70
Figura 42. Gráficos bolha que representam o trânsito de São Paulo para os 3 ciclos.	71
Figura 43. Gráficos bolha do ciclo WLTP.	73
Figura 44. Gráficos bolha do ciclo NEDC.	75
Figura 45. Gráficos bolha dos ciclos FTP-75 / HWFET.....	76
Figura 46. Gráfico bolha do ciclo US06.	77
Figura 47. Configuração do modelo de simulação de um BEV.....	79
Figura 48. Curva de torque motor elétrico.	83
Figura 49. Mapa de perda de potência motor elétrico.	83
Figura 50. Mapa de perda de torque da transmissão.....	85
Figura 51. Força resistiva do veículo para cada velocidade.....	86
Figura 52. Curva de potência da bateria durante o ciclo FTP-75.	90
Figura 53. Curva de torque e rotação do motor durante o ciclo FTP-75.	91
Figura 54. Curva de aceleração do veículo durante o ciclo FTP-75.....	92
Figura 55. Curvas do consumo de energia do veículo durante o ciclo FTP-75.....	93
Figura 56. Curvas do consumo de energia do veículo durante o ciclo NEDC-1.....	94
Figura 57. Curvas do consumo de energia do veículo durante o ciclo NEDC-2.....	95
Figura 58. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo US-06.....	96
Figura 59. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo HWYFET.	97
Figura 60. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo WLTP-2.....	98
Figura 61. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo WLTP-4.....	99
Figura 62. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo SP-1.	100
Figura 63. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo SP-2.	101
Figura 64. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo SP-3.	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Definição da potência e do consumo energético dos módulos auxiliares.	36
Tabela 2. Exemplos de coeficientes aerodinâmico a partir dos modelos de carroceria.	43
Tabela 3. Lista dos países participantes para a composição do ciclo WLTP.	50
Tabela 4. Relação das 24 rotas da cidade de São Paulo.	53
Tabela 5. Dados de GPS obtidos para as 12 corridas da Rota 03 (Sentido Centro/Bairro).	54
Tabela 6. Definição dos termos requeridos para a análise gráfica do método Multi-Vari.	56
Tabela 7. Relação dos parâmetros escolhidos para análise dos dados.	59
Tabela 8. Exemplo do método de seleção dos dados para todas as corridas.	61
Tabela 9. Definição dos 12 grupos de acordo com o sentido do trânsito e horários.	62
Tabela 10. Método de seleção de 3 corridas através dos índices SI.	64
Tabela 11. Definição das 36 corridas a serem utilizadas.	65
Tabela 12. Descrição das características gerais do BEV na simulação.	80
Tabela 13. Características das variáveis externas da simulação.	81
Tabela 14. Definição dos sistemas / subsistemas do BEV na simulação.	81
Tabela 15. Descrição das características gerais da bateria AV na simulação.	82
Tabela 16. Descrição das características da transmissão na simulação.	84
Tabela 17. Descrição das características do chassi do veículo na simulação.	85
Tabela 18. Descrição das características do chassi do veículo na simulação.	86
Tabela 19. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo FTP-75.	93
Tabela 20. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo NEDC-1 / NEDC-2.	95
Tabela 21. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo US06.	96
Tabela 22. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo HWYFET.	97
Tabela 23. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo WLTP.	99
Tabela 24. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo SP.	102
Tabela 25. Status do consumo de energia e autonomia para todos os ciclos.	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANL	Argonne National Laboratory
AV	Alta Voltagem
BC	Bairro-Centro
BI	Binnary Index
BEV	Battery Eletric Vehicles
CA	Corrente Alternada
CB	Centro-Bairro
CC	Corrente Contínua
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo
CO ₂	Dióxido de gás carbono.
DIT	Department for International Trade
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FTP75	Federal Test Procedure
GPS	Global Position System
HEV	Hybrid Electric Vehicles
HWFET	Highway Fuel Economy Test
ICE	Internal Combustion Engines
NEDC	New European Drive Cycle
NREL	National Renewable Energy Laboratory.
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PIB	Produto Interno Bruto
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RRC	Rolling Resistance Coefficient
SI	Similarity Index
US06	United States N.06 drive cycle
WLTP	World Light vehicle Test Procedure

NOMENCLATURA

A_f	Área frontal do veículo (m)
A_{ij}	Média dos parâmetros (-)
C_d	Coefficiente aerodinâmico do veículo (un)
D_{ij}	Desvio absoluto percentual (%)
E_{Aux}	Energia fornecida para os módulos auxiliares (kWh)
E_{Bat}	Energia total da bateria (kWh)
E_{Mot}	Energia mecânica requerida do motor elétrico (kWh)
E_{Prop}	Energia fornecida para o sistema de propulsão (kWh)
d_v/d_t	Aceleração (m/s ²)
f	Coefficiente de resistência ao rolamento do pneu (-)
F_a	Força de arrasto aerodinâmico (N)
F_g	Força peso (N)
F_r	Força de resistência ao rolamento (N)
F_R	Força resistiva do veículo (N)
F_t	Força trativa do veículo (N)
F_{track}	Fatores de atrito F_0 (N), F_1 (N/km/h), F_2 (N/km/h ²)
g	Gravidade (m/s ²)
I	Corrente (A)
i_g	Relação da transmissão (-)
L_{Mot}	Perdas do motor elétrico (kW)
m_v	Massa do veículo (kg)
P_{Aux}	Potência dos módulos auxiliares (kW)
P_{Bat}	Potência da bateria (kW)
P_g	Peso do veículo (N)
P_{Mot}	Potência total do motor elétrico (kW)
P_{Prop}	Potência fornecida para propulsionar as rodas do veículo (kW)
r_d	Raio dinâmico do pneu (m)
T_{Mot}	Torque do motor elétrico (Nm)
T_{total}	Tempo de funcionamento do veículo / componente (s)
U_{Bat}	Tensão da bateria (V)
$V_{veículo}$	Velocidade do veículo (m/s)
V_{vento}	Velocidade do vento (m/s)
X_{ij}	Valor do parâmetro (-)
α	inclinação do trajeto percorrido pelo veículo (%)
β	Energia útil fornecida pelo sistema regenerativo (%)
η_{trans}	Eficiência da transmissão (%)
Π	coeficiente matemático equivalente a 3,14 (-)
ρ	massa específica do ar (kg/m ³)
ω	Rotação do motor elétrico (rpm)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	FONTES DE EMISSÃO DE GASES CO ₂	17
2.1.1	Mundo	17
2.1.2	Brasil	20
2.1.3	Cidade de São Paulo	21
2.2	CICLOS DE VELOCIDADE.....	23
2.2.1	Características de trânsito.....	23
2.2.2	Uso do GPS	25
2.3	VEÍCULOS ELÉTRICOS A BATERIA	27
2.3.1	Aspectos gerais	27
2.3.2	Tipos de veículos elétricos.....	28
2.3.3	Detalhes dos sistemas de um veículo elétrico a bateria.....	30
2.3.3.1	Sistema de Carregamento	31
2.3.3.1.1	<i>Carregador</i>	31
2.3.3.1.2	<i>Bateria AV</i>	33
2.3.3.1.3	<i>Células de Íon-Lítio</i>	34
2.3.3.2	Sistema Elétrico	36
2.3.3.3	Sistema de Propulsão.....	37
2.3.3.3.1	<i>Motor elétrico</i>	38
2.3.3.3.1.1	Curvas de torque e potência	39
2.3.3.3.1.2	Força de propulsão.....	41
2.3.3.4	Chassis	41
2.3.3.4.1	<i>Arrasto aerodinâmico</i>	42
2.3.3.4.2	<i>Resistência ao rolamento dos pneus</i>	43
2.3.3.4.3	<i>Peso total do veículo</i>	44
2.4	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	45
2.4.1	Análise do consumo energético.....	45
3	ETAPA 1: LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE VELOCIDADE.....	48
3.1	METODOLOGIA.....	48
3.1.1	Ciclos padrões de velocidade	48

3.1.2	Ciclos reais de velocidade	50
3.1.2.1	WLTP	50
3.1.2.2	São Paulo	52
3.1.2.2.1	<i>Aquisição dos dados</i>	53
3.1.2.2.2	<i>Análise Multi-Vari</i>.....	56
3.1.2.2.3	<i>Método de seleção estatístico</i>	58
3.1.2.2.3.1	Definição dos parâmetros Y_s	58
3.1.2.2.3.2	Definição do critério de aceitação	59
3.1.2.2.3.3	Definição dos índices BI e SI.....	60
3.1.2.2.3.4	Aplicação do método de seleção	62
3.1.2.2.3.5	Definição das corridas.....	65
3.1.3	Definição das curvas de velocidade para São Paulo	65
3.1.3.1	Filtro passa-baixo	65
3.1.3.2	Curvas de velocidade.....	67
3.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
3.2.1	São Paulo.....	71
3.2.2	WLTP.....	73
3.2.3	NEDC	74
3.2.4	FTP-75 / HWFET	76
3.2.5	US06	77
3.2.6	Comentários	78
4	ETAPA 2: OBTENÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO	79
4.1	METODOLOGIA.....	79
4.1.1	Definição do software de simulação	79
4.1.2	Definição dos parâmetros de entrada	80
4.1.2.1	Variáveis externas	80
4.1.2.2	Subsistemas do veículo.....	81
4.1.2.2.1	<i>Auxiliares</i>	82
4.1.2.2.2	<i>Bateria AV</i>.....	82
4.1.2.2.3	<i>Motor Elétrico</i>	82
4.1.2.2.4	<i>Transmissão</i>	84
4.1.2.2.5	<i>Chassis</i>.....	85
4.1.3	Obtenção do consumo de energia do BEV	87
4.1.4	Considerações	88

4.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
4.2.1	FTP-75	89
4.2.1.1	Potência da bateria (P_{Bat})	90
4.2.1.2	Torque do motor (T_{Mot}) e rotação (ω)	91
4.2.1.3	Aceleração do veículo (d_v/d_t)	91
4.2.1.4	Energia da bateria (E_{Bat})	92
4.2.1.5	Autonomia (d_{total}) e consumo de energia do veículo (E_{total})	93
4.2.2	NEDC	94
4.2.3	US06	96
4.2.4	HWYFET	97
4.2.5	WLTP	98
4.2.6	São Paulo	100
4.2.7	Comentários	102
5	CONCLUSÕES	103
	REFERÊNCIAS	103

1 INTRODUÇÃO

A poluição dos grandes centros urbanos representa um risco para o meio ambiente e para a saúde da população. O dióxido de gás carbono (CO_2), obtido como produto da queima dos combustíveis fósseis na geração de energia, é um dos principais responsáveis por esta condição. A sua elevada concentração na atmosfera provoca o aumento dos gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global do planeta (EHSANI et al., 2005).

Os transportes e as indústrias são os setores que mais contribuem na emissão de gases CO_2 no mundo (TIE; TAN, 2013). A principal razão é devido ao elevado crescimento populacional das cidades nos últimos anos (ONU, 2019), o que resultou em um aumento expressivo na demanda dos serviços. Além da grande dependência desses setores na queima dos combustíveis fósseis para gerar energia (EIA, 2019).

Segundo relatório EPE (2020), a China e os Estados Unidos são os países que apresentam os mais altos índices de emissão de CO_2 per capita. Para a China, o maior contribuidor é o setor das indústrias, devido ao grande crescimento econômico do país e à dependência do uso do carvão mineral. Já para os Estados Unidos, o setor dos transportes é o mais relevante, devido à extensa frota de veículos do país e do uso excessivo da gasolina e do óleo diesel (EIA, 2020).

O Brasil possui um baixo nível de emissões de CO_2 comparado a esses países (EPE, 2020). Porém, chama a atenção à alta participação do setor dos transportes, que apesar de utilizar combustíveis renováveis como fonte de energia (etanol e biodiesel), ainda assim é extremamente dependente dos combustíveis fósseis, assim como os Estados Unidos. Essa condição mostra a necessidade de serem criadas novas políticas para o desenvolvimento sustentável do setor no país.

Os veículos elétricos são uma importante alternativa de meios de transporte sustentável. Eles utilizam os motores elétricos em substituição aos motores a combustão, e possuem as baterias como fonte de energia, ao invés dos combustíveis fósseis (TIE; TAN, 2013). Para o Brasil, o volume de participação desses veículos ainda é pequeno comparado a outros países, como os Estados Unidos e a Inglaterra (ANFAVEA, 2020), (EIA, 2020), (DIT, 2019).

A principal razão é que os veículos elétricos ainda possuem algumas desvantagens comparadas aos veículos convencionais, tais como a baixa autonomia e o elevado custo. Esses fatores são um agravante para o Brasil, devido à elevada extensão geográfica do país e também à baixa condição financeira de grande parte da população.

1.1 OBJETIVO

O trabalho tem como principal objetivo medir o consumo de energia de um veículo elétrico na cidade de São Paulo, que é o maior centro urbano do Brasil, e a principal fonte de emissão de gases CO₂. Os resultados obtidos são comparados a outros países do mundo, que fazem uso dessa tecnologia, a fim de confirmar a viabilidade de implementação do modelo para a região.

Para isso, o trabalho é dividido em 2 etapas. A primeira delas consiste na definição dos ciclos de velocidade, que representam as características de trânsito da cidade de São Paulo, assim como de outras regiões do mundo. Enquanto na segunda etapa, utiliza-se um software de simulação computacional para medir o consumo de energia de um veículo elétrico para cada um dos ciclos de velocidade disponíveis.

A seguir são descritas as principais atividades do trabalho.

- Obter dados de GPS em veículos na cidade de São Paulo.
- Analisar e selecionar os dados obtidos de acordo com as características das corridas (dias da semana, períodos do dia e sentidos do trânsito).
- Definir os ciclos de velocidade que representam o perfil de trânsito da cidade.
- Comparar as curvas obtidas para São Paulo com os ciclos de velocidade de outros países.
- Escolher um modelo de simulação computacional capaz de medir o consumo de energia de um veículo elétrico ao longo de um ciclo de velocidade.
- Definir os parâmetros de entrada da simulação, segundo as características físicas e atributivas de um veículo elétrico existente no mercado.
- Obter o consumo de energia do veículo elétrico.
- Comparar os resultados obtidos para São Paulo com os demais países.

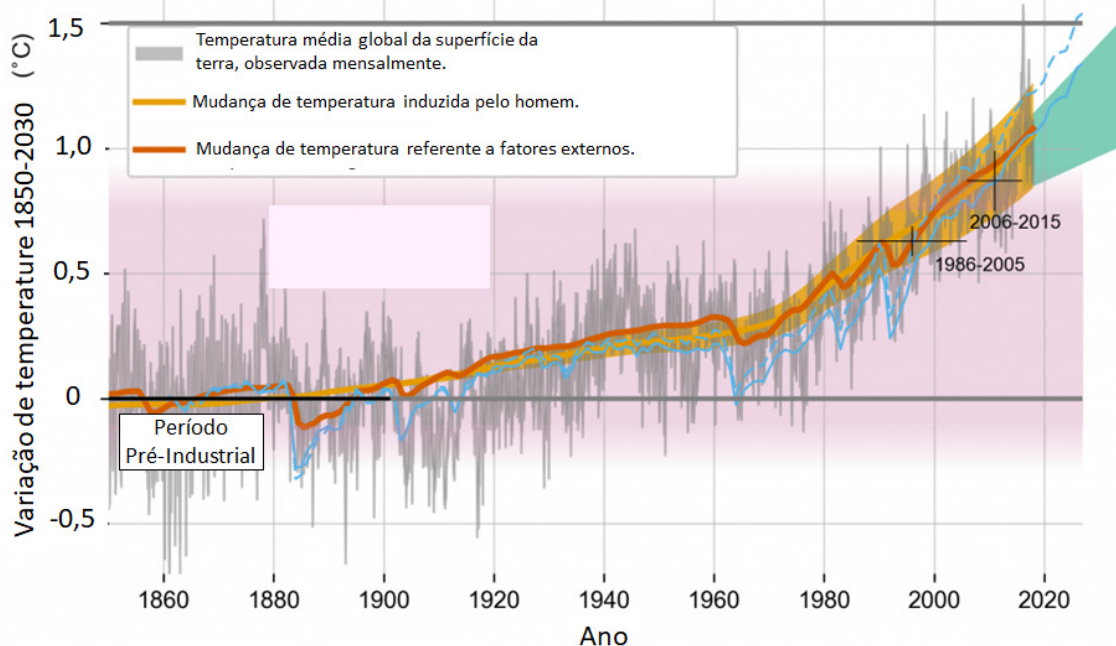
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FONTES DE EMISSÃO DE GASES CO₂

2.1.1 Mundo

A emissão dos gases CO₂ obtidos através da queima dos combustíveis fósseis para a geração de energia, representam um risco para o meio ambiente e para a saúde da população (EHSANI et al., 2005). A sua elevada concentração na atmosfera provoca o aumento dos gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global do planeta (MASSON-DELMOTTE et al., 2018). Essa condição teve início a partir da Segunda Revolução Industrial em 1900, e vem se agravando ainda mais nos últimos anos, conforme Figura 1.

Figura 1. Curva de aquecimento global do planeta entre os anos de 1860 a 2020.



Fonte: Adaptado de Masson-Delmotte et al. (2018).

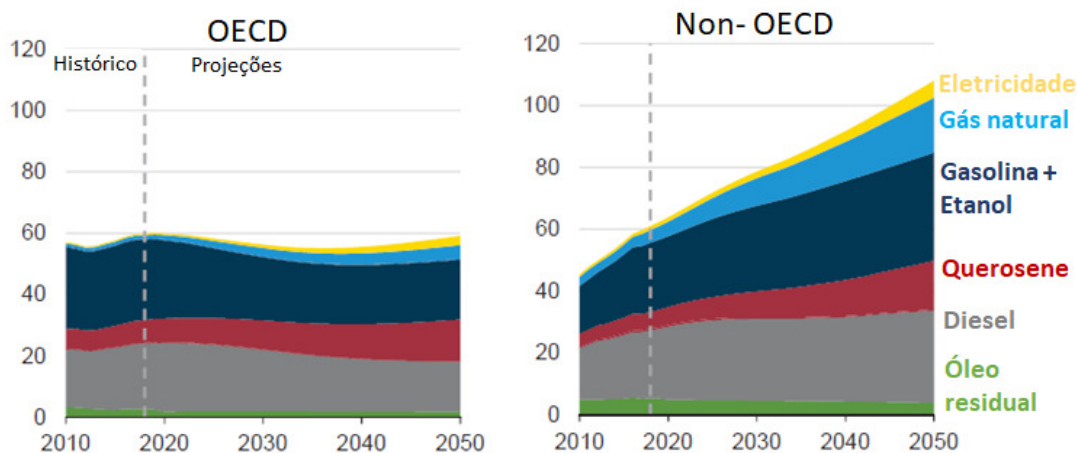
A principal razão é o excessivo aumento da demanda dos serviços das indústrias e dos transportes, ocasionado pelo crescimento populacional das cidades (ONU, 2019), e da queima dos combustíveis fósseis como fonte de energia (EIA, 2019). Atualmente, mais da metade da população mundial vive em cidades, com a perspectiva de chegar a 70% até 2030, o que tende a agravar ainda mais esse cenário (MOLINA; MOLINA, 2004).

Os transportes são os principais contribuidores para essa condição. Eles possuem maior nível de emissões de gases CO₂ do que as indústrias, que são o 2º setor mais poluente, mesmo consumindo 3x menos energia (TIE; TAN, 2013).

Segundo a Figura 2, a principal razão é que o setor dos transportes ainda utiliza 94% de combustíveis derivados do petróleo no mundo, com destaque para a gasolina e para o gás natural dos automóveis, o óleo diesel dos caminhões e a querosene da aviação. Há também uma participação de 5% dos combustíveis alternativos, como o biodiesel e o etanol, que apesar de resultarem na emissão de gases CO₂ através da sua combustão, são menos poluentes comparados ao petróleo, já que utilizam fontes de energia renováveis como a cana-de-açúcar.

Por fim, há ainda uma participação muito pequena, inferior a 1%, do uso das baterias como fonte de energia para os veículos híbridos e elétricos. Essa opção é a mais viável do ponto de vista ambiental, pois ela não requer a combustão. Dessa forma não há a emissão gases poluentes.

Figura 2. Consumo de Energia no mundo para o setor dos transportes (10¹⁵ Btu).

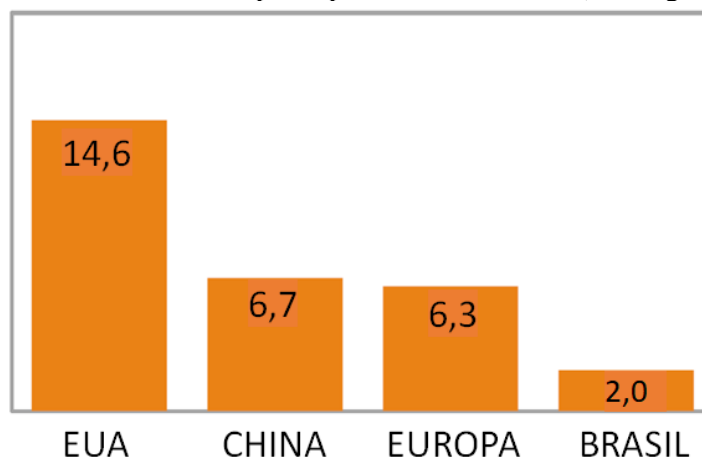


Fonte: Adaptado de EIA (2020).

Ainda conforme a Figura 2, observa-se um significativo aumento do consumo de energia do setor dos transportes para os países emergentes (non-OECD) comparados aos países desenvolvidos (OECD) até 2050. O que acarretará o avanço da incidência de gases CO₂ no mundo. As principais razões são a elevada taxa de crescimento populacional e o grande desenvolvimento econômico desses países (EIA, 2020).

A China é o principal país non-OECD contribuidor para esse aumento. Ela também apresenta o 2º maior nível de emissão de gases CO₂ per capita do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos, de acordo com a Figura 3.

Figura 3. Emissões de CO₂ per capita no mundo 2017 ($\times 10^3$ kg CO₂/hab).

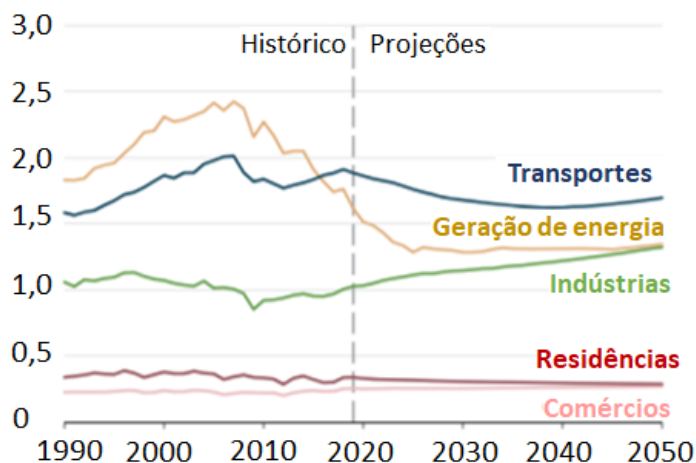


Fonte: Adaptado de EPE (2020).

Já os Estados Unidos, que é um país desenvolvido (OECD), apesar de serem os maiores emissores de CO₂ per capita do mundo, vêm implementando uma série de medidas a fim de reduzir essa condição, em que o principal foco é o setor dos transportes.

Através da Figura 4, nota-se a diminuição da taxa de emissão dos gases CO₂ esperada para o setor dos transportes nos próximos anos. As principais medidas adotadas pelo governo incluem a substituição gradativa do uso dos combustíveis fósseis pelos combustíveis com fontes de energia renováveis, e também o aumento do uso dos veículos híbridos e elétricos. Hoje, os Estados Unidos possuem uma frota de 1 milhão de veículos desse tipo e é esperado um crescimento de 6% ao ano até 2050 (EIA, 2020).

Figura 4. Taxa de Emissão de CO₂ nos Estados Unidos 2019 ($\times 10^6$ kgCO₂)

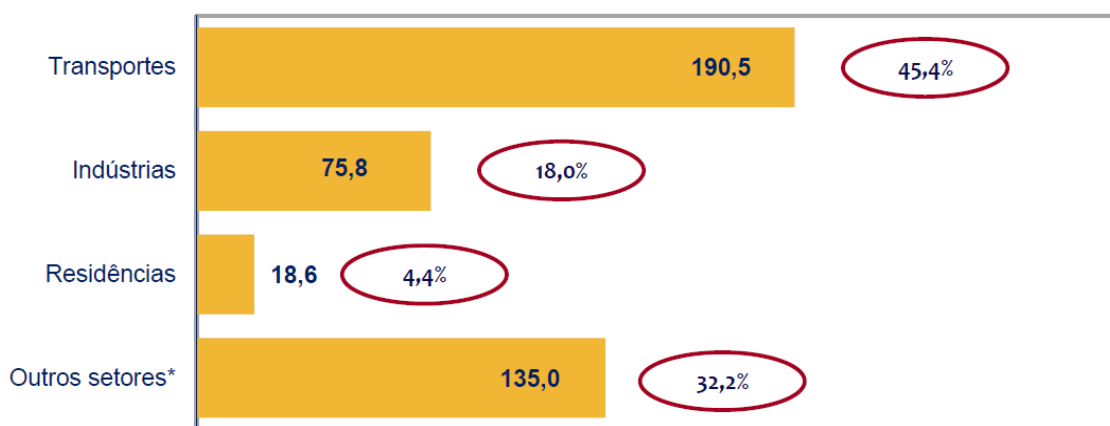


Fonte: Adaptado de EIA (2020).

2.1.2 Brasil

O Brasil é um país emergente (non-OECD), com baixo nível de emissões de gases CO₂ per capita comparado à China e aos Estados Unidos. Porém, segundo EPE (2020), apesar dos baixos índices apresentados, chama atenção a alta participação do setor dos transportes, com 45,4% da emissão total do CO₂ no país, conforme Figura 5. As indústrias, que possuem o 2º maior volume, têm uma participação de apenas 18,0%.

Figura 5. Emissão de gases CO₂ (x10³kg) no Brasil em 2019 por setor.

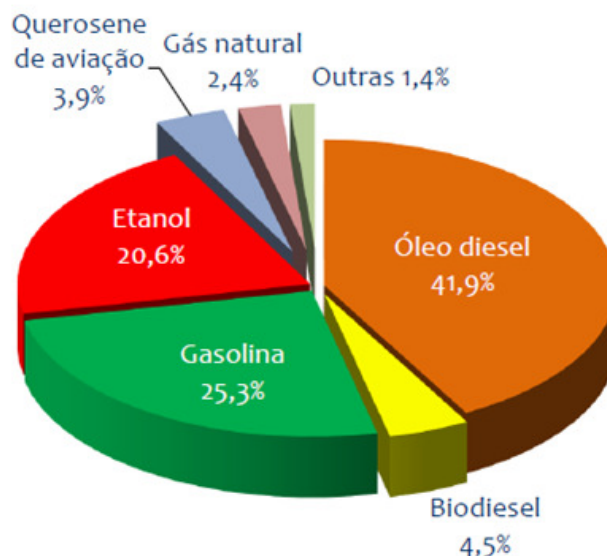


Fonte: EPE (2020).

Ainda para os transportes, é esperado que o setor contribua com o aumento de 2% ao ano de CO₂ per capita no país até 2029 (EPE, 2020). Isso se dá devido à sua relevante participação no crescimento da economia, associado ao avanço populacional dos centros urbanos e ao baixo desenvolvimento dos transportes públicos no país. Esse cenário mostra a necessidade de serem criadas novas políticas de desenvolvimento sustentável para o setor.

O país já possui alternativas de combustíveis com fontes renováveis de energia, representados pelo uso do etanol da cana-de-açúcar, com 20,6%, e do biodiesel, com 4,5%, de acordo com a Figura 6. Entretanto, há alguns fatores que limitam a produção e o uso desses combustíveis, o que torna o Brasil ainda dependente dos combustíveis fósseis, com uma elevada participação de 70% da gasolina e do óleo diesel.

Figura 6. Participação dos combustíveis para o setor dos transportes (%).



Fonte: EPE (2020).

2.1.3 Cidade de São Paulo

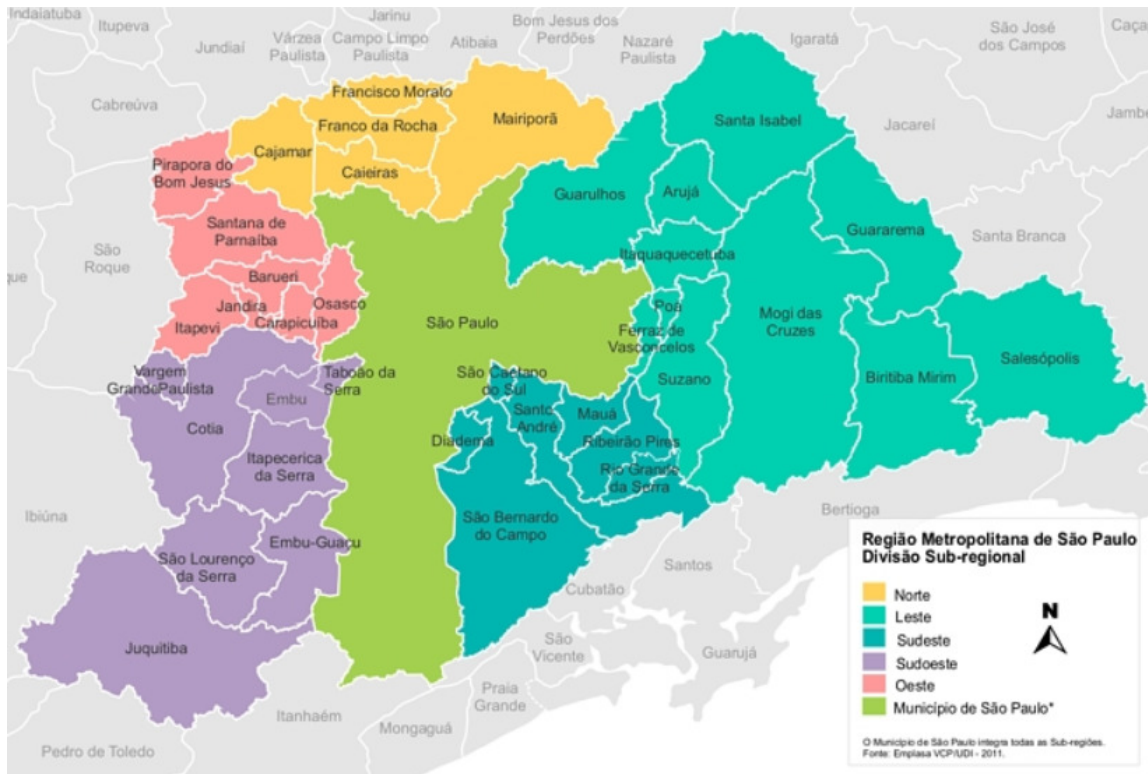
A cidade de São Paulo é o principal centro urbano do Brasil. A sua região metropolitana (RMSP) tem 21 milhões de habitantes, equivalente a 11% da população total do país (IBGE, 2016), e apresenta um fluxo de 7,2 milhões de veículos ao ano, correspondente a 50% do volume total do estado (CETESB, 2018). Ela é também um grande polo econômico e industrial, responsável pela produção de 16% do PIB nacional (MOLINA; MOLINA, 2004). A Figura 7 ilustra as dimensões geográficas da RMSP.

Apesar do tamanho e do elevado desenvolvimento econômico da região, a cidade de São Paulo convive com diversos problemas urbanos. Ela é a 5ª maior cidade do mundo em índices de congestionamento (INRIX, 2019) e o município com maior nível de emissões de gases CO₂ per capita do país (CETESB, 2018).

Segundo Figura 8, os automóveis são os maiores responsáveis por esse cenário, com aproximadamente 79% do volume total de veículos. Porém, chama atenção a alta quantidade de motos (16%) e o baixo volume de ônibus (3%) comparado a outros países, o que se deve à falta de planejamento de transporte público na cidade. Há ainda uma baixa circulação de caminhões (1,3%), devido a restrições para transportes pesados no município.

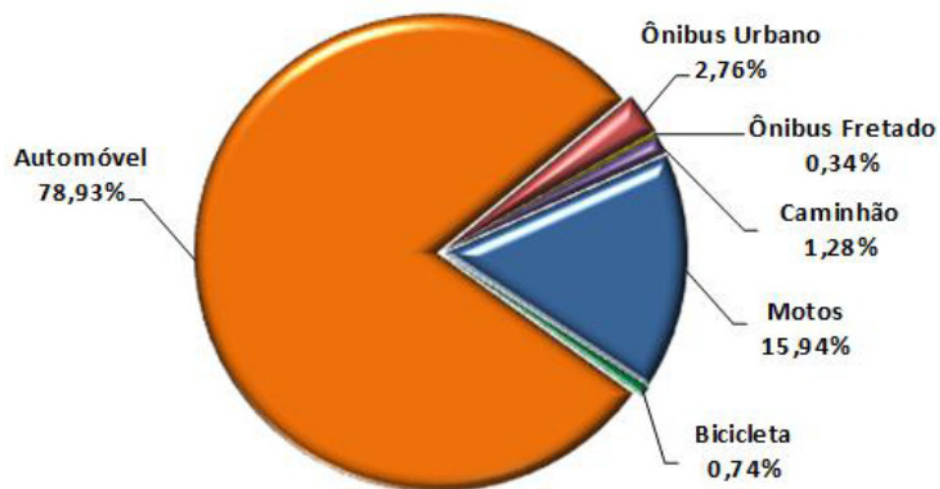
Dessa forma, as características de trânsito da cidade de São Paulo apresentadas são utilizadas como referência no trabalho para obter os ciclos de velocidade e medir o consumo de energia do veículo elétrico no município.

Figura 7. Mapa da região metropolitana da cidade de São Paulo (RMSP).



Fonte: Emplasa (2017).

Figura 8. Composição da frota de veículos no município de São Paulo 2018 por categoria.



Fonte: CET (2017).

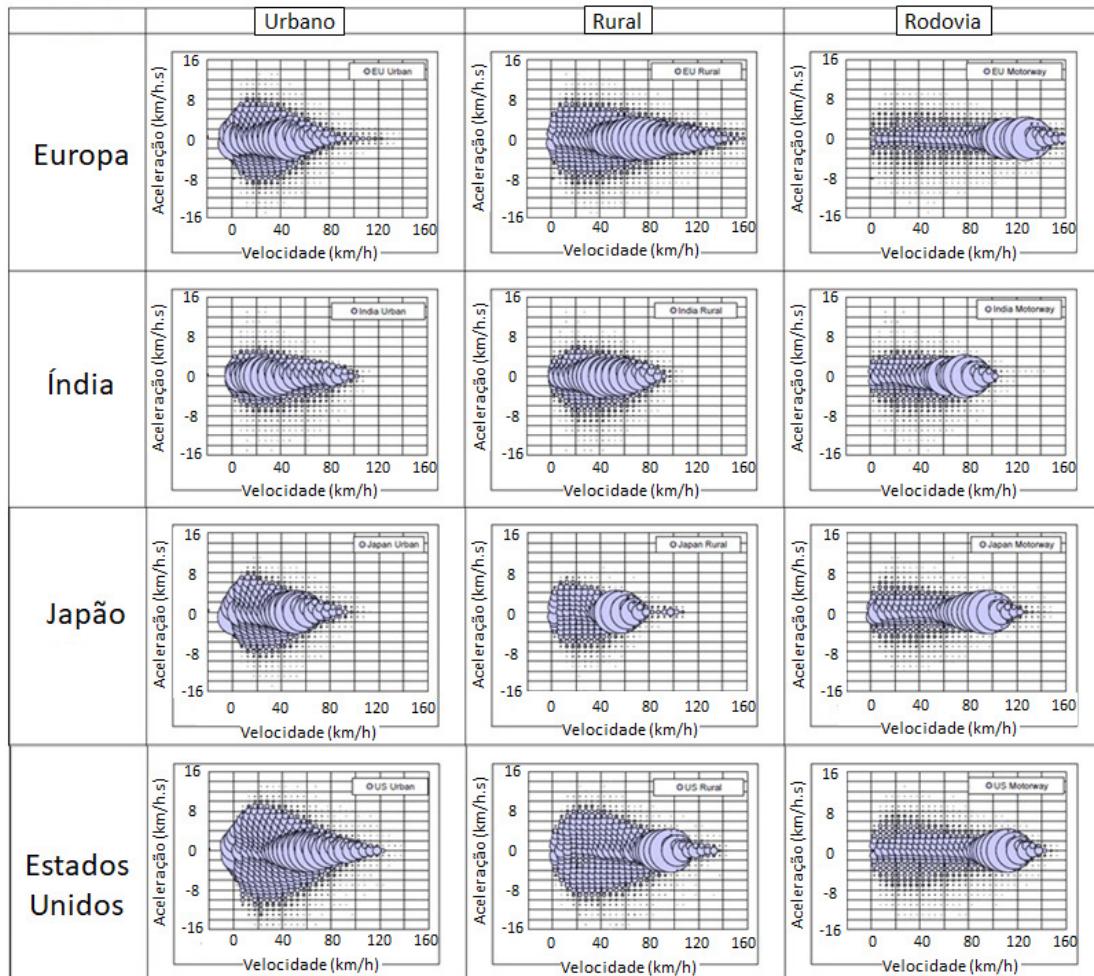
2.2 CICLOS DE VELOCIDADE

2.2.1 Características de trânsito

É possível afirmar que cada país apresenta uma característica de trânsito específica de acordo com as condições urbanas de suas cidades (DHC, 2014). Fatores como grau de desenvolvimento econômico da região, taxa de crescimento populacional, dimensões geográficas, legislações e até mesmo fatores culturais e sociais podem influenciar no perfil de direção dos veículos.

O relatório DHC (2014) fez uma análise detalhada comparando o perfil de velocidade e aceleração dos veículos para 4 regiões do mundo (Europa, Índia, Japão e Estados Unidos). Essa condição é representada pelos gráficos bolha na Figura 9.

Figura 9. Perfil de trânsito dos veículos para diferentes regiões do mundo.



Fonte: Adaptado de DHC (2014).

A Figura 9, também leva em consideração as particularidades de 3 diferentes vias consideradas como referência no estudo (Urbana, Rural e Rodovias).

- **Urbana:** Vias de grandes cidades, que possuem relevância comercial e econômica para a região. Há um excessivo fluxo de veículos, que acarretam em congestionamentos. As velocidades máximas normalmente são controladas de acordo com a legislação vigente.
- **Rural:** Vias de cidades com menor densidade populacional. Apresentam um perfil de velocidade maior que a via urbana. Elas podem ainda representar estradas, mas possuem velocidades inferiores às rodovias.
- **Rodovias:** Vias que representam estradas para conectar grandes centros urbanos. Possuem limites de velocidade superior à via rural.

Os dados obtidos no relatório DHC (2014), foram coletados através do uso de GPS e plotados em gráficos bolha para representar a distribuição de tempo, velocidade e aceleração dos veículos nas 4 regiões analisadas. O centro dos círculos no gráfico mostra a combinação da velocidade e da aceleração do veículo. Já a sua área relativa demonstra a porcentagem de tempo que o veículo, em média, percorre naquela condição. Por fim, o número de círculos representa a quantidade total de dados coletados, sendo que quanto maior o número de bolhas, maior a quantidade de dados.

Chama a atenção no relatório, as diferenças encontradas para cada localidade. A Europa possui a maior velocidade máxima nas rodovias, sendo a única região a ultrapassar 160 km/h. Enquanto os Estados Unidos, além de apresentarem a maior velocidade máxima e aceleração em vias urbanas, também têm uma grande quantidade de pontos com velocidades inferiores a 40 km/h, o que evidencia o modo de direção divergente dos veículos no país.

Por fim, a Índia e o Japão possuem características opostas à Europa e aos Estados Unidos, indicando um perfil de direção menos agressivo. A Índia apresenta a menor velocidade máxima nas rodovias, assim como um baixo índice de aceleração em todas as vias. Já o Japão é o país que tem baixa aceleração, e o menor tempo de duração dos trajetos (bolhas de tamanho pequeno), em vias rurais e urbanas.

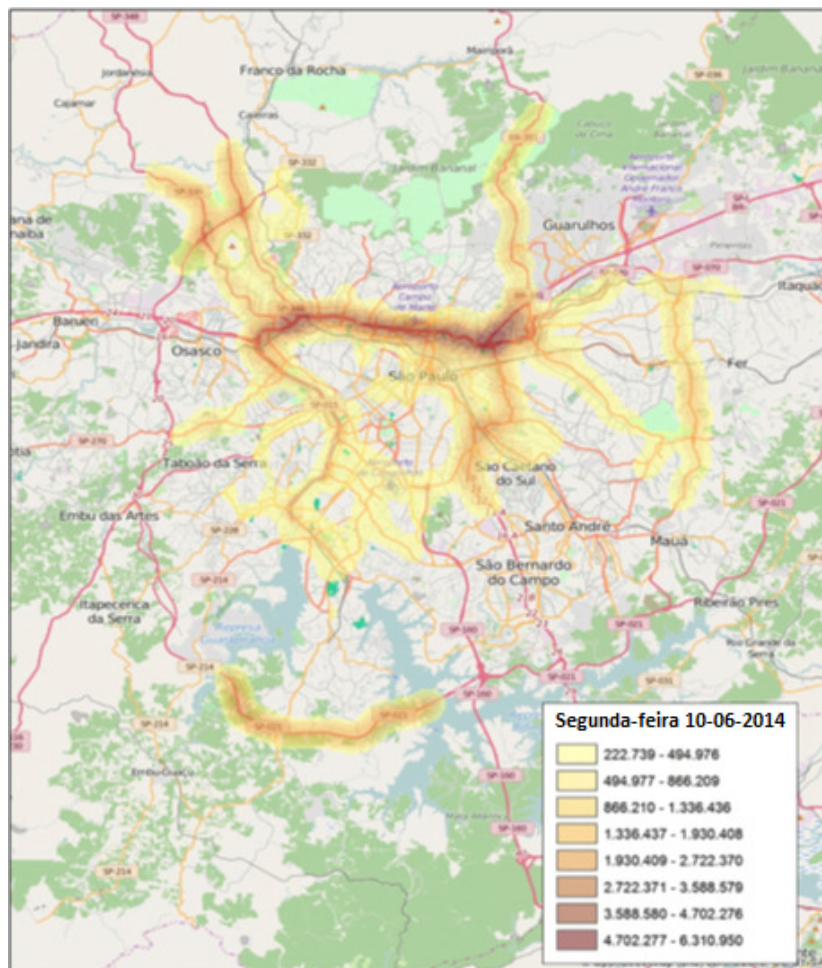
O Brasil, apesar de não ter sido incluído no relatório (DHC, 2014), da mesma forma mostra características de trânsito próprias, assim como os outros países. Faz parte do escopo do trabalho definir as curvas de velocidade e de aceleração dos veículos no país, levando em consideração a cidade de São Paulo como referência.

2.2.2 Uso do GPS

O GPS é uma importante ferramenta de aquisição de dados, capaz de rastrear a localização espacial dos veículos em diferentes instantes de tempo, a fim de determinar a sua velocidade (LARANJEIRO et al., 2019). Os dados obtidos através do uso do GPS vêm sendo utilizados por órgãos públicos e por empresas privadas, com o intuito de mapear o fluxo de trânsito dos veículos nas grandes cidades.

LARANJEIRO et al. (2019) fez uma análise do trânsito da cidade de São Paulo, focada na otimização da logística urbana dos transportes de carga. Para isso, foram utilizados dados de GPS de milhares de caminhões como referência, indicando a concentração dos veículos ao longo do tempo em diferentes regiões do município. A Figura 10 ilustra essa condição através de um mapa de calor.

Figura 10. Número de caminhões circulantes na RMSP em dias de semana.

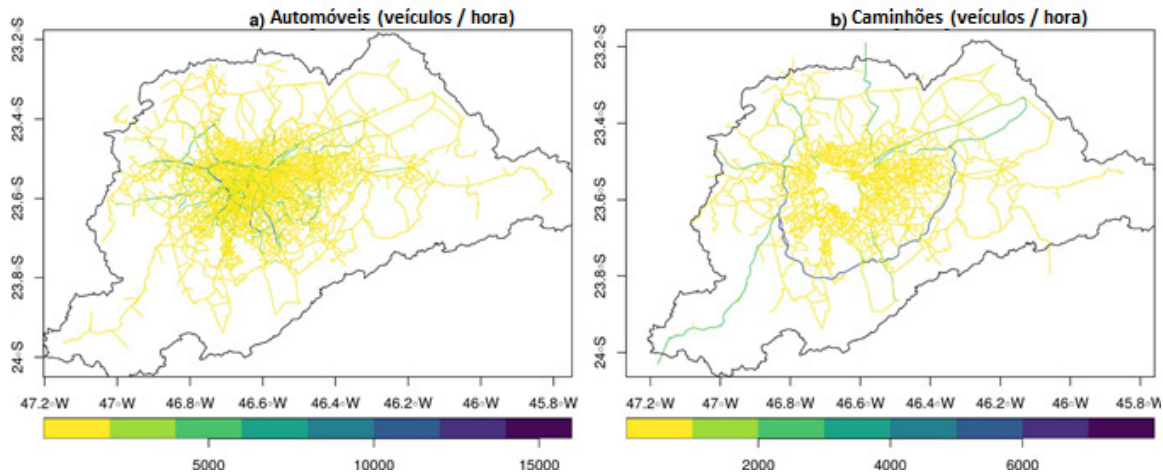


Fonte: Adaptado de Laranjeiro et al. (2019).

De acordo com a Figura 10, o fluxo de caminhões foi classificado em oito diferentes categorias. Para a maior delas (laranja escuro), o volume pode chegar até 6 milhões, enquanto que, para a menor (amarelo claro), ele se limita a 200 mil. É possível observar ainda uma alta concentração de caminhões nas vias expressas que conectam diferentes regiões da cidade, e um vazio no centro urbano devido às restrições impostas pela prefeitura.

IBARRA-ESPINOSA et al. (2020) também fez uma análise similar através do uso do GPS. Porém, os dados obtidos foram utilizados para determinar o nível de emissões de poluentes dos veículos na macro região de São Paulo, que engloba, além da RMSP, as micro regiões de Santos, São José dos Campos, Campinas e Sorocaba.

Figura 11. Fluxo de automóveis e caminhões na macro região de São Paulo.



Fonte: Adaptado de Ibarra-Espinosa et al. (2020).

A Figura 11 ilustra um mapa de calor similar à Figura 10, onde os gráficos representam o fluxo tanto de caminhões como de automóveis. A maior concentração dos automóveis é notada nos centros urbanos das cidades, principalmente ao redor da RMSP, onde o tráfego pode chegar a 10.000 veículos por hora. Enquanto para os caminhões, observa-se um cenário parecido com a Figura 10, com alta concentração dos veículos nas vias expressas da RMSP, assim como nas estradas que conectam as cidades da região, e um vazio no centro urbano da cidade de São Paulo.

Para o trabalho, o uso do GPS é feito de forma similar a LARANJEIRO et al. (2019) e a IBARRA-ESPINOSA et al. (2020). Entretanto, tem como finalidade determinar os ciclos de velocidade, que representam as características de trânsito dos veículos na cidade de São Paulo. Para isso, os dados de GPS utilizados devem ter uma taxa de aquisição superior a 1Hz.

2.3 VEÍCULOS ELÉTRICOS A BATERIA

2.3.1 Aspectos gerais

Os veículos elétricos são uma importante alternativa de transporte sustentável para a redução da emissão de gases CO₂ no mundo (TIE; TAN, 2013). Eles utilizam os motores elétricos para a propulsão dos veículos, em substituição aos motores a combustão e possuem as baterias de alta voltagem como fonte de energia, ao invés dos combustíveis fósseis.

As principais vantagens dos veículos elétricos em relação aos convencionais são: a ausência da emissão de gases poluentes provenientes da combustão, a independência do petróleo, a alta eficiência dos motores elétricos e a redução dos níveis de vibração e ruído (EHSANI et al., 2005).

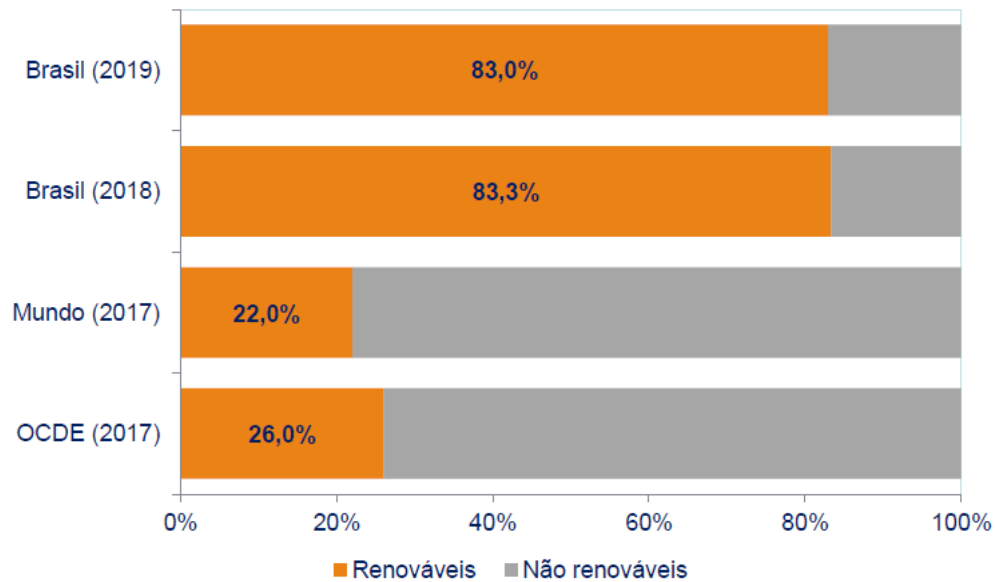
Esse modelo de tecnologia é amplamente utilizado em muitos países. Os Estados Unidos possuem uma frota de 1 milhão de veículos propulsionados a bateria, e é esperado um crescimento de 6% ao ano até 2050 (EIA, 2020). No Reino Unido, também está previsto que até 2040 todos os veículos sejam elétricos ou híbridos no país (DIT, 2019).

Porém, no Brasil, a participação desse modelo ainda é pequena, com um volume de apenas 11 mil carros híbridos e elétricos vendidos até 2020, representando 0,02% do mercado nacional (ANFAVEA, 2020).

Apesar do baixo volume de vendas dos veículos elétricos no Brasil, vale destacar que o setor de geração de eletricidade no país é um dos menos poluentes do mundo, com 83% dos meios oriundos de fontes renováveis, comparado a apenas 22% dos outros países, conforme ilustra a Figura 12. No Brasil, a maior participação é das usinas hidroelétricas, com 65%, mas ainda é possível observar um grande crescimento de outras fontes, como energia eólica (8%) e solar (1%) (EPE, 2020).

Portanto, da mesma forma que ocorreu com a implementação do Proálcool na década de 70, e do Renovabio em 2019 no Brasil, incentivando o uso dos combustíveis renováveis, é necessária a criação de novos programas pelo governo para investir no uso de novas tecnologias no setor dos transportes. Assim como já vem sendo feito em outros países do mundo, a fim de popularizar o uso dos veículos elétricos.

Figura 12. Uso de fontes renováveis para geração de energia elétrica no Brasil (%).



Fonte: EPE (2020).

2.3.2 Tipos de veículos elétricos

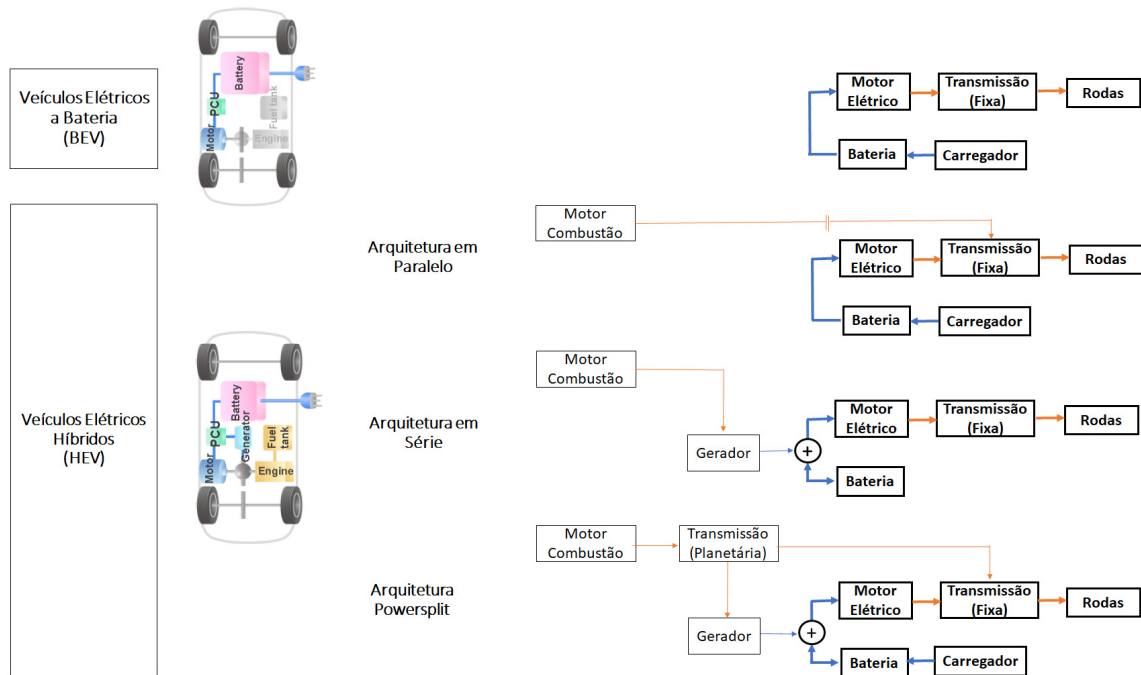
Os tipos de veículos elétricos disponíveis no mercado automotivo hoje são definidos conforme as fontes de abastecimento de energia para as baterias. Seja ela feita exclusivamente por um carregamento elétrico externo (BEV), ou através de uma mistura híbrida entre o carregamento elétrico externo e um motor a combustão (HEV). A Figura 13 ilustra todas as possíveis variações para as duas aplicações.

Para o BEV, o abastecimento de energia para as baterias ocorre apenas através de um carregador externo ao veículo, não havendo a presença de um motor a combustão. Dessa forma, o *layout* do modelo possui uma configuração bem mais simplificada.

Os veículos HEV contam com a presença de um motor a combustão em todas as suas configurações. Segundo a Figura 13, é possível observar que esses modelos são divididos em 3 diferentes arquiteturas. Isso se dá de acordo com a funcionalidade do motor ICE, que pode servir tanto como fonte de energia exclusiva para as baterias (Série), como para a propulsão do veículo (Paralelo) ou para ambos (Powersplit).

O BEV é o modelo menos poluente, pois não requer a queima de combustíveis para a sua propulsão. Porém, ele possui uma menor autonomia comparado aos veículos híbridos e convencionais. Já o HEV, devido ao uso combinado do motor a combustão, é o modelo de maior autonomia, além de também ser menos poluente que os veículos convencionais.

Figura 13. Possíveis configurações de um veículo elétrico a bateria.



Fonte: Adaptado de Anfavea (2020).

Para este trabalho, é levado em consideração apenas o modelo BEV. Ele é utilizado como referência para desenvolver o modelo de simulação e para medir o consumo de energia do veículo para cada um dos ciclos de velocidade.

A Figura 14 mostra a ilustração de um veículo BEV padrão disponível no mercado hoje. A bateria fica na parte traseira do carro e fornece a energia requerida para o motor elétrico, que se situa na parte dianteira.

Figura 14. Ilustração de um veículo BEV.



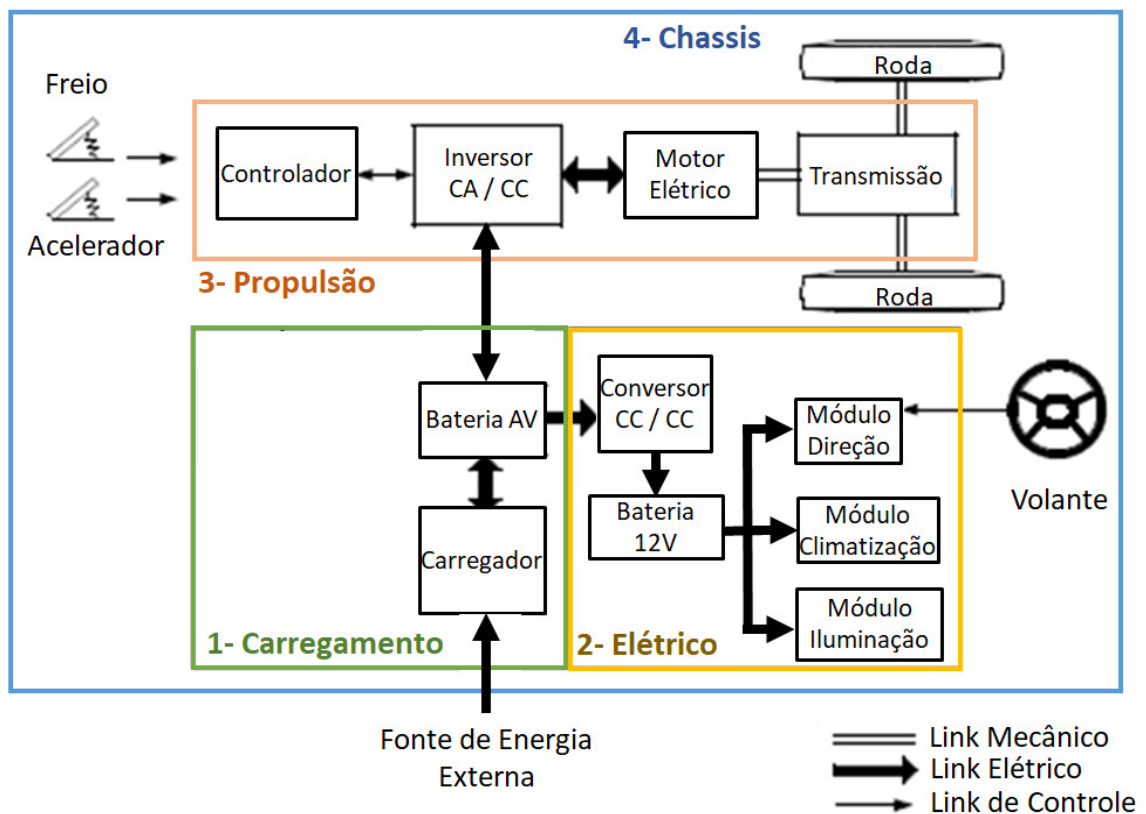
Fonte: Cockpitautomovel (2013).

2.3.3 Detalhes dos sistemas de um veículo elétrico a bateria

Um BEV é composto basicamente por 4 sistemas (EHSANI et al., 2005): 1-Carregamento, 2-Elétrico, 3-Propulsão e 4-Chassis.

A Figura 15 mostra a configuração dos sistemas e a forma como eles interagem entre si. A seguir, são detalhadas as principais características dos sistemas de um BEV.

Figura 15. Exemplo de configuração dos sistemas de um veículo elétrico.



- Sistema de Carregamento: Contém uma bateria de alta voltagem (AV), um módulo de gerenciamento de energia e o carregador da fonte externa ao veículo.
- Sistema Elétrico: Inclui um conversor de tensão, uma bateria 12V e os módulos elétricos do veículo (direção, climatização e iluminação).
- Sistema de Propulsão: Formado pelo controlador de potência, o inversor de sinal (CA / CC), o motor elétrico e a transmissão mecânica.
- Sistema de Chassis: É composto basicamente pela carroceria e pelas rodas do veículo.

2.3.3.1 Sistema de Carregamento

De forma geral, o fluxo de energia em um BEV inicia-se no sistema de Carregamento, a partir do fornecimento da energia elétrica de uma fonte externa para a bateria de alta voltagem (AV) do veículo. Porém, como a corrente elétrica transmitida pela fonte externa é do tipo alternada (CA), enquanto a bateria é de corrente contínua (CC), é requerida a presença de um carregador, a fim de converter o sinal de entrada da corrente.

Após a energia elétrica ser armazenada na bateria AV, ela é utilizada para alimentar os sistemas Elétrico e de Propulsão do veículo, conforme a equação (1). Segundo RHODES et al. (2017), a distribuição de energia para esses sistemas ocorre em média na proporção de 14% Elétrico e 86% Propulsão, dependendo muitas vezes das condições de uso do veículo.

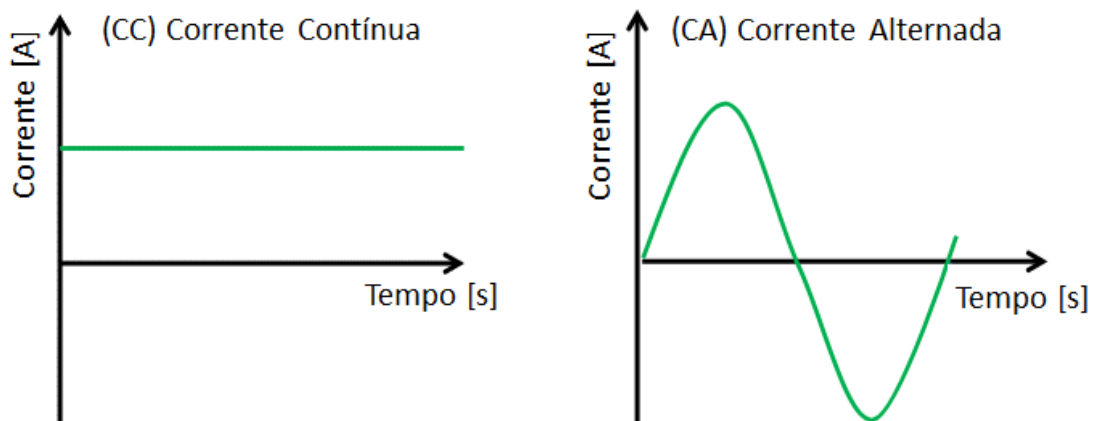
$$E_{Bat} = E_{Aux} + E_{Prop} \quad (1)$$

2.3.3.1.1 Carregador

O carregador é o componente do BEV que estabelece a conexão entre a bateria AV e a fonte de energia externa do veículo. Ele também faz a conversão do sinal da corrente elétrica da fonte, de CA para CC, antes que ela seja alimentada na bateria (EHSANI et al., 2005).

A diferença entre as correntes alternada (CA) e contínua (CC) está associada na forma de transmissão do seu sinal. A Figura 16 ilustra um exemplo, em que é possível observar as características do sinal para ambos os tipos de corrente.

Figura 16. Características do sinal da corrente elétrica (CC / CA).

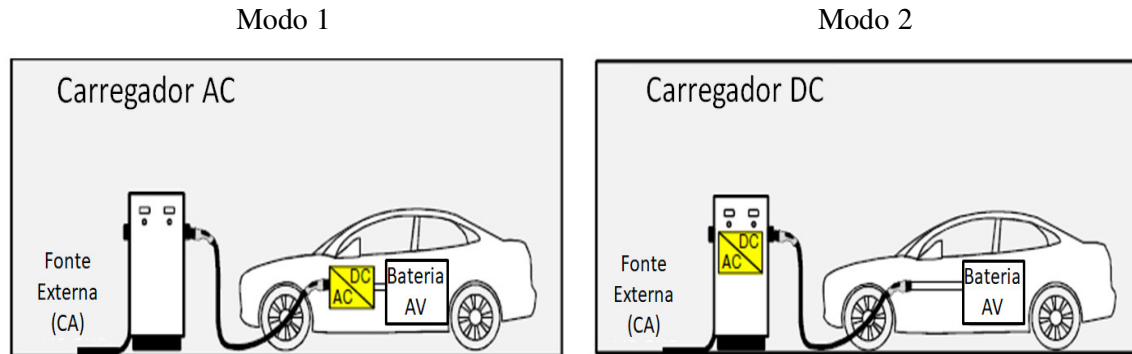


Fonte: Adaptado de Simone; Piegari (2016).

- CC: O sinal da corrente flui apenas em uma direção, não sendo possível controlá-lo (exemplo: a corrente elétrica de uma bateria).
- CA: O sinal da corrente inverte periodicamente a sua direção, sendo possível controlar a sua amplitude. (exemplo: a corrente elétrica dos plugues domésticos).

Os carregadores de um BEV variam de acordo com as características da fonte de energia externa disponível. Existem basicamente dois tipos de carregadores, conforme Figura 17. A principal diferença entre eles está associada ao modo como é convertido o sinal da corrente elétrica, que pode ocorrer tanto externo, como internamente ao veículo.

Figura 17. Tipos de carregadores de um BEV.



Fonte: Adaptado de Simone; Piegari (2016).

Segundo SIMONE; PIEGARI (2016), o carregador do Modo 2 é capaz de fornecer uma potência máxima de 175 kW, enquanto o Modo 1 de apenas 43 kW, assumindo para ambos uma tensão nominal de 400 V. Dessa forma, o carregador do Modo 2 possui uma maior eficiência que o Modo 1 para carregar a bateria do veículo em menor período de tempo.

Para o trabalho, não é levado em consideração as condições de carregamento da bateria. Na simulação computacional, assume-se apenas que a bateria se encontra carregada com 100% de energia. A eficiência energética do veículo é medida durante um trajeto específico até que a carga elétrica da bateria seja totalmente consumida.

2.3.3.1.2 Bateria AV

A bateria de alta voltagem (AV) é a principal fonte de energia de um BEV. Ela é composta por um conjunto de células eletroquímicas integradas, que são armazenadas dentro de módulos, no compartimento interno do veículo (FAPESP, 2019).

Por possuírem uma densidade de energia menor que a gasolina e o óleo diesel, as células eletroquímicas devem ser utilizadas em grande quantidade, a fim de garantir níveis aceitáveis de potência e autonomia do BEV (GUSTAFSSON; JOHANSSON, 2015). Os fatores limitantes para determinar o número máximo de células disponíveis são o tamanho, o limite de peso e o custo do veículo.

Segundo XI; CHRIS (2011), a energia presente na bateria AV (E_{Bat}) é definida a partir da equação (2). Ela depende tanto do tempo de uso (T_{total}) dos sistemas, como da potência elétrica consumida (P_{Bat}), representada pela tensão da bateria (U_{Bat}) e a corrente elétrica (I), conforme equação (3).

$$E_{Bat} = P_{Bat} * \frac{T_{total}}{3600} \quad (2) \quad P_{Bat} = U_{Bat} * I \quad (3)$$

A Figura 18 ilustra o compartimento de armazenamento dos módulos da bateria AV. Para esse exemplo, são instaladas 96 células, divididas em 24 módulos. O que resulta em uma tensão total de 300 V e uma potência máxima de 80 kW (WARNER, 2014). A autonomia do veículo para esse caso é de 117km.

Figura 18. Módulos da bateria AV do Nissan Leaf (24kWh, modelo 2011).



Fonte: Warner (2014).

A principal diferença entre a bateria AV comparada à de 12 V é que ela é composta por um conjunto maior de células eletroquímicas. Isso possibilita que ela armazene mais energia e trabalhe em regimes mais elevados de tensão e de potência, que são condições requeridas para um BEV (XI; CHRIS, 2011). Há ainda uma diferença com relação à composição das células eletroquímicas para cada modelo. A bateria AV é composta por células de íon-lítio, enquanto que a de 12V, por chumbo-ácido (ANDRESEN, 2012).

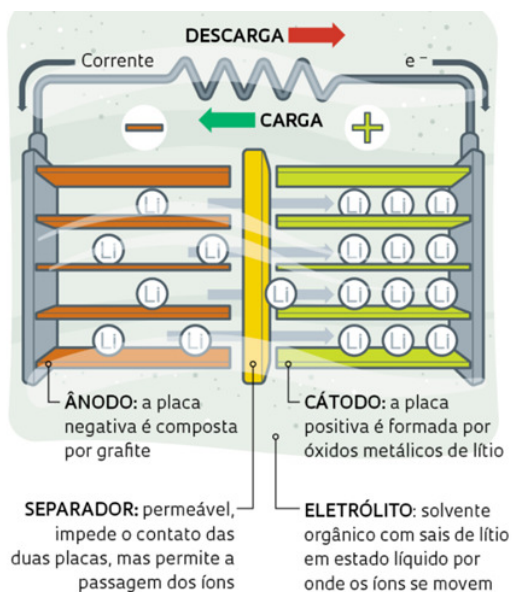
A bateria 12V também é utilizada em um BEV, conforme Figura 15. A sua função é exclusivamente fornecer energia elétrica para os módulos auxiliares do sistema Elétrico, o que demanda uma menor potência (RHODES et al., 2017).

2.3.3.1.3 Células de Íon-Lítio

A bateria AV composta por células de íon-lítio é o modelo mais comum para o BEV, devido à sua maior capacidade de armazenamento de energia e alta estabilidade térmica (ANDRESEN, 2012). Porém, ela possui um elevado custo comparado às baterias com células de chumbo-ácido, que pode chegar a 50% do valor total do veículo elétrico (FAPESP, 2019).

A Figura 19 ilustra o exemplo de funcionamento de uma bateria com células íon-lítio. A descarga de energia ocorre quando os íons de lítio se deslocam do polo negativo (ânodo) para o positivo (cátodo). Já a recarga acontece quando eles se movimentam no sentido inverso.

Figura 19. Ilustração conceitual de uma bateria íon-lítio.



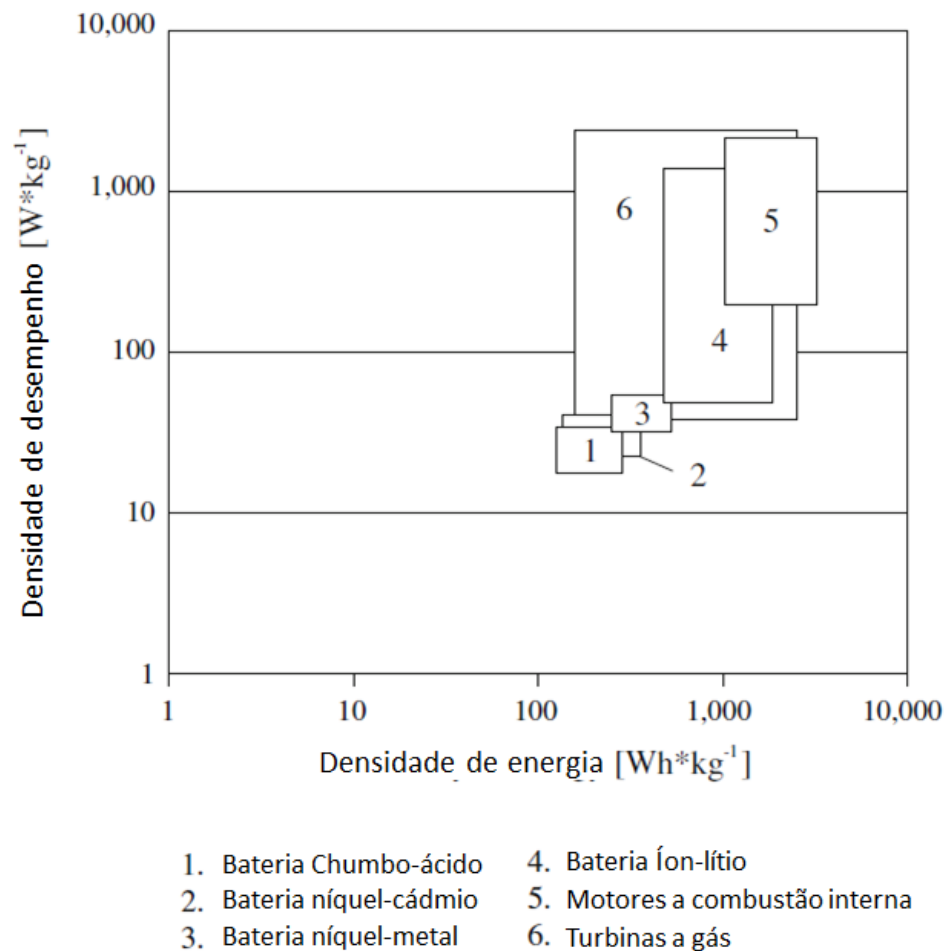
Fonte: Fapesp (2019).

As células de chumbo-ácido são um modelo muito comum no mercado atualmente, devido ao seu baixo custo. Dessa forma, elas são mais frequentemente utilizadas na composição das baterias 12V, por possuírem menor desempenho e eficiência.

A Figura 20 faz um comparativo entre a densidade de energia (eixo x) e o desempenho (eixo y) para diferentes meios de armazenamento de energia. Para um BEV, a densidade de energia da bateria está associada à autonomia em quilômetros do veículo, enquanto o desempenho dela é a potência elétrica máxima fornecida, a fim de propulsá-lo.

É possível observar, através da Figura 20, que os motores a combustão interna possuem, de fato, uma eficiência superior a todos os tipos de baterias disponíveis (ANDRESEN, 2012). Porém, a bateria de íon-lítio apresenta uma significativa melhora comparada aos outros modelos (chumbo-ácido, níquel-cádmio e níquel-metal), obtendo dessa forma, um desempenho similar aos motores a combustão.

Figura 20. Comparação entre diferentes tecnologias de armazenamento de energia.



Fonte: Adaptado de Andresen (2012).

2.3.3.2 Sistema Elétrico

O sistema elétrico de um BEV é composto basicamente por 3 módulos auxiliares: direção, climatização e iluminação.

A energia fornecida da bateria AV para o sistema elétrico é armazenada em uma bateria 12 V, com o objetivo de exclusivamente alimentar os módulos auxiliares do veículo. Devido à alta voltagem da bateria AV, é necessário que a tensão de origem do sinal elétrico seja reduzida, através de um conversor CC/CC, antes de alimentar a bateria 12 V (EHSANI et al., 2005).

Segundo RHODES et al. (2017), a potência máxima requerida para o sistema elétrico é de 6 kW, o que representa uma baixa parcela do consumo energético total do BEV, comparado ao sistema de propulsão. O consumo de energia do sistema elétrico (E_{Aux}) pode ser calculado a partir da equação (4). Ele depende da soma da potência elétrica dos módulos ($P_{(Aux)i}$) e do tempo total de funcionamento do veículo (T_{total}) (DUANGSRIKAEW et al., 2018).

$$E_{Aux} = \sum_{i=1}^n P_{(Aux)i} * \frac{T_{total}}{3600} \quad (4)$$

A Tabela 1 mostra como exemplo o consumo de energia de cada um dos módulos auxiliares do BEV (DUANGSRIKAEW et al., 2018). É assumido como referência a potência elétrica do sistema de 6 kW, e o tempo total de funcionamento do veículo de 1.186 s, determinado a partir do ciclo de velocidade escolhido.

Tabela 1. Definição da potência e do consumo energético dos módulos auxiliares.

Componentes Sistema Elétrico	Potência (kW)	Energia (kWh)	
1- Módulo de Direção	0.8	0.2	13%
2- Módulo Climatização	5.0	1.6	83%
3- Módulo de Iluminação	0.3	0.1	4%
Total	6	2	

Fonte: Adaptado de Duangsrikaew et al. (2018).

A partir dos resultados obtidos na Tabela 1, assume-se que o consumo de energia do modo de climatização é equivalente a 80% de todo o sistema elétrico. Enquanto os módulos de direção e iluminação possuem valores inferiores a 13% e 4% do total.

Para o modelo de simulação do trabalho, o consumo de energia do sistema elétrico leva apenas em consideração o módulo de iluminação do BEV, cuja potência requerida é de 300W. Os módulos de direção e climatização não são atribuídos, pois o trabalho considera os resultados obtidos durante a homologação do veículo como referência, sendo que para essa condição, eles não estão ativos.

2.3.3.3 Sistema de Propulsão

O sistema de propulsão é o principal consumidor energético de um BEV (RHODES et al., 2017). Ele transforma a energia elétrica da bateria AV do sistema de carregamento em energia mecânica, a fim de movimentar as rodas do veículo.

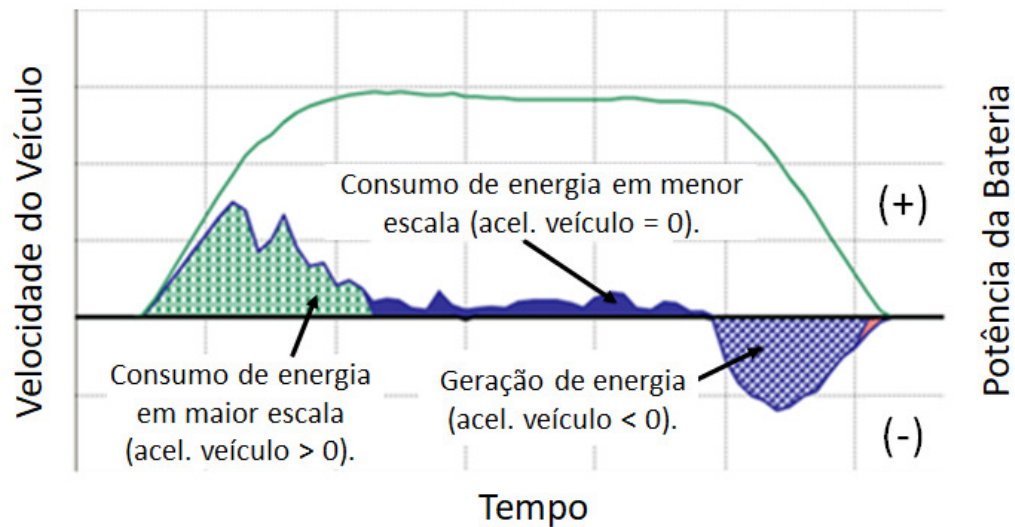
O sistema é composto principalmente por um motor elétrico, mas possui outros componentes interligados (EHSANI et al., 2005).

- **Motor Elétrico:** Converte a energia elétrica da bateria AV em energia mecânica para propulsionar o veículo.
- **Transmissão:** Transmite a energia mecânica provida do motor elétrico para as rodas do veículo.
- **Controlador:** Regula o fornecimento de energia da bateria para o motor elétrico.
- **Inversor (CC/CA):** Converte o sinal da corrente elétrica fornecida da bateria para o motor elétrico.

O motor elétrico é uma máquina reversível que, além de propulsionar o veículo, também é capaz de atuar como um freio motor. Isso se dá transformando a energia mecânica obtida pela desaceleração das rodas em energia elétrica, com o intuito de recarregar a bateria (EHSANI et al., 2005). Para ambos os modos de funcionamento do motor elétrico, propulsor e gerador, a energia distribuída é regulada pelo controlador de potência, de acordo com as demandas do pedal acelerador e freio do veículo.

A Figura 21 exemplifica o fluxo de energia de um BEV para um trajeto com diferentes trechos de velocidade. Quando a potência da bateria é positiva, há o consumo de energia do motor elétrico para a propulsão do veículo. Já quando a potência da bateria é negativa, o motor atua como um gerador para recarregar as baterias.

Figura 21. Demanda do fluxo de energia em um BEV.



Fonte: Adaptado de Gustafsson; Johansson (2015).

2.3.3.3.1 Motor elétrico

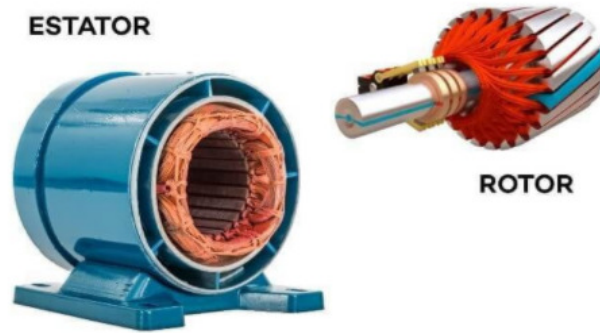
Existem basicamente 2 tipos de motores elétricos disponíveis no mercado automotivo (GUZZELLA; SCIARRETTA, 2007): os motores de corrente contínua (CC), e os motores de corrente alternada (CA). Para a propulsão do BEV, o tipo mais comum é o CA, pois apresenta maiores potência e eficiência comparadas aos motores CC.

Por essa razão, é sempre requerido em um BEV a presença de um inversor de sinal, a fim de converter a corrente vinda da bateria de alta tensão, de CC para CA, antes que ela chegue ao motor elétrico.

A Figura 22 ilustra um exemplo de dois dos principais componentes do motor elétrico: estator e rotor. Os motores CC e CA, apesar das diferenças físicas entre eles, possuem o mesmo princípio básico de funcionamento, que varia de acordo com os modos de atuação:

- **Propulsor:** O fornecimento da energia elétrica da bateria para o motor acarreta a geração de um campo magnético no estator, que faz rotacionar o eixo de saída do rotor e, assim, provém a energia mecânica requerida para movimentar o veículo.
- **Gerador:** Quando a energia mecânica é fornecida das rodas do veículo para o motor, o eixo do rotor é rotacionado. Isso gera um campo magnético através de suas aletas e resulta na formação de energia elétrica pelo estator, utilizada para recarregar as baterias.

Figura 22. Principais componentes de um motor elétrico CA Indutivo



Fonte: Neocharge (2021).

2.3.3.3.1.1 Curvas de torque e potência

A energia mecânica requerida pelo motor elétrico (E_{Prop}) é obtida a partir da equação (5) (XI; CHRIS, 2011). Ela depende do tempo de funcionamento do veículo (T_{total}) e da potência do motor elétrico (P_{Mot}).

$$E_{Prop} = P_{Mot} * \frac{T_{total}}{3600} \quad (5)$$

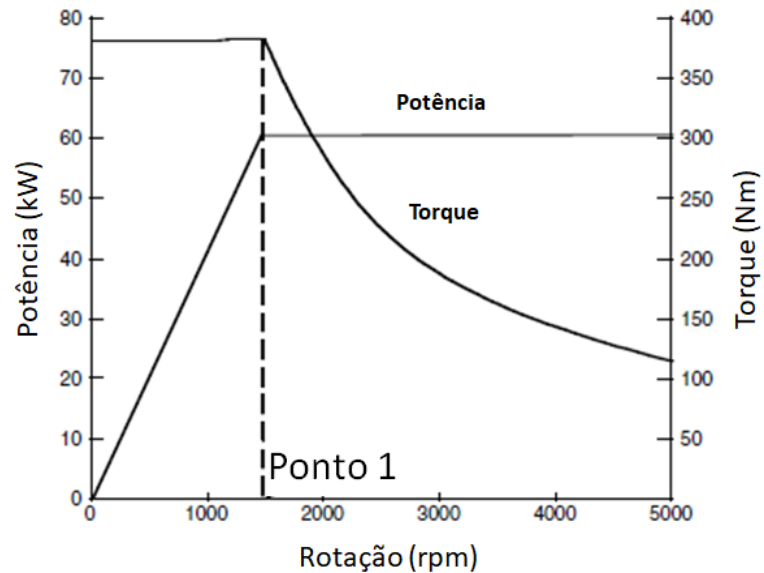
Em um sistema ideal, é esperado que a potência do motor elétrico (P_{Mot}) seja igual à potência fornecida para propulsionar as rodas do veículo (P_{Prop}). Porém, em um sistema real, devido às perdas do motor e da transmissão (L_{Mot}), a relação entre elas pode ser representada através da equação (6) (XI; CHRIS, 2011). Nela, a potência de propulsão do motor elétrico é calculada assumindo-se o torque do motor (T_{Mot}) e a sua rotação (ω), conforme equação (7).

$$P_{Mot} = P_{Prop} + L_{Mot} \quad (6) \quad P_{Prop} = T_{Mot} * \omega \quad (7)$$

A Figura 23 mostra o exemplo de uma curva de torque (T_{Mot}) e de potência (P_{Prop}) obtida para um motor elétrico em dinamômetro de acordo com a sua rotação (ω). O Ponto 1 representa o limite máximo de tensão da bateria.

Segundo a Figura 23, o acréscimo da rotação do motor até o Ponto 1, resulta na entrega do torque máximo e no aumento da sua potência, correspondente a equação (7). Contudo, após o Ponto 1, a potência atinge o seu limite máximo e, dessa forma, a curva de torque é reduzida até chegar ao limite de rotação do motor em 5.000 RPM.

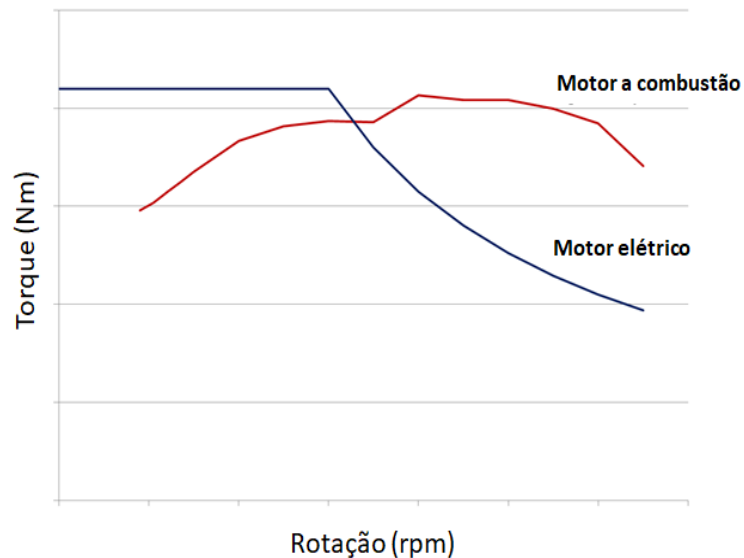
Figura 23. Curvas de desempenho (torque e potência) de um BEV.



Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2005).

A Figura 24 também mostra as diferenças da curva de torque de um motor elétrico comparado a um motor a combustão interna. O motor elétrico possui maior eficiência em baixa rotação que o motor a combustão, o que contribui para o melhor desempenho e dirigibilidade do BEV. Porém, em altas rotações, devido ao limite de tensão das baterias, há uma sensível perda de desempenho (GUSTAFSSON; JOHANSSON, 2015).

Figura 24. Curvas de torque de um BEV vs. ICE.



Fonte: Adaptado de Gustafsson; Johansson (2015).

2.3.3.3.1.2 Força de propulsão

A propulsão do BEV pode ser definida através da Segunda Lei de Newton (SANTICIOLLI et al., 2013), levando-se em consideração os parâmetros de força trativa (F_t), força resistiva (F_R), massa total (m_v) e aceleração (d_v/d_t) do veículo, conforme a equação (8).

Caso $F_t > F_R$, a aceleração do veículo é positiva (velocidade aumenta), $F_t < F_R$ a aceleração é negativa (velocidade diminui), e $F_t = F_R$ a aceleração é nula (velocidade constante).

$$F_t(t) - F_R(t) = m_v * \frac{d}{d_t} v(t) \quad (8)$$

A força trativa (F_t) é obtida de acordo com a quantidade de torque fornecida do motor elétrico para as rodas do veículo. A equação (9) estabelece a correlação entre os parâmetros. Além da curva de torque do motor (T_{Mot}), que varia conforme a rotação, assume-se também as constantes de relação de marcha (i_g), eficiência da transmissão (η_t) e o raio dinâmico do pneu (r_d).

$$F_t(t) = \frac{T_{Mot}(t) * i_g * \eta_{trans}}{r_d} \quad (9)$$

Já a força resistiva (F_R) representa a somatória das forças contrárias ao movimento do veículo. Ela é formada a partir das características do chassis do BEV, assumindo-se como referência o arrasto aerodinâmico da carroceria, a resistência ao rolamento dos pneus e o peso total do veículo.

2.3.3.4 Chassis

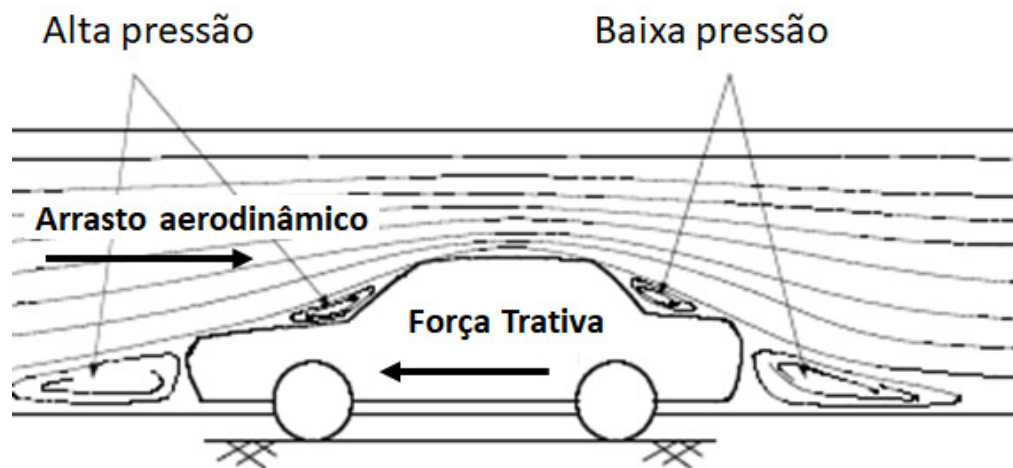
O Chassis é o sistema formado basicamente pela carroceria e pelas rodas do veículo. A partir da definição dos seus subsistemas, é possível calcular a força resistiva (F_R) do BEV segundo a equação (10) (SANTICIOLLI et al., 2013), composta pelos termos de arrasto aerodinâmico (F_a), resistência ao rolamento (F_r) e peso total do veículo (F_g).

$$F_R(t) = F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) \quad (10)$$

2.3.3.4.1 Arrasto aerodinâmico

Um veículo viajando a uma determinada velocidade ao longo de um trajeto, encontra no ar uma força resistiva contrária ao seu movimento (EHSANI et al., 2005). Essa força, denominada de arrasto aerodinâmico, é o resultado da diferença de pressão entre a parte da frente e a de trás do veículo. Ela varia a sua intensidade de acordo com o design proposto para a carroceria. A Figura 25 ilustra essa condição.

Figura 25. Arrasto aerodinâmico durante o deslocamento de um veículo



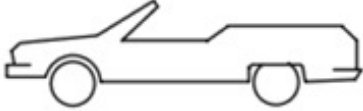
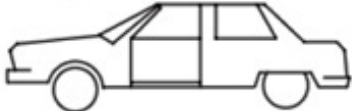
Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2005).

A Equação 11 representa a fórmula matemática dessa força. Ela é composta por: massa específica do ar (ρ), coeficiente aerodinâmico (C_d), área frontal (A_f), velocidade do vento (V_{vento}) e velocidade do veículo ($V_{veículo}$).

$$F_a(t) = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_f * (V_{veículo}(t) + V_{vento})^2 \quad (11)$$

Os termos C_d e A_f são constantes determinadas segundo as características do veículo. A Tabela 2, ilustra o exemplo da variação do coeficiente aerodinâmico, correspondente aos diferentes modelos de carroceria disponíveis. Quanto mais otimizado o design da carroceria, menor o valor de C_d .

Tabela 2. Exemplos de coeficientes aerodinâmico a partir dos modelos de carroceria.

Modelos de Carroceria		Coeficiente aerodinâmico (C_d)
Otimização da Carroceria ↓		0.5...0.7
		0.5...0.7
		0.4...0.55
		0.3...0.4
		0.15...0.20

Fonte: Adaptado de Santiciolli et al. (2013).

2.3.3.4.2 Resistência ao rolamento dos pneus

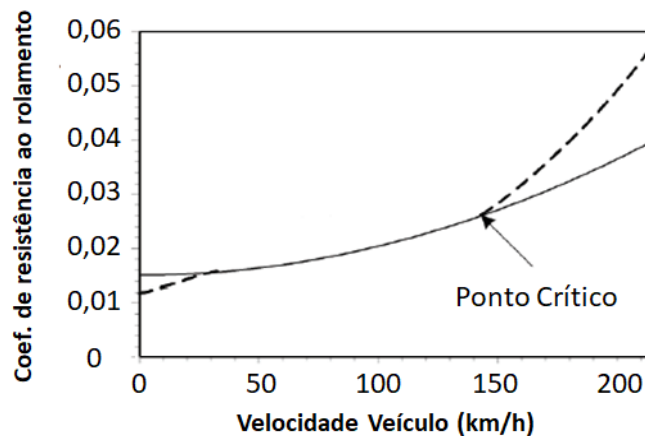
A resistência ao rolamento é o efeito resultante da conformação da carcaça do pneu em contato com a estrada durante o movimento do veículo (SANTICIOLLI et al., 2013). Ela varia de acordo com o tipo e o modelo dos pneus utilizados.

A Equação 12 representa essa condição. Ela é formada a partir do coeficiente de atrito (f), da massa do veículo (m_v) e da inclinação do trajeto (α).

$$F_r(t) = f(t) * m_v * g * \cos(\alpha) \quad (12)$$

O coeficiente f , que representa a resistência ao rolamento dos pneus com o solo, varia em função da velocidade do veículo, conforme a Figura 26. Em baixas velocidades, a curva é praticamente linear, o que representa a baixa interferência do coeficiente na força resistiva do veículo. Porém, após a velocidade ultrapassar o ponto crítico, a curva aumenta acentuadamente até atingir o seu limite.

Figura 26. Curva de resistência ao rolamento do pneu em relação a velocidade do veículo.

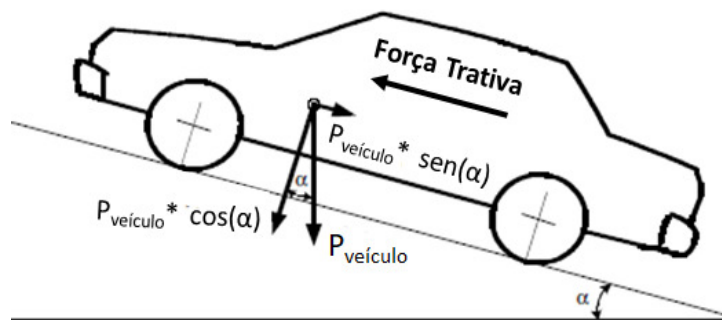


Fonte: Adaptado de Santiciolli et al. (2013).

2.3.3.4.3 Peso total do veículo

Quando um veículo sobe ou desce uma rampa, seu peso produz uma componente de força, conforme indicado na Figura 27. Ele possui um ângulo (α) de acordo com a inclinação da rampa. Quando o ângulo é positivo, o veículo está subindo a rampa e a força é oposta ao seu movimento. Já quando o ângulo é negativo, o veículo está em declive e a força atua a favor do seu movimento (SANTICIOLLI et al., 2013).

Figura 27. Influência do peso do veículo devido a inclinação do trajeto.



Fonte: Adaptado de Ehsani et al. (2005).

A equação (13) representa a força resistiva do veículo (F_g), e a equação (14), o seu peso (P_g). Elas são definidas a partir da massa do veículo (m_v), da inclinação da rampa (α) e da gravidade (g).

$$F_g(t) = P_g * \text{sen}(\alpha_t) \quad (13)$$

$$P_g = m_v * g \quad (14)$$

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Técnicas de simulação e modelamento computacional são importantes ferramentas de análise, capazes de projetar as características de um sistema real, através de um modelo virtual, a fim de medir o seu desempenho (YIN; MCKAY, 2018).

Existem muitos tipos de softwares de simulação hoje no mercado. O principal objetivo do uso dessa ferramenta é reduzir os custos de um projeto e acelerar a obtenção dos resultados.

A indústria automotiva também utiliza *softwares* de simulação em diversas áreas de atuação, seja para o desenvolvimento de um novo produto, ou para a análise de um problema corrente (MARKEL et al., 2002).

2.4.1 Análise do consumo energético

Para medir o consumo de energia do BEV no trabalho, é usado um tipo de software da indústria automotiva, que considera tanto as características de um veículo elétrico existente no mercado, como os ciclos de velocidade requeridos.

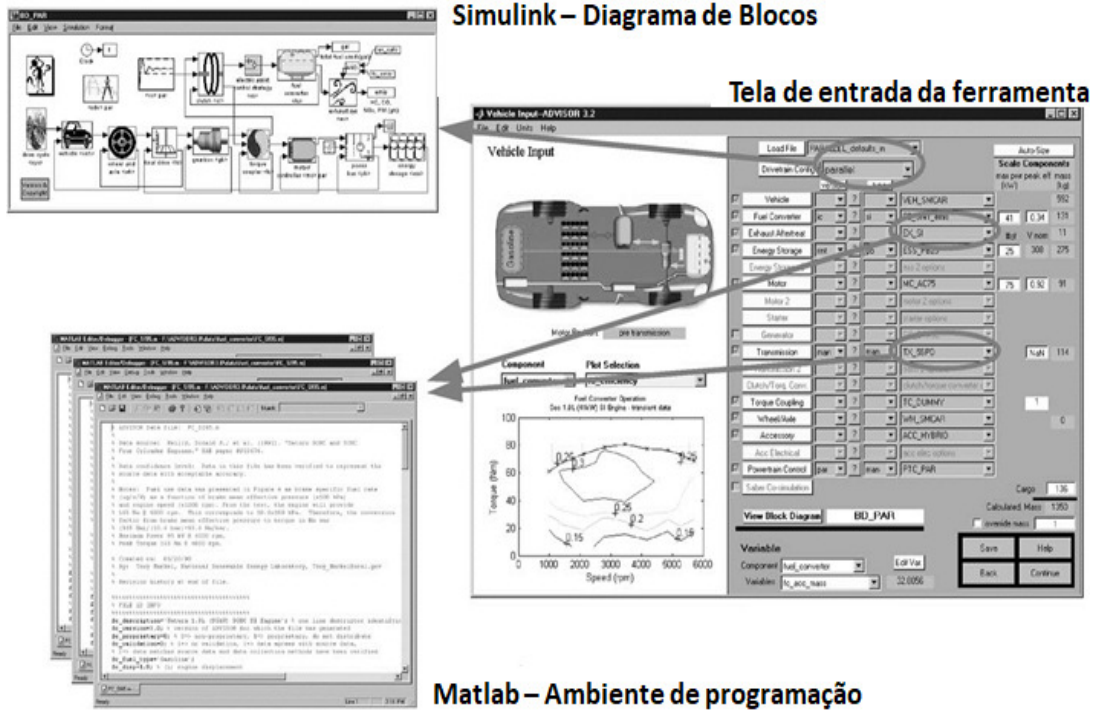
Há duas ferramentas com essa função: Autonomie e Advisor. Elas foram desenvolvidas por dois centros de pesquisa Norte Americanos (ANL e NREL) e estão disponíveis em código aberto para *download* na internet (ARGONNE, 2005) (SOURCEFORGE, 1999).

Ambas as opções possuem uma configuração bastante amigável ao usuário, utilizando as plataformas do MATLAB e do Simulink como base para a simulação. O MATLAB é o ambiente de programação em que são inseridas as equações matemáticas, que representam tanto a funcionalidade dos sistemas do veículo, como as particularidades do teste. Já o Simulink é usado para fazer a interação desses parâmetros, através do uso do diagrama de blocos (MARKEL et al., 2002).

A Figura 28, mostra um exemplo da tela de entrada do *software* Advisor, no qual são preenchidos os parâmetros de entrada dos sistemas do BEV, conforme a Figura 15 (Carregamento, Elétrico, Propulsão e Chassis). Além disso, é possível observar, através da Figura 28, a forma como o Advisor se relaciona com as plataformas do MATLAB e do Simulink.

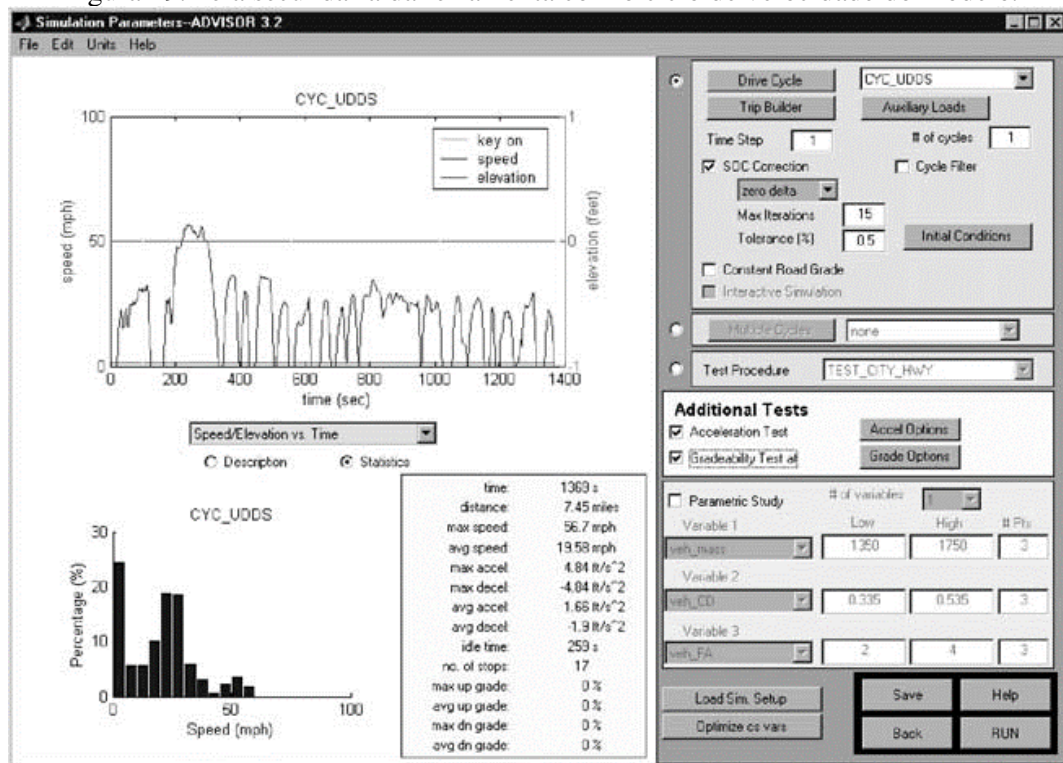
Após estabelecidos os parâmetros de entrada, é preciso determinar as particularidades do teste. A Figura 29 ilustra um exemplo da tela secundária do *software* Advisor, em que o ciclo de velocidade é definido. Além disso, nesta etapa, é iniciada a simulação do modelo.

Figura 28. Tela de entrada da ferramenta com os parâmetros de entrada.



Fonte: Adaptado de Markel et al. (2002).

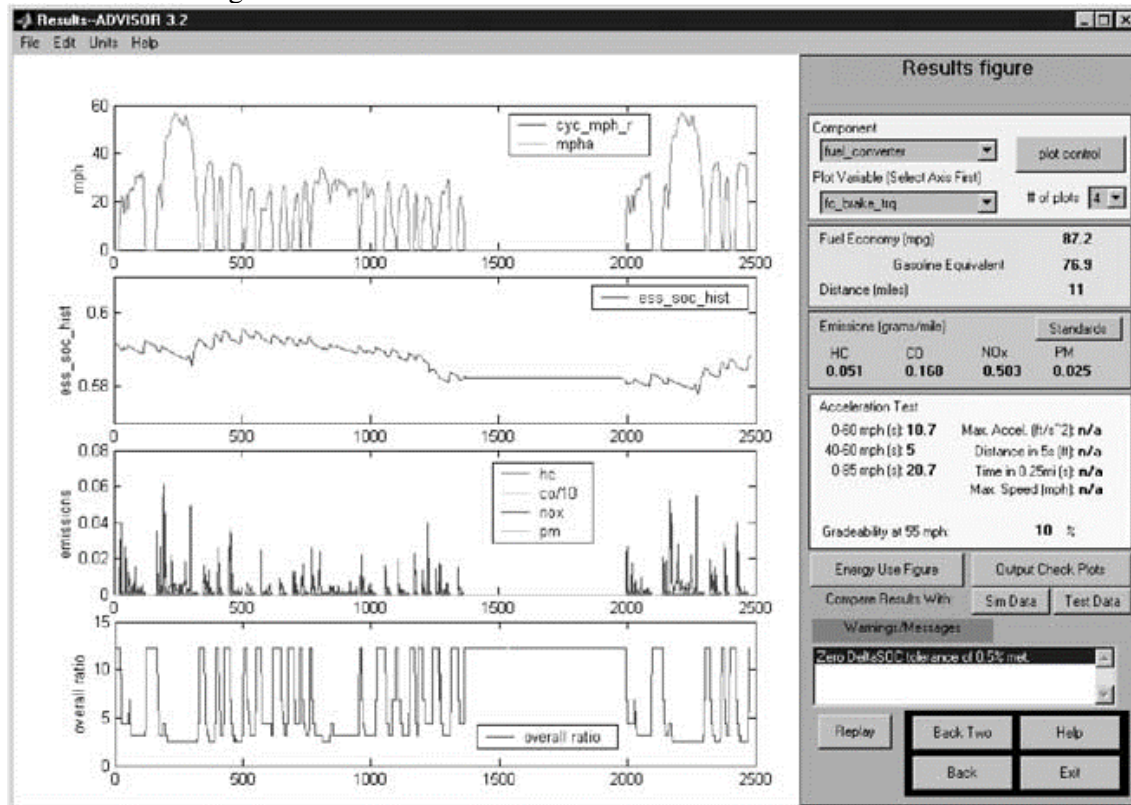
Figura 29. Tela secundária da ferramenta com o ciclo de velocidade do modelo.



Fonte: Markel et al. (2002).

Por fim, após o término da simulação, alguns resultados são obtidos. A Figura 30 mostra essa condição. Para esse exemplo, é simulado um veículo com motor a combustão interna. Portanto, é fornecido o consumo total de combustível do veículo durante o ciclo de velocidade. Além disso, também são ilustradas, na Figura 30, as curvas de eficiência da bateria 12V, as emissões dos gases poluentes e as relações de marcha do veículo ao longo do ciclo.

Figura 30. Tela final da ferramenta com os resultados obtidos.



Fonte: Markel et al. (2002).

Para o trabalho, utiliza-se o *software* de simulação de uma empresa privada, que possui a mesma funcionalidade da ferramenta Advisor. Através dele, é obtido o consumo de energia do BEV, considerando os diversos ciclos de velocidade disponíveis como referência.

3 ETAPA 1: LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE VELOCIDADE

O principal objetivo do trabalho é medir o consumo de energia de um BEV na cidade de São Paulo e comparar os resultados obtidos a outros países, para confirmar a viabilidade de implementação do modelo na região.

Para isso, a primeira etapa do trabalho consiste no levantamento das curvas de GPS dos veículos, em diferentes períodos e regiões da cidade. Após os dados serem coletados, é feita uma análise por meio de um método de seleção estatístico, a fim de gerar um ciclo de velocidade que represente as características de trânsito da região.

Ainda nessa etapa, os ciclos de velocidade obtidos para São Paulo (SP-1, SP-2 e SP-3), são comparados às curvas de velocidade de outros países (ciclos padrões e reais), com o intuito de verificar a sua eficiência.

3.1 METODOLOGIA

3.1.1 Ciclos padrões de velocidade

Os ciclos padrões são curvas de velocidade teóricas, determinadas a partir de um perfil de trânsito preestabelecido. Eles são utilizados usualmente no processo de homologação dos veículos com motores a combustão interna, com o objetivo de padronizar o método de medição do consumo de combustível e emissão de gases poluentes.

No geral, os ciclos padrões apresentam uma curta duração dos testes (10-30min), e possuem um perfil de direção menos robusto que os ciclos reais de velocidade. Portanto, para o BEV, caso eles sejam utilizados, devem ser repetidos inúmeras vezes ao longo do tempo, até que toda a energia disponível na bateria do veículo seja consumida.

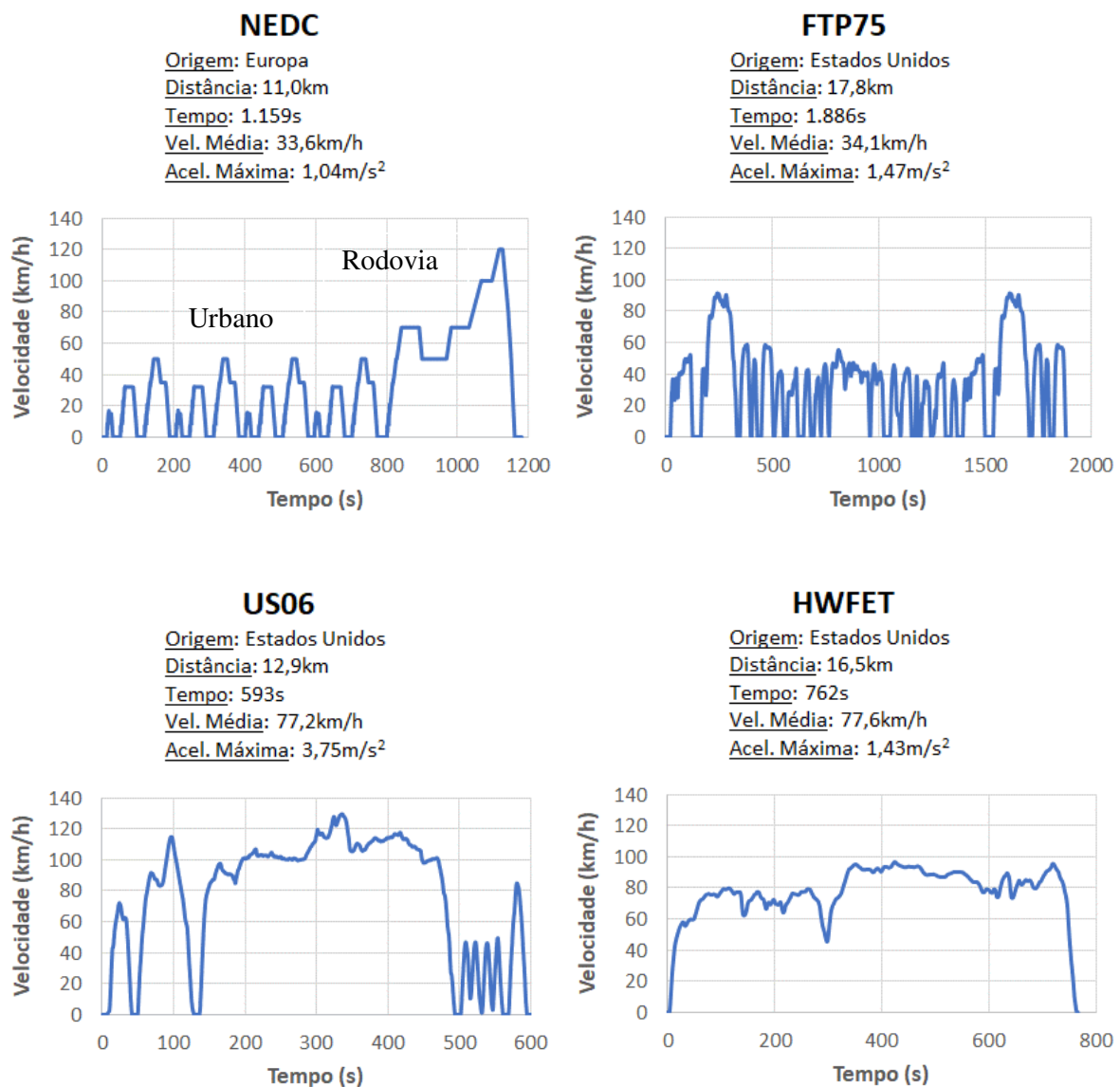
No trabalho, são considerados basicamente 4 tipos de ciclos padrões: NEDC, FTP75, HWFET e US06. A Figura 31 ilustra as curvas de velocidade de cada um deles.

- **NEDC:** Ciclo de velocidade criado na Europa (última atualização 1997). É também utilizado em outros países do mundo (Índia, China, África do Sul e Argentina). Ele representa as condições de trânsito urbano e rodovia combinados. É um ciclo de baixa aceleração, que apresenta pouca correlação com o trânsito real.
- **FTP-75/HWFET:** Ciclos de velocidade criados nos Estados Unidos (última atualização 2008). São também utilizados no Brasil. Eles representam condições distintas de trânsito urbano (FTP75) e rodovia (HWFET). São ciclos de média

aceleração, que apresentam maior correlação com o trânsito real, comparado ao NEDC.

- **US06:** Ciclo de velocidade criado nos Estados Unidos (última atualização 2008). É utilizado apenas nos Estados Unidos. Ele representa as condições de trânsito urbano e rodovia combinados. São ciclos de alta aceleração, que apresentam correlação com o trânsito real e representam um modo de direção mais agressivo.

Figura 31. Curvas de velocidade dos ciclos padrões.



Fonte: EPA (2021).

3.1.2 Ciclos reais de velocidade

Os ciclos reais, são curvas de velocidade obtidas através do uso do GPS, a fim de representar as características de trânsito de um veículo em uma determinada região. Os dados coletados, levam em consideração a variação da posição geográfica do veículo, ao longo do tempo, para determinar a sua velocidade.

Para o trabalho, são considerados como referência o ciclo WLTP, aplicado na homologação dos veículos automotivos leves na Europa, em substituição ao NEDC, e o ciclo de velocidade da cidade de São Paulo, desenvolvido exclusivamente para o trabalho.

3.1.2.1 WLTP

O ciclo WLTP foi criado em 2017, a partir do relatório DHC (2014). Comparado ao NEDC, ele representa de forma mais realista as características de trânsito das regiões analisadas, já que apresenta um perfil de condução mais dinâmico, com trechos de velocidade transientes e significativas acelerações.

As curvas de velocidade utilizadas para a criação do ciclo WLTP, foram obtidas a partir dos dados de GPS, coletados em 14 países ao redor do mundo. A Tabela 3, lista todos os países envolvidos no estudo, assim como a quantidade total de veículos requeridos e a quilometragem percorrida em cada região.

Tabela 3. Lista dos países participantes para a composição do ciclo WLTP.

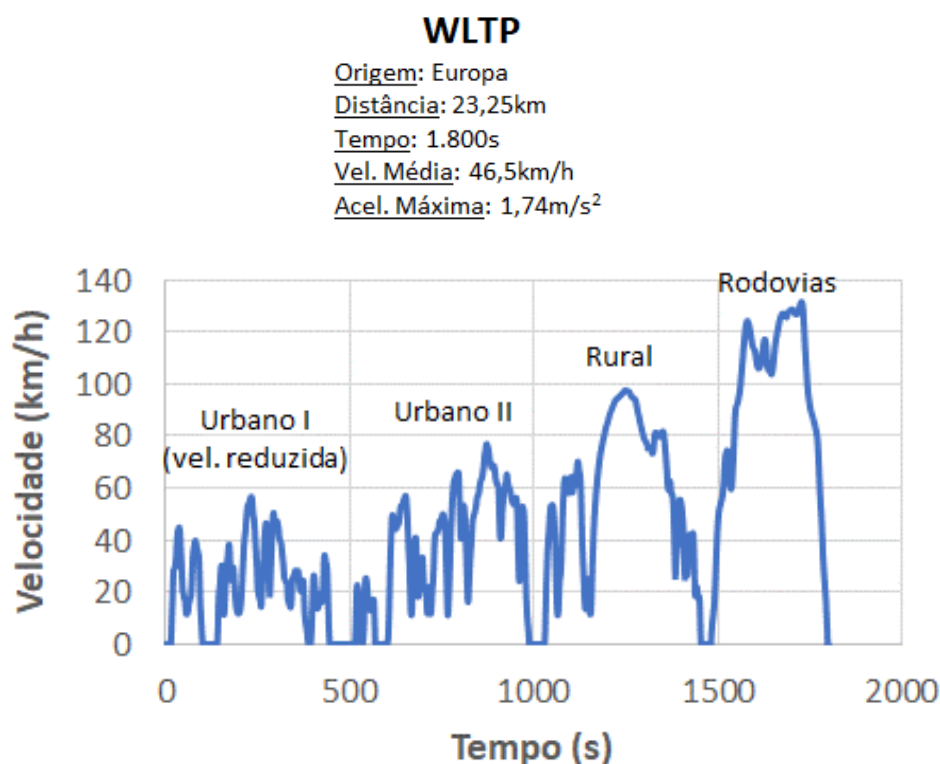
Região	País	Quant. Veículos	Quilometragem
Europa	Bélgica	12	106.952
	Alemanha	8	23.414
	Espanha	10	9.666
	França	42	108.916
	Itália	8	57.646
	Polônia	9	14.648
	Eslovênia	18	48.934
	Suíça	30	23.619
	Reino Unido	22	31.781
	Suécia	7	36.951
Ásia	Índia	20	55.778
	Japão	24	52.955
	Korea	8	34.403
América do Norte	Estados Unidos	176	159.726
Total		394	765.389

Fonte: Adaptado de DHC (2014).

A Figura 32 mostra a versão final da curva de velocidade do ciclo WLTP. O ciclo é dividido em 4 fases (Urbano I, Urbano II, Rural e Rodovia), com um total de 30 min de duração e uma distância percorrida de 23 km.

Comparado ao NEDC, é possível observar que o ciclo WLTP tem maior duração (1.800 vs. 1.159 s), apresenta maior velocidade média (46,5 vs. 33,6 km/h) e possui uma aceleração máxima mais significativa (1,74 vs. 1,04 m/s²), o que demonstra a sua capacidade de representar um perfil de trânsito mais robusto e próximo da realidade.

Figura 32.Ciclo WLTP de velocidade.



Fonte: Adaptado de DHC (2014).

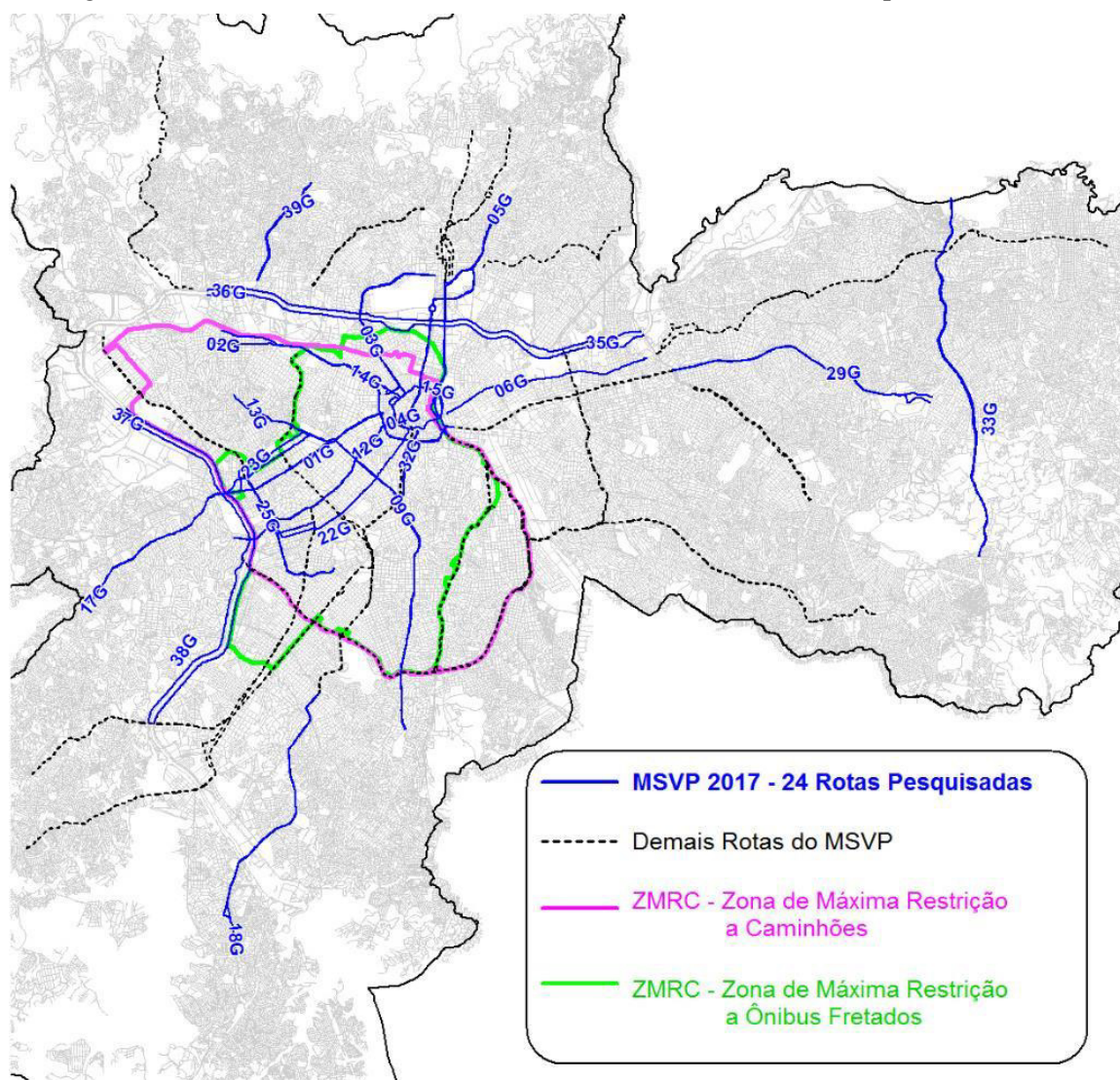
O Brasil não participou do estudo DHC (2014) e, dessa forma, não há um levantamento das características de trânsito do país, representadas através de um ciclo de velocidade. Portanto, para o trabalho, é feito um estudo similar, levando em consideração os dados de GPS obtidos na cidade de São Paulo, a partir do relatório CET (2017) da prefeitura.

3.1.2.2 São Paulo

Os dados de GPS da cidade de São Paulo empregados no trabalho, foram obtidos através da Lei de Acesso à Informação a partir do relatório CET (2017). Eles foram coletados pelo departamento de pesquisa de tráfego da prefeitura, com objetivo de mensurar a fluidez do trânsito da cidade, e propor novas alternativas a fim de otimizá-lo.

O relatório considera o monitoramento dos veículos em 24 rotas diferentes na cidade, conforme ilustra a Figura 33 e a Tabela 4. As rotas selecionadas, englobam as principais vias, desde ruas e avenidas, a marginais expressas e rodovias.

Figura 33. 24 rotas da cidade de São Paulo utilizadas como referência para o trabalho.



Fonte: CET (2017).

Tabela 4. Relação das 24 rotas da cidade de São Paulo.

ROTA	Sentidos pesquisados	
01 - Av. Eusébio Matoso, Av. Rebouças, R. da Consolação	Bairro - Centro	Centro - Bairro
02 - R. Clélia, R. Guaicurus, Av. Francisco Matarazzo, Av. São João	Bairro - Centro	Centro - Bairro
03 - Av. Braz Leme, Av. Rudge, Av. Rio Branco	Bairro - Centro	Centro - Bairro
04 - Av. Zaki Narchi, Av. Santos Dumont, Av. Prestes Maia	Bairro - Centro	Centro - Bairro
05 - Av. Luís Dumont Villares, Av. Cruzeiro do Sul, Av. do Estado	Bairro - Centro	Centro - Bairro
06 - Av. Celso Garcia, Av. Rangel Pestana	Bairro - Centro	Centro - Bairro
09 - R. Vergueiro, R. Domingos de Moraes, Av. Jabaquara, Av. Armando de Arruda Pereira	Bairro - Centro	Centro - Bairro
12 - Av. Cidade Jardim, Av. 9 de Julho	Bairro - Centro	Centro - Bairro
13 - Av. Heitor Penteado, Av. Dr. Arnaldo, Av. Paulista	Paraíso - Perdizes	Perdizes - Paraíso
14 - Elevado Pres. João Goulart, Ligação Leste-Oeste	Leste - Oeste	Oeste - Leste
15 - Rótula Central (R. Maria Paula, Av. Senador Queiróz, Av. Ipiranga)	Pista Direita	Pista Esquerda
17 - Av. Prof. Francisco Morato	Bairro - Centro	Centro - Bairro
18 - Av. Sen. Teotônio Vilela, Av. Interlagos, Av. Washington Luís	Bairro - Centro	Centro - Bairro
22 - Av. Brig. Faria Lima, Av. Brig. Luís Antônio	Bairro - Centro	Centro - Bairro
23 - R. Teodoro Sampaio, R. Cardeal Arcoverde	Bairro - Centro	Centro - Bairro
25 - Av. Brig. Faria Lima, Av. Hélio Pellegrino	Ibirapuera - Pinheiros	Pinheiros - Ibirapuera
29 - Av. Radial Leste (Av. Dr. Luís Aires, Av. Antônio Estevão de Carvalho, Av. Conde de Frontin)	Bairro - Centro	Centro - Bairro
32 - R. Vergueiro, Av. Liberdade	Bairro - Centro	Centro - Bairro
33 - Av. Jacu-Pêssego	A. Senna - R. Chohfi	R. Chohfi - A. Senna
35 - Marg. Tietê (Av. Pres. Castelo Branco, Av. Condessa Elisabeth de Robiano, Av. Morvan Dias Figueiredo)	A. Senna - C. Branco	C. Branco - A. Senna
36 - Marg. do Rio Tietê (Av. Assis Chateaubriand, Av. Otaviano Alves de Lima, Av. Emb. Macedo Soares, Av. Pres. Castelo Branco)	A. Senna - C. Branco	C. Branco - A. Senna
37 - Marg. Pinheiros (Av. das Nações Unidas, Av. Magalhães de Castro, Av. Eng. Billings)	C. Branco - Interlagos	Interlagos - C. Branco
38 - Marginal Pinheiros (Av. das Nações Unidas, Av. Magalhães de Castro, Av. Alcides Sangirardi)	C. Branco - Interlagos	Interlagos - C. Branco
39 - Av. Inajar de Souza	Bairro - Centro	Centro - Bairro

Fonte: CET (2017).

3.1.2.2.1 Aquisição dos dados

Para cada uma das 24 rotas do relatório (CET, 2017), foram mensuradas mais 24 corridas, considerando-se diferentes períodos do dia (Manhã: 07:00; 08:00; 09:00 / Tarde: 17:00; 18:00; 19:00), dias da semana (2ª a 6ª feira) e sentidos do trânsito (Bairro-Centro / Centro-Bairro).

Dessa forma, obteve-se um total de 511 corridas, resultando em mais de 700 mil pontos de coordenadas geográficas, uma distância percorrida de 3.719 km e o tempo gasto de 196 h. A frequência de aquisição dos dados foi de 1 Hz (1 ponto coletado / segundo).

A Tabela 5 e a Figura 34, ilustram como exemplo, os dados de GPS obtidos para 12 corridas da Rota 03, considerando um único sentido de trânsito (centro-bairro), e para ambos os períodos do dia (manhã e tarde). O mesmo modelo de análise também é aplicado para todas as outras corridas, das 24 rotas disponíveis.

A Tabela 5 mostra a velocidade média e o tempo de ciclo dos veículos para cada trajeto. É possível observar, dessa forma, uma significativa diferença obtida de acordo com o período do dia, 30,1 km/h e 831 s (manhã) vs. 16,7 km/h e 1.954 s (tarde). Fato que representa uma característica de trânsito mais acentuada no período da tarde, comparado à manhã.

Enquanto a Figura 34, a partir dos resultados obtidos na Tabela 5, ilustra o fluxo de trânsito dos veículos através de um gráfico de cores. A cor vermelha representa as velocidades inferiores a 10 km/h, a azul as velocidades superiores a 30 km/h, o verde e o amarelo as velocidades intermediárias.

Tabela 5. Dados de GPS obtidos para as 12 corridas da Rota 03 (Sentido Centro/Bairro).

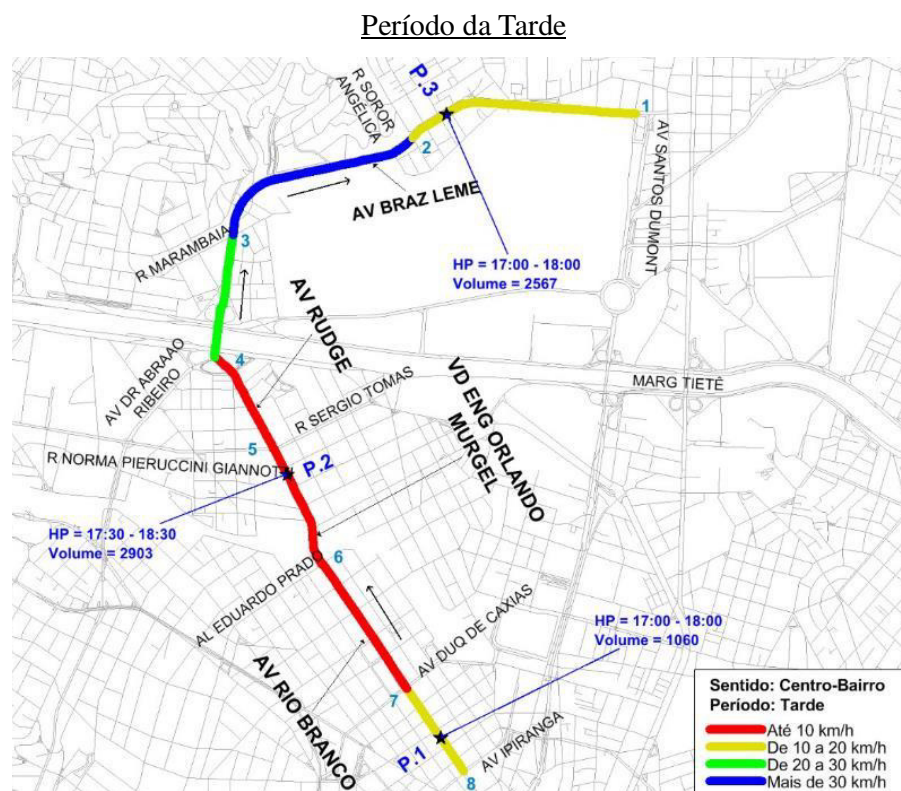
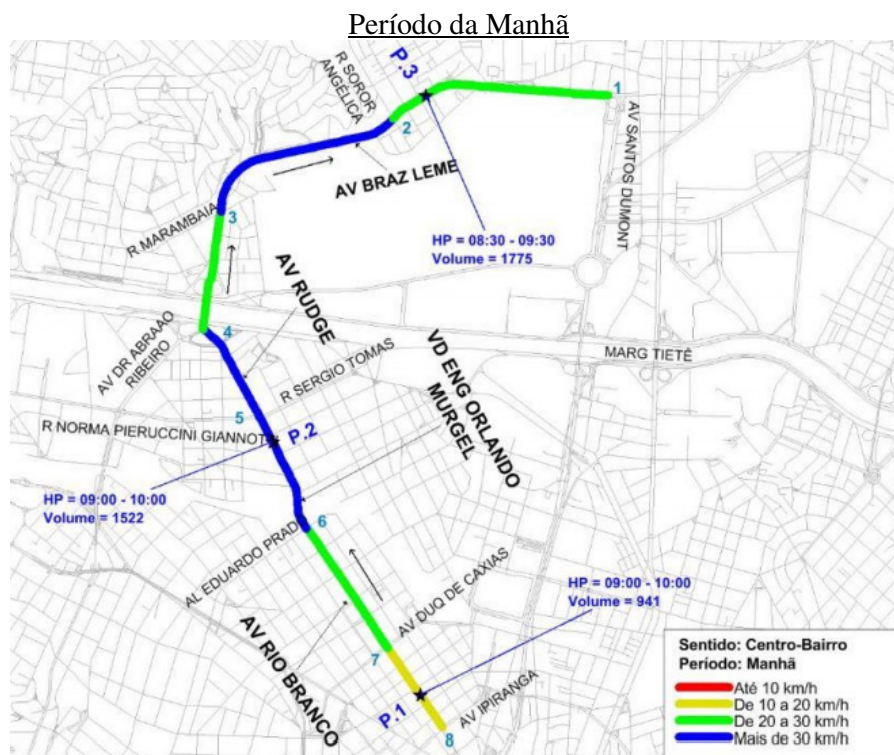
Centro - Bairro

				Vel. Média (km/h)		Tempo de ciclo (s)		Distância (km)	
Manhã				30,1		831		6580	
Tarde				16,7		1954		6580	

Dia Mês	Dia Semana	Hora	No Corrida	1-2		2-3		3-4		4-5		5-6		6-7		7-8		T(s)	Vm (km/h)
				T(s)	Vm (km/h)	T(s)	Vm (km/h)	T(s)	Vm (km/h)	T(s)	Vm (km/h)	T(s)	Vm (km/h)	T(s)	Vm (km/h)	T(s)	Vm (km/h)		
6/12	Qua	7:00	7	161	14,3	313	22,1	379	41,6	436	45,0	509	36,1	656	34,9	834	28,2	834	31,7
7/12	Qui	8:00	24	102	22,6	252	22,4	358	25,9	445	29,5	549	25,3	691	36,1	848	32	848	27,7
6/12	Qua	9:00	9	177	13,0	314	24,5	379	42,2	502	20,8	608	24,9	753	35,4	910	32	910	27,5
Média																		864	29,0
11/12	Seg	7:00	21	113	20,4	273	21,0	331	47,3	447	22,1	534	30,3	684	34,2	847	30,8	847	29,4
8/12	Sex	8:00	19	143	16,1	241	34,3	312	38,6	428	22,1	522	28,0	666	35,6	818	33	818	29,7
11/12	Seg	9:00	23	112	20,6	245	25,2	307	44,3	363	45,8	443	32,9	580	37,4	727	34,1	727	34,3
Média																		797	31,2
5/12	Ter	17:00	1	227	10,1	1029	4,2	1222	14,2	1907	3,7	2055	17,8	2202	34,9	2543	14,7	2543	14,2
5/12	Ter	18:00	5	242	9,5	1166	3,6	1487	8,5	1689	12,7	1839	17,6	1976	37,4	2322	14,5	2322	14,8
5/12	Ter	19:00	3	311	7,4	905	5,7	1188	9,7	1443	10,1	1536	28,3	1694	32,4	2094	12,5	2094	15,2
Média																		2320	14,8
6/12	Qua	17:00	10	146	15,8	755	5,5	1068	8,8	1387	8,0	1514	20,8	1689	29,3	2024	15	2024	14,7
6/12	Qua	18:00	14	71	32,5	529	7,3	903	7,3	1101	12,9	1199	26,9	1382	28	1634	19,9	1634	19,3
6/12	Qua	19:00	12	170	13,5	347	19	472	21,9	645	14,8	744	26,6	883	36,9	1104	22,7	1104	22,2
Média																		1587	18,7

Fonte: Elaboração própria.

Figura 34. Exemplo Rota 03 do relatório CET (2017) (Sentido: Centro/Bairro).



Fonte: CET (2017).

3.1.2.2.2 *Análise Multi-Vari.*

Após a obtenção dos dados de GPS, através do relatório da prefeitura (CET, 2017), a ferramenta Multi-Vari é aplicada. O objetivo dessa etapa ainda não é definir o ciclo de velocidade de São Paulo, mas ter uma visão geral do perfil de trânsito da região, correspondente aos dias da semana, horários do dia e sentidos do trânsito.

Segundo MINITAB (2018), Multi-Vari é uma ferramenta gráfica utilizada para monitorar a variação dos termos X_s de uma função, em relação a resposta do fator Y. É uma metodologia importante em estágios preliminares de um estudo estatístico.

Neste estudo, o gráfico Multi-Vari é estabelecido a partir dos termos da Tabela 6. O tempo de ciclo (Y_1) é escolhido para representar o perfil de trânsito das corridas (quanto maior o tempo de ciclo, maior o percentual do trânsito da região). A sua resposta, é monitorada de acordo com a variação dos 3 termos X_s (X_1 - Dias da semana, X_2 - Períodos do dia / Horários; X_3 - Sentidos do trânsito).

Tabela 6. Definição dos termos requeridos para a análise gráfica do método Multi-Vari.

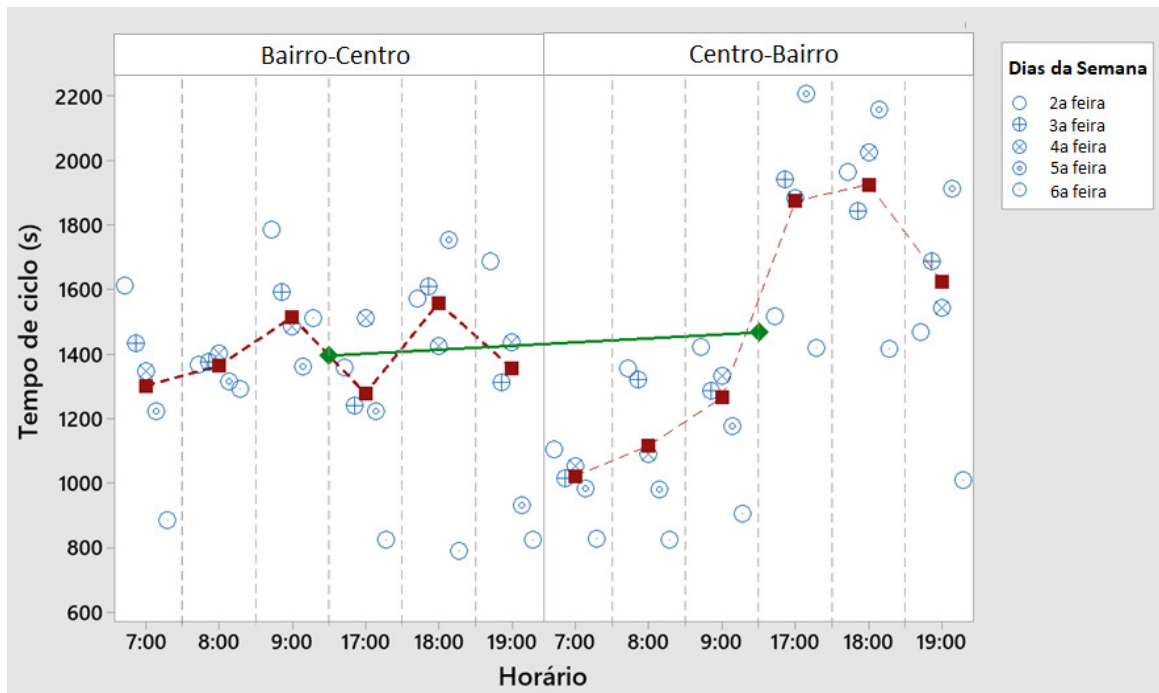
(Y)	(X)
1- Tempo de ciclo (s);	1- Dias da semana (2ª feira a 6ª feira); 2- Períodos do dia (Manhã e Tarde) / Horários (07:00; 08:00; 09:00 / 17:00; 18:00; 19:00); 3- Sentidos do trânsito (B-C / C-B).

Fonte: Elaboração própria.

A partir do gráfico Multi-Vari da Figura 35, é possível ter uma visão geral das características de trânsito dos veículos na cidade de São Paulo. Na análise, são utilizadas as 511 corridas disponíveis, correspondentes às 24 rotas do relatório CET (2017).

Os pontos obtidos no gráfico, representam a média do tempo de ciclo para cada condição. Os pontos azuis para os distintos dias da semana (X_1), os pontos vermelhos para a variação dos períodos do dia (X_2), enquanto os pontos verdes para os diferentes sentidos do trânsito (X_3).

Figura 35. Gráfico Multi-Vari do perfil de trânsito da cidade de São Paulo.



Fonte: Elaboração própria.

A seguir, são detalhadas algumas constatações do perfil de trânsito da cidade de São Paulo, obtidas conforme a variação dos parâmetros X_s .

- **Dias da semana (X_1):** Há expressiva variação das médias dos tempos de ciclo para os dias da semana (pontos azuis). Ressalta-se a baixa concentração de trânsito às sextas-feiras, na grande maioria dos horários. Enquanto o oposto ocorre às segundas-feiras.
- **Períodos do dia (X_2):** Nota-se grande dispersão entre as médias do tempo de ciclo para os períodos do dia (pontos vermelhos). Principalmente no sentido C-B, que mostra uma menor concentração de trânsito entre 07:00 e 08:00 e um aumento expressivo a partir das 17:00. Para o sentido B-C, há também uma pequena diferença entre os tempos de ciclo, porém ela ocorre de forma aleatória ao longo do dia.
- **Sentidos do trânsito (X_3):** Não há significativa variação dos tempos de ciclo entre os sentidos B-C e C-B (pontos verdes), portanto pode-se assumir que a intensidade do trânsito é a mesma para ambas as condições.

3.1.2.2.3 Método de seleção estatístico.

De forma a analisar a grande quantidade de dados de GPS do trabalho, obtidos através do relatório CET (2017), uma ferramenta estatística é utilizada como referência para auxiliar no processo de seleção das corridas.

O principal objetivo desta etapa é reduzir o tempo total de duração das corridas, a fim de gerar um ciclo de velocidade que seja capaz tanto de se adaptar ao modelo de simulação proposto, como de representar as características de trânsito da região.

Para o trabalho, o método escolhido como referência é KONDARU et al. (2018). Ao final da análise, a duração das corridas é reduzida de 196 para 15 horas, e são gerados 3 ciclos de velocidade, segundo o perfil de trânsito da cidade de São Paulo.

3.1.2.2.3.1 Definição dos parâmetros Y_s

O primeiro passo da análise estatística, é selecionar os parâmetros obtidos através das corridas de GPS, e classificá-los de acordo com a sua importância, em que 1 equivale ao maior ranking e 0, ao menor. A Tabela 7, mostra todos os termos definidos por KONDARU et al. (2018), e a forma como eles foram classificados.

Para o trabalho, com a intenção de simplificar a análise, são considerados apenas 4 parâmetros da Tabela 7, todos atribuídos com o maior ranking de importância 1. Além do tempo de ciclo (Y_1) descrito na análise Multi-Vari, também são avaliados a velocidade média (Y_2), a aceleração média (Y_3) e o percentual de trânsito (Y_4).

Os fatores Y_1 e Y_4 não foram inicialmente considerados por KONDARU, M.K, et al. (2018), porém são utilizados como referência para esse trabalho. A escolha do Y_1 é devida à criticidade do tempo de ciclo no modelo de simulação computacional. Enquanto o Y_4 é considerado devido à sua relevância nas características de trânsito da cidade de São Paulo.

O percentual de trânsito (Y_4) pode ser obtido através da equação (15), levando em consideração o tempo total do ciclo (Y_1) e a duração das paradas do veículo por quilômetro rodado (Y_5).

$$Y_4 = \frac{Y_5}{Y_1} \quad (15)$$

Tabela 7. Relação dos parâmetros escolhidos para análise dos dados.

No	Parâmetro	Unidade	Rank	
1	Velocidade média	km/h	1	Y ₂
2	Velocidade média (apenas com o veículo em movimento)	km/h	1	
3	Velocidade máxima	km/h	0,25	
4	Desvio padrão da velocidade	km/h	1	
5	Desvio padrão da velocidade (apenas com o veículo em movimento)	km/h	1	
6	Percentual de tempo em baixa velocidade (<20kph)	%	1	Y ₃
7	Percentual de tempo em alta velocidade (>70kph)	%	0,5	
8	Percentual de tempo em aceleração	%	1	
9	Percentual de tempo em desaceleração	%	1	
10	Percentual de tempo em velocidade de cruzeiro	%	1	
11	Percentage de tempo em marcha lenta	%	1	
12	Aceleração máxima	m/s ²	0,25	
13	Desaceleração máxima	m/s ²	0,25	
14	Aceleração média	m/s ²	1	
15	Desaceleração média	m/s ²	1	
16	Desvio padrão da aceleração	m/s ²	1	Y ₅
17	Desvio padrão da desaceleração	m/s ²	1	
18	Percentual de tempo em baixa aceleração (-1 ms ⁻² to 1 ms ⁻²)	%	1	
19	Quantidade de paradas e partidas por quilômetro	un	1	
20	Duração do tempo das paradas por quilômetro	s	1	
21	Tempo de ciclo	s	1	Y ₁
22	Trânsito	%	1	Y ₄

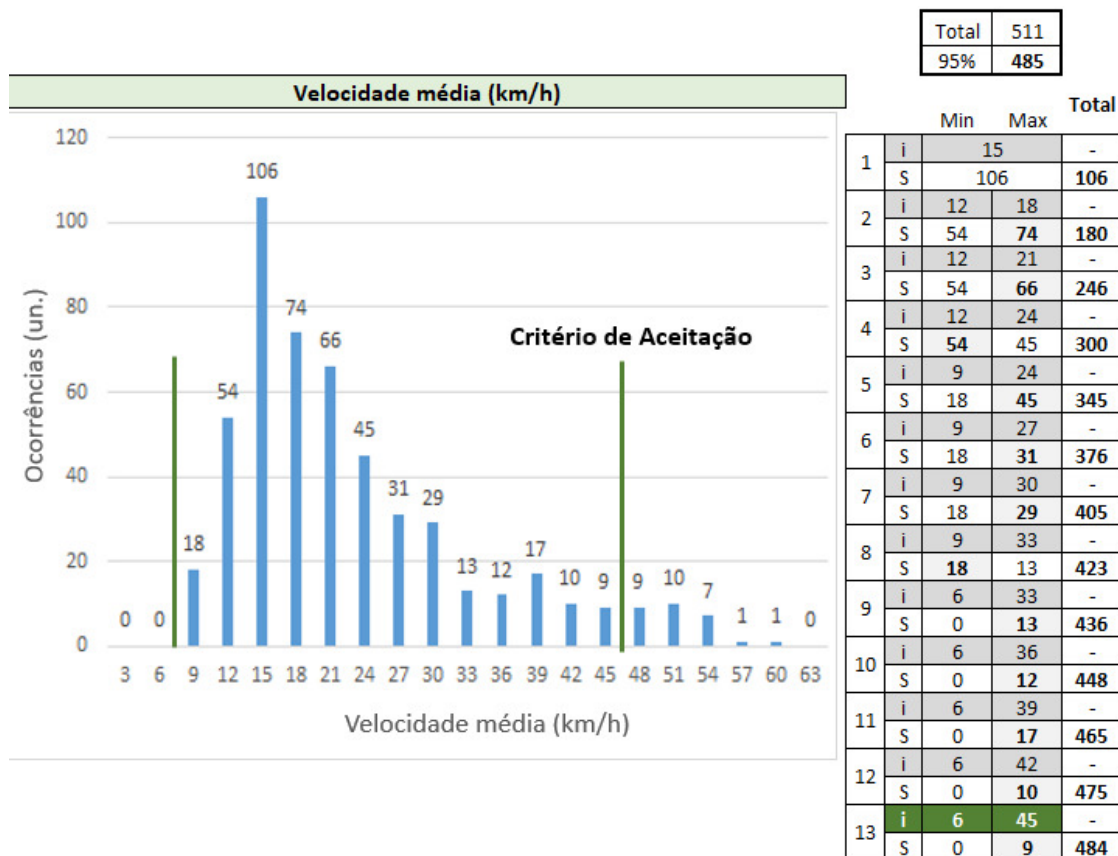
Fonte: Adaptado de Kondaru et al. (2018).

3.1.2.2.3.2 Definição do critério de aceitação

Após a definição e a classificação dos parâmetros Y_s, é iniciado o processo de seleção das corridas. Neste momento, a avaliação é feita de forma preliminar em busca de apenas identificar as corridas que se encontram fora do critério de aceitação proposto.

Para isso, um gráfico histograma é gerado com o objetivo de melhor visualizar a distribuição das corridas para cada um dos Y_s disponíveis. Também é aplicada uma taxa de aproveitamento de 95%, referente ao critério de aceitação de toda a população (KONDARU et al., 2018).

A Figura 36, traz o exemplo de um histograma para a velocidade média (Y₂). Para esse caso, o critério de aceitação é estabelecido entre 6 e 45 km/h, em que 26 corridas estão fora dessa condição.

Figura 36. Gráfico histograma da velocidade média (Y_2).

Fonte: Elaboração própria.

3.1.2.2.3.3 Definição dos índices BI e SI

Segundo KONDARU et al. (2018), dois índices (BI e SI) também devem ser criados para auxiliar no método de seleção das corridas no trabalho.

- **Índice Binário (BI)**
- **Índice de Similaridade (SI)**

O índice binário é definido a partir dos limites do critério de aceitação proposto (1 = dentro do limite, 0 = fora do limite). O objetivo é eliminar as 26 corridas que apresentem a menor soma do índice BI, para os 4 parâmetros (Y_s) disponíveis. Ao final do processo, a quantidade total de corridas é reduzida de 511 para 485.

Já o índice de similaridade SI é aplicado a fim de classificar as corridas em relação à média geral de toda a população para cada parâmetro Y. Ele é calculado pelo desvio

percentual absoluto (Dij), conforme equação (16). Se dá de forma que o termo X_{ij} é o valor do parâmetro para cada corrida, e A_i é a média dos valores do parâmetro para todas as corridas, assumindo-se as 24 rotas do trabalho.

$$D_{ij} = \left| \frac{X_{ij} - A_i}{A_i} \right| \times 100 \quad (16)$$

i = número do parâmetro; j = número da corrida.

A Tabela 8, traz um exemplo de definição dos índices BI e SI para a Rota 36. Nesse caso, apenas duas corridas foram descartadas (Nº 2 e 6), por apresentarem a menor soma total de BI, com relação a todas as corridas da rota. O mesmo critério é aplicado para as outras 23 rotas do trabalho afim de eliminar o total de 26 corridas.

O método de seleção das corridas através do índice SI é mostrado em detalhes na próxima seção.

Tabela 8. Exemplo do método de seleção dos dados para todas as corridas.

Rota 36																			
Y ₁ - Tempo de Ciclo (s)																			
Corridas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Status	551	447	548	564	699	497	1154	686	630	587	765	593	656	566	675	2109	2837	1652	Média Rota 36
BI	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	901
SI	0.59	0.67	0.59	0.58	0.48	0.63	0.15	0.49	0.53	0.57	0.43	0.56	0.52	0.58	0.50	0.56	1.10	0.22	Total 24 Rotas
Y ₂ - Vel. Média (km/h)																			
Corridas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Status	51.9	49.1	40.8	49.5	52.1	51.3	52.3	44.3	57.4	38.1	50.8	43.0	13.9	41.7	17.7	25.1	10.4	45.4	Média Rota 36
BI	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	40.8
SI	1.24	1.12	0.76	1.13	1.25	1.21	1.26	0.91	1.47	0.64	1.19	0.86	0.40	0.80	0.24	0.08	0.55	0.96	Total 24 Rotas
Y ₃ - Acel. Média (m/s ²)																			
Corridas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Status	0.34	0.41	0.40	0.30	0.32	0.37	0.27	0.33	0.34	0.38	0.25	0.43	0.41	0.29	0.47	0.58	0.41	0.38	Média Rota 36
BI	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.37
SI	0.44	0.32	0.35	0.51	0.47	0.40	0.56	0.45	0.44	0.38	0.60	0.30	0.32	0.52	0.24	0.06	0.32	0.37	Total 24 Rotas
Y ₄ - Trânsito (%)																			
Corridas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Status	0.3%	0.1%	0.3%	0.3%	1%	1%	6%	0.4%	0.4%	0.3%	2%	0.3%	0.4%	0.2%	0.4%	12%	20%	9%	Média Rota 36
BI	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3.0%
SI	0.99	1.00	0.99	0.99	0.96	0.96	0.77	0.98	0.98	0.99	0.92	0.99	0.98	0.99	0.98	0.54	0.23	0.65	Total 24 Rotas
BI total	3	1	4	3	3	2	3	4	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	
SI total	3.26	-	2.69	3.22	3.16	-	2.73	2.84	3.43	2.57	3.14	2.70	2.23	2.89	1.96	1.23	2.20	2.20	

Fonte: Elaboração própria.

Sentido C-B

Grupo 7		Grupo 8		Grupo 9		Grupo 10		Grupo 11		Grupo 12	
Sentido:	C-B	Sentido:	C-B	Sentido:	C-B	Sentido:	C-B	Sentido:	C-B	Sentido:	C-B
Horário:	7:00	Horário:	8:00	Horário:	9:00	Horário:	17:00	Horário:	18:00	Horário:	19:00
Rota	Corrida	Rota	Corrida	Rota	Corrida	Rota	Corrida	Rota	Corrida	Rota	Corrida
01G	10	01G	8	01G	12	02G	4	01G	17	02G	6
01G	22	01G	14	01G	24	03G	1	02G	2	02G	18
02G	13	02G	11	02G	15	03G	10	02G	8	03G	3
02G	22	02G	20	02G	24	04G	1	03G	5	03G	12
03G	7	03G	19	03G	9	04G	13	03G	14	04G	3
03G	21	03G	24	03G	23	05G	1	04G	5	04G	15
04G	10	04G	8	04G	12	05G	18	04G	17	05G	3
04G	22	04G	20	05G	8	06G	4	05G	16	05G	20
05G	6	05G	4	05G	14	06G	10	05G	22	06G	5
05G	12	05G	10	06G	2	09G	21	06G	3	06G	11
06G	1	06G	6	06G	9	13G	16	06G	12	09G	12
06G	7	06G	8	09G	9	13G	19	09G	2	09G	23
09G	7	09G	5	09G	17	14G	13	09G	14	12G	8
12G	1	09G	19	12G	3	14G	16	12G	5	12G	15
13G	4	12G	11	12G	9	15G	1	12G	17	13G	18
13G	10	13G	14	13G	6	15G	19	13G	2	13G	24
14G	1	13G	22	13G	12	17G	4	13G	8	14G	15
14G	22	14G	8	14G	3	17G	19	14G	5	14G	18
15G	5	14G	11	15G	15	18G	19	14G	20	15G	3
15G	16	15G	6	15G	23	18G	22	15G	2	15G	21
17G	10	15G	17	17G	12	22G	10	15G	20	17G	6
18G	4	17G	14	18G	6	22G	16	17G	2	17G	21
18G	13	17G	17	18G	15	23G	10	17G	8	18G	21
22G	4	18G	2	22G	6	23G	13	18G	8	18G	24
22G	22	18G	17	22G	24	25G	13	18G	11	22G	12
25G	4	22G	2	23G	21	25G	19	22G	14	22G	18
25G	22	22G	8	23G	24	29G	7	22G	20	23G	12
29G	4	23G	8	25G	6	29G	15	23G	2	23G	18
29G	18	23G	26	25G	24	32G	15	23G	5	25G	15
32G	7	25G	2	29G	6	33G	1	25G	11	25G	21
32G	18	25G	8	29G	20	33G	19	25G	17	29G	9
33G	6	29G	2	32G	9	35G	16	29G	13	29G	17
35G	4	29G	11	32G	20	36G	13	29G	22	32G	14
35G	7	32G	2	33G	8	37G	7	32G	11	32G	17
36G	4	32G	5	33G	23	38G	10	32G	22	33G	3
36G	10	33G	10	35G	6	39G	10	33G	5	33G	21
37G	4	33G	14	35G	9	39G	23	33G	17	35G	18
38G	1	35G	2	36G	6			35G	14	36G	15
39G	1	35G	11	36G	12			36G	17	37G	9
39G	4	36G	2	37G	6			37G	11	38G	12
		36G	8	38G	3			38G	5	39G	12
		37G	2	39G	3			39G	18	39G	26
		38G	8	39G	6			39G	21		
		39G	8								
		39G	15								

Fonte: Elaboração própria.

Depois de formados os 12 grupos, 3 corridas são escolhidas para cada grupo, levando-se em consideração os 3 critérios de seleção abaixo:

- **Critério 1:** Escolha da corrida com o menor valor SI (absoluto). Representa a corrida mais próxima da mediana da população.
- **Critério 2:** Escolha da corrida com o maior valor SI (positivo). Representa a corrida com o maior índice de trânsito da população (maior tempo de ciclo).
- **Critério 3:** Escolha da corrida com o maior valor SI (negativo). Representa a corrida com o menor índice de trânsito da população (menor tempo de ciclo).

A Tabela 10, mostra um exemplo da aplicação dos critérios de seleção (1, 2 e 3) para a escolha de 3 corridas do Grupo 1 (01G / 7; 09G / 4; 35G / 10). No total, são selecionadas 36 corridas a partir dos 12 grupos disponíveis.

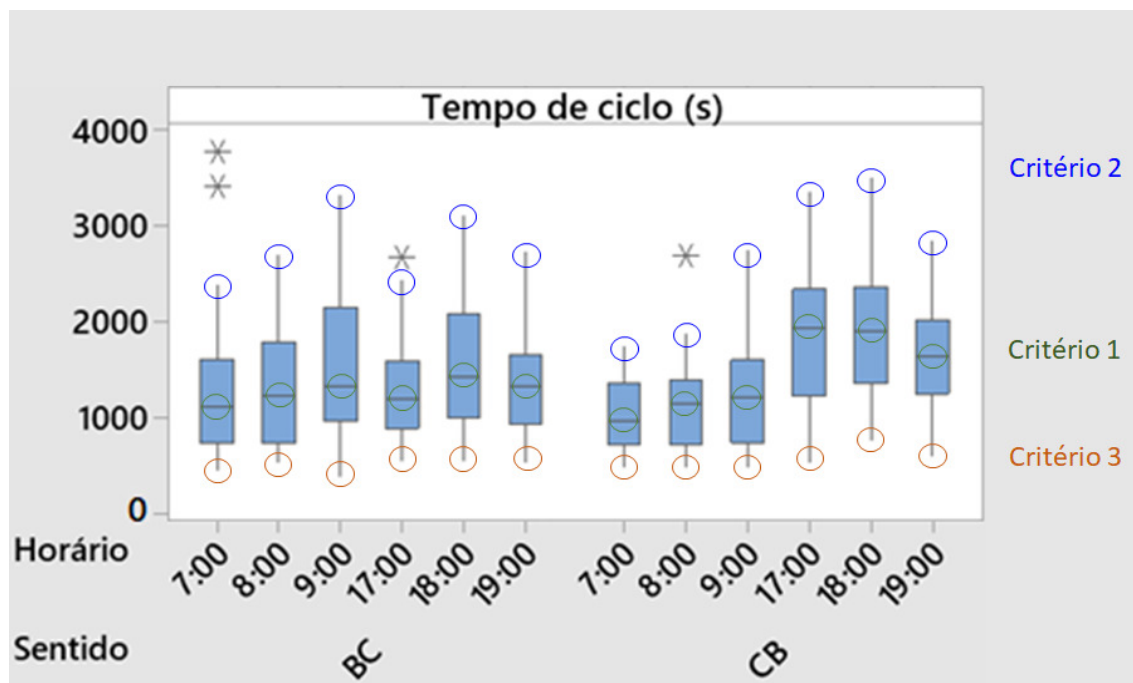
Tabela 10. Método de seleção de 3 corridas através dos índices SI.

Sentido (B-C)	Rota	01G	01G	02G	04G	04G	05G	09G	09G	35G	35G	36G	36G	37G	39G
Horário (7:00)	Corrida	7	13	10	7	19	9	4	18	1	10	1	7	1	7
Tempo de ciclo (s)	Status	1189	1023	1231	1378	1529	2327	2262	2368	694	546	551	547	454	990
	Índice SI	0,08	0,07	0,12	0,25	0,39	1,12	1,06	1,15	0,37	0,5	0,5	0,5	0,59	0,1
Trânsito (%)	Status	21%	20%	16%	23%	20%	36%	44%	35%	0%	0%	0%	0%	0%	35%
	Índice SI	0,1	0,15	0,32	0,02	0,15	0,54	0,92	0,53	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	0,54
Vel. Média V>0 (km/h)	Status	23,2	25,8	24,1	24,4	21,1	20,3	20,0	16,2	40,3	51,3	52,0	52,3	52,1	20,0
	Índice SI	0,02	0,03	0,01	0,00	0,07	0,08	0,09	0,17	0,33	0,55	0,57	0,58	0,57	0,09
Acel. Média (m/s ²)	Status	0,73	0,68	0,84	0,67	0,67	0,58	0,69	0,58	0,35	0,34	0,34	0,27	0,35	0,58
	Índice SI	0,05	0,01	0,14	0,00	0,00	0,07	0,02	0,06	0,24	0,25	0,24	0,3	0,24	0,07
Índice SI Total		0,25	-0,27	0,58	0,28	0,61	1,81	2,09	1,91	-1,93	-2,3	-2,3	-2,28	-2,28	-0,79
		Critério 1			Critério 2			Critério 3							

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, a Figura 37 mostra de forma mais abrangente, através de um gráfico *boxplot*, a escolha das corridas para cada um dos grupos. É possível observar a variação do perfil de trânsito, através dos tempos de ciclo, e também a forma como os critérios de seleção (1, 2 e 3) são aplicados para a escolha das 36 corridas.

Figura 37. Gráfico Boxplot da variação das corridas para os 12 grupos definidos.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.2.2.3.5 Definição das corridas

A Tabela 11, mostra as 36 corridas escolhidas a partir do método de seleção estatístico, assim como as características gerais dos seus respectivos parâmetros (Y_1 , Y_2 , Y_3 e Y_4).

Tabela 11. Definição das 36 corridas a serem utilizadas.

Sentido		B-C						C-B						
Horário		7:00	8:00	9:00	17:00	18:00	19:00	7:00	8:00	9:00	17:00	18:00	19:00	
Critério 1	Rota	01G	12G	13G	17G	25G	18G	15G	04G	09G	05G	38G	06G	16,735
	Corrida	7	2	23	1	14	9	16	20	9	18	5	5	
	Tempo de ciclo (s)	1189	1175	1357	1088	1444	1552	946	1058	1397	1877	1887	1765	
	Trânsito (%)	21%	27%	25%	23%	23%	26%	22%	27%	32%	31%	25%	21%	
	Vel. Média (km/h)	23.2	26.0	24.6	25.9	15.7	31.8	22.1	32.2	27.1	23.8	17.9	16.5	
	Acel. Média (m/s ²)	0.73	0.76	0.59	0.60	0.70	0.52	0.78	0.71	0.77	0.55	0.52	0.63	
Critério 2	Rota	09G	39G	17G	15G	01G	13G	18G	33G	22G	04G	14G	03G	30,117
	Corrida	4	5	15	11	5	9	13	10	6	1	5	3	
	Tempo de ciclo (s)	2262	1796	3309	2282	3091	2721	1729	1600	2728	3017	3390	2192	
	Trânsito (%)	44%	55%	55%	46%	43%	41%	31%	13%	41%	50%	34%	45%	
	Vel. Média (km/h)	20.0	13.2	12.2	12.1	11.0	14.2	30.0	33.1	16.0	16.1	9.1	16.8	
	Acel. Média (m/s ²)	0.69	0.53	0.53	0.58	0.54	0.72	0.50	0.46	0.76	0.72	0.61	0.58	
Critério 3	Rota	38G	38G	36G	35G	37G	36G	37G	35G	14G	33G	37G	33G	8,062
	Corrida	7	2	9	13	8	18	4	11	3	19	11	3	
	Tempo de ciclo (s)	464	532	497	609	541	630	487	571	516	1217	754	1244	
	Trânsito (%)	2%	0%	1%	0%	0%	0%	2%	1%	1%	10%	4%	7%	
	Vel. Média (km/h)	60.4	52.8	57.4	46.0	43.7	45.4	50.4	51.0	42.3	43.3	33.0	41.5	
	Acel. Média (m/s ²)	0.27	0.35	0.31	0.36	0.28	0.38	0.41	0.33	0.69	0.39	0.49	0.37	
Tempo total de ciclo													54.914s	15h

Fonte: Elaboração própria.

3.1.3 Definição das curvas de velocidade para São Paulo

Finalizado o método de seleção das corridas, o próximo passo é definir os ciclos de velocidade que representam as características de trânsito da cidade de São Paulo. Portanto, as corridas disponíveis na Tabela 11 são uniformemente agrupadas para cada um dos 3 critérios estabelecidos, dando origem às respectivas curvas de velocidade.

3.1.3.1 Filtro passa-baixo

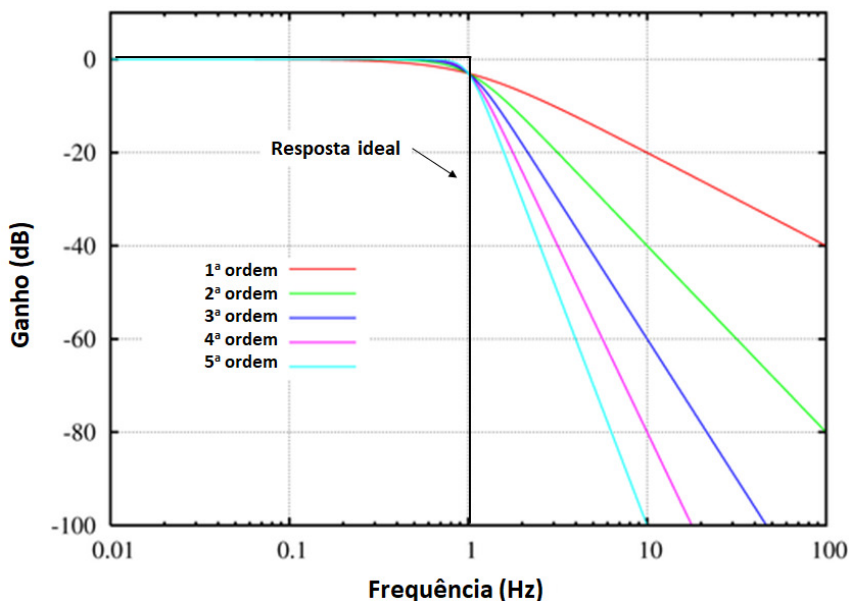
Porém, antes das curvas de velocidade serem geradas, um filtro de sinal passa-baixo é aplicado para diminuir a interferência dos ruídos oriundos da aquisição do GPS.

Conforme WIKIPEDIA (2020), os filtros são uma importante ferramenta capaz de selecionar várias gamas de frequência de um sinal. O filtro passa-baixo, por exemplo, permite

a passagem de sinais cujas frequências naturais são menores que a frequência de corte do filtro, atenuando as amplitudes das frequências maiores.

A Figura 38 representa as ordens de grandeza de resposta do filtro. Para o trabalho, é utilizado um filtro de ordem 5, com frequência de corte de 0,2 Hz, e sinal de entrada de 1,0Hz.

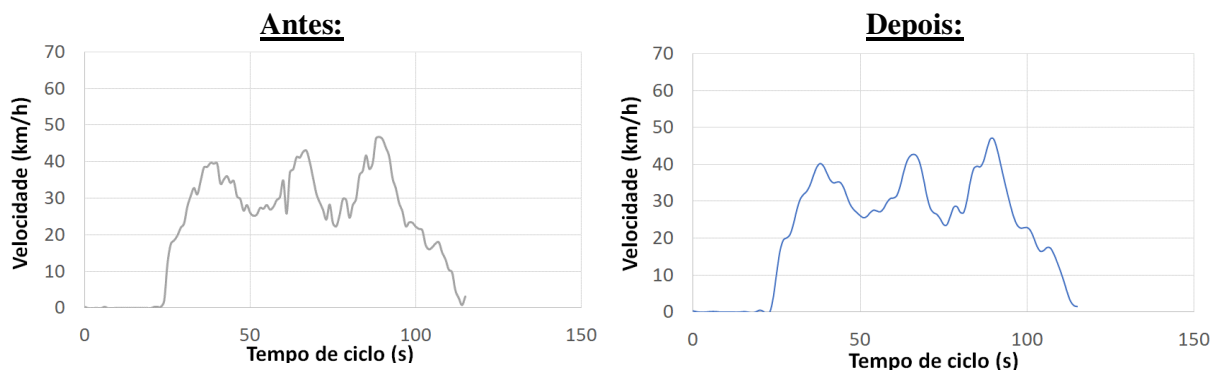
Figura 38. Respostas em frequência de filtros Butterworth de diversas ordens.



Fonte: Adaptado de Wikipedia (2020).

Já a Figura 39 mostra um comparativo antes / depois, da aplicação do filtro passa-baixo, em um trecho de velocidade do trabalho, em que é possível perceber as melhorias do sinal apresentadas. Dessa forma, é possível garantir uma maior robustez dos resultados analisados.

Figura 39. Exemplo de aplicação do filtro Bandworth.



Fonte: Elaboração própria.

3.1.3.2 Curvas de velocidade

Após concluído o processo de aplicação do filtro passa-baixo, 3 ciclos de velocidade podem ser finalmente gerados para a cidade de São Paulo. Eles são formados através da junção das 12 corridas, para os 3 critérios de seleção obtidos.

- **Ciclo SP-1 (Critério 1):** Índice de trânsito 25%; Velocidade média 23,9 km/h.
- **Ciclo SP-2 (Critério 2):** Índice de trânsito 41%; Velocidade média 17 km/h.
- **Ciclo SP-3 (Critério 3):** Índice de trânsito 2%; Velocidade média 47,3 km/h.

Os ciclos SP-2 e SP-3 demonstram os maiores e menores índices de trânsito na cidade de São Paulo respectivamente. Enquanto o SP-1 representa uma condição intermediária entre eles. Quanto maior o índice de trânsito, menor a velocidade média do veículo ao longo do trajeto.

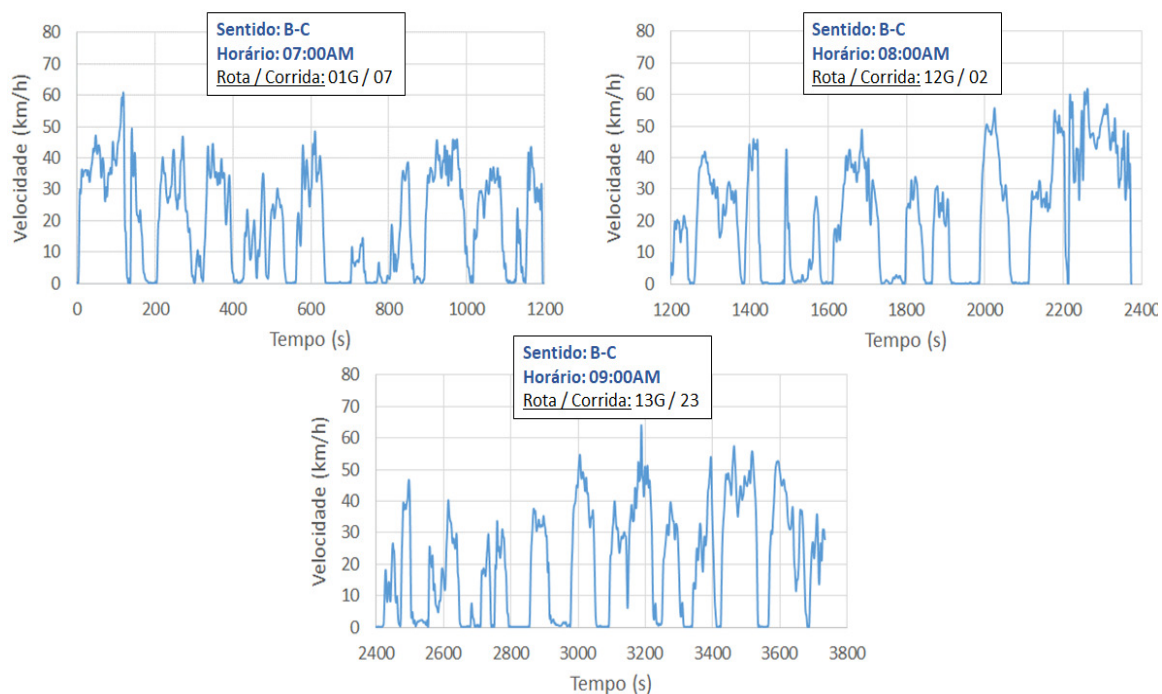
A Figura 40 ilustra, como exemplo, os trechos de velocidade das 12 corridas selecionadas para o ciclo SP-1, levando em consideração os períodos do dia (Manhã / Tarde) e os sentidos do trânsito (B-C / C-B). Apesar de ser um ciclo de velocidade característico de São Paulo, é possível observar que ele apresenta um perfil de trânsito similar aos grandes centros urbanos, com altos índices de congestionamento (anda / para), e cuja velocidade máxima não ultrapassa 60 km/h.

Por fim, a Figura 41 representa as curvas de velocidade dos 3 ciclos para cada um dos critérios de seleção, em que é possível observar as suas diferenças. Eles serão utilizados como dados de entrada do modelo de simulação, a fim de medir o consumo energético do BEV.

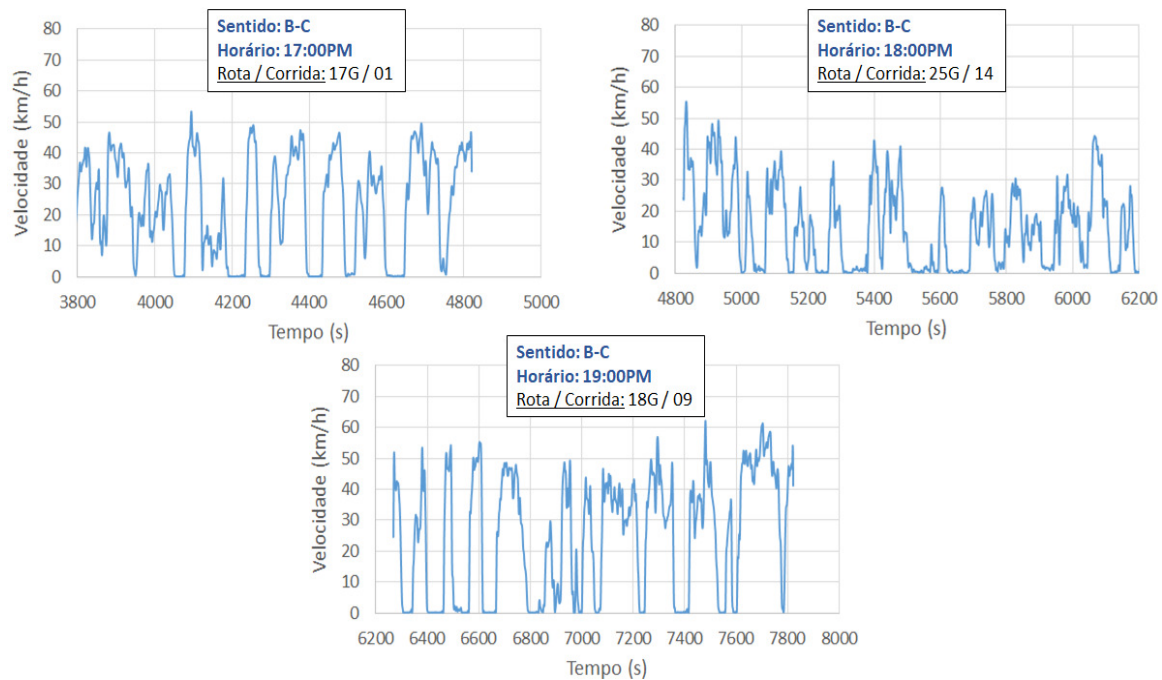
Uma análise mais detalhada dos 3 ciclos também é feita na próxima seção, comparando as características das curvas de velocidade da cidade de São Paulo, com os demais ciclos do trabalho.

Figura 40. Exemplo dos trechos de velocidades obtidos para as corridas do Critério 1.

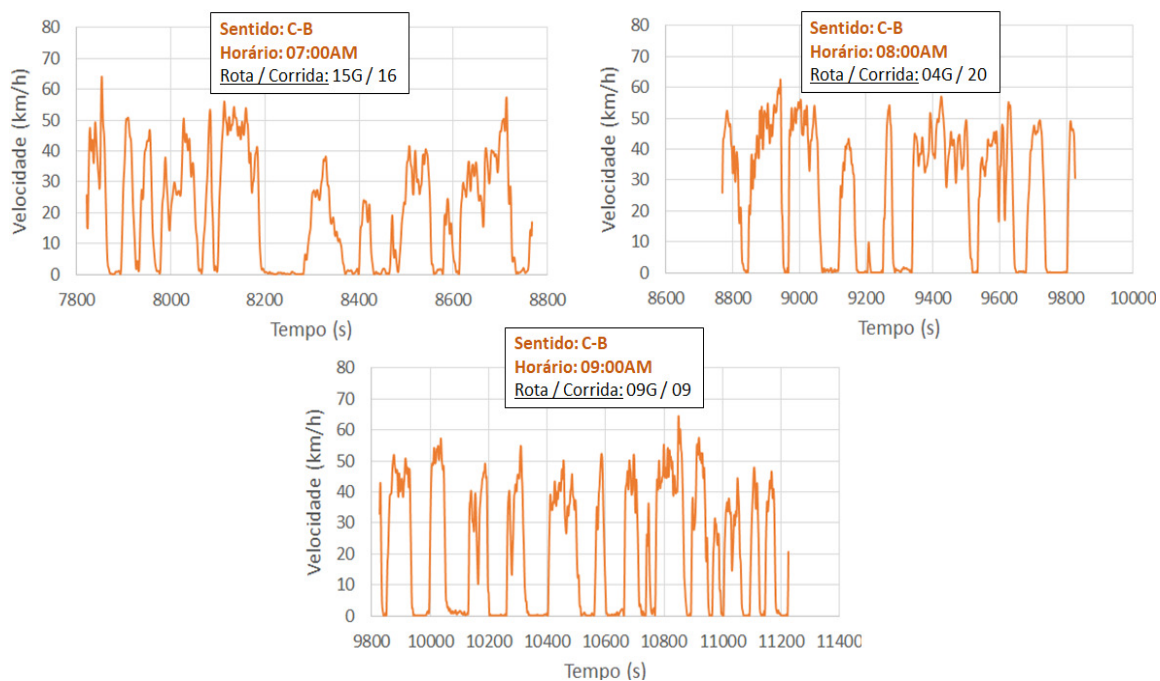
Sentido B-C (Manhã)



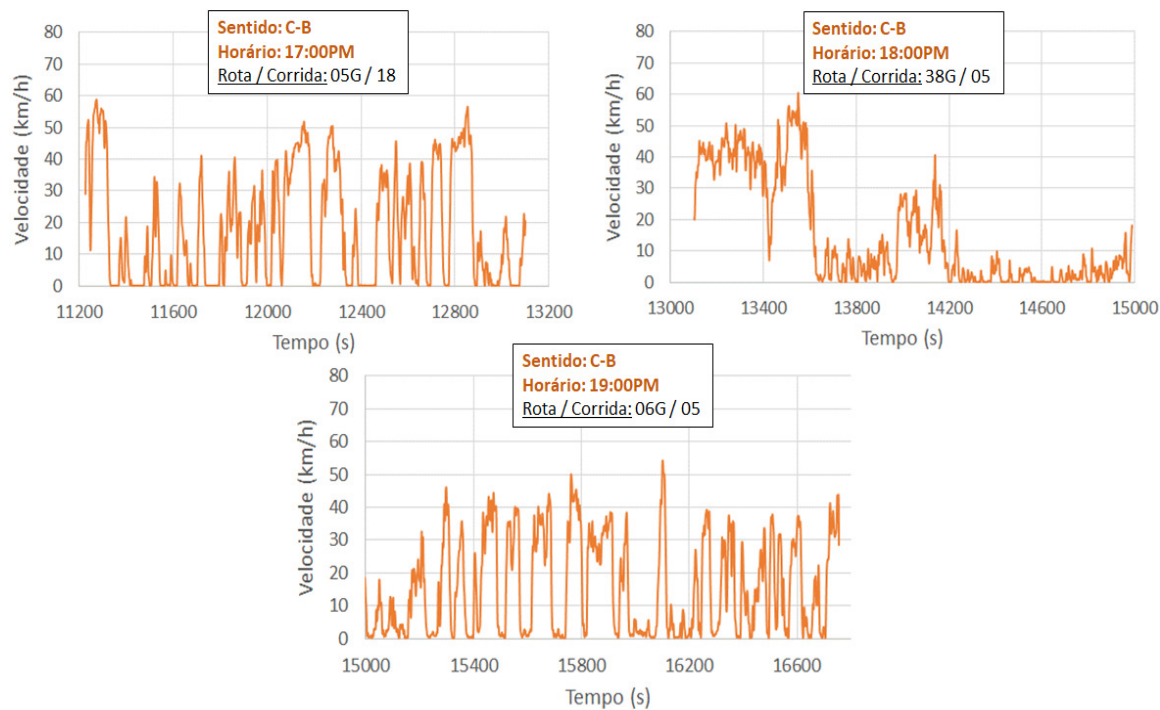
Sentido B-C (Tarde)



Sentido C-B (Manhã)

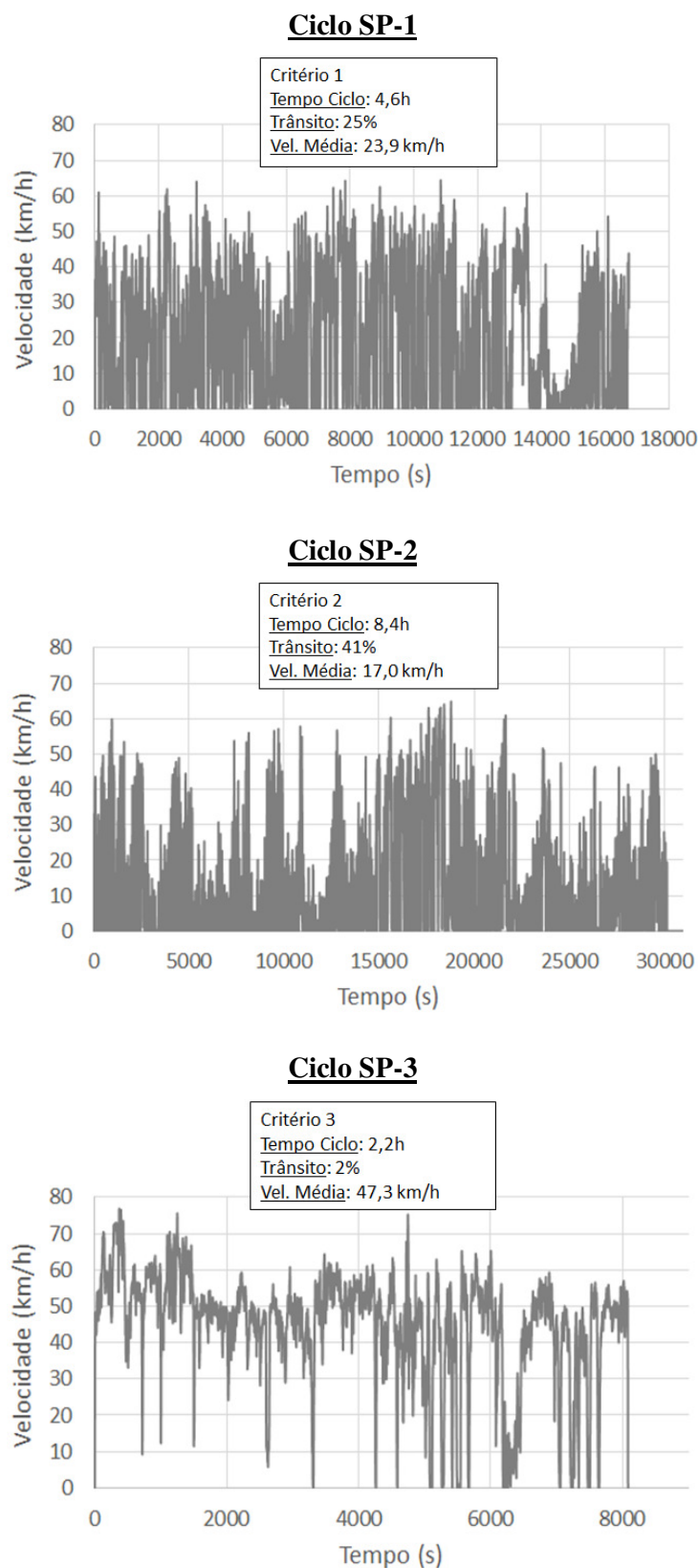


Sentido C-B (Tarde)



Fonte: Elaboração própria.

Figura 41. Ciclos de velocidade de São Paulo para os 3 critérios disponíveis.



Fonte: Elaboração própria.

3.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

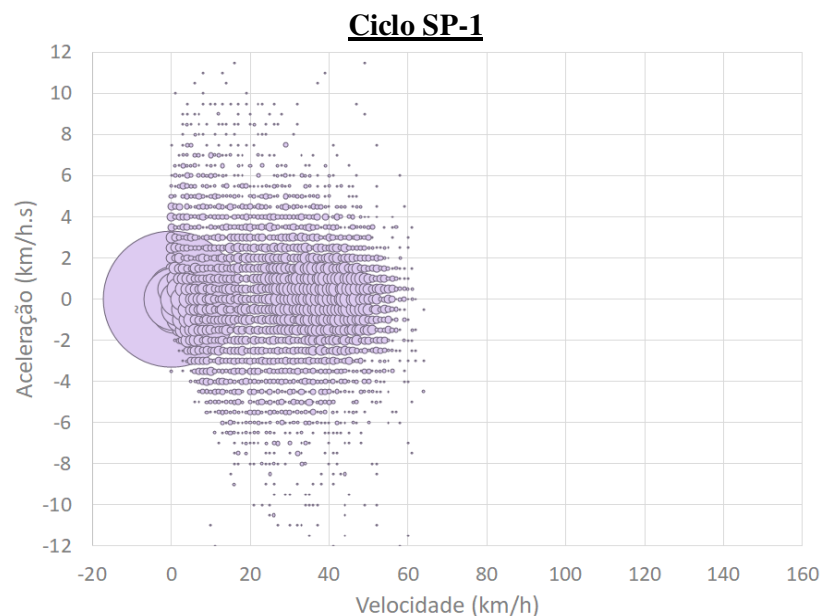
Os 3 ciclos de velocidade da Figura 41 representam as condições de trânsito na cidade de São Paulo. Apesar das curvas concebidas terem alguns aspectos comuns a outros grandes centros urbanos, como por exemplo os elevados índices de congestionamento, elas também possuem características específicas da região, que são retratadas a seguir.

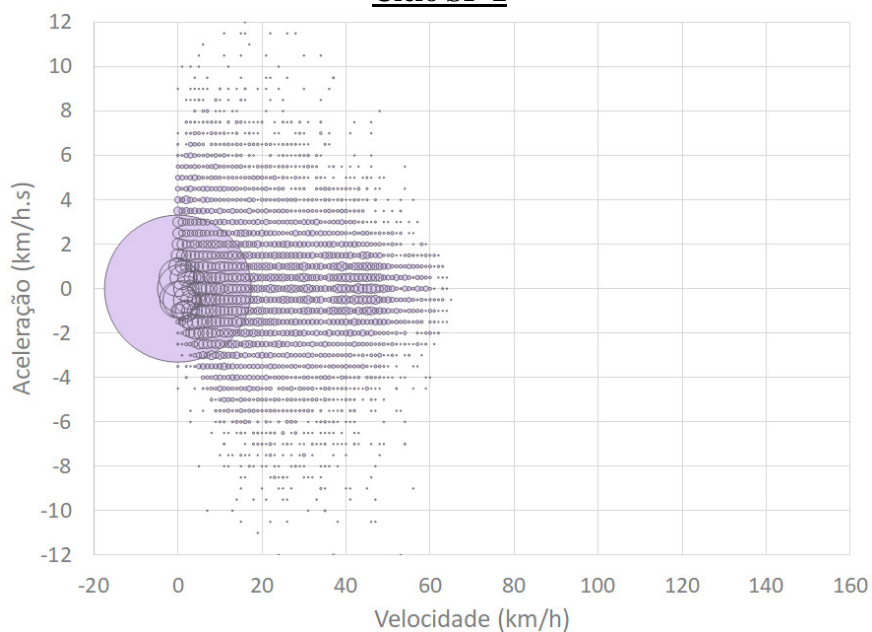
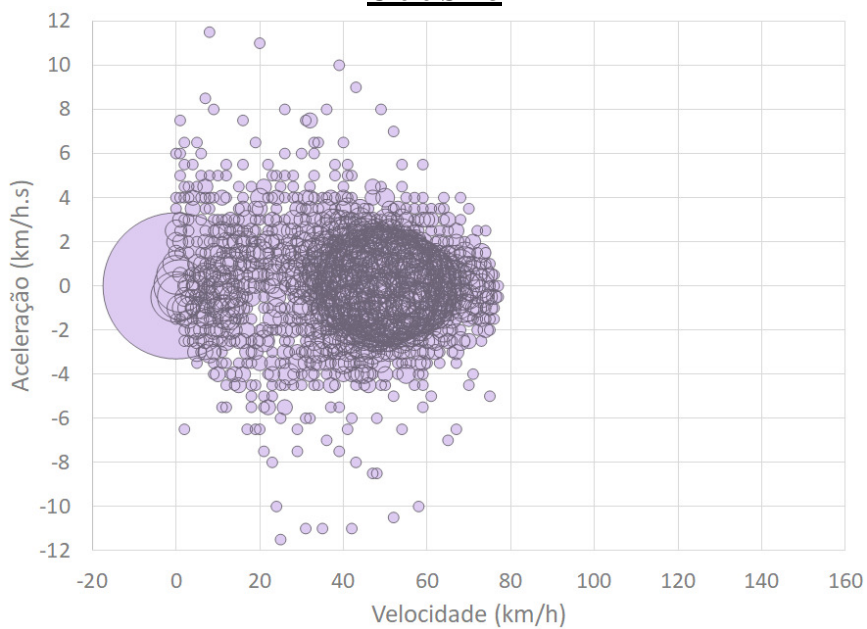
3.2.1 São Paulo

Um gráfico bolha é utilizado como referência para mostrar as individualidades dos ciclos de velocidade SP-1, SP-2 e SP-3, conforme Figura 42. A localização do centro das bolhas indica o status da velocidade (eixo x) e aceleração (eixo y) do veículo. A quantidade total de bolhas representa o número de pontos da aquisição, e a sua área refere-se ao período de tempo que o veículo permanece naquela condição.

- Ciclo SP-1: Bolhas de tamanho pequeno, concentradas entre os limites de 0-60 km/h (velocidade) e +/- 12 km/hs (aceleração).
- Ciclo SP-2: Bolhas de tamanho pequeno, dispersas entre os limites de 0-60 km/h (velocidade) e +/- 12 km/hs (aceleração).
- Ciclo SP3: Bolhas de tamanho médio, concentradas entre os limites de 0-80 km/h (velocidade) e +/- 12 km/hs (aceleração).

Figura 42. Gráficos bolha que representam o trânsito de São Paulo para os 3 ciclos.



Ciclo SP-2**Ciclo SP-3**

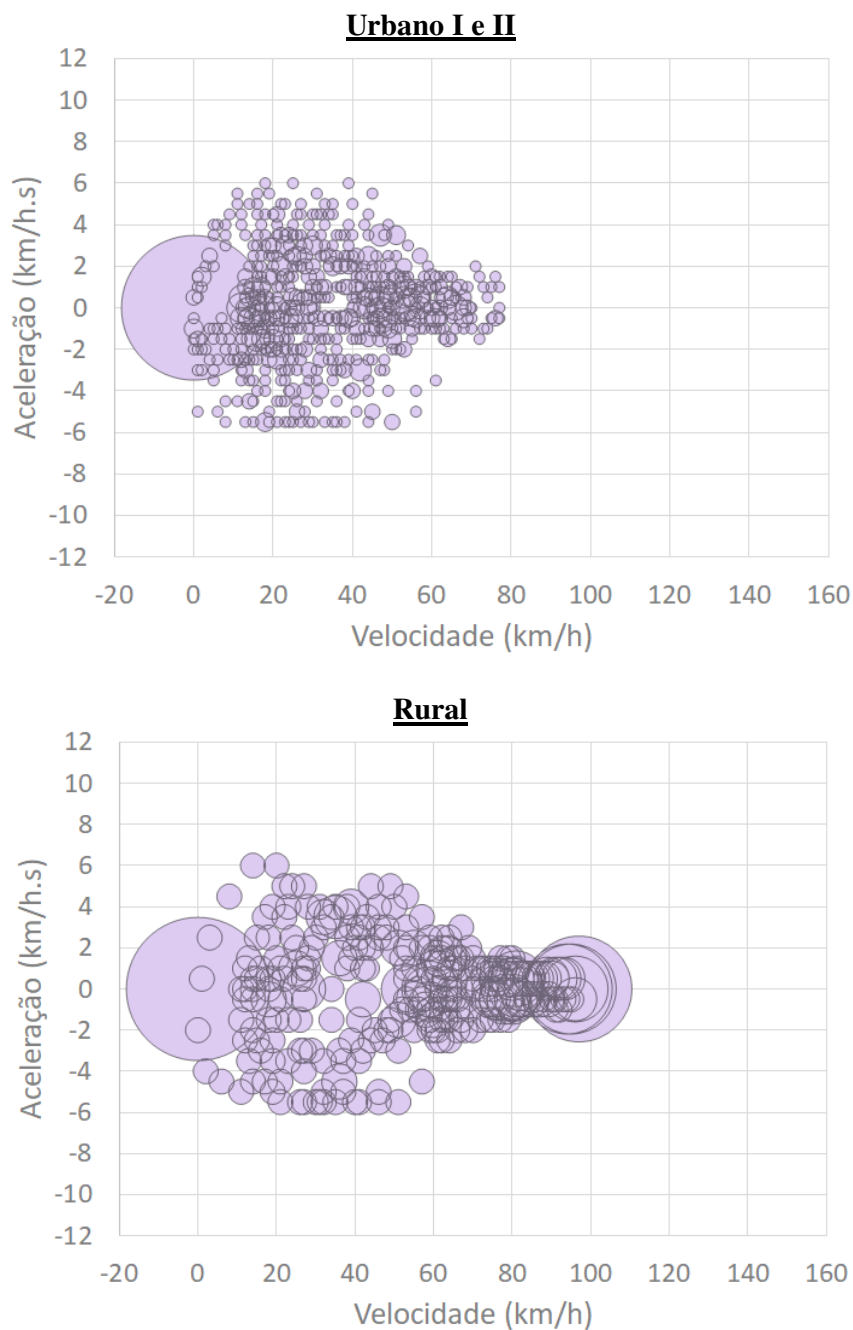
Fonte: Elaboração própria.

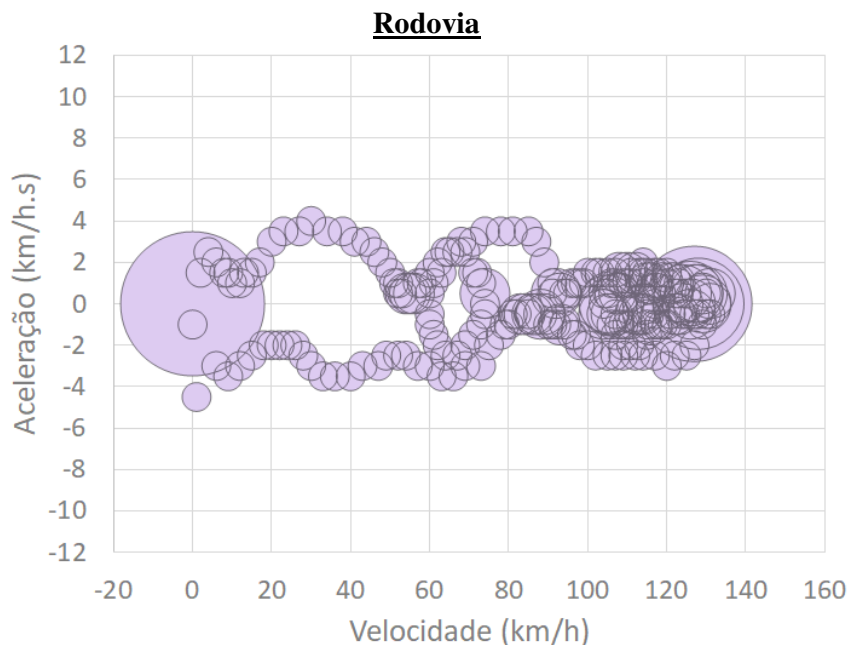
Os gráficos da Figura 42, além de representarem as características de São Paulo, também são usados para comparar o perfil de trânsito da cidade com outros ciclos de velocidade do mundo: WLTP, NEDC, FTP75, US06, HWFET.

3.2.2 WLTP

WLTP é um ciclo de velocidade real, utilizado atualmente na homologação de veículos automotivos leves para a Europa. Ele é dividido em 4 fases (Urbano I, Urbano II, Rural e Rodovia). A Figura 43 ilustra os gráficos bolha que representam esse ciclo. A fim de robustecer a análise, os trechos Urbanos I e II são incluídos juntos no mesmo gráfico.

Figura 43. Gráficos bolha do ciclo WLTP.





Através da Figura 43, é possível observar que as fases Urbano I e II apresentam um perfil de direção similar ao ciclo SP-3. Isso se dá pois ambos possuem o mesmo intervalo de velocidade (0-80 km/h), e um período de tempo intermediário para todas as condições (bolhas de tamanho médio). A única diferença observada, é que, para o WLTP, o intervalo de aceleração é um pouco mais estável (± 6 km/hs) comparado ao SP-3 (± 12 km/hs).

Nas fases Rural e Rodovia, nota-se um comportamento de condução diferente. Os intervalos de aceleração são menores (± 4 km/hs), e os de velocidade maiores (0-140 km/h). Eles também possuem trechos de maiores períodos de tempos (bolhas de tamanho grande).

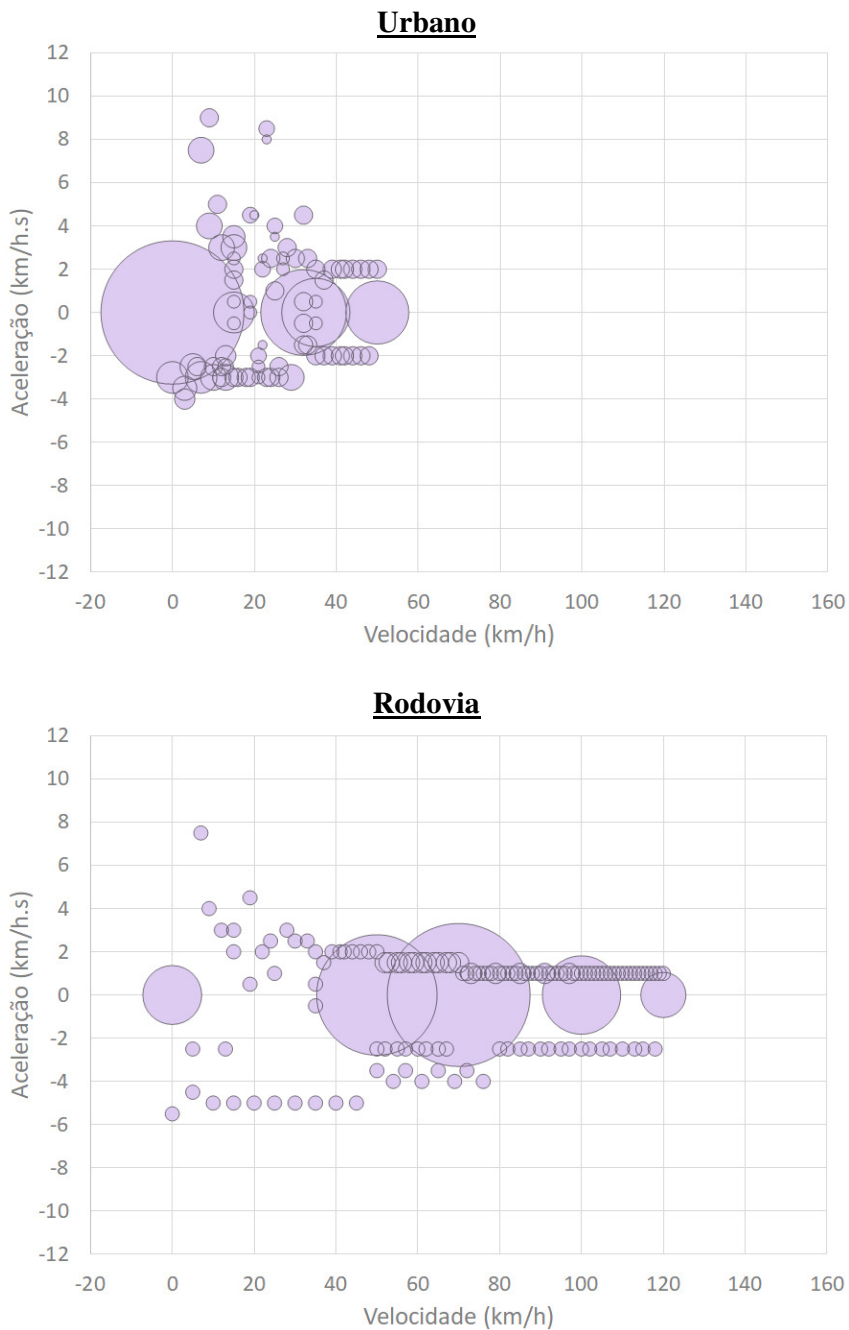
Para melhor equipará-lo aos ciclos de São Paulo, o WLTP é utilizado no trabalho de duas formas diferentes.

- WLTP-2: composto apenas por 2 fases (Urbano I e II).
- WLTP-4: composto por 4 fases (Urbano I e II, Rural e Rodovia).

3.2.3 NEDC

O ciclo NEDC é uma curva teórica de velocidade, utilizada na homologação de veículos automotivos para várias regiões do mundo. Ele é representado por 2 fases (Urbano e Rodovia). A Figura 44 mostra os gráficos bolha para esse ciclo.

Figura 44. Gráficos bolha do ciclo NEDC.



Fonte: Elaboração própria.

Comparado às curvas de São Paulo, nota-se que o NEDC tem poucas características em comum. No geral ele é um ciclo mais estável, com uma condição de longos períodos de tempo para todo o ciclo (bolhas de tamanho grande). O intervalo de aceleração é menor (± 4 km/h.s), já o de velocidade é maior (0-120 km/h), devido à influência da fase de rodovia.

Para o trabalho, o ciclo NEDC também é utilizado de duas formas distintas, separando as fases Urbana e Rodovia, assim como feito para o WLTP.

- NEDC-1: composto apenas pela fase Urbana.
- NEDC-2: composto pelas fases Urbana e Rodovia.

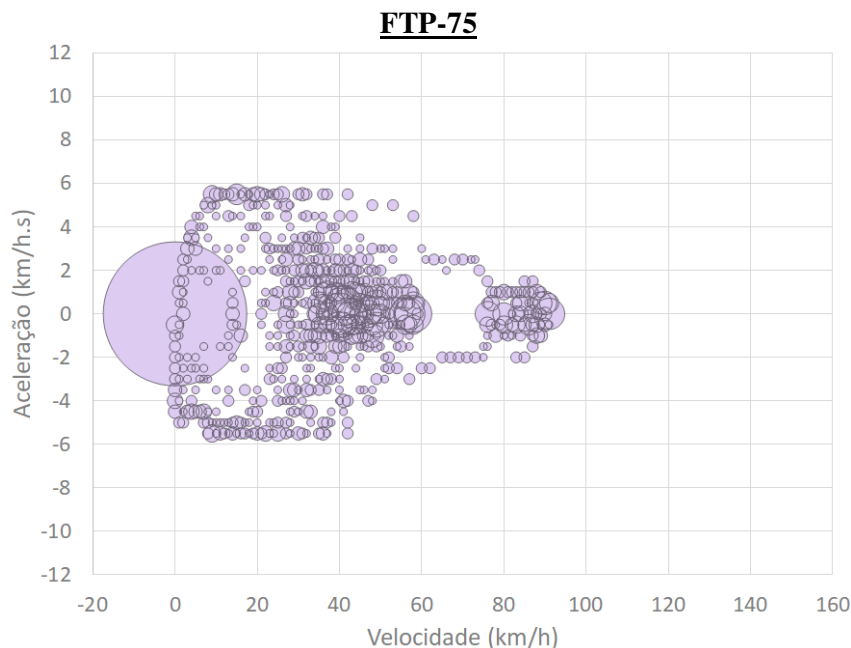
3.2.4 FTP-75 / HWFET

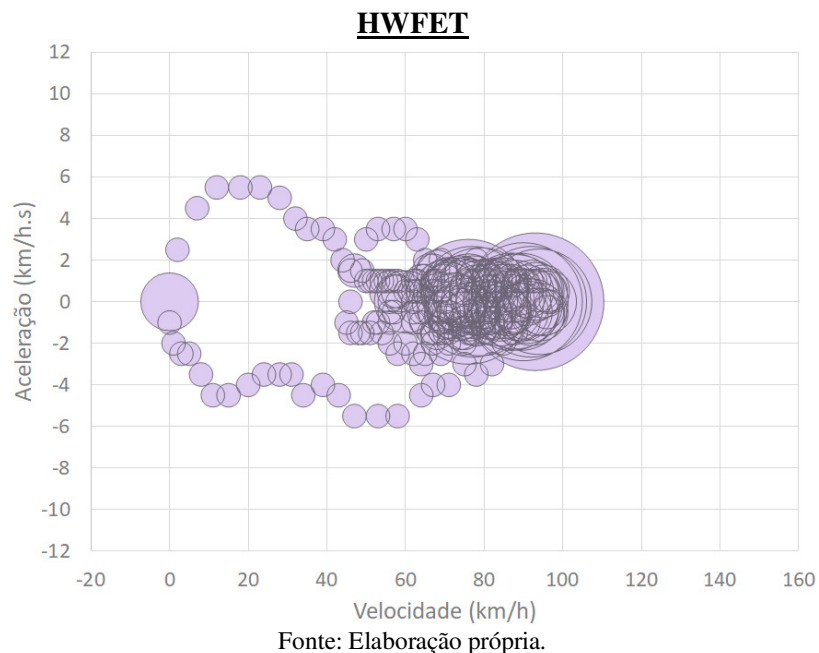
FTP-75 e HWFET são curvas padrões de velocidade utilizadas na homologação de veículos automotivos leves para alguns países do mundo, dentre eles o Brasil. O FTP-75 representa a fase urbana, enquanto o HWFET a de rodovia.

A Figura 45 ilustra os gráficos bolha para ambas as fases. É possível observar certa semelhança entre os ciclos FTP-75 e WLTP-2, principalmente com relação aos períodos de tempo (bolhas de tamanho médio), e aos intervalos de aceleração (+/- 6 km/h). Enquanto para o intervalo de velocidade, o limite superior do FTP-75 é um pouco mais abrangente (0-90 km/h).

Por fim, o HWFET apresenta características opostas aos ciclos SP, com períodos longos e altas velocidades (80 – 100km/h). Ele é muito similar ao WLTP-4 na fase de rodovia.

Figura 45. Gráficos bolha dos ciclos FTP-75 / HWFET.

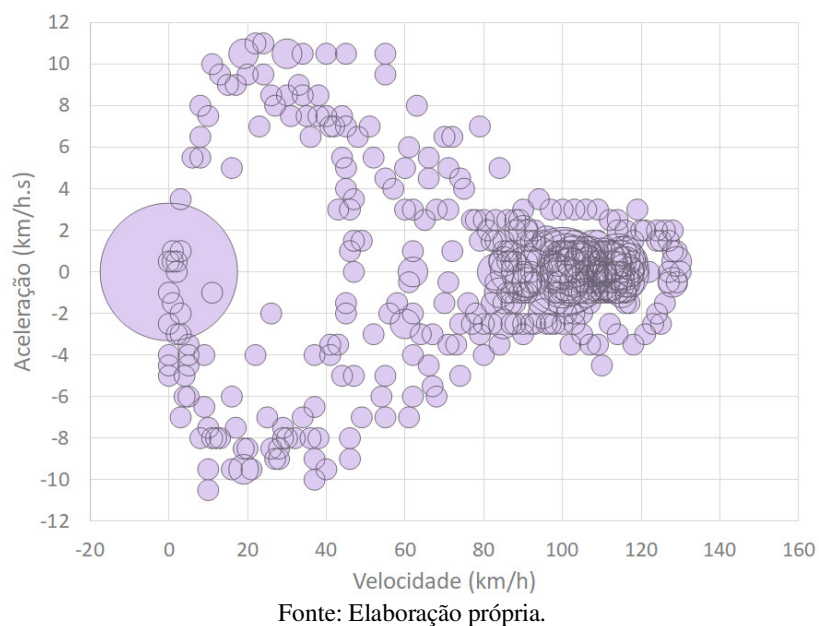




3.2.5 US06

US06 é uma curva padrão de velocidade criada exclusivamente para os Estados Unidos. Ele é um ciclo representado por rodovias de alta velocidade (0-130 km/h), mas que também tem trechos urbanos de elevada aceleração (+/- 12 km/h.s) e períodos intermediários de tempo (bolhas de tamanho médio). A Figura 46 ilustra essa condição.

Figura 46. Gráfico bolha do ciclo US06.



Apesar de ter um perfil de direção próprio, diferente dos outros, o US-06 é utilizado como referência no trabalho, com o intuito de verificar o consumo de energia do BEV em um ciclo com velocidades e acelerações extremas.

3.2.6 Comentários

Através da análise dos gráficos bolha, foram constatadas algumas particularidades do perfil de trânsito da cidade de São Paulo, retratadas através dos ciclos de velocidade SP-1, SP-2, SP-3. Alguns exemplos são mostrados a seguir.

Os ciclos SP-1 e SP-2 apresentam características comuns entre si, mas que se diferem dos demais ciclos do trabalho. Ambos possuem um intervalo de velocidade limitado a 60 km/h, um perfil de aceleração disperso entre +/- 12 km/hs, assim como um curto período de tempo para cada trajeto percorrido (bolhas de tamanho pequeno). Esses padrões representam os elevados índices de congestionamento da região.

Já o SP-3, possui um perfil de direção similar aos ciclos urbanos WLTP-2 e FTP-75, que representam as condições de trânsito em uma cidade, porém com uma maior fluidez dos veículos. Eles têm o mesmo intervalo de velocidade (0-80 km/h) e apresentam longos períodos de tempo do trajeto (tamanho das bolhas médio). Apesar das similaridades, é ainda possível notar algumas diferenças, pois o SP-3 possui um maior intervalo de aceleração (+/- 12 km/hs) comparado aos outros dois ciclos (+/- 6 km/hs).

Os demais ciclos do trabalho WLTP-4, NEDC-1, NEDC-2, HWFET e US06, mesmo não tendo características comuns aos ciclos de São Paulo, possuem um perfil de trânsito próprio, correspondente à região de sua origem. Dessa forma, eles são utilizados no trabalho como uma referência, a fim de medir e comparar o consumo energético do veículo entre os ciclos.

4 ETAPA 2: OBTENÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO

O próximo passo é definir o conteúdo de um *software* de simulação computacional, que seja capaz de medir o consumo de energia de um BEV, para os ciclos de velocidade disponíveis. Assim, os resultados obtidos para São Paulo, são comparados aos demais ciclos, com o objetivo de determinar a viabilidade de implementação do veículo na região.

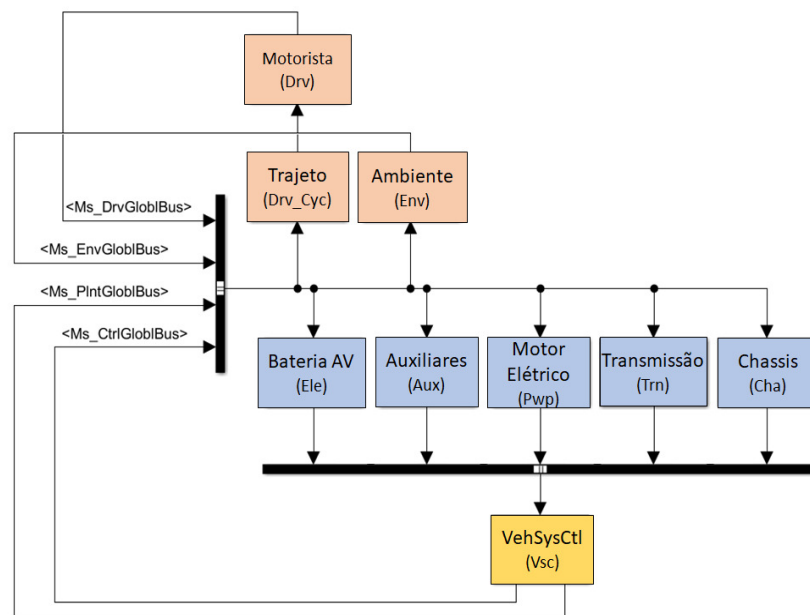
4.1 METODOLOGIA

4.1.1 Definição do software de simulação

O trabalho utiliza o *software* de uma empresa privada, através das plataformas do MATLAB e do Simulink, como base para a simulação. Primeiramente, são estabelecidos os parâmetros de entrada do modelo, que representam tanto a funcionalidade dos sistemas do veículo como as particularidades do seu teste.

A Figura 47, ilustra um exemplo de configuração da ferramenta no Simulink. São utilizados como parâmetros de entrada, os principais subsistemas de um BEV (bateria AV, auxiliares, motor elétrico, transmissão e chassi), conforme descrito na Figura 15, e também algumas variáveis externas ao modelo (motorista, ambiente e trajeto).

Figura 47. Configuração do modelo de simulação de um BEV.



Fonte: Elaboração própria.

4.1.2 Definição dos parâmetros de entrada

Basicamente os parâmetros de entrada da simulação são classificados de duas formas:

- Variáveis externas: Representam as condições de teste do veículo.
- Subsistemas do veículo: Descrevem a funcionalidade do veículo.

No trabalho as variáveis externas levam em consideração as condições de teste do veículo em dinamômetro. Enquanto os subsistemas do veículo têm como base as características de um BEV já existente no mercado. A Tabela 12 ilustra os detalhes. Por motivo de confidencialidade a marca e o modelo do veículo não são descritos.

Tabela 12. Descrição das características gerais do BEV na simulação.

Características gerais	
Ano de Lançamento:	2011
Mercado:	Estados Unidos
Classe:	Compacto C
Categoria:	Hatchback (5 portas)
Tamanho:	4,4m (C) x 1,8m (L) x 1,5m (A)
Massa (m_v):	1.651kg

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2.1 Variáveis externas

A Tabela 13 ilustra o status das variáveis externas consideradas no modelo de simulação do trabalho.

- Ambiente: Representa as condições de pressão, temperatura e velocidade do vento, determinadas de acordo com os padrões de teste em dinamômetro.
- Trajeto: Retrata tanto a variação de velocidade do veículo ao longo do tempo, conforme o ciclo escolhido, como a inclinação da rampa (α), que no trabalho é assumida sempre como 0%.
- Motorista: Utiliza-se as configurações pré-existentes do modelo de simulação, para acompanhar o perfil de aceleração e desaceleração do ciclo de velocidade.

Tabela 13. Características das variáveis externas da simulação.

Ambiente	• Temperatura (15°C), Pressão (97 kPa), Vel. Vento (0 km/h).
Trajeto	• Ciclos de velocidade: SP-1/2/3, WLTP-2/4, NEDC-1/2, FTP-75, HYFET, US06. • Inclinação da rampa: 0%
Motorista	• Perfil de direção definido a partir do ciclo de velocidade.

Fonte: Elaboração própria

4.1.2.2 Subsistemas do veículo

A Tabela 14 ilustra os detalhes dos sistemas e subsistemas de um BEV na simulação. A seguir eles são descritos em mais detalhes, segundo a sua funcionalidade.

Tabela 14. Definição dos sistemas / subsistemas do BEV na simulação.

Sistemas	Subsistemas	Detalhes
Elétrico	Auxiliares	• Curva de consumo de energia do sistema.
Carregamento	Bateria AV	• Características gerais da bateria (tipo, número de células, tensões e capacidade máxima).
Propulsão	Motor Elétrico	• Curva de torque do motor. • Mapa de perda de potência do motor.
	Transmissão	• Características gerais da transmissão (tipo, número de marchas, relação e eficiência). • Mapa de perda de torque da transmissão.
Chassis	Chassis	• Características gerais da carroceria (área frontal, coef. aerodinâmico e peso). • Características gerais das rodas (raio dinâmico e coef. de resistência a rolagem do pneu). • Curva de força resistiva do veículo.

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2.2.1 Auxiliares

O consumo de energia do sistema elétrico é calculado no modelo de simulação, a partir da equação (4). Assume-se apenas a potência requerida pelo módulo de iluminação, equivalente a 0,3 kWh (DUANGSRIKAEW et al., 2018) e o seu tempo total de funcionamento, que varia de acordo com a duração do ciclo de velocidade.

4.1.2.2.2 Bateria AV

O sistema de carregamento, é constituído basicamente no modelo de simulação pela bateria AV do veículo elétrico. O carregador não é considerado, pois assume-se que a bateria está carregada com 100% da energia disponível no início do teste.

A Tabela 15, descreve as principais características do sistema, que são assumidas como referência para o veículo durante a simulação. Ele é formado por uma bateria AV de íon-lítio, composta por 430 células, o que resulta em uma tensão máxima de 364 V. Assim como possibilita o acúmulo de energia de 33,5 kWh, correspondente as equações (2) e (3), e uma autonomia de 185 km. A temperatura de trabalho da bateria é assumida constante a 25 °C.

Tabela 15. Descrição das características gerais da bateria AV na simulação.

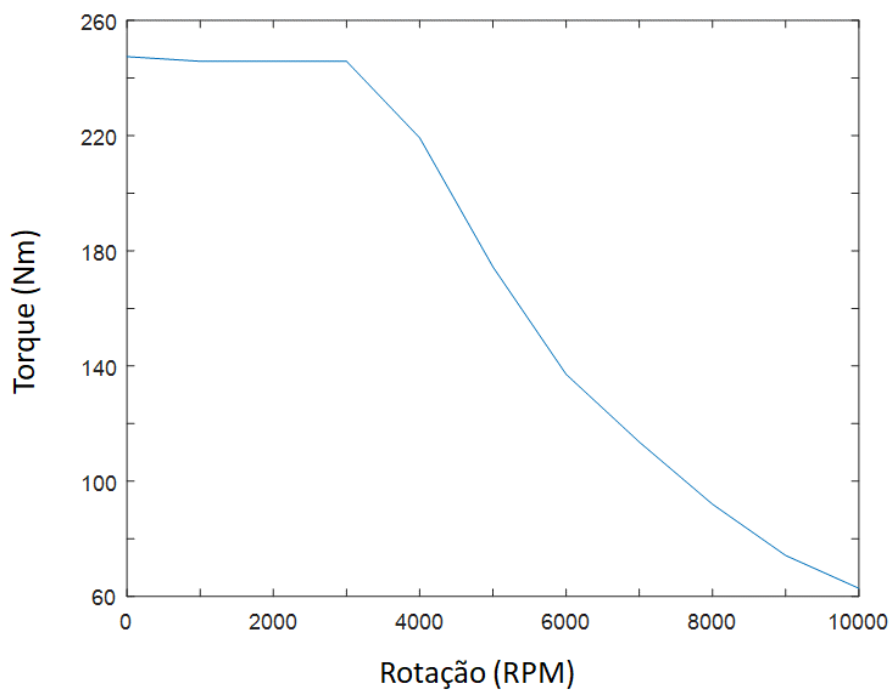
Características	Status
Tipo de Bateria	Íon - lítio
Quantidade de células	430 un
Tensão Min / Máxima	300 / 364 V
Capacidade total de energia	33,5 kWh
Autonomia	185 km (ciclo FTP-75)
Temperatura de uso	25 °C

Fonte: Elaboração própria.

4.1.2.2.3 Motor Elétrico

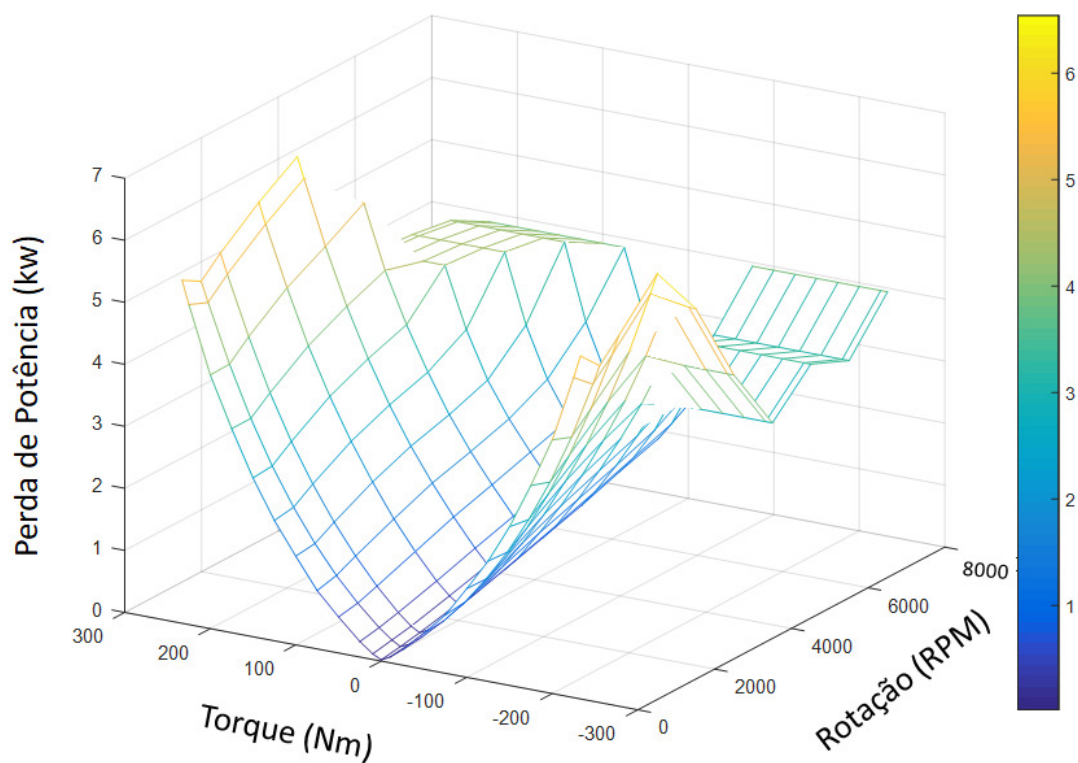
No modelo de simulação, a configuração do subsistema do motor elétrico é representada pela curva de torque (T_{Mot}), através da Figura 48 e pelo mapa de perda de potência (L_{Mot}), segundo a Figura 49. Ambas as curvas variam a sua magnitude, conforme a rotação do motor (ω).

Figura 48. Curva de torque motor elétrico.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 49. Mapa de perda de potência motor elétrico.



Fonte: Elaboração própria.

O torque do motor elétrico T_{Mot} é utilizado para calcular a força trativa do veículo, correspondente a equação (9), enquanto as perdas L_{Mot} são para obter o consumo total de potência do sistema, segundo a equação (6). Isso se dá tanto para o modo de propulsão (torque positivo), como para o de regeneração (torque negativo). É possível observar, para esse caso, que as perdas do sistema se diferem para ambos os modos, além de variar de acordo com o aumento do torque requerido do motor.

4.1.2.2.4 Transmissão

O subsistema da transmissão é composto no modelo de simulação pelas características descritas na Tabela 16. Ela é do tipo automática, de apenas 1 marcha.

Tabela 16. Descrição das características da transmissão na simulação.

Características	Status
Tipo de Transmissão	Automática
Quantidade de marchas	1
Relação (i_g)	7,18
Eficiência (η_t)	96 %

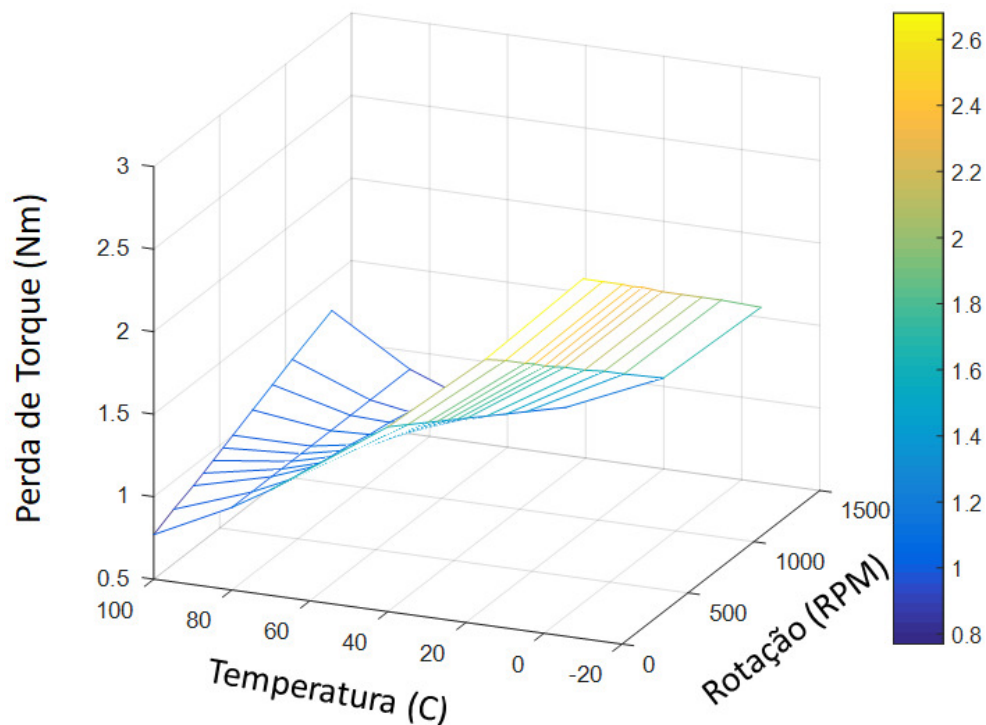
Fonte: Elaboração própria.

Através dos termos de relação de marcha (i_g) e eficiência (η_t) da transmissão, é possível estabelecer a força de tração do veículo, em conjunto com o torque do motor elétrico, a partir da equação (9). O termo i_g é uma constante definida com base no número de dentes das engrenagens, enquanto η_t é o valor referente às perdas de torque internas dos componentes da transmissão.

A Figura 50, mostra o mapa das perdas de torque da transmissão, conforme a rotação do seu eixo de saída, e com a temperatura de óleo. Por meio da figura, observa-se que as maiores perdas do conjunto ocorrem previamente ao aquecimento do óleo e também devido às suas altas rotações.

Para o trabalho, assume-se uma eficiência (η_t) constante de 96%, levando em consideração as perdas específicas desse modelo.

Figura 50. Mapa de perda de torque da transmissão.



Fonte: Elaboração própria.

4.1.2.2.5 Chassis

O subsistema do chassis, atribui as configurações da carroceria e das rodas do veículo no modelo de simulação. A Tabela 17 detalha os valores das principais características do sistema. A partir dos termos A_f , C_d , m_v , r_d e f é possível calcular a força resistivas do veículo, através das equações (10), (11), (12) e (13).

Tabela 17. Descrição das características do chassis do veículo na simulação.

Características	Status
Área frontal (A_f)	2,3
Coef. de arrasto aerodinâmico (C_d)	0,313
Massa (m_v):	1.651 kg
Raio dinâmico das rodas (r_d)	0,637 m
Coef. de resistência a rolagem dos pneus (f)	7,1

Fonte: Elaboração própria.

Uma outra forma de se obter a força resistiva é através da equação (17). Ela leva em conta a velocidade do veículo ($V_{\text{veículo}}$), e os fatores F_0 , F_1 e F_2 , que são medidos a partir de testes físicos do veículo em pista (ABNT, 2010).

$$F_R(t) = F_0 + F_1 * V_{\text{veículo}}(t) + F_2 * V_{\text{veículo}}(t)^2 \quad (17)$$

Caso a força resistiva do veículo seja calculada a partir da equação (17), os termos da Tabela 17 não são levados em conta, pois eles já estão atribuídos nos fatores F_0 , F_1 e F_2 .

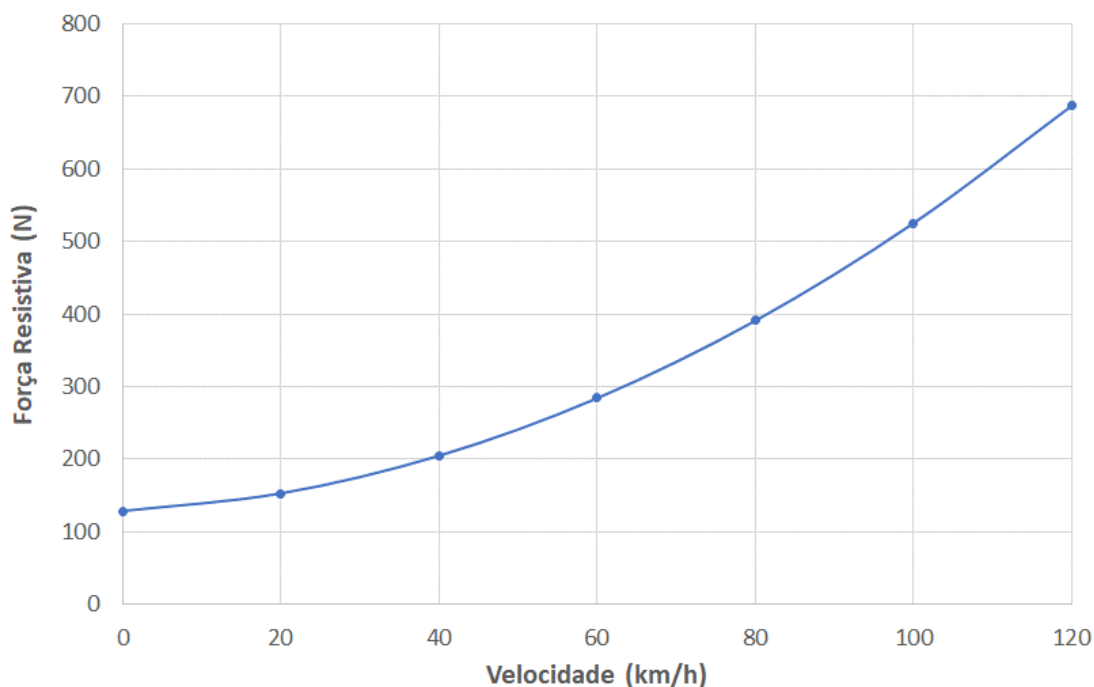
Para o trabalho, o modelo de simulação considera apenas a força resistiva obtida a partir da equação (17). A Tabela 18 mostra os respectivos fatores de pista (F_0 , F_1 e F_2), enquanto a Figura 54 ilustra a variação da força resistiva do BEV, de acordo com a sua velocidade.

Tabela 18. Descrição das características do chassis do veículo na simulação.

Fatores de Pista	Status
F_0	128,5 N
F_1	0,5266 N/km/h
F_2	0,034424 N/(km/h) ²

Fonte: Elaboração própria.

Figura 51. Força resistiva do veículo para cada velocidade.



Fonte: Elaboração própria.

4.1.3 Obtenção do consumo de energia do BEV

Após definidos os parâmetros de entrada da simulação, o próximo passo é medir o consumo de energia do BEV, para cada um dos ciclos de velocidade.

No trabalho, o consumo de energia (E_{total}) é avaliado por quilômetro rodado, a partir da equação (18). Ele leva em consideração a energia total da bateria AV (E_{Bat}) e a autonomia do veículo (d_{total}).

$$E_{total} = \frac{E_{Bat}}{d_{total}} \quad (18)$$

Segundo EHSANI et al. (2005), E_{Bat} pode ser determinada pela equação (19), em que são considerados ambos os modos de funcionamento do motor elétrico (propulsor e gerador), a potência da bateria AV (P_{Bat}), e a porcentagem de energia útil (β) fornecida pelo sistema regenerativo de frenagem do veículo.

$$E_{Bat} = \int_{propulsor} P_{Bat} dt + \int_{gerador} (\beta * P_{Bat}) dt \quad (19)$$

De acordo com RHODES et al. (2017), além da equação (19), o consumo da energia da bateria (E_{Bat}) também pode ser representada pela equação (1), levando em conta as demandas dos sistemas de propulsão e elétrico do BEV. Dessa forma, pode-se assumir que toda a potência fornecida pela bateria (P_{Bat}) é consumida pelo motor elétrico (P_{Mot}), e pelo módulo de iluminação (P_{Aux}) do veículo, conforme demonstrado na equação (20).

$$P_{Bat}(t) = P_{Mot}(t) + P_{Aux}(t) \quad (20)$$

No trabalho P_{Aux} é considerada constante 0,3 kW, e P_{Mot} é estabelecido a partir das equações (6) e (7), levando em consideração o torque (T_{Mot}) e as perdas (L_{Mot}) do motor elétrico. A equação (21) ilustra essa condição.

$$P_{Bat}(t) = (T_{Mot}(t) * \omega(t)) + L_{Mot}(t) + P_{Aux} \quad (21)$$

A rotação (ω) pode ser calculada a partir da equação (22) (EHSANI et al., 2005). Ela é obtida através da demanda de velocidade do veículo ($V_{veículo}$) durante o ciclo e leva em consideração o raio dinâmico do pneu (r_d) e a relação de marcha da transmissão (i_g).

$$\omega(t) = \frac{30}{\pi} * \frac{V_{\text{veículo}}(t) * i_g}{r_d} \quad (22)$$

Enquanto o torque do motor elétrico (T_{Mot}), pode ser definido pela equação (23), que é uma junção das equações (8) e (9), referentes à força de propulsão do veículo. Assim, assume-se como referência a massa do veículo (m_v), a aceleração do ciclo de velocidade (d_v/d_t), a força resistiva (F_R), o raio dinâmico da roda (r_d), a relação de marcha (i_g) e a eficiência da transmissão (η_{trans}) para calculá-lo.

$$T_{\text{Mot}}(t) = \frac{(m_v * \frac{d}{d_t} v(t) + F_R(t)) * r_d}{i_g * \eta_{\text{trans}}} \quad (23)$$

Por fim, ao substituir as equações (22) e (23) na equação (21), é possível calcular o consumo total de potência da bateria ao longo do ciclo de velocidade, conforme a equação (24), e também determinar o consumo de energia do BEV, a partir das equações (18) e (19).

$$P_{\text{Bat}}(t) = \frac{\left(m_v * \frac{d}{d_t} v(t) + F_R(t)\right) * 30 * V_{\text{veículo}}(t)}{\pi * \eta_{\text{trans}}} + L_{\text{Mot}}(t) \quad (24)$$

Os termos m_v e η_{trans} são constantes determinadas pelas características do veículo, segundo os valores estabelecidos nas Tabelas 17 e 18. Já as funções F_R , L_{Mot} , $V_{\text{veículo}}$ e d_v/d_t , variam a sua magnitude ao longo do tempo, dependendo do ciclo de velocidade utilizado.

4.1.4 Considerações

Por meio das equações apresentadas, é possível observar algumas constatações, que deverão ser levadas em conta na análise dos resultados da simulação.

- Quanto maior a velocidade ($V_{\text{veículo}}$) do ciclo, maior a rotação do motor (ω).
- Quanto maior a velocidade ($V_{\text{veículo}}$) e aceleração (d_v/d_t) do ciclo, maior o torque requerido para o motor elétrico (T_{Mot}), maior a potência da bateria (P_{Bat}) e maior o consumo de energia do veículo (E_{total}).
- Quanto maior a força resistiva (F_R) do veículo, maior a força trativa (F_T) requerida e maior o torque do motor elétrico (T_{Mot}).

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O principal objetivo do trabalho é medir o consumo de energia de um BEV, para os diferentes ciclos de velocidade disponíveis. Porém, além do consumo de energia, também são considerados no trabalho outros parâmetros de saída do modelo de simulação, a fim de robustecer o método de análise.

A seguir são apresentados os principais parâmetros:

- Potência da bateria (P_{Bat})
- Torque do motor (T_{Mot})
- Rotação do motor (ω)
- Aceleração do veículo (d_v/d_t)
- Energia da bateria (E_{Bat})
- Autonomia do veículo (d_{total})
- Consumo de energia do veículo (E_{total})

Para dar início às análises, o primeiro passo do trabalho é obter o consumo de energia do BEV para o ciclo FTP-75. Ele é utilizado como referência para correlacionar os resultados obtidos através da simulação, com o valor homologado do veículo no mercado Norte Americano.

Neste momento da análise, ainda é possível fazer alguns ajustes na configuração do modelo de simulação, caso seja necessário, de forma a garantir que os resultados obtidos sejam os mais representativos possíveis. Após garantir a sua correlação, o modelo pode ser utilizado para definir o consumo de energia do BEV na cidade de São Paulo (SP-1, SP-2, SP-3) e para os demais ciclos do trabalho (WLTP-2, WLTP-4, NEDC-1, NEDC-2, HWFET e US06).

4.2.1 FTP-75

O FTP-75 é um ciclo de velocidade padrão utilizado na homologação de veículos automotivos leves em muitos países do mundo, entre eles os Estados Unidos e o Brasil.

As Figuras 52, 53, 54 e 55 mostram os resultados obtidos através da simulação para a potência da bateria (P_{Bat}), torque do motor (T_{Mot}), rotação (ω), aceleração (d_v/d_t) e a energia total da bateria (E_{Bat}), ao longo do ciclo de velocidade.

A autonomia (d_{total}) e o consumo de energia do veículo (E_{total}) são reportados na Tabela 19. Eles são utilizados como referência para correlacionar os resultados da simulação com os valores homologados do BEV.

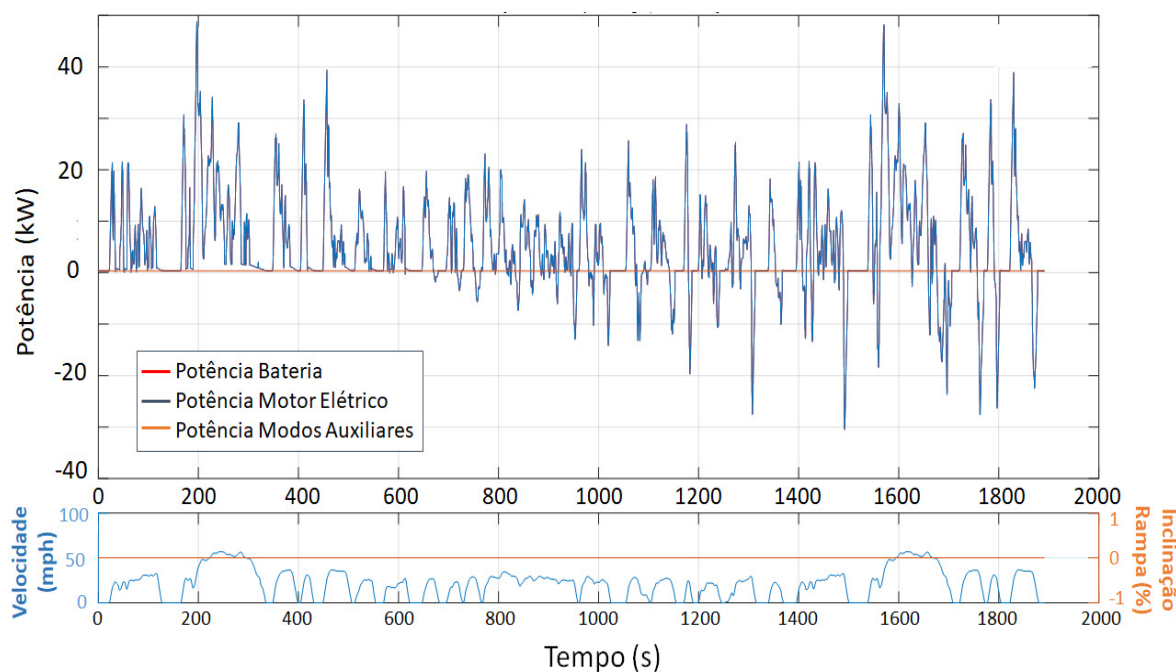
A análise completa, incluindo todos os parâmetros de saída da simulação, é feita apenas para o ciclo FTP-75, pois ele serve como referência para a correlação do modelo. Para os demais ciclos de velocidade do trabalho, são analisados apenas os parâmetros da energia da bateria (E_{Bat}), autonomia (d_{total}) e o consumo de energia do veículo (E_{total}).

4.2.1.1 Potência da bateria (P_{Bat})

A Figura 52 ilustra a curva de potência da bateria (P_{Bat}). A partir do gráfico, define-se as regiões que o motor elétrico atua como um propulsor (potência positiva) ou gerador (potência negativa) de energia durante o ciclo.

Também, observa-se a variação da curva de velocidade ($V_{\text{veículo}}$) do ciclo FTP-75 ao longo do tempo. Assim como a potência dos módulos auxiliares do sistema elétrico (P_{Aux}), que se mantém constante em 0,3 kW, e a inclinação da rampa do trajeto (α), assumida sempre como 0%.

Figura 52. Curva de potência da bateria durante o ciclo FTP-75.



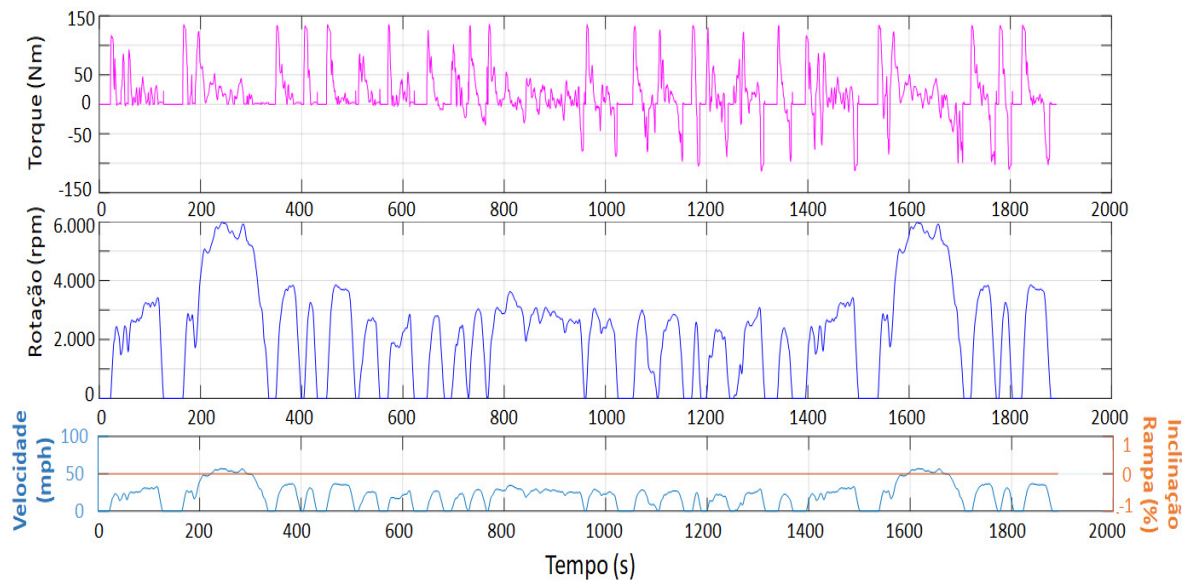
Fonte: Elaboração própria.

4.2.1.2 Torque do motor (T_{Mot}) e rotação (ω)

A Figura 53 mostra as curvas de torque (T_{Mot}) e rotação (ω) do motor elétrico, que assim como na Figura 52, demonstra o funcionamento de ambos os modos de atuação do motor (propulsor e gerador).

Nota-se, inclusive, que para o ciclo FTP-75 são requeridos baixos níveis de rotação e torque do motor, comparado aos limites apresentados na Figura 48. Isso contribui para um baixo consumo de energia da bateria do BEV durante o ciclo.

Figura 53. Curva de torque e rotação do motor durante o ciclo FTP-75.

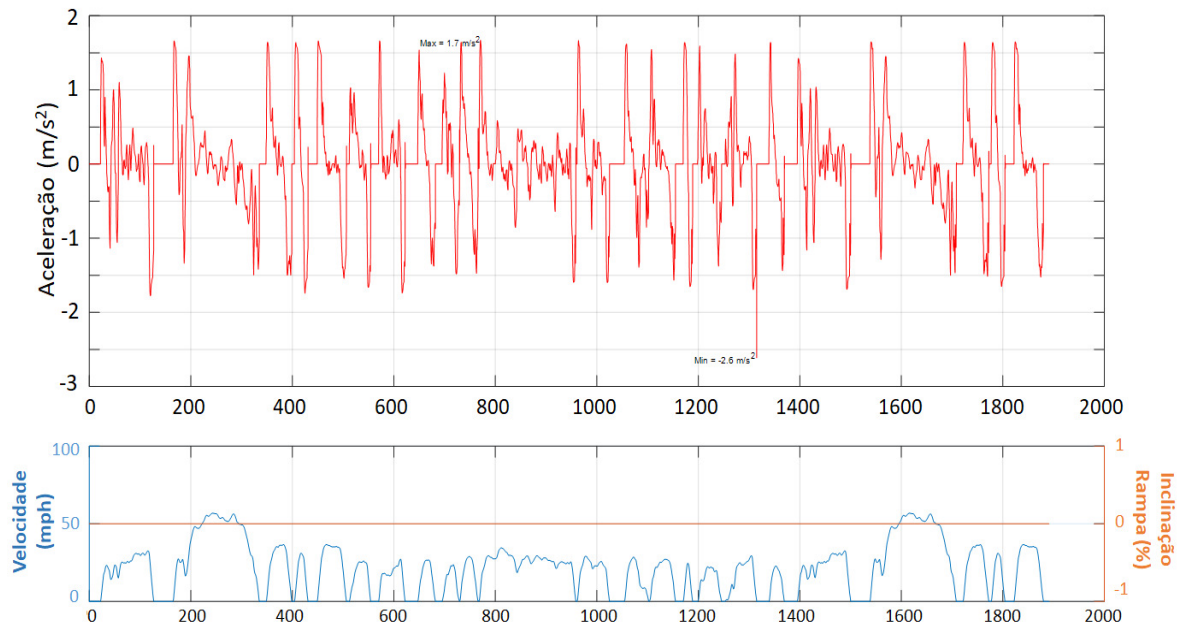


Fonte: Elaboração própria.

4.2.1.3 Aceleração do veículo (d_v/d_t)

A Figura 54, ilustra as curvas de aceleração (positiva) e desaceleração (negativa) do veículo (d_v/d_t). Para esse caso, as curvas geradas pelo modelo de simulação, correspondem à demanda do ciclo de velocidade FTP-75, conforme o gráfico bolha da Figura 45.

Figura 54. Curva de aceleração do veículo durante o ciclo FTP-75.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.1.4 Energia da bateria (E_{Bat})

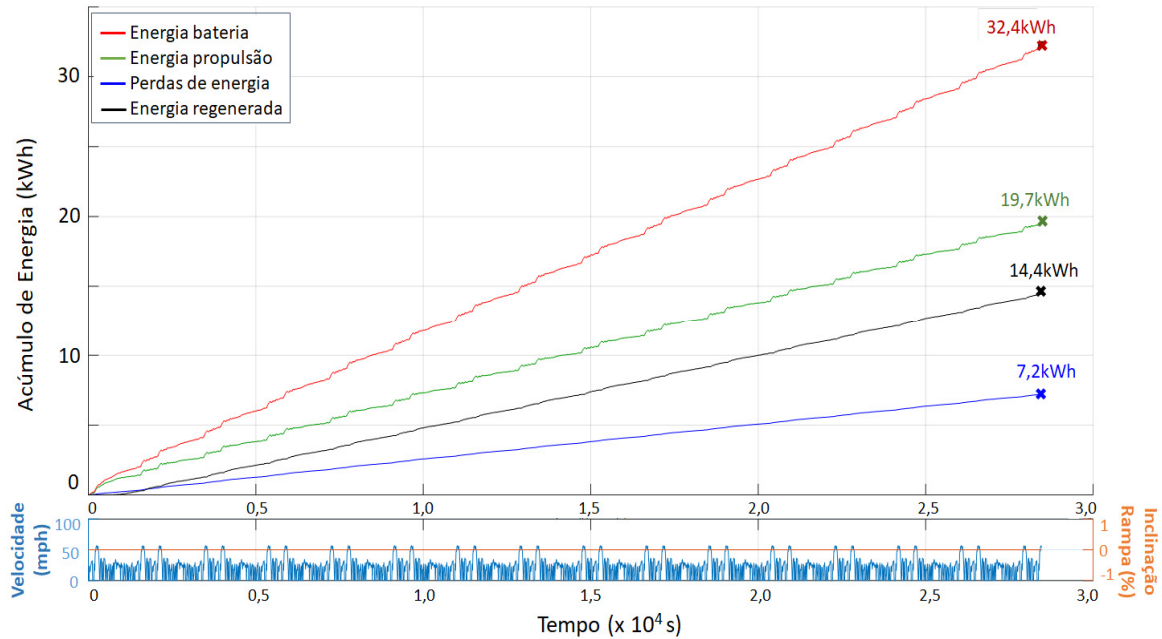
Por fim, a Figura 55 mostra a curva acumulativa total da energia da bateria (E_{Bat}). Além dela, ainda são apresentadas as curvas referentes à energia de propulsão do veículo (E_{Prop}), às perdas de energia dissipadas (L_{Mot}) e à energia convertida pelo motor elétrico por meio da frenagem regenerativa.

Dessa forma, nota-se que o valor total de E_{Bat} ao final do ciclo é de 32,4 kWh, sendo que apenas 60% dela (19,7 kWh) é utilizado para a propulsão do veículo. O restante (12,7 kWh) é referente a perdas diversas do BEV, tais como a energia dissipada pelo motor elétrico (7,2 kWh), pelo módulo de iluminação (2,3 kWh) e pela transmissão do veículo (3,2 kWh).

Devido à grande quantidade de trechos de desaceleração do ciclo FTP-75, ainda é possível regenerar o equivalente a 14,4 kWh de energia, o que garante o aumento da eficiência do veículo em 45% ao longo do ciclo.

Ainda através da Figura 55, verifica-se também que, para calcular a energia da bateria do BEV, é requerido a repetição do ciclo de velocidade inúmeras vezes, até que seja consumida toda a energia. Para o ciclo FTP-75, são necessárias 16 repetições.

Figura 55. Curvas do consumo de energia do veículo durante o ciclo FTP-75.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.1.5 Autonomia (d_{total}) e consumo de energia do veículo (E_{total})

A Tabela 19 mostra os resultados da simulação do BEV, comparado aos valores homologados para o mercado Norte Americano (EPA, 2017).

Tabela 19. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo FTP-75.

Variável	Status Simulação	Status Homologação	Diferença
Energia total da bateria (kWh)	32,4	33,5	- 1,1
Autonomia (km) => total	270	185	+ 85
Consumo de energia (kWh/km)	0,12	0,18	- 0,06

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com a tabela, observa-se que a energia total da bateria (E_{Bat}) na simulação, é 1,1 kWh maior que o status homologado. Essa diferença pode ser justificada devido às adaptações feitas nas configurações do modelo teórico da bateria, com o intuito de adequá-la ao *software*.

Também, nota-se que, na simulação é reportada uma autonomia do veículo de 85 km a mais do que na homologação, o que resulta em uma variação do consumo de energia de 0,06 kWh/km. O motivo dessa diferença está associado ao uso do ar-condicionado. Ele não foi considerado na simulação, porém é assumido através de um fator de correção na homologação, a fim de tentar aproximar os resultados obtidos em dinamômetro ao consumo real do veículo.

Portanto, embora os resultados da simulação apresentem algumas diferenças comparados aos valores homologados, no geral a correlação do modelo é considerada aceitável para o trabalho. Dessa forma, o próximo passo é simular o uso do BEV para os outros ciclos de velocidade definidos, e comparar os resultados apresentados.

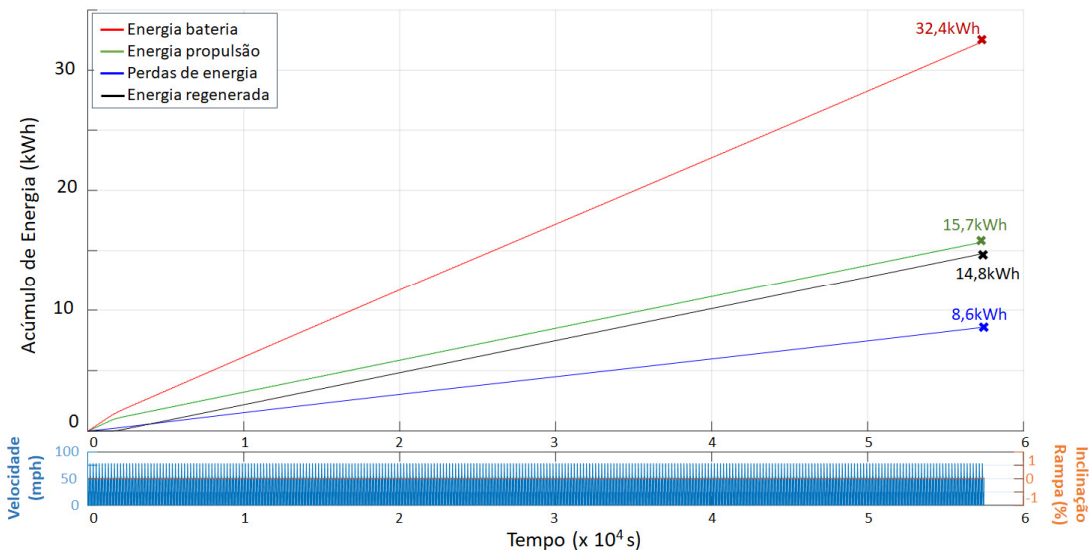
4.2.2 NEDC

O NEDC é uma curva padrão de velocidade, que representa as condições de trânsito urbano e de rodovia combinados. No trabalho são simuladas 2 versões do ciclo. O NEDC-1, formado apenas pela fase urbana, e o NEDC-2, composto pelas fases urbana e rodovia.

As Figuras 56 e 57 ilustram a curva acumulativa da energia da bateria (E_{Bat}) para ambas as versões do ciclo, enquanto a Tabela 20 mostra um resumo da autonomia (d_{total}) e do consumo de energia do veículo (E_{total}).

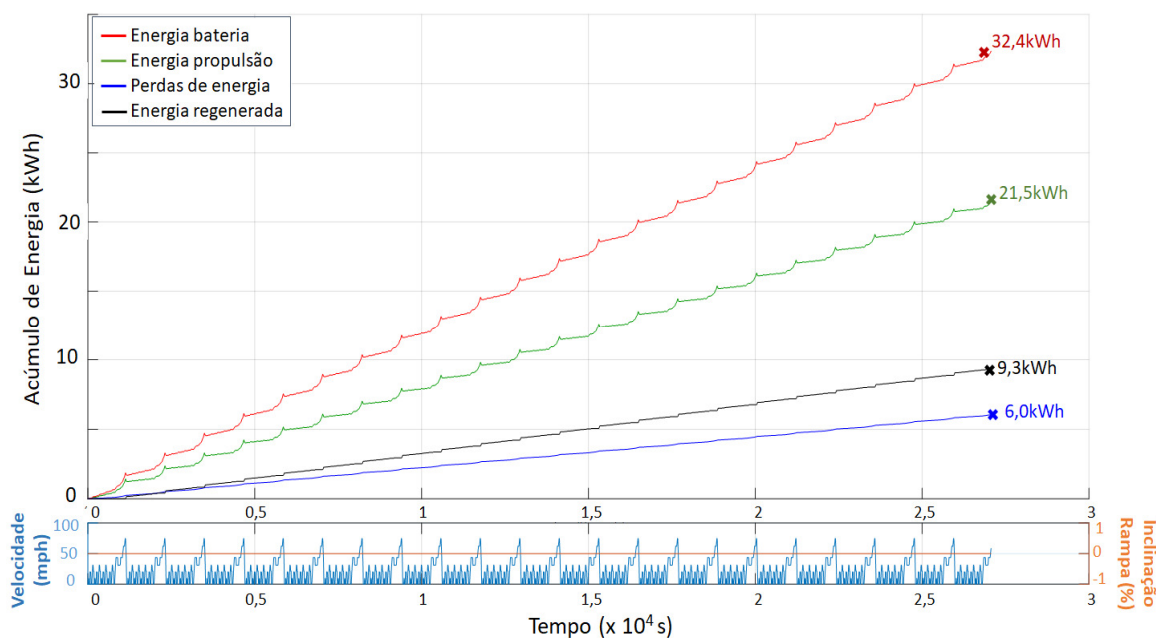
A simulação é repetida 74 vezes para o NEDC-1 e 23 vezes para o NEDC-2, até ser consumida toda a energia da bateria.

Figura 56. Curvas do consumo de energia do veículo durante o ciclo NEDC-1.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 57. Curvas do consumo de energia do veículo durante o ciclo NEDC-2.



Fonte: Elaboração própria.

O NEDC-2 apresenta os resultados de autonomia e de consumo de energia bastante parecidos ao FTP-75. Eles apenas se diferem na proporção da energia regenerada, que é menor para o NEDC-2 devido à presença da fase de rodovia no ciclo, o que não possibilita a desaceleração do veículo.

Para o NEDC-1, que é formado apenas pela fase urbana, observa-se um comportamento mais eficiente, devido à menor velocidade média do ciclo e à elevada concentração de pontos de frenagem.

Tabela 20. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo NEDC-1 / NEDC-2.

Variável	NEDC-1	NEDC-2
Energia total da bateria (kWh)	32,4	32,4
Autonomia (km)	300	251
Consumo de energia (kWh/km)	0,11	0,13
Tempo de ciclo (horas)	16	7,5
Velocidade média (km/h)	19	33

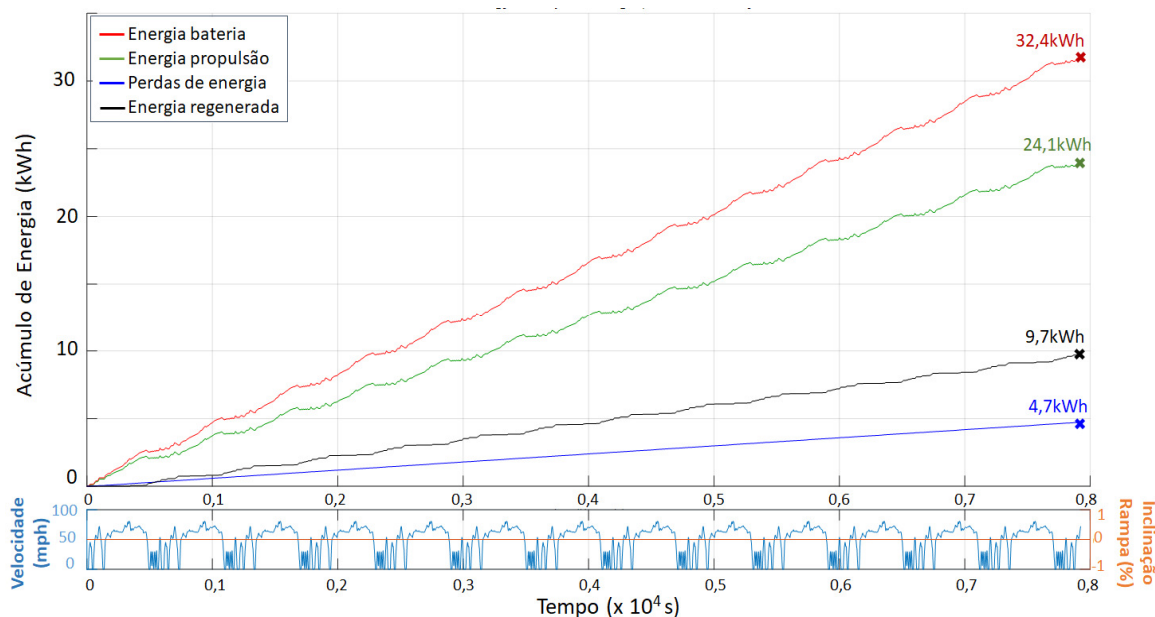
Fonte: Elaboração própria.

4.2.3 US06

O US06, assim como o NEDC-2, também possui a fase urbana e de rodovia combinadas no mesmo ciclo. Porém, ele é um ciclo mais agressivo, com maior velocidade média e índices de aceleração.

A Figura 58 e a Tabela 21 mostram os resultados da energia da bateria (E_{Bat}), autonomia (d_{total}) e consumo de energia do veículo (E_{total}) para essa condição. Para o US-06 há uma repetição de 14 vezes do ciclo, a fim de consumir o total de 32,4kWh da energia da bateria.

Figura 58. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo US-06.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo US06.

Variável	US06
Energia total da bateria (kWh)	32,4
Autonomia (km)	169
Consumo de energia (kWh/km)	0,19
Tempo de ciclo (horas)	2,2
Velocidade média (km/h)	77

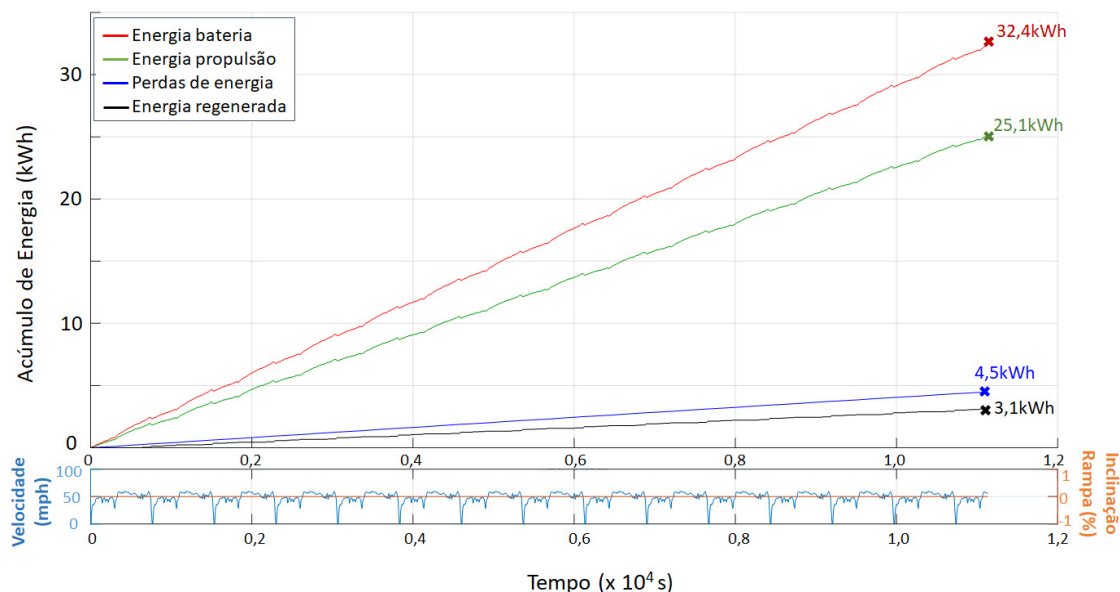
Fonte: Elaboração própria.

O US06 tem o maior consumo de energia e a menor autonomia dentre todos os ciclos disponíveis, por causa das suas características. Porém, chama a atenção o fato de que para ele, as perdas de energia dissipadas (L_{Mot}) são menores do que para os outros ciclos, provavelmente devido à sua curta duração.

4.2.4 HWYFET

O HWYFET é um ciclo padrão utilizado na homologação de veículos automotivos em conjunto com o FTP-75, a fim de simular exclusivamente o uso do veículo em rodovias. Para ele, o ciclo é repetido por 15 vezes na simulação.

Figura 59. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo HWYFET.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 22. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo HWYFET.

Variável	HWYFET
Energia total da bateria (kWh)	32,4
Autonomia (km)	239
Consumo de energia (kWh/km)	0,14
Tempo de ciclo (horas)	3,1
Velocidade média (km/h)	77

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 59 e a Tabela 22 ilustram um resumo dos resultados apresentados para a energia da bateria (E_{Bat}), autonomia (d_{total}) e consumo de energia do veículo (E_{total}).

O HWYFET, assim como o US06, apresenta um elevado consumo energético, requerido para a propulsão do veículo (E_{Prop}). Também, vale ressaltar que em virtude dos poucos trechos de desaceleração presentes no ciclo, há uma baixa regeneração de energia, o que contribui ainda mais para a pouca autonomia do veículo.

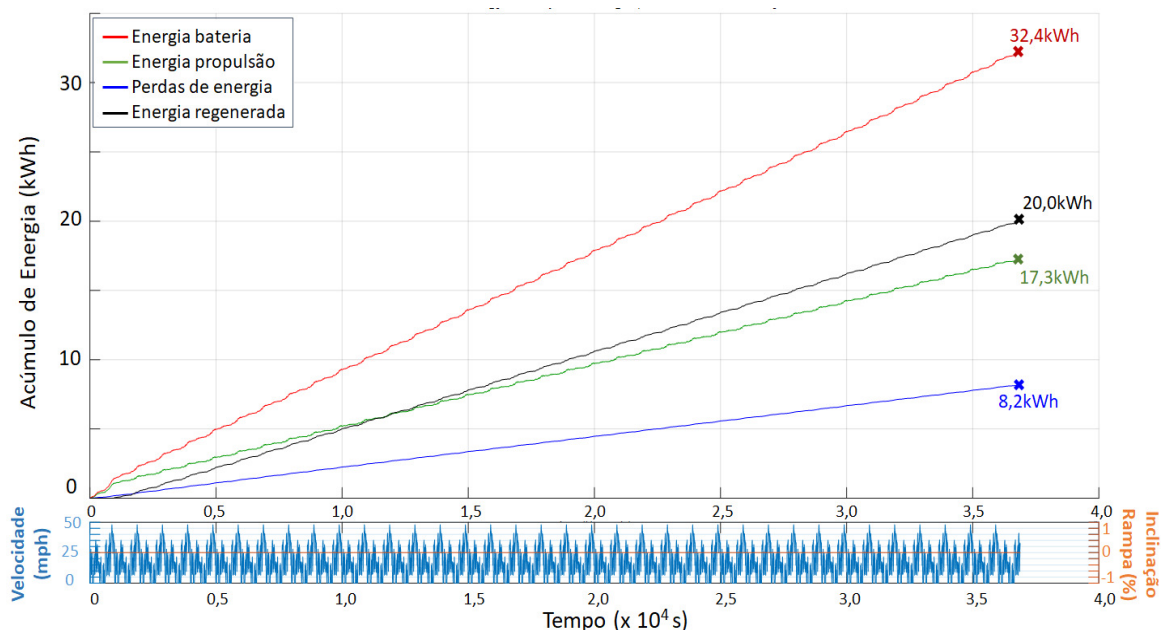
4.2.5 WLTP

O WLTP é o ciclo de velocidade aplicado na homologação dos veículos automotivos leves na Europa, em substituição ao NEDC. Ele possui um perfil de condução dinâmico, em que as curvas de velocidade foram obtidas através do uso do GPS, levando em consideração as características de trânsito reais das cidades.

Para o trabalho ele é simulado em duas diferentes versões. São elas: WLTP-2, que assume a combinação dos trechos urbanos I e II, e WLTP-4, que considera o ciclo completo.

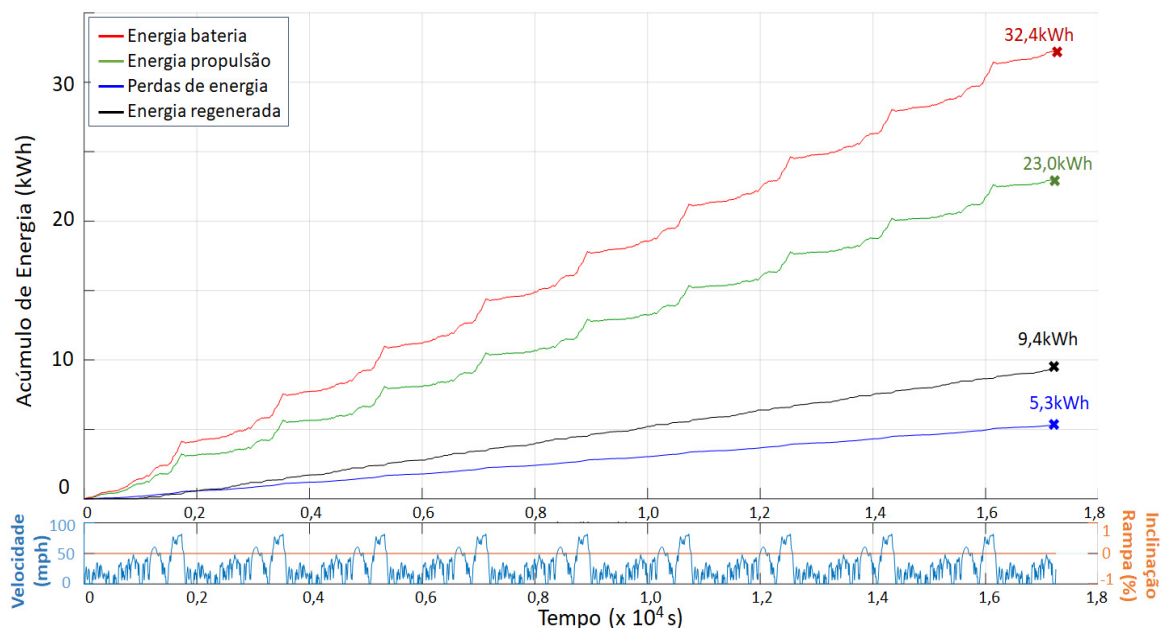
As Figuras 60, 61 e a Tabela 23 mostram os resultados da energia da bateria (E_{Bat}), autonomia (d_{total}) e consumo de energia do veículo (E_{total}) para ambos os ciclos. O ciclo WLTP-2 é simulado por 38 vezes, enquanto o WLTP-4 por 9 vezes.

Figura 60. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo WLTP-2.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 61. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo WLTP-4.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 23. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo WLTP.

Variável	WLTP-2	WLTP-4
Energia total da bateria (kWh)	32,4	32,4
Autonomia (km)	288	217
Consumo de energia (kWh/km)	0,11	0,15
Tempo de ciclo (horas)	10,2	4,8
Velocidade média (km/h)	28	45

Fonte: Elaboração própria.

As duas versões do ciclo WLTP apresentam um comportamento similar ao NEDC. O WLTP-2, por estar restrito às velocidades urbanas, apresenta um baixo consumo de energia, em que a energia regenerada das rodas chega a ser superior até mesmo à energia de propulsão, o que contribui para o aumento da autonomia do veículo.

Por fim, o WLTP-4 por ter uma velocidade média mais elevada, detém um maior consumo de energia comparado ao WLTP-2. Porém, ainda assim inferior aos demais ciclos do trabalho (FTP-75 e US06).

4.2.6 São Paulo

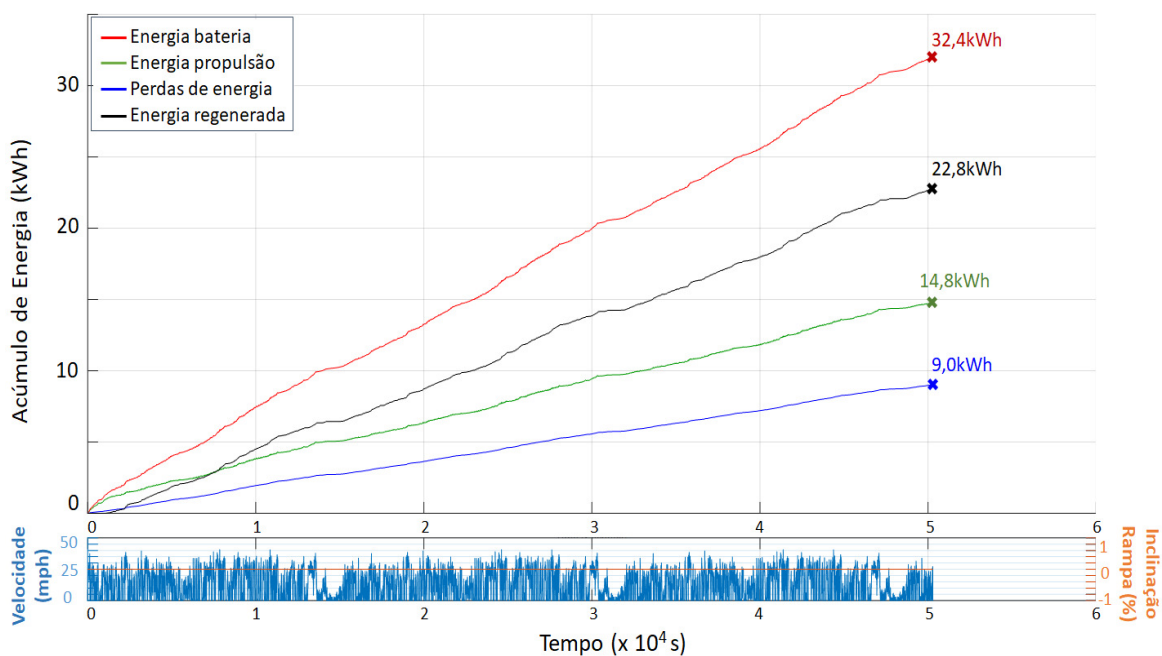
Os ciclos de São Paulo foram criados exclusivamente para o trabalho, com o objetivo de representar as condições reais de trânsito dos veículos na cidade. Assim como o WLTP, eles são formados por curvas de velocidade obtidas através do uso de GPS.

Os ciclos são divididos em 3 diferentes versões (SP-1, SP-2 e SP-3). Por terem características urbana, ambas as versões apresentam em comum a baixa velocidade média das corridas, que não chega a ultrapassar 50 km/h.

Já diferença entre os 3 ciclos está relacionada à variação dos índices de trânsito das corridas. As versões SP-2 e SP-3 demonstram os maiores e menores níveis de congestionamento da cidade respectivamente, enquanto a SP-1 representa uma condição intermediária entre eles.

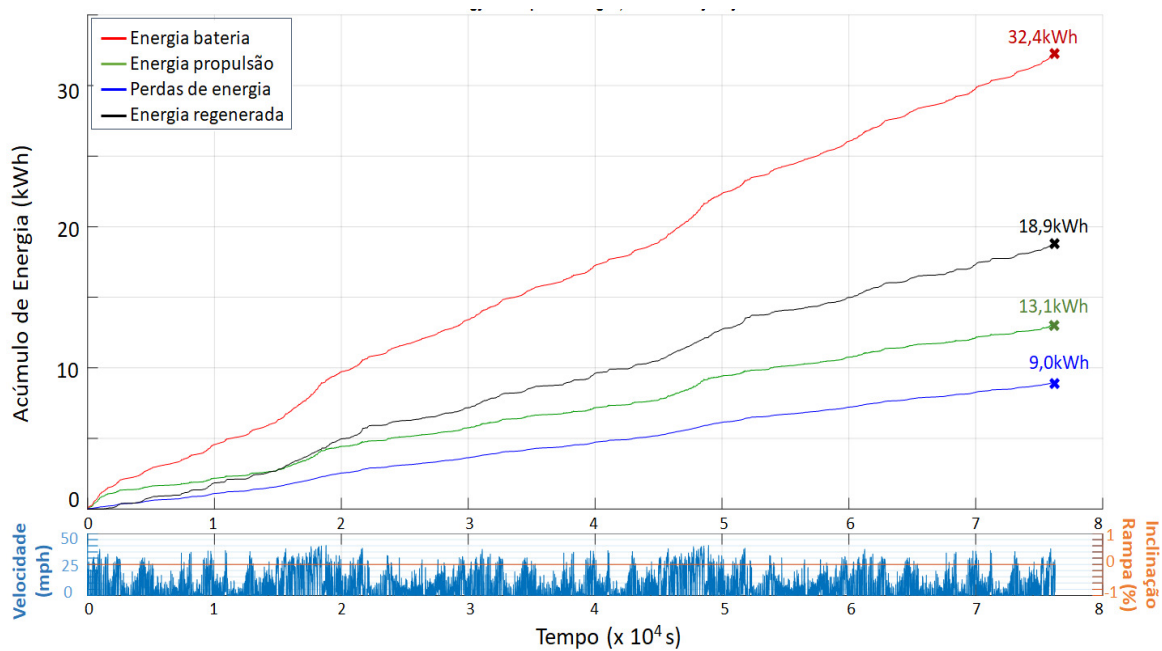
Para o trabalho, ambas as versões são repetidas ao menos 3 vezes durante a simulação, a fim de esgotar toda a energia armazenada na bateria. Através dos resultados das Figuras 62, 63 e 64, e da Tabela 24 determina-se a energia total da bateria (E_{Bat}), autonomia (d_{total}) e consumo de energia do veículo (E_{total}) para cada um dos ciclos.

Figura 62. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo SP-1.



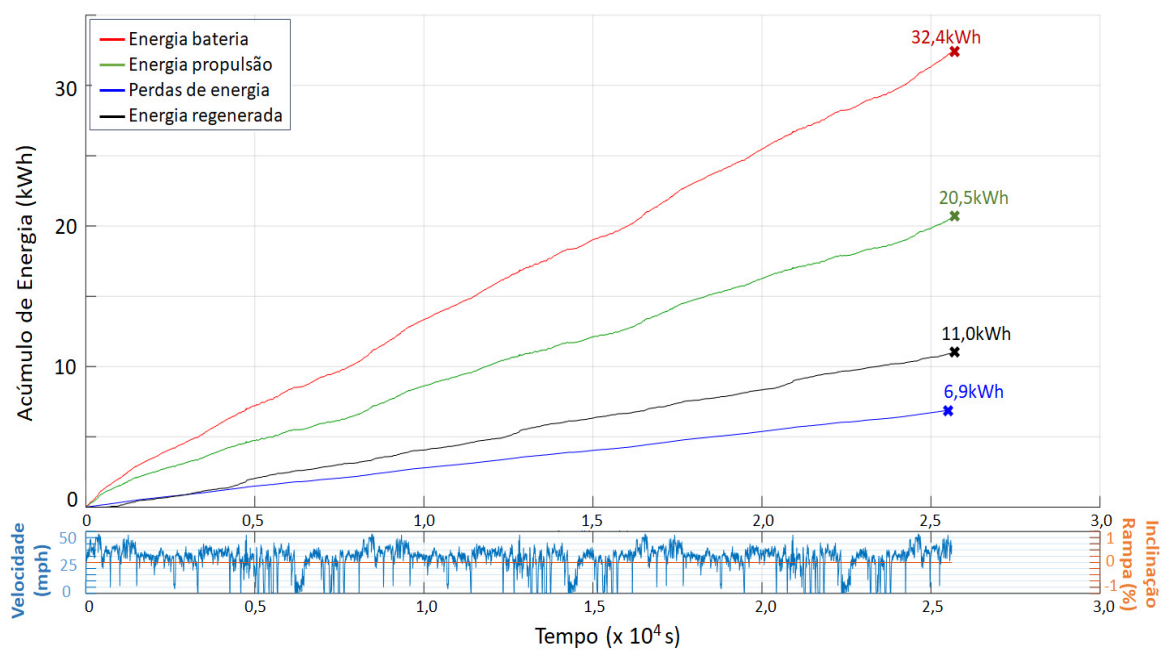
Fonte: Elaboração própria.

Figura 63. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo SP-2.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 64. Curva do consumo de energia do veículo durante o ciclo SP-3.



Fonte: Elaboração própria.

Tabela 24. Status do consumo de energia e autonomia para o ciclo SP.

Variável	SP-1	SP-2	SP-3
Energia total da bateria (kWh)	32,4	32,4	32,4
Autonomia (km)	272	235	323
Consumo de energia (kWh/km)	0,12	0,14	0,10
Tempo de ciclo (horas)	14	21,2	7,1
Velocidade média (km/h)	19	11	45

Fonte: Elaboração própria.

É possível observar através da Tabela 24, que o consumo de energia do BEV varia conforme os índices de trânsito das corridas. O ciclo SP-3, que representa o menor índice de trânsito da cidade, apresenta o menor consumo de energia. Já as versões SP-1 e SP-2, que possuem altos níveis de congestionamento, dispõem de um consumo de energia mais elevado.

4.2.7 Comentários

A Tabela 25, mostra os resultados para a cidade de São Paulo, comparado aos demais ciclos de velocidade. O SP-3, com uma autonomia de 323 km e um consumo de 0,10 kWh/km, é o ciclo mais eficiente do trabalho. Enquanto o SP-1, que obteve uma autonomia de 272 km e um consumo de 0,12 kWh/km, é inferior ao SP-3. Porém, ainda assim, apresenta resultados similares a outros ciclos urbanos, como o FTP-75, WLTP-2 e o NEDC-2. Por fim, o SP-2, com uma autonomia de 235 km e um consumo de 0,14 kWh/km, é o ciclo com o pior desempenho. É, entretanto, superior ao US-06 e ao WLTP-4, que representam as características do mercado Norte Americano e do Europeu respectivamente.

Dessa forma, é possível concluir que o BEV é uma alternativa de transporte satisfatória para a cidade de São Paulo do ponto de vista do consumo energético, e que vale a pena ser investidos novos esforços para o seu desenvolvimento na região.

Tabela 25. Status do consumo de energia e autonomia para todos os ciclos.

Variável	SP-1	SP-2	SP-3	WLTP-2	WLTP-4	FTP-75	HWYFET	NEDC-1	NEDC-2	US06
Perfil	Urbano			Urbano	Combinado	Urbano	Rodovia	Urbano	Combinado	Combinado
Autonomia (km)	272	235	323	288	217	270	239	300	251	169
Consumo de energia (kWh/km)	0,12	0,14	0,10	0,11	0,15	0,12	0,14	0,11	0,13	0,19
Tempo de ciclo (horas)	14	21,2	7,1	10,2	4,8	7,9	3,1	16	7,5	2,2
Velocidade média (km/h)	19	11	45	28	45	34,1	77	19	33	77

Fonte: Elaboração própria.

5 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados para os ciclos SP-1, SP-2 e SP-3 indicam uma oportunidade de se expandir o uso do BEV na cidade de São Paulo. Isso se dá, pois, a eficiência energética alcançada para o veículo na região, é bastante parecida com outros países que já vêm investindo na popularização desse modelo de tecnologia.

O trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira delas levantou os ciclos de velocidade, por meio de gráficos bolha, para a cidade de São Paulo e outros países. Através da análise desta etapa, foram constatadas algumas particularidades do perfil de trânsito dos veículos em cada região.

Os ciclos SP-1 e SP-2 apresentam características comuns entre si, mas se diferem dos demais ciclos do trabalho. Ambos possuem um intervalo de velocidade limitado a 60 km/h, um perfil de aceleração disperso entre ± 12 km/hs e um curto período de tempo para cada trajeto percorrido (bolhas de tamanho pequeno). Esses padrões representam os elevados índices de congestionamento da região. Enquanto o ciclo SP-3 possui um perfil de direção similar aos ciclos urbanos WLTP-2 e FTP-75, que também representam as condições de trânsito em uma cidade, porém com uma maior fluidez dos veículos. Eles têm o mesmo intervalo de velocidade (0-80 km/h), e apresentam longos períodos de tempo do trajeto (tamanho das bolhas médio). Entretanto, nota-se algumas diferenças entre eles, como o maior intervalo de aceleração (± 12 km/hs) do SP-3, comparado aos outros dois ciclos (± 6 km/hs).

Por fim, a segunda etapa utilizou um *software* de simulação computacional capaz de medir o consumo de energia de um BEV para os ciclos de velocidade disponíveis. O ciclo SP-3, que representa o menor índice de trânsito da cidade, apresentou o melhor consumo de energia dentre todos os ciclos (0,10 kWh/km). Já o SP-1 e SP-2, que possuem o maior nível de congestionamento, tiveram um desempenho pior do que o SP-3 (0,12 e 0,14 kWh/km), mas ainda assim superior ao FTP-75, NEDC-2 e ao WLTP-2/4. Os resultados obtidos, destacam a relevância do uso do BEV na região.

Como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a inclusão do perfil de inclinação do trajeto (α) na simulação, pois para o trabalho considerou-se 0% para todas as corridas. Ainda pode ser interessante, através do modelo de simulação, medir novamente a autonomia do BEV na cidade de São Paulo, porém agora substituindo o conteúdo de um veículo elétrico por um motor a combustão, a fim de comparar o seu desempenho. Por último, sugere-se fazer uma análise econômica para a implementação do BEV na cidade, levando em consideração o custo da energia e a infraestrutura local.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7024**: Light road vehicles: fuel consumption determination: test method. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ANDRESEN, M. P. **Decreasing fuel consumption and exhaust gas emissions in transportation, green energy and technology**. Berlin: Springer, 2013. 273 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES - ANFAVEA. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2020. **Revista dos Transportes Públicos** - ANTP, São Paulo, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2020. Disponível em: <http://files.antp.org.br/2019/7/29/rtp152-4.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2021.

ARGONNE National Laboratory. **Autonomie**, c2005. Disponível em: <https://www.autonomie.net/index.html>. Acesso em: 28 ago. 2021.

BERJOZA, D.; JURGENA, I. Influence of batteries weight on electric automobile performance. *In*: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT, 16., 2017, Latvia University of Agriculture. **Anais [...]**. Latvia: Enviromental Science, 2017.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Relatório de emissões veiculares no Estado de São Paulo 2018**. Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/> ISBN978-85-9467-093-9. Acesso em: 28 ago. 2021.

COCKPITAUTOMOVEL. **Apresentação Ford focus electric**. São Paulo: Cockpit Automóvel, [2014]. Disponível em: <https://www.cockpitautomovel.com/apresentacao-ford-focus-electric.html>. Acesso em: 06 mar. 2021.

DEVELOPMENT OF HARMONIZED CYCLE - DHC. Development of a Worldwide Harmonized Light Duty Driving Test Cycle (WLTC). **Technical Report**, Switzerland, [s. l.], p. 7–10, 2014. Disponível em: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2014/wp29grpe/GRPE-68-03e.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2021.

DEPARTMENT OF INTERNATIONAL TRADE - DIT. Innovation is Great in Britain & Northern Ireland. **A Presentation to Innovation Day**, São Paulo, p. 4–8, 2019. Disponível em: <https://www.events.great.gov.uk/ehome/index.php?eventid=200187739&>. Acesso em: 22 set. 2021.

DUANGSRIKAEW, B.; MONGKOLTANATAS, J.; KARIN, P.; HANAMURA, K.; BENYAJATI, C. Battery sizing for electric vehicles based on real driving pattern in Thailand. *In*: INTERNATIONAL ELECTRIC VEHICLE SYMPOSIUM AND EXHIBITION, EVS, 31., 2018, Thailand. **Anais [...]**. Thailand: World Electric Vehicle Journal, 2019.

EHSANI, M.; GAO, Y.; GAY, S. E.; EMADI, A. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles fundamentals, theory, and design**. 2. ed. Boca Raton, Florida: CRC PRESS, 2005.

EIA - Energy Information Administration. Transportation sector energy consumption. **International Energy Outlook**, v. 45, n. 09, p. 25–150, 2019.

EIA - Energy Information Administration. Transportation sector energy consumption. **Annual Energy Outlook 2020 with projections to 2050**, v. 44, n. 8, p. 1–64, 2020.

EMPLASA. **Mapa da região metropolitana de São Paulo**. Disponível em: <https://emplasa.sp.gov.br/RMSP/2017>. Acesso em: 06 mar. 2021.

EPA. **Vehicle and fuel emissions testing**. Disponível em: <https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing>. Acesso em: 06 mar. 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balanco Energético Nacional 2020**: ano base 2019. Relatório Síntese. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>. Acesso em: 28 ago. 2021.

FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO - FAPESP. Foco nas baterias de lítio. **Revista Fapesp**, São Paulo, n. 285, p. 100, 2019.

GUSTAFSSON, T.; JOHANSSON, A. **Comparison between battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles fueled by electrofuels**. 2015. Master's Thesis FRT – Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2015. Disponível em: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/218621/218621.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2021.

GUZZELLA, L.; SCIARRETTA, A. **Vehicle propulsion systems introduction to modeling and optimization**. 2nd. ed. Berlin: Springer, 2007. 345 p.

IBARRA-ESPINOSA, S.; YNOUE, R. Y.; ROPKINS, K.; ZHANG, X.; FREITAS, E. D. High spatial and temporal resolution vehicular emissions in south-east Brazil with traffic data from real-time GPS and travel demand models. **Atmospheric Environment**, Elsevier, v. 222, p. 117-136, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117136>. Acesso em: 20 ago. 2021.

IBGE. **Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/panorama>. Acesso em: 27 nov. 2020.

INRIX. Global Traffic Scorecard 2018. **INRIX Research**, United States, 2019. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2019/02/INRIX_2018_Global_Traffic_Scorecard_Report__final_.pdf. Acesso em: 28 ago. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Global warming of 1.5°C. **Special Report**, New York, v. 2, p. 17–20, 2018. Disponível em: www.environmentalgraphiti.org. Acesso em: 28 ago. 2021.

KONDARU, M. K.; TELIKEPALLI, K. P.; THIMMALAPURA, S. V.; PANDEY, N. K. Generating a real world drive cycle-A statistical approach. **Technical Papers**, SAE International, v. 2018, p. 1–15, apr. 2018. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2018-01-0325/>. Acesso em: 20 ago. 2021.

LARANJEIRO, P. F.; MERCHÁN, D.; GODOY, L. A.; GIANNOTTI, M.; YOSHIKAZI, H. T. Y.; WINKENBACH, M.; CUNHA, C. B. Using GPS data to explore speed patterns and temporal fluctuations in urban logistics: the case of São Paulo, Brazil. **Journal of Transport Geography**, v. 76, p. 114–129, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.03.003>. Acesso em: 20 ago. 2021.

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. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775302001891>. Acesso em: 20 ago. 2021.

MINITAB. **Help and how to**. Disponível em: <https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/supporting-topics/multi-vari-chartbasics/#:~:text=A%20multi%2Dvari%20chart%20is,and%20root%20causes%20for%20variation>. Acesso em: 16 fev. 2021.

MOLINA, M. J.; MOLINA, L. T. Megacities and atmospheric pollution. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 54, n. 6, p. 644–680, 2004. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10473289.2004.10470936>. Acesso em: 28 ago. 2021.

NEOCHARGE. **Tudo sobre carro elétrico**. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/motor-como-funciona>. Acesso em: 06 mar. 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. World population prospects 2019. **Population Division, Department of Economic and Social Affairs**, New York, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Download/>. Acesso em: 20 ago. 2021.

RHODES, K.; KOK, D.; SOHONI, P.; PERRY, E.; KRASKA, M.; WALLACE, M. Estimation of the effects of auxiliary electrical loads on hybrid electric vehicle fuel economy. **Technical Papers**, v. 2017, p. 1-6, Mar. 2017. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2017-01-1155/>. Acesso em: 28 ago. 2021.

SANTICIOLLI, F. M.; ECKERT, J. J.; COSTA, E. D. S.; DIONÍSIO, H. J.; DEDINI, F. G. Evaluation of available energy for regenerative braking at the brazilian driving cycle. **Technical Papers**, v. 13, p. 1-9, 2013. Disponível em: <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2013-36-0404/>. Acesso em: 28 ago. 2021.

SÃO PAULO (Município). **MSVP 2017**: pesquisa de monitoração da mobilidade no sistema viário principal. São Paulo: Central de Engenharia de Tráfego - CET, 2017.

SIMONE, D.; PIEGARI, L. Integration of stationary batteries for fast charge EV charging stations. **Canadian Automobile Association**, p. 1–6, 2016. Disponível em: <http://electricvehicles.caa.ca/types-of-electric-vehicles/charging-stations/>. Acesso em: 28 ago. 2021.

SOURCEFORGE. The complete open-source and business software platform. **Advisor**, c1999. Disponível em: <https://sourceforge.net/projects/adv-vehicle-sim/>. Acesso em: 28 ago. 2021.

TIE, S. F.; TAN, C. W. A review of energy sources and energy management system in electric vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 1, n. 20, p. 82–102, 2013.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/271617544_A_review_of_energy_sources_and_energy_management_system_in_electric_vehicles. Acesso em: 28 ago. 2021.

XI, Z.; CHRIS, M. **Vehicle power management modeling, control and optimization**.

London: Springer London, 2011.

WARNER, J. Lithium-ion battery packs for EVs. **Lithium Ion Batteries**, v. 1, p. 50–62, 2014.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-59513-3.00007-8>. Acesso em: 28 ago. 2021.

WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. **Filtro passa-baixo** (Butterworth). [São Francisco, CA: Wikimedia Foundation, 2016]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Filtro_passa-baixo. Acesso em: 06 mar. 2021.

YIN, C.; MCKAY, A. Introduction to modeling and simulation techniques. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE AND INDUSTRIAL APPLICATIONS, ISCIIA, 8., 2018, China. **Anais [...]**. China: Symplectic Publications, 2018.