



Universidade Federal de Pernambuco

Departamento de Engenharia Mecânica

Curso de Engenharia Mecânica

**Modelagem computacional de Veículos Elétricos em Simulador
Microscópico de Tráfego: Impactos da Eletrificação da Frota em Recife**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação

por

Raul Alves Feitosa Bezerra

Orientador: Prof. Guilherme Soares Andrade

Coorientador: Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos

Recife, Setembro de 2025

RAUL ALVES FEITOSA BEZERRA

**Modelagem computacional de Veículos Elétricos em Simulador Microscópico de Tráfego:
Impactos da Eletrificação da Frota em Recife**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

Orientador: Guilherme Soares Andrade

Coorientador: Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Bezerra , Raul Alves Feitosa .

Modelagem computacional de veículos elétricos em simulador microscópico de tráfego: Impactos da eletrificação da frota em recife / Raul Alves Feitosa Bezerra . - Recife, 2025.

85 p.

Orientador(a): Guilherme Soares Andrade

Coorientador(a): Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2025.

Inclui referências.

1. Motor elétrico. 2. Simulação de Tráfego. 3. Desempenho Energético. I. Andrade, Guilherme Soares . (Orientação). II. Santos, Maurício Pereira Magalhães de Novaes. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

RAUL ALVES FEITOSA BEZERRA

**Modelagem computacional de Veículos Elétricos em Simulador Microscópico de Tráfego:
Impactos da Eletrificação da Frota em Recife**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

Aprovada em: 13/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Participação via Videoconferência

Prof. Dr. Guilherme Soares Andrade (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação via Videoconferência

Prof. Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação via Videoconferência

Prof. Dr. Fábio Santana Magnani (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Participação via Videoconferência

Dr. Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

RESUMO

O crescimento acelerado da frota de veículos particulares nas cidades brasileiras, especialmente em capitais como Recife, tem provocado impactos significativos na mobilidade urbana, com destaque para o aumento dos congestionamentos e suas consequências ambientais e sociais. Em paralelo, observa-se uma tendência crescente na adoção de veículos elétricos como alternativa mais sustentável, dada sua menor emissão de poluentes e custos operacionais reduzidos. Diante desse cenário, este trabalho propõe uma avaliação dos efeitos da inserção de veículos elétricos na dinâmica do tráfego urbano da cidade do Recife. A metodologia empregada baseia-se na aplicação do modelo de simulação de tráfego Gipps-Santos, desenvolvido no Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos da UFPE, em uma via calibrada da capital pernambucana, a Via Mangue. Foram modelados veículos elétricos e a combustão com características equivalentes, respeitando os parâmetros exigidos pelo simulador, permitindo a análise comparativa do comportamento do tráfego. Diversos cenários foram simulados, variando a densidade veicular e a proporção de veículos elétricos na frota. Os resultados obtidos possibilitaram investigar o impacto da eletrificação sobre os perfis de velocidade, o desempenho energético e a eficiência do sistema de tráfego, contribuindo para a discussão sobre as vantagens energéticas de se utilizar veículos elétricos na tentativa de promover uma mobilidade urbana mais eficiente e sustentável, em detrimento a motorizações a combustão.

Palavras chaves: Motor elétrico, Simulação de Tráfego, Desempenho Energético.

ABSTRACT

The growth of private vehicle fleets in Brazilian cities, especially in capitals such as Recife, has led to significant impacts on urban mobility, notably the increase in congestion and its associated environmental and social consequences. Simultaneously, there is a growing trend in the adoption of electric vehicles as a more sustainable alternative, due to their lower pollutant emissions and reduced operational costs. In this context, this study aims to evaluate the effects of electric vehicle integration on urban traffic dynamics in the city of Recife. The adopted methodology is based on the application of the Gipps-Santos traffic simulation model, developed at the Thermal Systems Optimization Laboratory (UFPE), applied to a calibrated road segment in Recife—Via Mangue. Electric and combustion vehicles were modeled with equivalent characteristics, following the simulator's requirements, allowing for a comparative traffic behavior analysis. Several scenarios were simulated, varying vehicle density and the proportion of electric vehicles in the fleet. The results enabled an investigation into the impact of electrification on speed profiles, energy performance, and system efficiency, contributing to the broader discussion on the role of electric vehicles in promoting more efficient and sustainable urban mobility.

Key words: Electric motor, Traffic simulation, Energy performance.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	OBJETIVOS	8
1.2	OBJETIVO GERAL	8
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	VEÍCULOS ELÉTRICOS	9
2.1.1	Veículos Elétricos a Bateria	9
2.2	MOTOR ELÉTRICO	10
2.2.1	O Motor Elétrico CC com Escovas	11
2.2.2	Estatador	11
2.2.3	Armadura	12
2.2.4	Comutador	12
2.2.5	Rotor	12
2.2.6	Eixo do Motor	12
2.2.7	Escovas do Motor	13
2.2.8	Torque no Motor	13
2.2.9	Motor de Indução	16
2.3	PERDAS EM MOTORES ELÉTRICOS	17
2.3.1	Perdas no Cobre	17
2.3.2	Perdas no Ferro	18
2.3.3	Perdas Mecânicas	18
2.3.4	Perdas Constantes	18
2.3.5	Modelo Unificado	19
2.4	FUNCIONAMENTO DE UMA BATERIA	19
2.4.1	Potência de Peukert	20
2.4.2	Descarga da Bateria	20
2.5	ANÁLISE CINEMÁTICA DE UM VEÍCULO	21
2.6	TRÁFEGO	23

2.6.1	Tráfego Microscópico de veículos	24
2.6.2	Diagrama Fundamental do Tráfego	25
2.6.3	Ciclos de Condução	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	MODELAGEM DOS MOTORES	29
3.1.1	Escolha dos Veículos	30
3.1.2	Modelagem dos Motores elétricos	32
3.1.2.1	Motor de corrente contínua (CC) Para Motocicleta	33
3.1.2.2	Motor de Indução Para Automóvel	33
3.1.3	Modelagem do Motor a Combustão	34
3.1.4	Validação do Modelo dos Motores Elétricos Com Ciclo WOT	35
3.2	PROCEDIMENTO PARA GERAÇÃO DE CURVAS DE POTÊNCIA	37
3.2.1	Velocidade	37
3.2.2	Rotação	37
3.2.3	Potência	38
3.2.4	Curvas de Potência	38
3.2.5	Rendimento	39
3.3	INICIALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	40
3.3.1	Simulador	41
3.3.2	Percurso Avaliado e Calibração do Modelo	43
3.3.3	Estudo Realizado	44
3.4	ANÁLISE ENERGÉTICA	47
3.4.1	Cálculo da Potência do Motor	48
3.4.2	Modelagem do Consumo de Energia para Veículos Elétricos	50
3.4.3	Modelagem do Consumo de Energia para Veículos a Combustão	51
3.4.4	Distância	52
3.4.5	VSE	52
3.4.6	Economia	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE MOTORES ELÉTRICOS	53

4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO DE AUTOMÓVEL A COMBUSTÃO	57
4.3	CURVAS DE POTÊNCIA GERADAS PARA OS VEÍCULOS	60
4.4	RESULTADOS DO SIMULADOR	61
4.4.1	Impacto do Aumento de Veículos Elétricos no Diagrama Fundamental ..	63
4.4.2	Análise de um Perfil de Velocidades no Tráfego	67
4.5	ANÁLISE ENERGÉTICA DO TRÁFEGO	69
4.5.1	Fluxo Livre	70
4.5.2	Fluxo Intermediário	72
4.5.3	Fluxo Congestionado	74
4.6	LIMITAÇÕES DO SISTEMA ADOTADO	76
5	CONCLUSÃO	78

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Confederação Nacional de Municípios (CNM), o crescimento acelerado da frota de veículos particulares nas últimas décadas gerou efeitos significativos nas cidades brasileiras, com destaque para os prejuízos à mobilidade urbana, consequência do aumento dos congestionamentos e os impactos ambientais e sociais (CNM, 2023). Em Recife, capital do estado de Pernambuco, esse cenário se manifesta de forma ainda mais crítica: de acordo com pesquisa realizada pela TomTom (2024), empresa que analisa o tráfego globalmente, a cidade foi classificada como uma das mais congestionada do mundo nos horários de pico, com motoristas perdendo, em média, 99 horas por ano em engarrafamentos. Nesse contexto, os surgimentos de estudos como o de Araújo (2021), que buscam analisar o tráfego urbano por meio da simulação adequada de modelos veiculares aplicados a realidades locais, a exemplo da cidade do Recife, passam a ser observados.

Não obstante, um outro cenário vem se desenvolvendo em uma taxa de crescimento similar àquela analisada a cima. A transição para veículos elétricos tem ganhado destaque como alternativa sustentável, que cativa através de redução em emissões e nos custos operacionais. Segundo a associação brasileira do veículo elétrico, (ABVE), as vendas de veículos eletrificados contaram com projeções acima de 170 mil para o ano de 2024, um aumento de 80% em relação a 2023 (ABVE, 2024). Diante desse avanço, surge um questionamento: o crescimento da frota de veículos elétricos influenciará significativamente a dinâmica do tráfego urbano, contribuindo para a mitigação dos congestionamentos? Essa reflexão se torna especialmente relevante em contextos de alta densidade veicular, como o observado em cidades brasileiras de grande porte.

Dessa forma, é proposto por esse trabalho avaliar o impacto da inserção de veículos elétricos no trânsito da cidade de Recife. A metodologia aplicada consiste em utilizar o modelo de simulação de tráfego (Gipps-Santos), desenvolvido no trabalho de Santos (2019), no Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos (LOST), da Universidade Federal de Pernambuco, para descrever o comportamento de veículos em uma via da capital pernambucana. A pista estudada, via mangue, foi calibrada através das análises desempenhadas em Araújo (2021). O presente trabalho tem como objetivo demonstrar o funcionamento do simulador adotado, levando em consideração a sua calibração, para o cenário de crescimento na frota de automóveis e motocicletas elétricas. Para isso, realiza-se a modelagem dos veículos eletrificados e de seus respectivos motores, assegurando que suas características estejam alinhadas às exigências do simulador. Na

sequência, é definido um automóvel a combustão com parâmetros similares ao modelo elétrico selecionado, a fim de verificar a influência no processo de calibração do sistema.

Por fim, o fluxo metodológico adotado, composto pela modelagem dos veículos e de seus motores, a consequente aplicação dela no simulador de tráfego e análise dos perfis de velocidade obtidos, permitiu avaliar diferentes configurações de densidade veicular, variando-se a proporção de modelos elétricos na frota. Essa abordagem possibilitou entender os efeitos dessa transição tecnológica sobre a dinâmica do tráfego urbano, o desempenho energético e os indicadores de eficiência, contribuindo para aproximar a compreensão do papel dos veículos elétricos na construção de uma mobilidade mais sustentável.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho avalia o impacto da inserção de veículos elétricos na frota urbana de Recife por meio de um simulador de tráfego. O objetivo é analisar como essa tecnologia influencia o trânsito, em ambiente simulado, considerando fluxo de veículos, consumo energético e velocidades médias.

1.2 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um modelo computacional de motor elétrico para analisar o impacto da inserção de veículos elétricos no tráfego de Recife, utilizando um sistema computacional de simulação de tráfego.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver um modelo de motor elétrico e validar seu funcionamento mediante testes de Performance e autonomia.
- Avaliar o impacto dinâmico do aumento na proporção de veículos elétricos na pista, através dos resultados obtidos pelo simulador de tráfego.
- Compreender como a variação na proporção de veículos elétricos no tráfego influencia os gastos energéticos dos veículos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

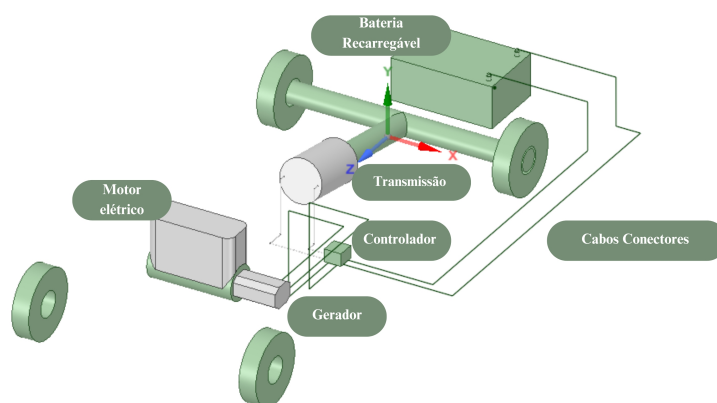
2.1 VEÍCULOS ELÉTRICOS

A energia elétrica como fonte de movimento pode ser empregada por meio de diferentes tecnologias, entre as quais as baterias se destacam como o principal componente dos Veículos Elétricos (VEs). Responsáveis por armazenar energia química e convertê-la em energia elétrica, as baterias são amplamente reconhecidas por sua eficiência e versatilidade. No entanto, elas não representam a única alternativa viável: sistemas de célula a combustível, supercapacitores e soluções híbridas também podem desempenhar papel relevante na viabilização da mobilidade elétrica, oferecendo diferentes vantagens em termos de autonomia, tempo de recarga e desempenho.

2.1.1 Veículos Elétricos a Bateria

O veículo elétrico a bateria (BEV, Battery Electric Vehicle) tem um conceito simples, composto por três elementos principais: uma bateria para armazenar energia, um motor elétrico e um controlador. A bateria é recarregada pela rede elétrica, usando um plugue e uma unidade de carregamento, que pode estar no veículo ou no ponto de abastecimento. O controlador, mostrado na Figura 1, regula a potência enviada ao motor, controlando a velocidade do veículo, tanto para frente quanto para trás.

Figura 1: Layout veículo elétrico



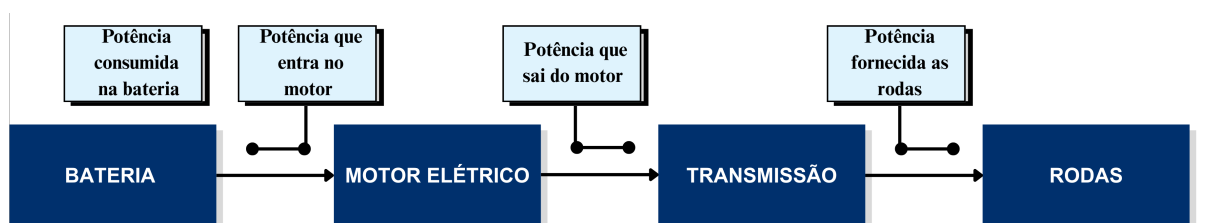
Fonte: Autoria própria

A tecnologia de recarga impulsionou inovações como os freios regenerativos, que convertem energia cinética em eletricidade. Esse sistema inverte o motor elétrico, transformando-o em gerador para armazenar energia na bateria, aumentando a autonomia e reduzindo o desgaste dos freios convencionais. No trânsito urbano, onde há frenagens frequentes, essa tecnologia se torna uma vantagem significativa.

2.2 MOTOR ELÉTRICO

O motor elétrico muitas vezes divide a posição com a bateria no que diz respeito ao grau de importância de um componente, perante o veículo completo. Esses motores são essenciais para o funcionamento de veículos elétricos, pois convertem energia elétrica em movimento de forma eficiente, silenciosa e sem emissões diretas de poluentes (BOLDEA; NASAR, 2015). De forma geral, os motores elétricos recebem uma certa quantidade de energia, de uma, ou um conjunto de baterias, e a transfere para a roda do veículo. A análise feita para um período de tempo específico e considerando a potência como energia de transferência, pode ser avaliada na Figura 2.

Figura 2: Diagrama de transferência de potência



Fonte: Autoria própria

No motor elétrico, a aplicação de corrente elétrica em seus enrolamentos gera um campo eletromagnético que interage com os elementos magnéticos do rotor, produzindo torque. Esse torque promove a rotação do eixo do motor, cuja energia mecânica é transmitida às rodas por meio do sistema de transmissão, permitindo o deslocamento do veículo. Os campos magnéticos desempenham um papel fundamental na conversão de energia em motores elétricos. O conceito de que um fio condutor de corrente elétrica gera um campo magnético ao seu redor, e consequentemente, quando esse fio é submetido a um campo magnético externo, uma força é induzida sobre ele, torne-se o princípio que constitui a base do funcionamento dos motores elétricos, (CHAPMAN, 2012).

2.2.1 O Motor Elétrico CC com Escovas

O motor elétrico mais simplificado encontrado em automóveis é o motor de corrente contínua (CC) com escovas. Esse tipo de motor é bastante utilizado em diversas aplicações, como ferramentas portáteis, brinquedos, vidros elétricos em veículos e pequenos eletrodomésticos, como secadores de cabelo, mesmo quando operam com alimentação de corrente alternada (CA) da rede elétrica. Embora ele ainda seja encontrado empregando motores de tração, atualmente outras configurações de motores apresentam maior viabilidade e vantagens para essa finalidade (LARMINIE; LOWRY, 2012).

O motor CC tradicional é ilustrado na Figura 3 através de um modelo tridimensional. Ele consiste em um motor CC equipado com ímãs permanentes e escovas. Esse motor simplificado contém uma única bobina, e a corrente que circula por ela interage com o campo magnético dos ímãs para gerar movimento. Os componentes do motor são descritos com mais detalhes a seguir:

Figura 3: Modelagem de motor elétrico CC com escovas



Fonte: Autoria própria

2.2.2 Estator

O estator, mostrado na figura 4 (a), de um motor CC é o componente estático responsável por gerar o campo magnético que influencia a força no componente móvel do motor. Ele é composto por dois ímãs permanentes, de forma curvada, apontados um para o outro, fixados na carcaça do motor.

2.2.3 Armadura

O próximo componente a ser introduzido na montagem é a armadura, figura 4 (b). Ela é um elemento que consiste em um núcleo de ferro laminado, geralmente cilíndrico, que contém enrolamentos de fio condutor (bobinas). Montada sobre um eixo, a armadura gira dentro de um campo magnético, produzido por ímãs permanentes ou eletroímãs, e tem a função de converter energia elétrica em mecânica através da interação entre a corrente elétrica e o campo magnético, gerando torque (CHAPMAN, 2012).

2.2.4 Comutador

O comutador, figura 4 (c) é responsável por garantir que o torque gerado no rotor seja contínuo e unidirecional. Ele funciona como um interruptor mecânico que inverte periodicamente a direção da corrente elétrica que flui através dos enrolamentos da armadura, mantendo o movimento rotativo do motor (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2004). Nesse cenário, ao ser conectado a fonte de alimentação de energia elétrica, consegue garantir que a corrente flua por meio da armadura, gerando o campo magnético.

2.2.5 Rotor

O rotor é a parte móvel de um motor de corrente contínua (CC), mostrado na figura 4 (d), responsável por converter energia elétrica em mecânica. Composto por um núcleo laminado de aço silício, enrolamentos de cobre e um comutador, o rotor gira dentro do campo magnético do estator. Quando a corrente passa pelos enrolamentos, a interação com o campo magnético gera torque, fazendo o eixo girar. O comutador inverte a corrente nos enrolamentos a cada meia volta, mantendo o torque contínuo (WILDI, 2006).

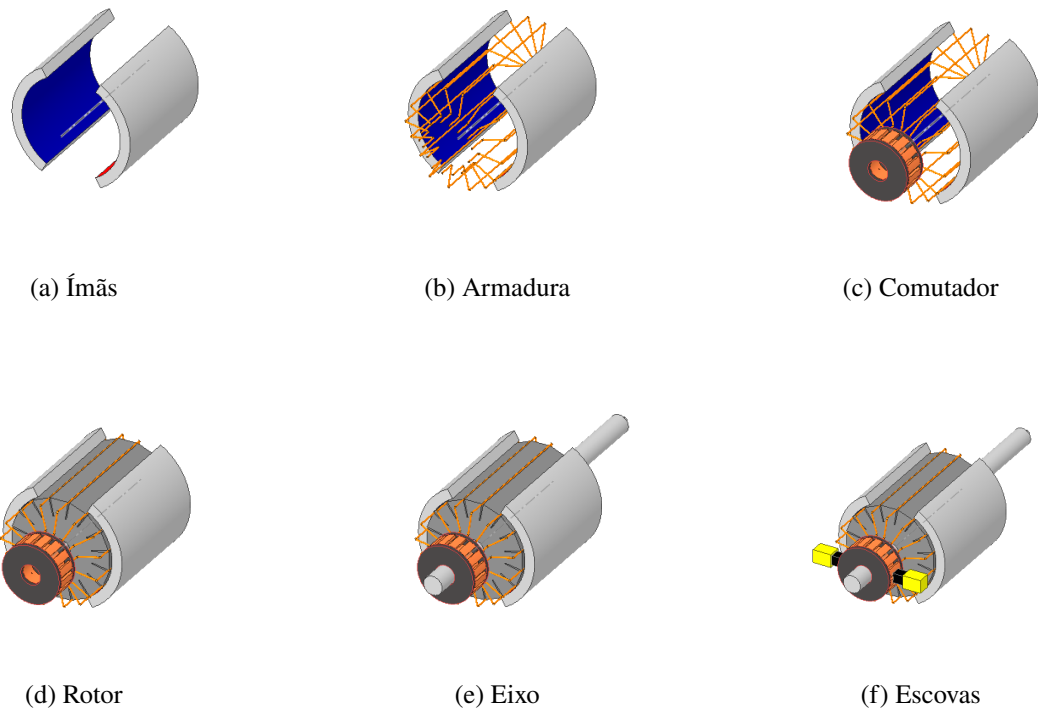
2.2.6 Eixo do Motor

O eixo do motor, figura 4 (e) é o componente que vai transmitir a energia mecânica, que é recebida em formato de rotação do rotor, para a transmissão do veículo.

2.2.7 Escovas do Motor

Por fim, as escovas, figura 4 (f) são os componentes do motor que recebem a energia e a transmitem para o comutador. Elas têm sua notória importância pois são responsáveis por classificar o tipo de motor CC estudado em sua denominação.

Figura 4: Modelagem de Componentes do Motor



Fonte: Autoria própria

2.2.8 Torque no Motor

Se um fio em um motor elétrico possui um comprimento de l metros, conduz uma corrente de I ampères e está submetido a um campo magnético de intensidade B webers por metro quadrado, então a força exercida sobre o fio pode ser calculada como mostrado na equação (2.1). Ao ser considerado o raio da bobina como r e a armadura formada por n espiras, o torque T do motor é dado pela equação (2.2).

$$F = BIl \quad (2.1)$$

$$T = 2nrBIl \quad (2.2)$$

O termo $2Blr$ (que representa a área vezes o campo magnético) pode ser substituído por Φ , caracterizado como o fluxo magnético total que passa pela bobina. Assim, a equação do torque se torna como mostrado na equação (2.3).

$$T = nI\Phi \quad (2.3)$$

No entanto, esse é o torque máximo, que ocorre quando a bobina está completamente imersa no fluxo magnético, que é perfeitamente radial. Na prática, isso nem sempre ocorre, pois a equação não leva em conta a presença de múltiplos pares de polos magnéticos, conjuntos de polos norte e sul distribuídos que influenciam diretamente na relação entre a velocidade elétrica e a velocidade mecânica. Portanto, utiliza-se uma constante K_m , mostrada na equação (2.4), conhecida como constante do motor, para relacionar o torque médio com a corrente e o fluxo. O valor de K_m depende do número de espiras na bobina, do número de pares de polos e de outros aspectos do projeto do motor, como a geometria do entreferro, as dimensões do rotor, o tipo de material magnético utilizado no núcleo, e a distribuição dos enrolamentos.

$$T = K_m I \Phi \quad (2.4)$$

Assim, o torque do motor é diretamente proporcional à corrente I do rotor. Essa, por sua vez, depende da tensão de alimentação do motor E_s e da resistência elétrica R_a da bobina. Além disso, conforme o motor gira, o rotor se move no campo magnético, atuando como um gerador. Considerando o modelo básico, com apenas uma armadura e analisando um lado da bobina, a tensão gerada é expressa por meio da equação (2.5).

$$E_b = Blv \quad (2.5)$$

A tensão gerada por essa equação é chamada de "força eletromotriz (FEM) reversa", representada por E_b . Ela depende da velocidade do fio que se move no campo magnético. Nesse cenário, a velocidade do fio depende da velocidade angular e do raio r da bobina. Além disso, a armadura

possui dois lados, com n espiras, representadas na equação (2.6).

$$E_b = 2nrBl\omega \quad (2.6)$$

A equação pode ser simplificada de forma semelhante à equação anterior para a corrente. Como se trata do mesmo motor, a constante K_m pode ser usada novamente, com o mesmo valor. A equação que descreve a tensão gerada pelo efeito do movimento do rotor é dada na equação (2.7).

$$E_b = K_m \Phi \omega \quad (2.7)$$

Essa tensão se opõe à tensão de alimentação e reduz a corrente no motor. A tensão líquida na armadura é a diferença entre a tensão de alimentação E_s e a FEM reversa E_b . Portanto, a corrente na armadura é dada como mostrado na equação (2.8).

$$I = \frac{E_s - E_b}{R_a} = \frac{E_s - K_m \Phi \omega}{R_a} \quad (2.8)$$

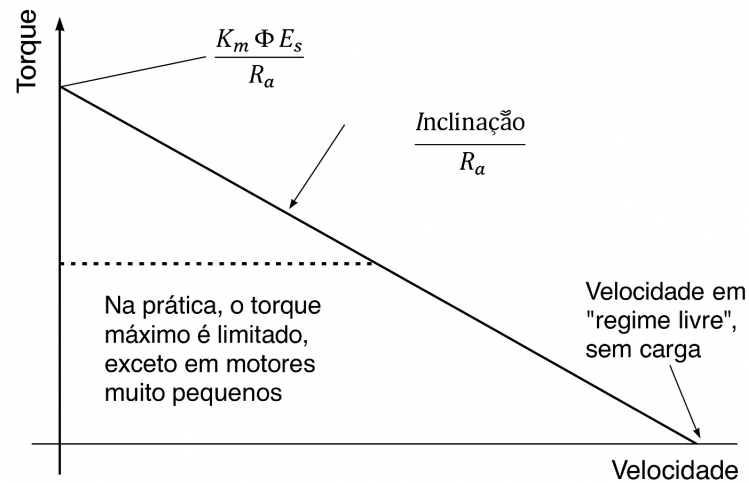
Essa equação mostra que a corrente diminui com o aumento da velocidade angular. Substituindo-a na equação (2.4), obtemos a relação entre o torque e a velocidade de rotação:

$$T = K_m \Phi I = K_m \Phi \left(\frac{E_s - K_m \Phi \omega}{R_a} \right) \quad (2.9)$$

$$T = \frac{K_m \Phi E_s}{R_a} - \frac{(K_m \Phi)^2 \omega}{R_a} \quad (2.10)$$

Nesse contexto, essa equação demonstra que o torque do motor diminui à medida que a velocidade angular aumenta, refletindo a interação entre a tensão de alimentação, a FEM reversa e a resistência de armadura. Por fim, o comportamento do motor elétrico CC escovado, no que diz respeito a relação existente entre o torque e a velocidade angular, rotação, pode ser representado pela Figura 5 exposta.

Figura 5: Gráfico Torque x Rotação Motor CC



Fonte: Adaptado de Larminie and Lowry (2012).

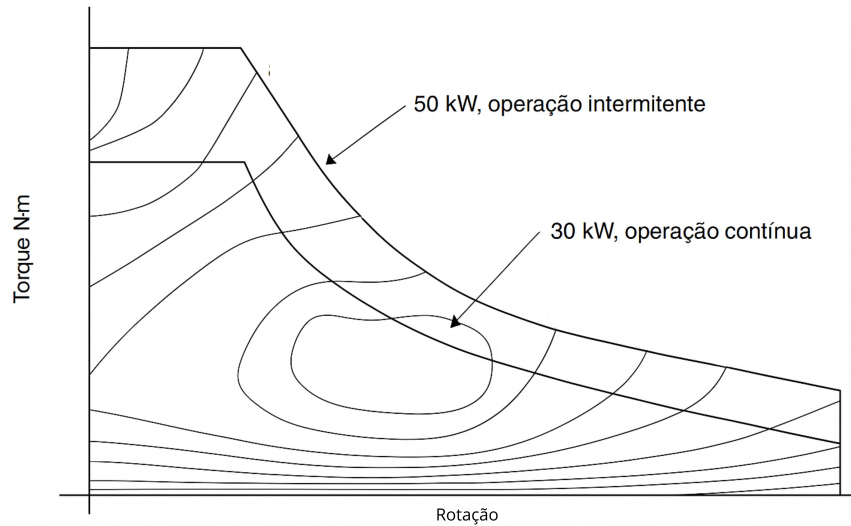
2.2.9 Motor de Indução

O motor de indução é amplamente utilizado em máquinas industriais devido à sua tecnologia consolidada e confiabilidade. Embora exijam uma fonte de corrente alternada (CA), o que pode parecer incompatível com fontes de corrente contínua (CC) como baterias ou células a combustível, é possível gerar CA facilmente usando um inversor. Na verdade, o inversor necessário para alimentar um motor de indução não é mais complexo ou caro do que os circuitos usados em motores de corrente contínua sem escovas (brushless) ou motores de relutância comutada, que geram torque pela variação da relutância magnética entre o rotor e o estator. Portanto, esses motores, amplamente disponíveis e robustos, são adequados para veículos elétricos.

O princípio de funcionamento do motor de indução trifásico envolve três bobinas enroladas no estator. O rotor, geralmente composto por barras de cobre ou alumínio interligadas, forma uma espécie de gaiola. Quando as bobinas são alimentadas por uma corrente trifásica, um campo magnético giratório é gerado, induzindo correntes no rotor e produzindo torque. O rotor "persegue" o campo magnético, mas nunca alcança sua velocidade, criando o chamado "escorregamento". A relação entre torque e velocidade é característica, com o torque aumentando até um ponto ótimo de escorregamento e depois diminuindo. A velocidade do campo magnético depende da frequência da alimentação e do número de pólos, permitindo ajustes na velocidade de rotação do motor.

O torque do motor de indução, não decai de forma linear com a rotação como acontece nos motores CC. Pelo fato de ser utilizado uma corrente alternada para gerar o campo magnético, o torque descreve a seguinte relação, mostrada na Figura 6.

Figura 6: Gráfico Torque x Rotação Motor CA



Fonte: Adaptado de Larminie and Lowry (2012).

2.3 PERDAS EM MOTORES ELÉTRICOS

As perdas em motores elétricos representam a parcela da energia elétrica que não é convertida em potência mecânica útil, sendo dissipada sob diferentes formas, como calor ou vibração. Essas perdas podem ser classificadas em cinco categorias principais: perdas no cobre, perdas no ferro, perdas mecânicas, perdas por ventilação e perdas constantes. A seguir, detalha-se cada uma delas.

2.3.1 Perdas no Cobre

As perdas no cobre (P_{cobre}) decorrem da resistência elétrica presente nos enrolamentos do estator e/ou rotor, além do contato elétrico com escovas (em motores comutados). De acordo com a Lei de Joule, essas perdas são proporcionais ao quadrado da corrente elétrica, conforme mostrado na equação (2.11).

$$P_{\text{cobre}} = I^2 R \quad (2.11)$$

Como, em regime estacionário, a corrente elétrica é proporcional ao torque mecânico T

exigido pelo motor, essas perdas podem ser reescritas como a equação (2.12), onde k_c é uma constante que incorpora a resistência do enrolamento e características do campo magnético.

$$P_{\text{cobre}} = k_c T^2 \quad (2.12)$$

2.3.2 Perdas no Ferro

As perdas no ferro (P_{ferro}) estão associadas às variações do fluxo magnético no núcleo ferromagnético do motor. Elas podem ser subdivididas em duas componentes principais: perdas por histerese, que ocorrem devido ao atrito interno nos domínios magnéticos do material, quando estes são realinhados com o campo alternado, e perdas por correntes parasitas (ou de Foucault), que surgem pela indução eletromagnética de correntes no núcleo metálico, gerando aquecimento. Ambas as perdas são fortemente dependentes da taxa de variação do campo magnético aplicado e, portanto, da velocidade angular do rotor, onde k_i é uma constante empírica e ω é a velocidade angular. Por simplificação, podem ser modeladas como mostrado na equação (2.13).

$$P_{\text{ferro}} = k_i \omega \quad (2.13)$$

2.3.3 Perdas Mecânicas

As perdas mecânicas referem-se ao atrito entre partes móveis e ao arrasto aerodinâmico. São modeladas conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Modelagem das perdas mecânicas em motores elétricos

Tipo de Perda	Equação	Descrição
Atrito nos mancais e escovas	$P_{\text{atrito}} = T_f \cdot \omega$	Proporcional à velocidade angular. T_f representa o torque resistivo devido ao atrito.
Ventilação (arrasto aerodinâmico)	$P_{\text{ventilação}} = k_w \cdot \omega^3$	Proporcional ao cubo da velocidade angular. k_w está associado à geometria do rotor e características da ventilação.

Fonte: Autoria própria

2.3.4 Perdas Constantes

Algumas perdas são independentes da carga mecânica ou da velocidade de operação, sendo associadas, por exemplo, ao consumo de circuitos eletrônicos auxiliares, sistemas de

excitação separada, ventiladores constantes, entre outros:

$$P_{\text{constante}} = C \quad (2.14)$$

2.3.5 Modelo Unificado

Somando todas as componentes, a potência total dissipada pelas perdas internas do motor pode ser expressa como mostrado na equação (2.15). Essa equação é fundamental para a modelagem do desempenho de motores elétricos, especialmente em aplicações que demandam alta eficiência energética.

$$P_{\text{perdas}} = \underbrace{k_c T^2}_{\text{Cobre}} + \underbrace{k_i \omega}_{\text{Ferro}} + \underbrace{k_w \omega^3}_{\text{Vent.}} + \underbrace{C}_{\text{Const.}} \quad (2.15)$$

2.4 FUNCIONAMENTO DE UMA BATERIA

O funcionamento da bateria veicular pode ser descrito a partir do comportamento do fluxo de potência elétrica. Quando solicitada pelo sistema, a bateria responde liberando energia química armazenada, convertida em energia elétrica nos eletrodos (TREMBLAY; DESSAINT; DEKKICHE, 2007). A potência que sai da bateria, P_{out} , é função da tensão terminal e da corrente elétrica gerada. Essa corrente é estimada com base na potência demandada pelo veículo, conforme equação (2.16).

$$I(t) = \frac{P(t)}{V(t)} \quad (2.16)$$

Durante o fornecimento de energia, parte da potência é dissipada devido à resistência interna, o que reduz a tensão útil disponível. Assim, a tensão real nos terminais pode ser estimada conforme equação (2.17). Esse fenômeno implica que a potência entregue ao sistema externo é sempre inferior à potência originalmente gerada, sendo essa diferença uma perda inerente ao processo interno da bateria. A eficiência da bateria depende do estado de carga, da resistência interna e da corrente solicitada em cada instante (ZHANG et al., 2020; HE et al., 2011).

$$V(t) = E_{oc}(t) - I(t) \cdot R_{int} \quad (2.17)$$

2.4.1 Potência de Peukert

A potência efetivamente consumida da bateria é determinada pela quantidade de energia elétrica que sai do sistema armazenador para suprir a carga, corrigida pelas perdas internas. Considerando os efeitos resistivos e a natureza não-linear da descarga, a potência de saída da bateria é dada pela equação (2.18), em que k é o coeficiente de Peukert, que representa o impacto da taxa de descarga na capacidade da bateria.

$$P_{\text{out}} = I^k \cdot V \quad (2.18)$$

A Lei de Peukert é utilizada para modelar o comportamento de baterias sob diferentes regimes de descarga. Ela expressa a redução da capacidade efetiva da bateria à medida que a corrente de descarga aumenta. Essa relação é dada por:

$$C_p = I^k \cdot t \quad (2.19)$$

Em que:

C_p = Capacidade de Peukert (geralmente maior que a capacidade nominal);

I = Corrente de descarga;

k = Coeficiente de Peukert, que depende da química da bateria ($k > 1$);

t = Tempo de descarga.

Esse efeito implica que, quanto maior for a demanda instantânea de corrente, menor será a energia total que a bateria consegue disponibilizar antes de atingir o limite de descarga.

2.4.2 Descarga da Bateria

Durante a descarga, a energia acumulada na bateria vai sendo reduzida, o que se reflete tanto na corrente extraída quanto na tensão terminal. A profundidade de descarga (*Depth of Discharge* - DoD) é uma medida percentual da energia que já foi consumida em relação à capacidade total. Ela é definida como mostrado na (2.20).

$$(DoD) = \frac{C_{\text{removida}}}{C_p} \quad (2.20)$$

Conforme o (DoD) aumenta, a tensão terminal da bateria decresce, de acordo com seu perfil de circuito aberto (E_{oc}), ajustado pelas perdas internas causadas pela resistência da bateria. Tal relação pode ser expressa na 2.21.

$$V = E_{oc}(DoD) - I \cdot R_{\text{int}} \quad (2.21)$$

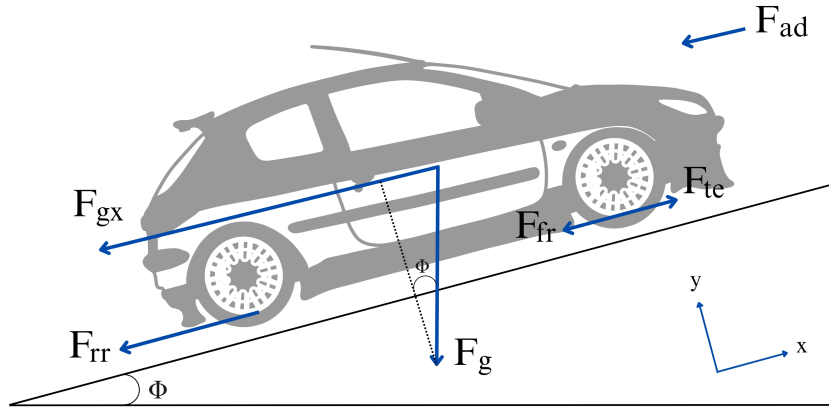
A energia efetivamente consumida pela bateria em um intervalo de tempo Δt pode ser estimada pela integral da potência instantânea ou, para casos discretos como simulações em tempo real, onde o denominador ajusta as unidades para quilowatt-hora (kWh), pela aproximação mostrada na equação (2.22).

$$E_{\text{bat}} = \frac{I^k \cdot V \cdot \Delta t}{3600} \quad (2.22)$$

2.5 ANÁLISE CINEMÁTICA DE UM VEÍCULO

Ao considerar um veículo de massa m , deslocando-se com velocidade v em uma rampa de inclinação ψ , O esforço de tração, representado por F_{te} deve cumprir as seguintes funções: superar a resistência ao rolamento, vencer a resistência aerodinâmica, fornecer a força necessária para contrabalancear o peso do veículo na inclinação e permitir a aceleração do veículo, caso a velocidade não seja constante. A avaliação dinâmica do veículo comumente é realizada a partir de análises dinâmicas em diagramas de corpo livre, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7: Diagrama de corpo livre de um Veículo



Fonte: Autoria própria

A partir da representação esquemática, é possível decompor o esforço de tração nos principais componentes que atuam durante o deslocamento veicular. Cada uma dessas forças possui origem e influência distintas sobre o movimento, sendo possível expressá-las de forma individual por meio de equações específicas. Na Tabela 2, são apresentadas as expressões analíticas e as respectivas descrições das forças consideradas no modelo adotado.

Em situações em que o valor exato do momento de inércia I não está disponível, uma prática comum é aproximar seus efeitos adicionando 5% à massa total do veículo no cálculo da força de aceleração linear, desconsiderando-se explicitamente $F_{\omega a}$ (LARMINIE; LOWRY, 2012). Nesse cenário, É importante destacar que o esforço total de tração corresponde à soma vetorial de todas as forças atuantes no veículo. Durante frenagens ou desacelerações, os termos de aceleração linear F_{la} e rotacional $F_{\omega a}$ tornam-se negativos, contribuindo no sentido oposto ao deslocamento. A equação (2.23) contextualiza esse processo.

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{gx} \pm F_{la} \pm F_{\omega a} \quad (2.23)$$

Tabela 2: Forças atuantes no movimento do veículo elétrico

Força	Equação	Descrição
Resistência ao Rolamento (F_{rr})	$F_{rr} = \mu_{rr} \cdot mg$	Depende do coeficiente de resistência ao rolamento, do peso do veículo e da pressão dos pneus.
Resistência Aerodinâmica (F_{ad})	$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2$	Influenciada pela densidade do ar, área frontal do veículo e coeficiente aerodinâmico (C_d).
Força para Subida de Rampa (F_{hc})	$F_{gx} = mg \cdot \sin \phi$	Componente do peso do veículo ao longo da inclinação da pista.
Força de Aceleração Linear (F_{la})	$F_{la} = ma$	Necessária para variação da velocidade do veículo.
Força de Aceleração Rotacional ($F_{\omega a}$)	$F_{\omega a} = \frac{IG^2}{\eta_{trans} r^2} \cdot a$	Considera a inércia rotacional do motor elétrico e a transmissão.

Fonte: Autoria própria.

2.6 TRÁFEGO

A compreensão científica do fluxo de veículos nas ruas começou a ser desenvolvida a partir da década de 1930, com os trabalhos de Greenshields (1935). Ele estabeleceu relações fundamentais entre grandezas como fluxo, densidade e velocidade, abrindo caminho para pesquisas mais aprofundadas. Desde então, a área evoluiu significativamente, com estudos cada vez mais complexos que buscam modelar a interação entre veículos, ruas, semáforos e outros elementos do sistema viário.

A análise do tráfego veicular sob a perspectiva local e instantânea permite a observação simultânea de diversos veículos dentro de um intervalo de tempo e em uma região espacial limitada da via. Esse tipo de abordagem é comumente viabilizado por câmeras fixas ou sensores posicionados em pontos estratégicos, como postes ou viadutos, que registram o comportamento dos veículos em tempo real. A partir desses dados, é possível calcular médias e estimativas que descrevem o comportamento coletivo do fluxo. As três variáveis mais relevantes extraídas dessa perspectiva são: o fluxo de veículos Q , a velocidade média V e a densidade veicular ρ , mostrados na Tabela 3. Esses parâmetros são fundamentais em diversas abordagens de estudo do tráfego,

como nos modelos hidrodinâmicos, nas análises experimentais baseadas em dados reais e mesmo em simulações microscópicas, quando os resultados são interpretados em uma escala agregada. (TREIBER; KESTING, 2013).

Tabela 3: Definições e expressões das variáveis fundamentais da modelagem macroscópica do tráfego

Variável	Descrição	Expressão Matemática
Fluxo de veículos	Quantidade de veículos que atravessa uma seção da via x em um intervalo de tempo Δt . Representa a capacidade de escoamento da via.	$Q(x, t) = \frac{\Delta N}{\Delta t}$
Velocidade média	Média aritmética das velocidades dos ΔN veículos que passaram pela seção no intervalo considerado.	$V(x, t) = \frac{1}{\Delta N} \sum_{n=1}^{\Delta N} v_n$
Densidade de veículos	Número de veículos por unidade de comprimento da via. Obtida pela razão entre o fluxo e a velocidade média.	$\rho(x, t) = \frac{Q(x, t)}{V(x, t)}$

Fonte: Autoria própria

2.6.1 Tráfego Microscópico de veículos

A modelagem do tráfego pode ser dividida em três escalas principais: macroscópica, mesoscópica e microscópica. Os modelos macroscópicos descrevem o tráfego como um fluxo contínuo, utilizando variáveis agregadas como densidade e velocidade média ao longo da via. Já os modelos mesoscópicos conciliam essa visão com aspectos individuais, considerando grupos de veículos com características semelhantes. No entanto, é na modelagem microscópica que se observa maior detalhamento: ela considera explicitamente a posição, velocidade e aceleração de cada veículo, permitindo simular as interações individuais entre condutores em cenários como aproximações, frenagens e mudanças de faixa.

Nesse contexto, o modelo de Gipps-Santos pode ser classificado como um modelo microscópico de car-following. Ele busca representar a lógica de um condutor ao ajustar sua velocidade em função do veículo à frente, equilibrando dois aspectos: a aceleração desejada em tráfego livre e a necessidade de manter uma distância segura. Essa abordagem permite capturar de forma mais realista o comportamento do tráfego em situações cotidianas, podendo ser utilizada

em simulações urbanas.

Conceitualmente, o modelo determina a velocidade futura de um veículo como o menor valor entre a velocidade que ele gostaria de atingir em um trecho livre (v_{livre}) e a velocidade que garante segurança em relação ao veículo à frente (v_{seg}). Essa lógica simula uma aceleração de forma confortável pelo motorista, quando possível, mas também uma reação com segurança em caso de aproximação rápida de outro veículo. A equação central do modelo é mostrada na Equação (2.24). O termo v_{livre} , que representa a velocidade de aceleração em tráfego livre, é calculado conforme a formulação original proposta por Gipps na equação (2.25). No entanto, cabe destacar que na adaptação de Gipps-Santos, o valor máximo de v_{livre} é limitado pela velocidade da via e pela aceleração máxima desejada pelo motorista, considerada como uma constante.

$$v(t + \tau) = \min(v_{\text{livre}}, v_{\text{seg}}) \quad (2.24)$$

$$v_{\text{livre}} = v(t) + 2.5 a_{\text{max}} \tau \left(1 - \frac{v(t)}{V_{\text{max}}}\right) \left(0.025 + \frac{v(t)}{V_{\text{max}}}\right)^{1/2} \quad (2.25)$$

A velocidade de segurança é calculada a partir de uma versão simplificada da formulação de Gipps, cuja equação base é mostrada na equação (2.26). Essa simplificação consiste em igualar a desaceleração máxima do veículo seguidor com a do veículo líder, além de utilizar o tempo de reação igual a um segundo.

$$v_{\text{seg}} = b \tau + \sqrt{b^2 \tau^2 - b \left[2(x^+ - x - S) - v(t)\tau - \frac{v^+(t)^2}{b^+} \right]} \quad (2.26)$$

Na aproximação utilizada no modelo, garante-se que as distâncias para o veículo da frente e para o veículo de trás na faixa adjacente sejam positivas, além de se verificar se as desacelerações requeridas são superiores à máxima desejada. Em seguida, exige-se que a diferença entre as velocidades de segurança seja maior que o limite pré definido.

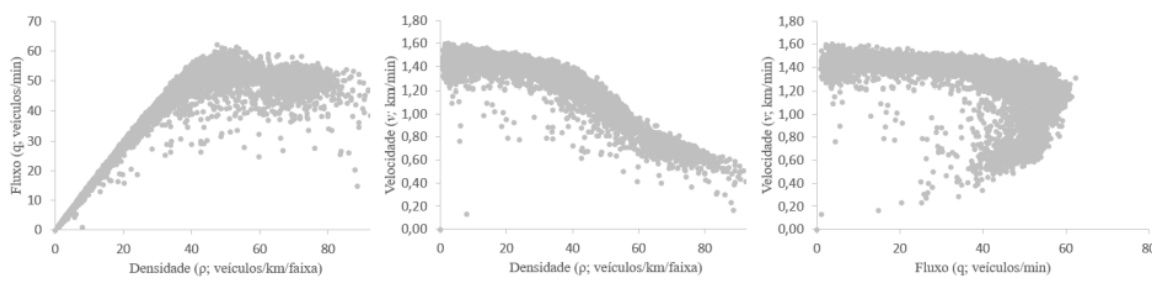
2.6.2 Diagrama Fundamental do Tráfego

O diagrama fundamental do tráfego descreve a relação entre as variáveis macroscópicas densidade (ρ), fluxo (Q) e velocidade média (V), sendo amplamente utilizado para compreender o comportamento agregado do tráfego em diferentes condições de ocupação da via. Embora essas variáveis sejam tradicionalmente associadas a modelos macroscópicos, que tratam o tráfego

como um meio contínuo, sua aplicação se estende a diversas abordagens, incluindo estudos experimentais e análises baseadas em simulações microscópicas, desde que os dados sejam agregados de forma apropriada em espaço e tempo.

A observação empírica dessas grandezas permite construir representações gráficas como o diagrama fundamental, cuja forma depende da modelagem adotada. No modelo proposto por Greenshields, por exemplo, assume-se que a velocidade média dos veículos decresce linearmente com o aumento da densidade. Isso resulta em uma relação parabólica entre fluxo e densidade, como mostrada na Figura 8, em que o fluxo atinge um valor máximo, chamado capacidade da via, antes de entrar em regime de congestionamento. No entanto, essa formulação não é universal, diferentes modelos macroscópicos propõem outras formas funcionais para essa curva, como as expressões logarítmica (GREENBERG, 1959), exponencial (UNDERWOOD, 1961) ou hiperbólica (DRAKE; SCHOFER; MAY, 1965).

Figura 8: Exemplo de diagramas construídos com dados reais de tráfego.



Fonte: (CAMARGO; HORA CARACIOLO FERREIRA; RODRIGUES, 2022).

A utilização de um modelo de simulação microscópica calibrado com base em grandezas macroscópicas estabelece uma ponte metodológica importante entre diferentes escalas de representação do tráfego. Esse tipo de abordagem garante que as interações locais entre veículos, definidas por parâmetros individuais como aceleração, distância de seguimento e tempo de reação, resultem em um comportamento coletivo compatível com os dados empíricos disponíveis ou com modelos agregados consolidados na literatura. Assim, a calibração por meio de grandezas como fluxo, densidade e velocidade média funciona como um mecanismo de alinhamento entre a modelagem e a realidade observada em campo, assegurando que os padrões provenientes da simulação representem adequadamente o sistema estudado.

A partir da coleta de dados reais ou dos resultados agregados de simulações microscópicas,

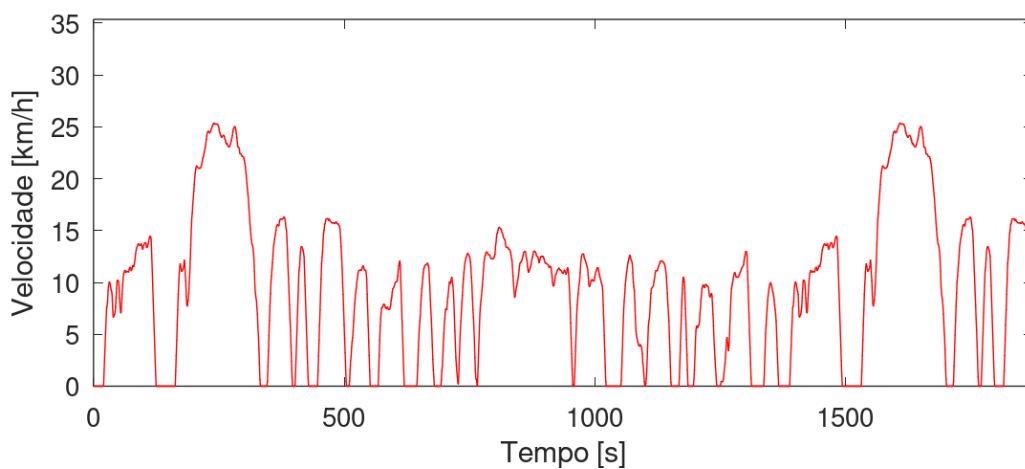
é possível agrupar medições dessas variáveis em intervalos de tempo definidos e, com isso, obter curvas empíricas que descrevem o desempenho de uma via sob diferentes condições operacionais. Essas curvas, denominadas de diagrama permitem identificar, por exemplo, o ponto de máximo escoamento, os limites entre os regimes livre e congestionado, e as variações no comportamento coletivo do tráfego frente a alterações no volume de veículos ou na composição da frota. Ainda que o diagrama fundamental do tráfego represente uma idealização de equilíbrio, os dados observados apresentam, em geral, dispersões decorrentes da heterogeneidade entre condutores, características veiculares e condições da via, e podem ser dispostos em um diagrama do fluxo pela densidade.

2.6.3 Ciclos de Condução

Ciclos de condução são perfis padronizados de velocidade em função do tempo, desenvolvidos para simular condições típicas de operação veicular em testes laboratoriais. Esses ciclos são amplamente empregados em procedimentos de certificação de consumo energético, permitindo uma base comparativa entre diferentes veículos sob condições controladas. Um dos principais protocolos utilizados nesses ensaios é a norma SAE J1634, desenvolvida pela Society of Automotive Engineers (SAE), que estabelece o procedimento para determinação da autonomia e do consumo energético de veículos elétricos em ambientes controlados. O método prevê a execução de ciclos de condução como o FTP-75, que simula tráfego urbano, e o HWFET, voltado para condições de rodovia. Para veículos elétricos, os ciclos são conduzidos em um dinamômetro de chassi até atingir a descarga completa da bateria, a fim de determinar a autonomia e o consumo energético.

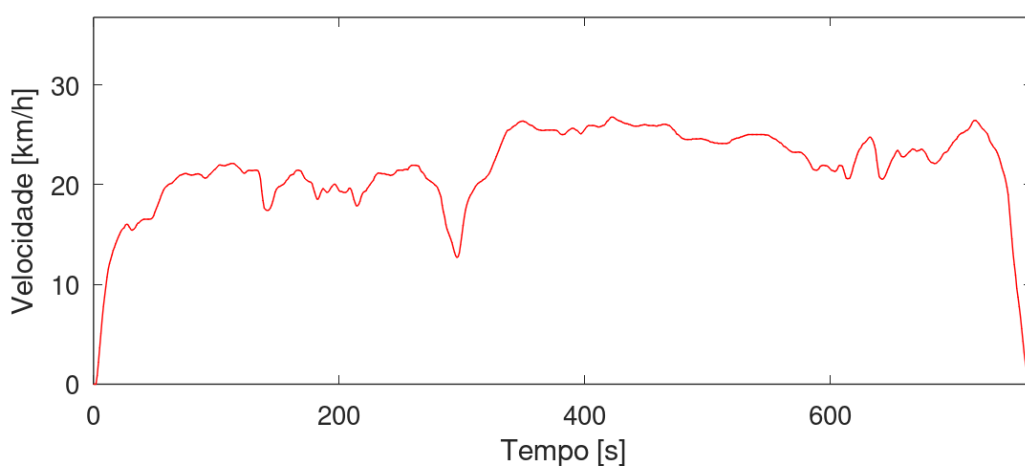
O primeiro citado, desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency) e mostrado na Figura 9, foi originalmente projetado na década de 1970 e consiste em um perfil de velocidade ao longo de aproximadamente 1874 segundos. Seu objetivo é refletir trajetos urbanos com baixa velocidade média e muitas variações de aceleração (FAIZ; WEAVER; WALSH, 1996; FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017). Já o ciclo HWFET, mostrado na Figura 10, visa representar uma condição de condução em estrada. Com duração de 765 segundos, inclui velocidades mais elevadas, típicas de rodovias, e acelerações mais constantes. Esse ciclo é comumente usado em conjunto com o FTP-75 em procedimentos de homologação de veículos no Brasil, conforme previsto pelas normas ABNT NBR 7024 e NBR 6601, para determinação do consumo de combustível e das emissões de poluentes (ABNT, 2002).

Figura 9: Perfil de velocidade do ciclo FTP-75.



Fonte: Autoria própria

Figura 10: Perfil de velocidade do ciclo HWFET.



Fonte: Autoria própria

Vale destacar que, embora amplamente utilizados, os resultados obtidos com esses ciclos não reproduzem com exatidão o consumo e as emissões em condições reais. Estudos mostram que há discrepâncias significativas, com subestimativas que podem superar os 30% em relação ao desempenho observado em vias públicas (HUERTAS; QUIRAMA; GIRALDO, 2019).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia empregada para integrar os modelos de motores veiculares ao comportamento do tráfego, com o intuito de investigar, por meio de simulações, a relação entre o fluxo de veículos e o consumo de energia. O estudo busca estimar o gasto energético por quilômetro rodado em cenários compostos por veículos convencionais e elétricos, foco central desta pesquisa. A Figura 11 Apresenta, por meio de um fluxograma, as etapas do processo de modelagem e simulação adotado. Por fim, o trabalho visa evidenciar os efeitos do aumento da densidade de tráfego sobre o consumo energético do sistema, analisando como as variações nas condições viárias impactam a eficiência operacional.

Figura 11: Fluxograma representando sequência de etapas de projeto

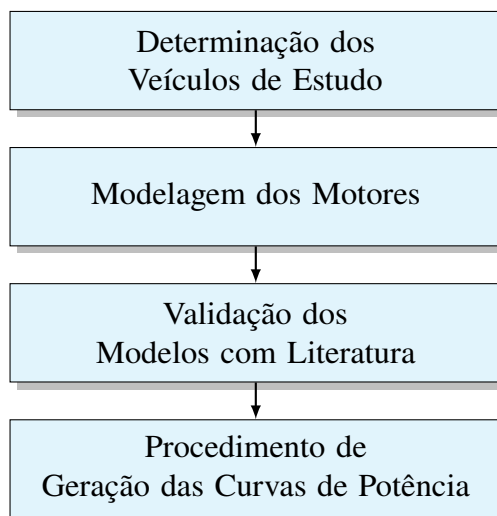


Fonte: Autoria própria

3.1 MODELAGEM DOS MOTORES

As curvas de potência de um veículo são gráficos que representam a variação da potência e do torque em função da rotação do motor (RPM). Dessa forma, para esse trabalho, a avaliação é iniciada a partir da determinação dos veículos de estudo. Em seguida, a modelagem dos motores foi realizada com base em suas especificações técnicas e os modelos desenvolvidos foram validados com base em dados da literatura. Por fim, aplicou-se o procedimento de geração das curvas de potência, processo que permite a interação dos modelos adotados com o simulador de tráfego, resultando em gráficos que representam o desempenho dos motores em função da rotação. A Figura 12 apresenta as etapas realizadas nesse procedimento.

Figura 12: Fluxograma do desenvolvimento das curvas de potência



Fonte: Autoria própria

3.1.1 Escolha dos Veículos

Para os veículos elétricos, foram utilizados dados físicos provenientes do estudo realizado por Larminie e Lowry (2012). No trabalho usado como referência, mais especificamente no capítulo 8, são utilizadas, sem perda de generalidade, informações referentes a uma scooter elétrica com características semelhante aos modelos fabricados pela Peugeot, e ao GMEV1, produzido pela General Motors (GM), nos anos de 1996 a 1999. Seus valores são expressos na Tabela 4. Como citado anteriormente, o objetivo principal desse trabalho é avaliar energeticamente veículos de modelos distintos, movidos a combustão ou a eletricidade, em uma situação de tráfego misto. Nesse cenário, o processo de escolha dos veículos a gasolina modelados foi pautada majoritariamente em suas características físicas, filtrando-as de modo que elas aproximem-se ao máximo daquelas determinadas pelos veículos elétricos. Essa aproximação foi adotada para assegurar um sistema comparativo adequado, de modo que, ao realizar a análise no simulador de tráfego, sejam avaliados veículos com massas, dimensões e desempenhos semelhantes, permitindo isolar o impacto energético associado exclusivamente ao tipo de motorização.

Assim, a escolha dos veículos a combustão seguiu basicamente três premissas principais: Peso compatível com o modelo elétrico estudado, potência máxima similar e informações disponíveis e de fácil acesso em documentos confiáveis. Nesse contexto, e após avaliação, o carro e moto a combustão utilizados nas análises desse trabalho, bem como as características

físicas e energéticas que os caracterizam são mostrados na Tabela 5.

Tabela 4: Variáveis do modelo de scooter elétrico e GMEV1

Variável	Scooter	GMEV1
Massa do veículo (m_v)	115 kg	1470 kg
Massa do passageiro (m_p)	70 kg	70 kg
Massa total (m)	185 kg	1540 kg
Massa ajustada (m_{aj})	194 kg	1560 kg
Coeficiente de arrasto (C_d)	0.75	0.19
Área frontal (A)	0.6 m ²	1.8 m ²
Coeficiente de resistência ao rolamento (μ_{rr})	0.007	0.0048
Relação de transmissão (G)	2:1	11:1
Raio da roda (r)	0.21 m	0.3 m
Tensão do motor (V)	18 V	312 V
Corrente máxima (I_{max})	250 A	350 A
Eficiência da transmissão (η_g)	0.98	0.95
Motor speed	70	N/A
Torque máximo (T_{max})	34 N	140 N
Velocidade máxima (v_{max})	47 km/h	140 km/h

Fonte: Autoria própria

As informações referentes aos dados do Renault fluence são encontradas na ficha técnica do veículo disponível em Renault do Brasil (2015) . As rotações de troca de marcha, por serem características de dirigibilidade, são definidas neste trabalho com base nos limites de segurança do motor e nos parâmetros operacionais adotados no modelo de Andrade (2020), que exige a definição prévia das rotações mínima e máxima para mudança de marcha. Assim, os valores de 1800 rpm e 5000 rpm foram adotados como limites inferiores e superiores, respectivamente, por estarem alinhados com a faixa típica de operação segura de motores ciclo Otto, de aspiração natural, conforme também sugerido em manuais de fabricantes e literatura técnica. Já para o coeficiente de resistência ao rolamento, considerando que o Fluence é um sedã médio equipado com pneus 205/60 R16, adota-se tipicamente o valor de 0,015, conforme dados da literatura técnica e engenharia veicular para esse tipo de configuração, encontrados em Robert Bosch (2000).

Tabela 5: Parâmetros técnicos comparativos: Renault Fluence 2.0 16V Hi-Flex (manual) e motocicleta

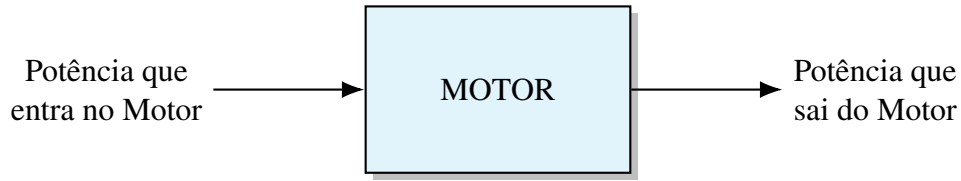
Variável (símbolo)	CG 150	Fluence
Potência máxima do motor ($P_{\max}$)	9 kW (gasolina)	103 kW (gasolina)
Eficiência da transmissão (η_g)	0,80	0,80
Rotação da potência máxima ($n_{P_{\max}}$)	8260 rpm	6000 rpm
Rotação do torque máximo ($n_{T_{\max}}$)	6000 rpm	3750 rpm
Rotação mínima ($n_{\min}$)	1400 rpm	1000 rpm
Rotação máxima ($n_{\max}$)	10500 rpm	7000 rpm
Rotação de troca (máx) ($n_{\text{troca, máx}}$)	5000 rpm	4000 rpm
Rotação de troca (mín) ($n_{\text{troca, mín}}$)	1400 rpm	1500 rpm
Eficiência máxima do motor ($\eta_{\max}$)	0,30	0,30
Redução final (R_{final})	10,31:1	4,31:1
Relação de transmissão (G_t)	2,785/1,789/1,351 1,12/0,958/0,761	3,721/2,101/1,451 1,191/0,971/0,761
Diâmetro do pneu (D_p)	0,610 m	0,652 m
Comprimento total (L)	2 m	4,620 m
Coeficiente de rolagem (μ_{rr})	0,02	0,015
Coeficiente aerodinâmico (C_d)	0,7	0,334
Coeficiente de atrito do pneu (μ)	0,80	0,80
Massa total (m)	177 kg	1425 kg
Velocidade máxima ($v_{\max}$)	80 km/h	160 km/h

Fonte: Autoria própria

3.1.2 Modelagem dos Motores elétricos

Para esta etapa do estudo, foi tomado como referência o fluxograma apresentado na Figura 13, que organiza o procedimento adotado para a determinação das potências desempenhadas pelo motor em função da rotação. Esse fluxograma ilustra a sequência de cálculos utilizada na modelagem, servindo como base para os motores elétricos analisados. Embora a estrutura geral do processo seja semelhante, cada tecnologia de acionamento possui particularidades que se refletem principalmente na formulação do torque e, conseqüentemente, nas expressões empregadas para obtenção da potência e da eficiência.

Figura 13: Fluxo energético do motor



Eficiência do motor

Fonte: Autoria própria

3.1.2.1 Motor de corrente contínua (CC) Para Motocicleta

O torque máximo de um motor elétrico de corrente contínua com escovas é descrito pela equação (2.10) como uma função da velocidade angular. Em baixas velocidades, ele permanece constante até que a rotação do motor atinja um valor crítico ω_c e, após esse ponto, o torque começa a decrescer linearmente com o aumento da velocidade. Dessa forma, é usada a relação descrita na equação (3.1) para encontrar a potência entregue pelo motor:

$$P_{\text{mot}_{out}} = \left(\frac{K_m \Phi E_s}{R_a} - \frac{(K_m \Phi)^2 \omega}{R_a} \right) \times \omega \quad (3.1)$$

A eficiência do motor é definida como a razão entre a potência de saída e a potência total fornecida (saída + perdas), como mostrado na equação (3.2) :

$$\eta_{mot} = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C} \quad (3.2)$$

Essa modelagem permite estimar o desempenho do motor em diferentes regimes de operação e é aplicável a diversos tipos de motores, com ajustes nos coeficientes conforme o projeto. Assim, a potência de entrada pode ser calculada como representada na equação (3.3):

$$P_{\text{mot}_{in}} = \frac{P_{\text{mot}_{out}}}{\eta_{mot}} \quad (3.3)$$

3.1.2.2 Motor de Indução Para Automóvel

Para o motor de indução, o torque é calculado de maneira diferente. O torque máximo também é constante até que a rotação do motor atinja um valor crítico ω_c , porém, após esse instante, ele torna-se equivalente a um valor que permitirá que a potência seja constante com a

rotação. Nesse contexto, a equação (3.4) foi utilizada para descrever o comportamento dessa variável, nessas condições.:

$$\begin{aligned} T &= T_{max}, \omega < \omega_c \\ T &= \frac{P_{max}}{\omega}, \omega \geq \omega_c \\ P_{sai} &= T \times \omega \end{aligned} \quad (3.4)$$

Com o valor do torque calculado para a rotação, as equações (3.1) e (3.2) podem ser usadas para encontrar a potência que entra e que sai do motor, bem como a eficiência.

3.1.3 Modelagem do Motor a Combustão

Já para motores a combustão, a potência entregue pelo motor é modelada em função da rotação do virabrequim (ω_m), com base em uma formulação empírica proposta por Ni e Henclewood (2008). Essa abordagem permite uma aproximação realista da curva de potência a partir de dados básicos do motor, normalmente disponíveis em manuais técnicos: a potência máxima (P_{max}), a rotação correspondente à potência máxima (ω_p) e a rotação de torque máximo (ω_t). A equação utilizada na equação (3.5):

$$P_m(\omega_m) = a \cdot b - c \cdot \omega_m \cdot (\omega_m - \omega_t)^2 \quad (3.5)$$

Essa modelagem permite representar a variação da potência com a rotação do motor de forma contínua e suave, refletindo as principais características da curva real de desempenho. Nesse cenário, os coeficientes a , b e c podem ser definidos na equação (3.6):

$$\begin{aligned} a &= \frac{P_{max}}{2\omega_p^2} \\ b &= (3\omega_p - \omega_t) \cdot \omega_m \\ c &= \frac{P_{max}}{2\omega_p^2(\omega_p - \omega_t)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Além da potência, o modelo também considera o rendimento do motor a combustão, modelado usando como base a expressão definida por Ben-Chaim; Shmerling; Kuperman (2013). Adotou-se, para isso, um modelo empírico simplificado que leva em conta o rendimento máximo

do motor ($\eta_{\max}$), bem como fatores de correção relacionados à carga (μ_p) e à rotação (μ_n), mostrado na equação (3.7).

$$\eta(\omega_m) = \eta_{\max} \cdot \mu_p \cdot \mu_n \quad (3.7)$$

Neste estudo, considerou-se um rendimento máximo típico de 40% para o automóvel, valor usualmente adotado para motores ciclo Otto convencionais em regime de carga parcial, conforme informações encontradas em fichas técnicas. Para a motocicleta, foi usado o valor de 30% conforme estudo realizado por Araújo (2021).

3.1.4 Validação do Modelo dos Motores Elétricos Com Ciclo WOT

No intuito de verificar se as equações descritas anteriormente correspondem ao funcionamento de um motor elétrico, foi criado um ambiente virtual que simula as condições do teste realizado. Nesse cenário, foi utilizado o software SCilab para essa tarefa, devido a fácil interface e intercambialidade entre o modelo proposto e as informações do veículo, mas, a cima de tudo, por ser um software gratuito. Dessa forma, para um veículo em terreno plano, com densidade do ar de $1,25 \text{ kg/m}^3$, a equação (2.20) pôde ser reescrita como expresso na equação (3.8). Substituindo para F_{te} e observando que $a = \frac{dv}{dt}$, obtém-se a equação (3.9).

$$F_{te} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g + 0,625 \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 + m \cdot a + \frac{I \cdot G^2}{\eta_{trans} \cdot r^2} \cdot a. \quad (3.8)$$

$$\frac{G}{r} \cdot T = \mu_{rr} \cdot m \cdot g + 0,625 \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 + \left(m + \frac{I \cdot G^2}{\eta_{trans} \cdot r^2} \right) \cdot \frac{dv}{dt}. \quad (3.9)$$

Como o torque T do motor é constante ou uma função simples da velocidade, a equação acima pode ser reduzida a uma equação diferencial de primeira ordem para a velocidade v . Dessa forma, é possível determinar o valor de v para qualquer instante t . Dessa maneira, ao substituirmos o valor do Momento de força na equação acima por aquele encontrado na equação (2.12) para o motor CC, e (3.4) para o motor de indução, e implementarmos os dados provenientes da tabela 4, encontraremos a seguinte relação, que rege o comportamento do torque com a rotação nessas condições para a motocicleta:

$$T = 153 - 1.16\omega \quad (3.10)$$

$$\frac{dv}{dt} = 1.57 - 0.00145v^2, \quad \omega < \omega_c, \quad (3.11)$$

$$\frac{dv}{dt} = 7.30 - 0.53v - 0.00145v^2, \quad \omega > \omega_c. \quad (3.12)$$

E para o automóvel:

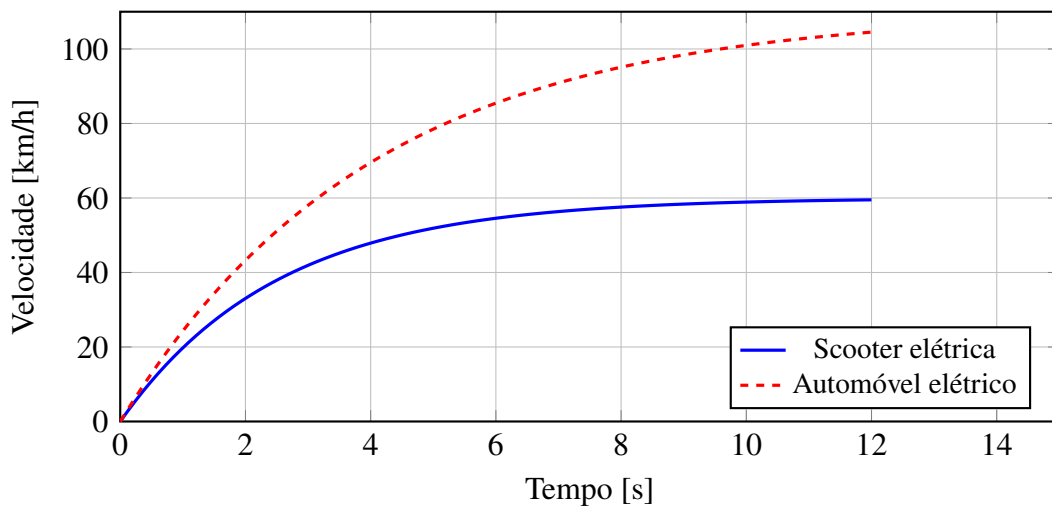
$$T = \frac{102600}{\omega} \quad (3.13)$$

$$\frac{dv}{dt} = 3.11 - 0.000137v^2, \quad \omega < \omega_c, \quad (3.14)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{62.1}{v} - 0.046 - 0.000137v^2, \quad \omega > \omega_c \quad (3.15)$$

Para solucionar essas EDOs, foi implementado o método de Runge-Kutta, uma técnica numérica utilizada para resolver equações diferenciais ordinárias. Aliado à implementação dos parâmetros e equações já citados, o resultado da aplicação desse método é o desenvolvimento de um vetor velocidade variando de 0 a velocidade máxima do veículo, sempre usando a potência máxima disponível no motor naquele instante. Tal procedimento é conhecido como: WOT (Wide Open Throttle), que refere-se à condição em que o acelerador de um veículo está completamente aberto, permitindo que o motor opere com máxima potência. Assim, é criado um ambiente que possibilite a determinação dos valores de velocidade, rotação, torque, na faixa de tempo que se deseja analisar. Para o teste em questão, foi utilizado um período de 50 segundos, com intervalos de tempo espaçados em 0,1 segundos. A solução que se espera encontrar com a finalização desse processo pode ser graficamente representada a partir da figura 12.

Figura 14: Curvas típicas de velocidade no teste WOT: scooter elétrica vs. automóvel elétrico

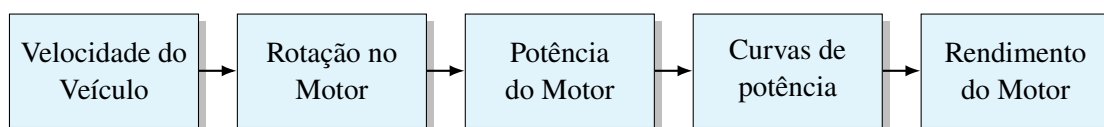


Fonte: Autoria própria

3.2 PROCEDIMENTO PARA GERAÇÃO DE CURVAS DE POTÊNCIA

Para garantir a intercambialidade dos modelos de motores desenvolvidos com os pré-requisitos de entrada do simulador de tráfego adotado, um algoritmo foi desenvolvido no Octave, Software usado como ambiente para as análises desempenhadas a partir desse tópico no trabalho, devido a ser mais completo que o scilab e também gratuito. De modo geral, a lógica principal usada corresponde a tentativa de aproximação de uma análise instantânea de potência para cada motor, tendo o fluxo de energia determinado a cada valor de rotação correspondente, e dessa forma, criando uma curva de potência específica para cada sistema. A Figura 15 representa o fluxo de atuação desse processo, incorporando o cálculo da eficiência na análise realizada, que serviu como prelúdio da análise energética, mesmo não sendo uma variável de entrada propriamente dita do simulador.

Figura 15: Parâmetros calculados para geração das curvas de potência



Fonte: Autoria própria

3.2.1 Velocidade

O desenvolvimento das curvas descritas anteriormente é feito a partir da determinação da potência de saída no motor, para cada valor de velocidade que o veículo desempenha, em um determinado tempo. A abordagem realizada tentou aproximar uma análise instantânea do movimento visando aumentar a precisão dos dados gerados, sem comprometer o desempenho computacional. A potência máxima disponível no componente é determinada para cada valor da velocidade variando de 0 a velocidade máxima do veículo, em intervalos de $0,1 \text{ m/s}$. Além do exposto, a aproximação é dada como prerrogativa para a utilização do simulador de tráfego.

3.2.2 Rotação

Para os veículos elétricos a rotação no motor, dada uma velocidade, é calculada por uma fórmula direta devido a falta de influência de um sistema de marchas. Dessa forma, a equação (3.16) é utilizada para definir o perfil de velocidade angular desempenhada pelo motor durante todo o trajeto

$$\omega_{motor} = \frac{v \cdot (G)}{(r)} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (3.16)$$

Já para os veículos a combustão, o cenário muda um pouco. As relações de transmissão apresentadas na Tabela 5 influenciam diretamente o cálculo da rotação, além da coalizão com outros conceitos, como a embreagem e consequentemente, as trocas de marcha. Para garantir o funcionamento adequado do motor e a sua operação dentro da faixa ideal de desempenho, o algoritmo implementado realiza a troca automática de marchas. Quando a rotação estimada ultrapassa o valor máximo para determinada marcha, ocorre a mudança para a marcha seguinte, o que reduz a rotação para uma mesma velocidade. Da mesma forma, caso a rotação fique abaixo do valor mínimo, uma redução de marcha é realizada, aumentando a rotação do motor. Após cada troca de marcha, a rotação é imediatamente recalculada com base na nova relação de transmissão de acordo com a equação 3.17.

$$\omega_{motor} = \frac{v \cdot R_{final} \cdot (G)_{marcha \text{ atual}}}{r} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (3.17)$$

3.2.3 Potência

Dentro do ambiente do Octave, com a rotação determinada no tópico anterior, é implementado uma função que calcula a potência entregue pelo motor para cada veículo classificado pelas tabelas 5 e 6, utilizando as equações (3.1), (3.4) e (3.5). Dessa forma, cada automóvel e motocicleta estudados receberá as características referentes ao motor a ele atribuído, e a potência pode ser calculadas conforme fórmula adequada respectiva.

3.2.4 Curvas de Potência

Nesse contexto, a potência desenvolvida pelos motores é representada em gráficos em função da rotação pré-determinada, originando as curvas características de potência. O formato dessas curvas varia de acordo com as propriedades físicas e construtivas de cada motor, de modo que elas se tornam uma assinatura representativa do seu comportamento dinâmico. Nesse trabalho, essa forma de representação foi utilizada pois, além de ser uma variável de entrada do simulador, foi possível através dela comparar os modelos de motores, de modo a evidenciar suas particularidades de desempenho.

3.2.5 Rendimento

Como mostrado pela equação (3.2), para os modelos elétricos, o cálculo do rendimento ocorre através da determinação das perdas energéticas decorrentes do funcionamento do motor. Essas perdas dependem das características físicas das estruturas que comportam os motores. Descritas como os coeficientes na equação (2.15), os valores dessas variáveis são retirados de Larminie e Lowry (2012) e são descritos para cada modelo de motor na Tabela 6 :

Tabela 6: Parâmetros de perdas para diferentes tipos de motores elétricos

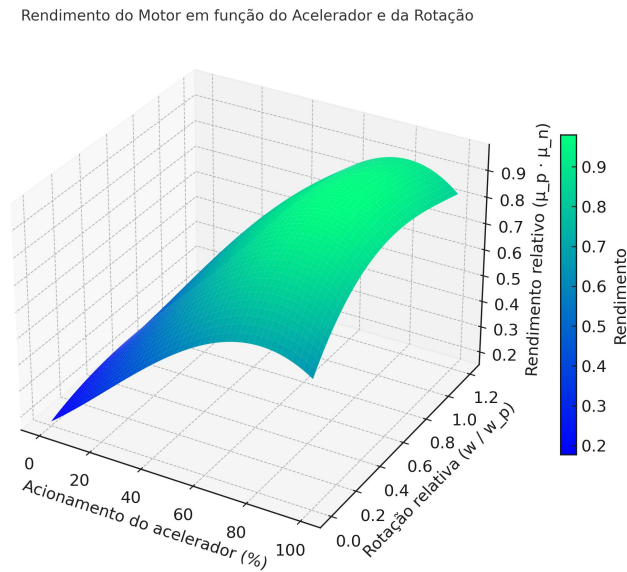
Parâmetro	Motor CC tipo ‘Lynch’ com escovas (2–5 kW)	Motor de indução de alta rotação (100 kW)
k_c	1,5	0,3
k_i	0,1	0,01
k_w	10^{-5}	$5,0 \times 10^{-6}$
C	20	600

Fonte: Adaptado (LARMINIE; LOWRY, 2012)

Para o motor a combustão, foi tomada uma outra abordagem. O rendimento desse motor, assim como o elétrico, não é constante ao longo do seu funcionamento, variando em função de dois parâmetros principais: o nível de carga solicitado pelo condutor, representado pela porcentagem de acionamento do acelerador, e a rotação em que o motor opera em relação à sua rotação de pico. Para representar esse comportamento de forma aproximada, foi adotado um modelo empírico, descrito em Ben-Chaim; Shmerling; Kuperman (2013), que estima o rendimento instantâneo com base nesses dois fatores. A Figura 16 ilustra essa relação.

A porcentagem de acionamento do acelerador, simbolizada por α , varia entre 0 e 1, e expressa o quanto da potência máxima está sendo demandado pelo condutor em determinado instante. Esse parâmetro é utilizado no cálculo de um fator de modulação de eficiência, denominado μ_p , que representa como a eficiência do motor se comporta sob diferentes níveis de carga. O fator μ_p é obtido por meio de um polinômio de terceiro grau ajustado a partir de dados experimentais, refletindo a característica típica dos motores, nos quais a eficiência tende a aumentar com a carga até um ponto ótimo, diminuindo em seguida quando a solicitação atinge valores muito altos.

Figura 16: Rendimento do Motor em função do acelerador e da rotação



Fonte: Autoria própria

De forma complementar, a rotação do motor é normalizada pela rotação na qual o motor atinge sua potência máxima. A partir disso, calcula-se outro fator de eficiência, μ_n , também por meio de uma equação polinomial cúbica. Esse fator representa como a eficiência se altera com a velocidade angular do motor, reconhecendo que existe uma faixa ideal de rotação na qual o desempenho energético é maximizado.

Por fim, o rendimento total instantâneo do motor é dado pelo produto entre a eficiência máxima possível do sistema ($\eta_{\max}$) e os dois fatores moduladores calculados na equação 3.7

3.3 INICIALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A Figura 17 ilustra o funcionamento do simulador de tráfego, pautado na concepção de entradas e saídas.

Figura 17: Fluxograma do funcionamento do simulador de Tráfego



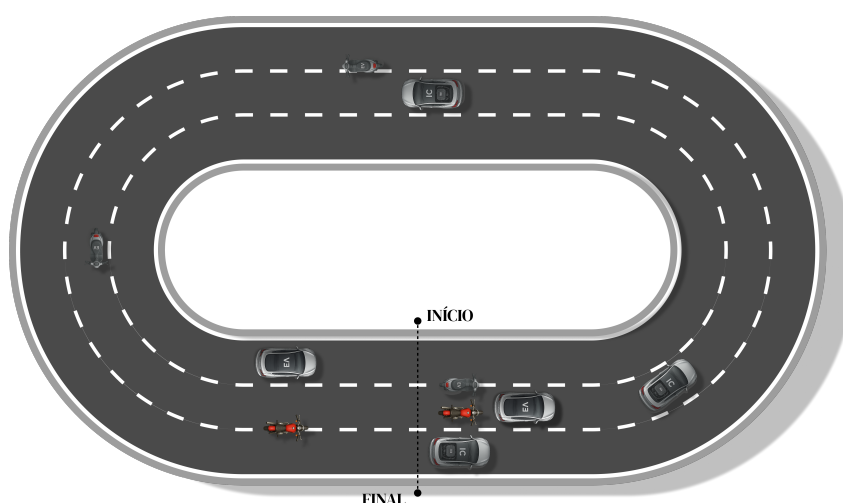
Fonte: Autoria própria

Nesse cenário, a forma com que os veículos se comportam durante o percurso foi determinada a partir da dependência entre as curvas de potência disponível no motor, as características físicas e energéticas de cada veículo, como mostrado nas Tabelas 5 e 6, e o do modelo de tráfego adotado, como Composição do tráfego, Velocidade máxima, Tamanho da, pista, Inclinação da pista e Tempo de simulação. Conforme a metodologia descrita por Araújo (2021), que fundamenta a utilização do simulador neste trabalho, a análise do movimento dos veículos e da respectiva demanda energética foi realizada por meio da integração entre o modelo do motor e as características físicas dos veículos. Por sua vez, o modelo de tráfego foi responsável por representar o comportamento dos condutores, estabelecendo as regras de circulação adotadas no ambiente simulado.

3.3.1 Simulador

Nesse trabalho, assim como no do Fernando Araújo, o modelo de tráfego utilizado foi o desenvolvido pelo Maurício Novaes Santos (Modelo Gipps-Santos) em seu mestrado e atualizado durante seu doutorado em andamento (SANTOS, 2019). No sistema, pista simulada, Figura 18, comporta-se como um sistema fechado, ou seja, seu fim está conectado ao seu início. Esse arranjo garante que os veículos que alcançam a extremidade sejam automaticamente redirecionados ao ponto de partida, mantendo suas condições originais.

Figura 18: Representação da pista adotada no simulador de tráfego



Fonte: Autoria própria

A pista é composta por três faixas de tráfego, acessíveis tanto para carros quanto para motocicletas. Entre essas faixas, há dois corredores exclusivos, destinados apenas ao

deslocamento das motos durante a simulação. Antes do início da simulação, os veículos são posicionados aleatoriamente ao longo da pista, e, durante a execução, não ocorre entrada nem saída de carros ou motos no sistema. A dinâmica dos veículos é avaliada em duas etapas: inicialmente, verifica-se a intenção de mudança de faixa, seguida pela determinação da aceleração desejada pelo condutor ao longo do deslocamento longitudinal. O modelo é responsável por estudar o movimento desempenhado pelos veículos a partir dessas prerrogativas da seguinte forma: primeiro se a mudança de faixa ocorreu dada a intenção, depois avalia a aceleração desempenhada pelo condutor no movimento. Para que um veículo possa realizar uma mudança de faixa, é necessário que duas condições fundamentais sejam atendidas: a segurança da manobra e a vantagem em realizá-la. A Tabela 7 descreve esses eventos.

Tabela 7: Critérios para mudança de faixa no modelo de tráfego

Critério	Descrição
Segurança	Verifica se há distância segura entre o veículo e os demais na faixa de destino. Avalia também se as desacelerações necessárias são inferiores à desaceleração máxima, evitando frenagens bruscas ou colisões.
Vantagem	Analisa se a mudança trará benefício ao condutor, como maior fluidez. A mudança só será realizada se a diferença entre essas duas velocidades for superior a um valor mínimo predeterminado, indicando que há, de fato, um ganho em termos de desempenho ao trocar de faixa.

Fonte: Autoria própria

Para fins de simplificação do modelo, a equação original de Gipps considera o tempo de reação dos condutores como nulo. No entanto, no simulador utilizado neste estudo, é adotado um tempo de reação padrão, de valor um segundo, que representa o intervalo necessário para que um condutor inicie sua resposta ao comportamento do veículo à frente, além de que todos os veículos de mesma categoria possuem a mesma capacidade máxima de frenagem. Esses critérios garantem que a manobra seja realizada de forma segura e vantajosa dentro do ambiente simulado. Essa abordagem segue os princípios dos modelos previamente utilizados em estudos do grupo de pesquisa do laboratório de otimização de sistemas térmicos (LOST).

O modelo microscópico abordado avalia o comportamento veicular com base em dois critérios principais: a condução em tráfego livre e a segurança em relação ao veículo à frente. Para isso, considera parâmetros como a velocidade máxima da via, a distância mínima entre

veículos e os limites de aceleração e desaceleração. A lógica utilizada nos trabalhos citados determina uma equação, que atualiza a velocidade do veículo a cada intervalo de tempo e leva em conta essas variáveis, garantindo que os valores estejam dentro dos limites definidos. Além disso, a aceleração é calculada com base na variação de velocidade entre os instantes, respeitando os valores máximos permitidos tanto para ganho quanto para perda de velocidade.

3.3.2 Percurso Avaliado e Calibração do Modelo

A necessidade de calibração do modelo de simulação de tráfego é amplamente reconhecida na literatura, sendo considerada um fator fundamental para assegurar a representatividade e a confiabilidade dos resultados gerados. Trabalhos como os de Araújo (2021) e Santos (2019) destacam a calibração como etapa indispensável para o funcionamento adequado do simulador. Neste estudo, os procedimentos descritos por Araújo (2021) foram adotados como base metodológica, servindo de referência para a construção e a validação do modelo proposto.

Nesse contexto optou-se por seguir a mesma análise realizada em Araújo (2021) para um trecho de uma avenida da cidade de Recife, a via Mangue, justificada pela peculiaridade de que o fluxo de veículos só é interrompido pela a quantidade de veículos acima da capacidade da via, e não por algum atuante externo, além da calibração já ter sido realizada no trabalho tomado como referência. A Figura 19 ilustra a via estudada.

Figura 19: Imagem representando a totalidade da via Mangue em Recife-PE



Fonte: Auditoria do TCE-PE (2024)

A análise de vídeos realizada no trabalho de referência foi essencial para a construção do diagrama de fluxo versus densidade do trecho da Via Mangue, a partir de dados capturados por câmeras de monitoramento posicionadas ao longo da via. Dentro do trabalho base, o fluxo foi

estimado a partir da delimitação de um trecho da via, em que a contagem de veículos por minuto pôde ser extraída das gravações, enquanto a densidade, por sua vez, foi calculada pela razão entre o número de veículos presentes e a extensão observada. Dessa forma, Essa base experimental foi utilizada na calibração do modelo de tráfego através de variáveis macroscópicas do sistema, conduzida a partir de uma análise de sensibilidade, na qual os parâmetros mais relevantes foram ajustados para minimizar o erro relativo entre os resultados simulados e os dados de observações reais.

Nesse contexto, é importante destacar, entretanto, que o cenário atual simulado difere do estudo base utilizado como referência pelo fato de nele existir uma diferente composição veicular. Enquanto o estudo original considerava um tráfego convencional, composto exclusivamente por veículos a combustão, a proposta atual adota um ambiente misto, variando a representatividade de veículos elétricos na via. Essa mudança não influencia diretamente o sistema calibrado adotado, entretanto, a adoção de um veículo a combustão com características diferentes pode impactar significativamente os resultados da calibração, especialmente no comportamento dinâmico do fluxo, devido às distintas características de aceleração, frenagem e dimensões dos veículos.

Para verificar a sensibilidade do modelo a essas alterações, foram realizadas simulações adicionais com os modelos de veículos adotados, mas mantendo as mesmas variáveis observadas no estudo de referência. Esse procedimento buscou isolar o efeito da mudança da frota sobre o erro relativo entre simulação e dados observados, permitindo avaliar se o modelo calibrado para o cenário base mantém boa aderência ou se necessita de ajustes específicos para representar adequadamente a nova configuração veicular.

3.3.3 Estudo Realizado

Nesse tópico, é explicado como foi desempenhado estudo realizado neste trabalho, a partir da utilização do simulador de tráfego citado nas seções anteriores. Neste contexto, usou-se o modelo microscópico de tráfego, desenvolvido por Santos (2019) e previamente calibrado e validado, conforme o método proposto por Araújo (2021). A calibração envolveu parâmetros fundamentais dos veículos convencionais, como aceleração máxima, comprimento dos veículos e características de condução, de modo a assegurar a representatividade do comportamento do fluxo veicular na simulação. Os demais parâmetros calibrados, bem como seus respectivos valores padrões estão expostos na Tabela 8. Ressalta-se, contudo, que nesta etapa a aplicação do modelo configura-se mais como uma análise exploratória do que como um processo de calibração

propriamente dito.

Tabela 8: Parâmetros de entrada utilizados na simulação.

Parâmetros de entrada, símbolo	Valor
Probabilidade de Mudança de Faixa, P_{mf}	1,1%
Desaceleração Aleatória, d_{al}	1,0 m/s ²
Probabilidade de Frenagem Aleatória, P_{fa}	10%
Distância Mínima Entre os Veículos, D_{min}	3,0 m
Aceleração Máxima, a_{max}	0,4 m/s ²
Desaceleração Máxima, d_{max}	2,0 m/s ²
Velocidade Máxima, V_{max}	55 km/h

Fonte: (ARAUJO, 2021)

Com base nesse modelo, foram realizadas simulações com o objetivo de avaliar o impacto da introdução de veículos elétricos no tráfego viário. Para isso, além da análise padrão realizada para veículos convencionais a combustão, variou-se a densidade de tráfego para os automóveis em geral, alternando a proporção de veículos elétricos (motocicletas e automóveis) inseridos na via. Essas variáveis possibilitaram a análise dos efeitos do aumento de veículos elétricos, em conjunto com diferentes níveis de ocupação da via, sobre o perfil de velocidades e o fluxo global do sistema. Importa salientar que, embora as características dos veículos elétricos tenham sido ajustadas a partir dos parâmetros já calibrados para os veículos convencionais, essa etapa consistiu em uma análise de cenários. Os parâmetros adotados para os veículos elétricos basearam-se em estudos prévios da literatura, mas não foram submetidos a um novo processo de calibração específico.

A escolha das densidades veiculares simuladas neste trabalho foi fundamentada na segmentação adotada por Araújo (2021), que utilizou um método de agrupamento estatístico para classificar o diagrama fluxo-densidade em três grupos distintos: fluxo livre, fluxo intermediário e fluxo congestionado. Conforme evidenciado em seu estudo, esses agrupamentos apresentam variações significativas nos parâmetros característicos de tráfego, sendo representativos das diferentes condições operacionais da via. Assim, as densidades escolhidas neste trabalho buscam representar, de forma sintética, pontos centrais dentro de cada uma dessas faixas de operação.

Tabela 9: Densidades adotadas para realização do estudo

DENSIDADE [carros · km ⁻¹ · faixa ⁻¹]										
20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, observa-se nos exemplos de simulação, mostrados na Tabela 11, que a análise foi conduzida considerando valores crescentes de densidade de automóveis, definidos como mostrado na Tabela 9. Para cada uma dessas densidades, também foram avaliadas diferentes proporções entre veículos elétricos e veículos a combustão. Especificamente, as simulações foram realizadas para onze cenários distintos, em que a participação dos veículos elétricos variou conforme os testes ilustrados na Tabela 10, com a fração correspondente de veículos a combustão ajustada de forma complementar.

Tabela 10: Composição percentual dos testes entre veículos elétricos (VE) e veículos a combustão (VC)

Configuração	% VE	% VC
Teste 1	100	0
Teste 2	90	10
Teste 3	80	20
Teste 4	70	30
Teste 5	60	40
Teste 6	50	50
Teste 7	40	60
Teste 8	30	70
Teste 9	20	80
Teste 10	10	90
Teste 11	0	100

Fonte: Autoria própria

Tabela 11: Exemplo de processo de simulação para densidade e proporção de veículos elétricos

Variável	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Densidade de carros (carros/km faixa)	20	20	20	20
Densidade de motos (motos/km faixa)	10	10	10	10
Proporção de carros a combustão	1,00	0,90	0,80	0,70
Proporção de carros elétricos	0,00	0,10	0,20	0,30
Proporção de motos a combustão	1,00	0,90	0,80	0,70
Proporção de motos elétricas	0,00	0,10	0,20	0,30

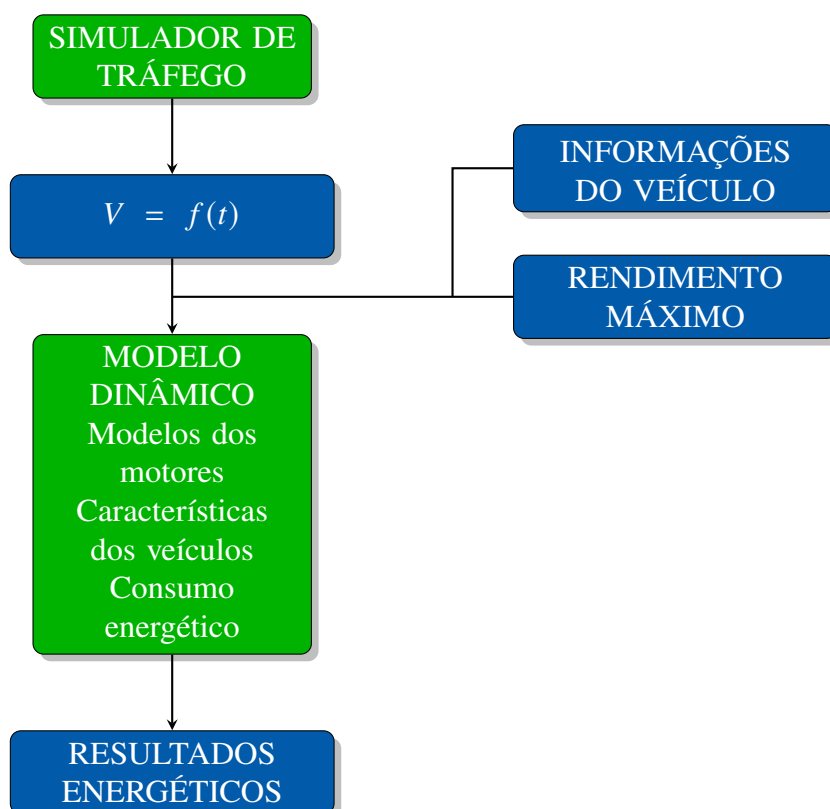
Fonte: Autoria própria

A densidade de motocicletas teve valor fixo, 10 motos km^{-1} faixa $^{-1}$. Essa decisão se deve à baixa presença de motos registrada nos vídeos analisados no trabalho de referência, com média de 3,1 e máximo de 13 motos km^{-1} faixa $^{-1}$, sem padrão definido ao longo do dia. Dessa forma, na intenção de simplificar a simulação, adotou-se um valor constante para esse parâmetro. Por fim, a efetividade do simulador nas condições testadas garante a geração de onze conjuntos de perfis distintos de velocidade para cada veículo, referentes a cada configuração de densidade de tráfego citada, levando em consideração, uma porcentagem específica de veículos elétricos na via.

3.4 ANÁLISE ENERGÉTICA

Com a definição da velocidade instantânea para cada veículo ao longo de todo o trajeto, iniciou-se a etapa de análise energética do sistema. A metodologia adotada neste trabalho foi baseada no estudo desenvolvido por Andrade (2020), que propôs essa abordagem para ciclos de condução desenvolvidos para as vias urbanas da cidade do Recife. No presente projeto, essa metodologia foi adaptada de forma a atender às particularidades do sistema analisado, incorporando contribuições específicas do autor, demonstradas na imagem como o desenvolvimento dos modelos de motores elétricos e a análise realizada para veículos com diferentes tipos de propulsão. A Figura 20 apresenta um diagrama representativo do procedimento adotado.

Figura 20: Fluxograma do processo de análise energética adaptado



Fonte: Autoria própria e adaptado de Andrade (2020)

Para este estudo, o simulador de tráfego foi utilizado como gerador dos perfis de velocidade que representam o comportamento dos veículos na pista, em contraste com o ciclo de condução adotado no trabalho de referência. Além disso, foram analisados três tipos distintos de motores, cujas características energéticas são determinadas pelos modelos já desenvolvidos, distribuídos em quatro modelos veiculares, classificados com base em suas especificações técnicas. Ressalta-se que, para garantir a efetividade da análise, foi necessário desenvolver uma modelagem específica para o cálculo do consumo energético ao longo do trajeto simulado, diferenciada entre os modelos de motores. Esses modelos compõem o sistema de simulação dinâmica.

3.4.1 Cálculo da Potência do Motor

Para que um veículo consiga acelerar ou manter sua velocidade constante, é necessário que a potência fornecida à roda seja suficiente para vencer as forças resistivas, definidas como resistências aerodinâmica, de rolagem, gravitacional e inercial. Essa potência desejada nas rodas (P_{des}) é determinada a partir da análise dinâmica do movimento, empregando um somatório de forças, como exemplificado no tópico (2.5). A inclinação na pista é considerada nula para análise

em questão. Dessa forma, para cada perfil de velocidade gerado pelo simulador, a potência desejada na roda do veículo é calculada a partir das equações (3.18) a (3.20).

$$F_{\text{roda}} = \mu_{rr} \cdot m \cdot g + \rho_{ar} \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 + (\Delta)m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (3.18)$$

$$P_{\text{roda}} = F_{\text{roda}} \cdot v \quad (3.19)$$

$$P_{\text{des}} = \frac{P_{\text{roda}}}{\eta_{\text{trans}}} \quad (3.20)$$

Nesse cenário, é realizada a comparação entre a potência desejada nas rodas e a potência máxima disponível no motor, a qual depende diretamente da rotação (ω). Essa potência máxima (P_{max}) é obtida a partir dos modelos dos motores desenvolvidos no tópico (3.1), vetorizado para todas as rotações consideradas. O termo (Δ) que está multiplicando a massa é caracterizado por ser uma constante, referente a atuação das forças de aceleração linear e rotacional. A fim de garantir que a potência do motor não exceda a potência demandada, aplica-se um fator de controle α , que funciona analogamente a um pedal de acelerador. Esse fator regula a fração da potência máxima efetivamente utilizada pelo motor, sendo definido na equação (3.21). Com isso, calcula-se a potência efetivamente entregue pelo motor ($P_{\text{mot}_{out}}$), dada na equação (3.22).

$$\alpha = \min \left(\max \left(\frac{P_{\text{des}}}{P_{\text{max}}}, 0 \right), 1 \right) \quad (3.21)$$

$$P_{\text{mot}_{out}} = \alpha \cdot P_{\text{max}} \quad (3.22)$$

Na sequência, é determinado o rendimento (η_{mot}) do motor para cada configuração de veículo e motor, a partir da metodologia empregada no tópico (3.2). Esse rendimento é utilizado para estimar a potência que entra no motor ($P_{\text{mot}_{in}}$), como em (3.23).

$$P_{\text{mot},in} = \begin{cases} \frac{P_{\text{mot}_{out}}}{\eta_{\text{mot}}}, & \text{se } \eta_{\text{mot}} \neq 0 \\ 0, & \text{se } \eta_{\text{mot}} = 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

3.4.2 Modelagem do Consumo de Energia para Veículos Elétricos

A potência instantânea entregue pela bateria não representa diretamente o consumo efetivo de energia observado na fonte, pois o processo de descarga envolve perdas associadas a fenômenos eletroquímicos e resistivos. Neste trabalho, considera-se que a energia solicitada pelo sistema de armazenamento é determinada pela potência demandada no motor, e calculada com base na tensão de circuito aberto (E_{oc}), cuja definição depende do tipo de bateria utilizada e do estado de descarga da bateria (DoD). Essa variável indica a proporção de energia já utilizada em comparação à capacidade total disponível em plena carga. Dessa forma, duas configurações foram adotadas: baterias de chumbo-ácido seladas e baterias de níquel-cádmio.

No caso das baterias de chumbo-ácido, a relação entre tensão e estado de carga é aproximadamente linear. Por isso, é adotada uma expressão simples que considera uma queda linear da tensão de circuito aberto por célula ao longo da descarga. O modelo adotado é descrito pela equação (3.24), com (N_{cells}) representando o número de células adotadas na bateria:

$$E_{oc} = (2,15 - 0,15 \cdot DoD) \cdot N_{cells} \quad (3.24)$$

Por outro lado, baterias de níquel-cádmio apresentam uma resposta de tensão mais complexa e fortemente não linear ao longo do ciclo de descarga. Para representar adequadamente essa característica, foi utilizada uma equação polinomial de sétimo grau, ajustada a partir de dados experimentais, conforme apresentado na equação (3.25):

$$E_{oc} = N_{cells} \cdot (- 8,2816 \cdot DoD^7 + 23,5749 \cdot DoD^6 - 30 \cdot DoD^5 + 23,7053 \cdot DoD^4 - 12,5877 \cdot DoD^3 + 4,1315 \cdot DoD^2 - 0,8658 \cdot DoD + 1,37) \quad (3.25)$$

Ambas as expressões provém do estudo realizado em Larminie e Lowry (2012) e são usadas para estimar a tensão de circuito aberto da bateria a cada instante do processo de simulação. A escolha desses dois tipos de bateria foi motivada pelo respaldo técnico-científico encontrado no trabalho analisado, além de representarem dois modelos comumente encontrados no mercado na composição de automóveis e motocicletas elétricas. Considerando que a demanda energética do veículo varia ao longo do trajeto, a tensão de circuito aberto da bateria (E_{oc}) é recalculada a cada instante da simulação, de forma a refletir o estado de descarga atualizado. Com isso, para uma determinada potência requerida pelo motor, obtida pela Equação (3.3), é possível

calcular a corrente de saída da bateria com base na tensão instantânea, conforme expresso na Equação (3.26).

$$I(n) = \frac{E_{oc} - \sqrt{E_{oc}^2 - 4 \cdot R_{in} \cdot P_{mot_{in}}}}{2 \cdot R_{in}} \quad (3.26)$$

Assim, a potência fornecida pelos eletrodos é ajustada com base nesse valor e corrigida pelo efeito de Peukert, com coeficiente representado por k , determinado na equação (2.22). Desse modo, o consumo energético ao longo do tempo pôde ser estimado a partir da soma das potências instantâneas fornecidas pela bateria, expressa na equação (3.27) em quilowatt-hora (kWh), convertidas em energia acumulada.

$$P_{bat} = I^k \cdot V \cdot \frac{1}{3,6 \cdot 10^6} \quad (3.27)$$

$$\text{consumo} = \sum P_{bat}$$

3.4.3 Modelagem do Consumo de Energia para Veículos a Combustão

O consumo de combustível do veículo a combustão foi estimado com base na potência de tração exigida nas rodas, levando-se em conta as perdas mecânicas associadas ao sistema de transmissão (η_{trans}), bem como as perdas térmicas inerentes ao motor (η_{motor}). A conversão da potência requerida em consumo é feita a partir do poder calorífico inferior do combustível (PCI_{comb}). O cálculo foi realizado ponto a ponto, permitindo assim a obtenção do consumo instantâneo ao longo de todo o trajeto. Além disso, Nos instantes em que a velocidade do veículo é nula, ou seja, em marcha lenta, foram adotados valores de consumo específicos conforme a litragem do motor. Já para a condição de desaceleração com rotação superior a 1000–1200 rpm, foi adotada a estratégia comum em motores com injeção eletrônica, na qual a injeção de combustível é interrompida temporariamente. Nessas condições, o consumo foi considerado nulo, pois o motor é mantido em funcionamento apenas pela inércia do veículo.

A formulação matemática utilizada para o cálculo do consumo energético baseia-se na metodologia de Andrade (2020), e pode ser representada pela equação (3.28).

$$\text{consumo} = \frac{P_{mot_{in}}}{PCI_{comb}} \quad (3.28)$$

3.4.4 Distância

Com o intuito de facilitar a implementação das variáveis no sistema, e considerando que a análise realizada possui um enfoque instantâneo do movimento, a distância percorrida por cada veículo é calculada exclusivamente com base no perfil de velocidade. Supondo um intervalo de tempo constante entre as amostragens, a distância total percorrida é estimada pela equação (3.29). Essa aproximação considera que, em pequenos intervalos de tempo, o movimento pode ser tratado como uniforme, sendo a distância proporcional à velocidade instantânea medida.

$$D_{(veiculo)} = \sum_{i=1}^n v_i \cdot \Delta t \quad (3.29)$$

3.4.5 VSE

A primeira análise realizada neste trabalho é o cálculo do VSE (Vehicular Specific Energy), um indicador que expressa a energia consumida no motor por quilômetro percorrido, considerando a eficiência térmica do componente. Medido em megajoules por quilômetro (MJ/km), o VSE permite comparar a eficiência energética de veículos com diferentes tipos de motorização, revelando de forma direta o consumo energético real independentemente da fonte de energia utilizada.

3.4.6 Economia

Em seguida, é realizada uma análise da economia energética dos dois modelos avaliados. Considerando a distância percorrida por cada veículo, a economia é definida como a razão entre essa distância e a energia consumida para completá-la. No entanto, devido às diferentes formas de motorização, a apresentação desse indicador varia conforme o tipo de veículo, seguindo as convenções adotadas na literatura técnica.

Para veículos a combustão, a economia costuma ser expressa em quilômetros por litro (km/L), indicando a distância percorrida por unidade de combustível. Já para veículos elétricos, utiliza-se quilowatt-hora por 100 quilômetros ($kWh/100km$), refletindo a quantidade de energia elétrica necessária para percorrer uma distância padrão.

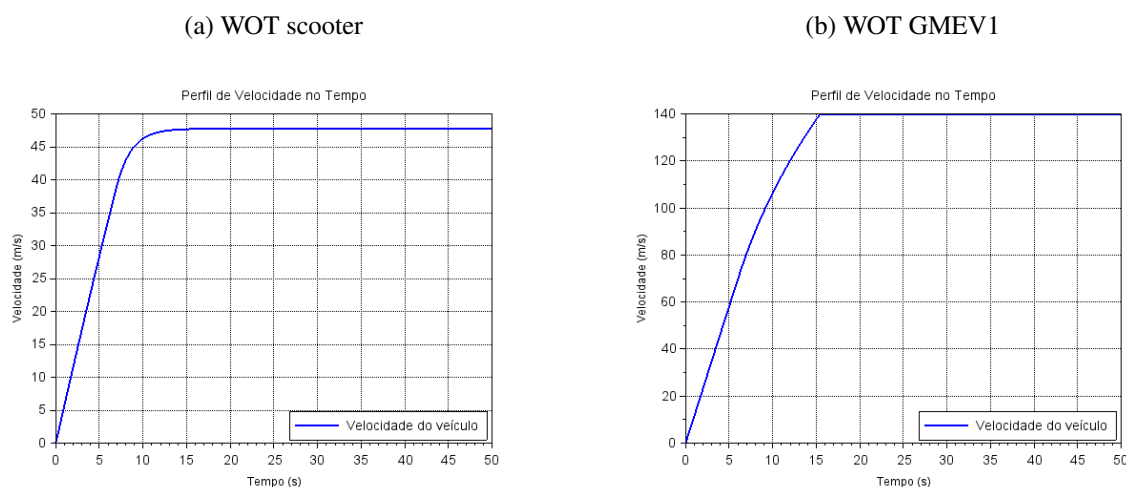
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos com base na metodologia descrita anteriormente, com foco na análise do impacto do aumento na densidade de veículos elétricos no consumo energético do sistema de tráfego, considerando diferentes proporções de automóveis em circulação. Inicialmente, é realizada a validação da metodologia adotada na modelagem dos motores elétricos, por meio de testes de desempenho. Em seguida, são apresentadas as curvas de potência desenvolvidas para integração ao simulador. Com a validação dos dados de saída do simulador, adota-se um perfil de velocidade de um veículo como referência para realizar uma análise cinemática do movimento descrito por ele durante o processo, e após isso, para toda a frota de veículos. Por fim, realiza-se uma análise energética, primeiramente considerando um único veículo sujeito ao ciclo proposto, e posteriormente expandindo a avaliação para todo o sistema de tráfego simulado.

4.1 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE MOTORES ELÉTRICOS

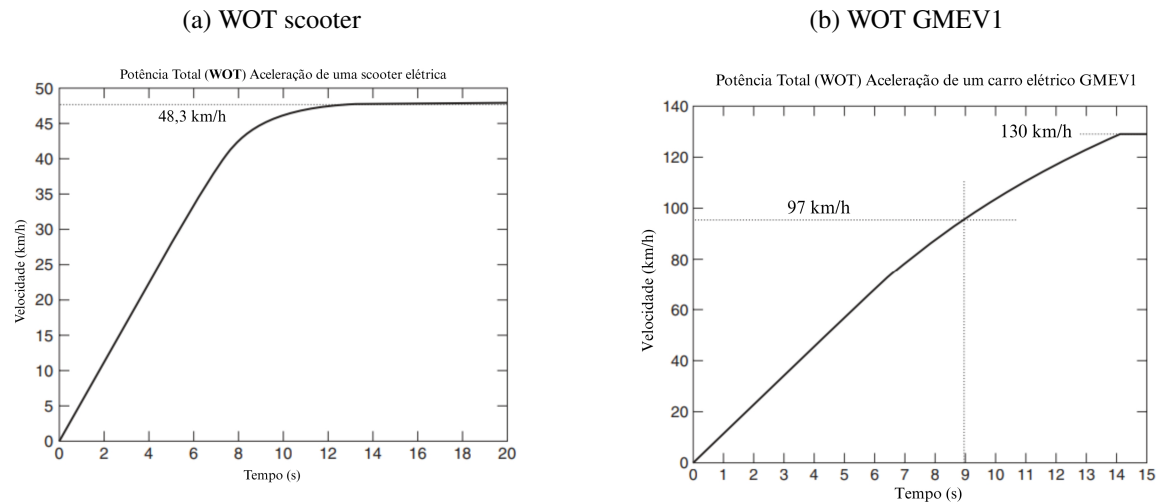
Como primeiro objetivo, este trabalho propôs a modelagem dos motores elétricos avaliados e, conseqüentemente, a validação de seus resultados com base na literatura consultada. Para isso, foi realizado o ensaio WOT, conforme descrito na Seção 3.1.3, aplicado aos dois motores elétricos estudados. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 22.

Figura 21: Resultados do teste (WOT) pelo modelo



Fonte: Autoria própria

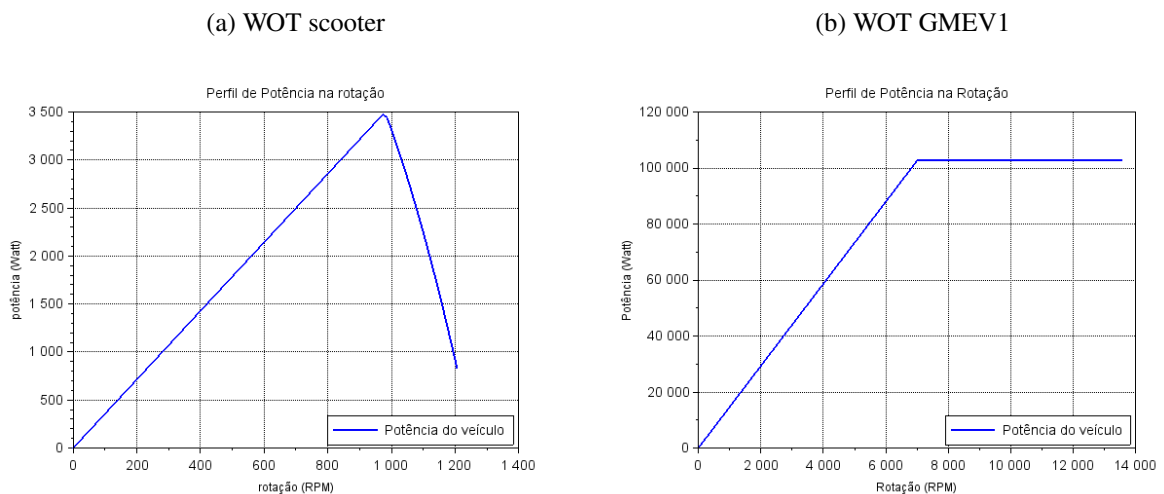
Figura 22: Resultado do teste WOT em (LARMINIE; LOWRY, 2012)



Fonte: Adaptado de Larminie e Lowry (2012).

Conforme observado na curva de referência, encontrada em Larminie e Lowry (2012), Figura 22, o modelo desenvolvido mostrou-se eficaz na representação do desempenho dos motores no teste avaliado, uma vez que os resultados obtidos aproximaram-se dos valores esperados nas condições utilizadas no trabalho base. Nesse contexto, foi realizada também uma análise da relação entre a potência fornecida pelo motor e sua rotação durante o teste de aceleração e performance. Essa etapa amplia a abordagem apresentada no trabalho de referência, que, em sua pesquisa, não contempla o gráfico de potência em função da rotação para esse teste, um dos objetivos estabelecidos neste trabalho. Os resultados encontrados nesta fase são ilustrados na Figura 23.

Figura 23: Resultado WOT para potência na rotação

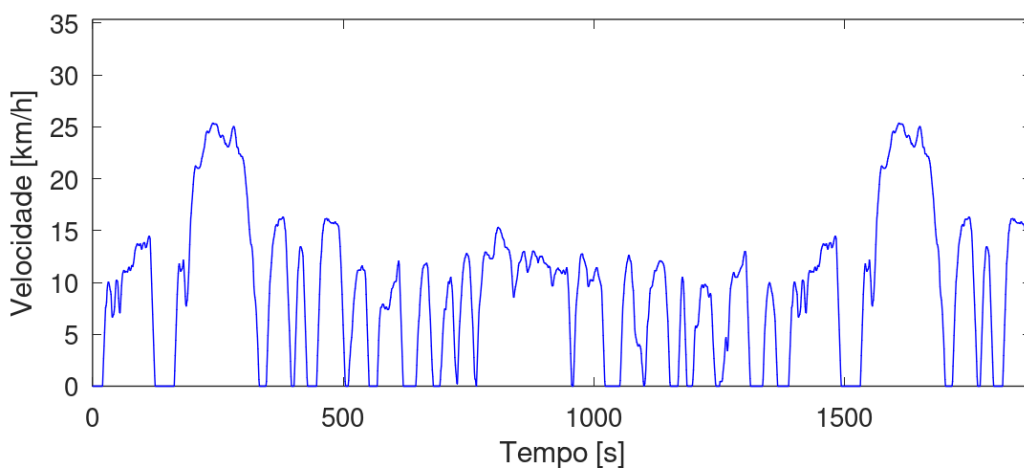


Fonte: Autoria própria

Dessa forma, a partir dessas ilustrações se tornou possível inferir, para a scooter, uma velocidade máxima de aproximadamente 47 km/h, atingida em cerca de 13 a 14 segundos, com potência máxima de 3,5 kW a 970 RPM. Para o GMEV1, o tempo de aceleração de 0 a 100 km/h foi de 9,5 segundos, atingindo uma potência máxima de 102,6 kW, valor compatível com os 140 cv frequentemente encontrados em fichas técnicas de veículos desse tipo. Ambos os resultados mostraram-se coerentes com os valores encontrados no trabalho de referência. Os gráficos da figura 24(a) e figura 24(b) representaram, no decorrer desse estudo, a primeira etapa para o entender o comportamento energético dos motores elétricos.

Para a validação do desempenho energético desses veículos, foi adotada uma metodologia padronizada desenvolvida pela Society of Automotive Engineers (SAE), o procedimento SAE J1634, na intenção de determinar a autonomia e o consumo energético de veículos elétricos leves em condições controladas de laboratório. Neste processo, adotou-se o ciclo de condução FTP-75 (Federal Test Procedure), projetado para simular a operação do veículo em ambiente urbano, devido a ao grau de capacitação desse ciclo em representar o tráfego típico de grandes centros urbanos. O ciclo usado é ilustrado na Figura 24.

Figura 24: Gráfico representativo do ciclo FTP-75



Fonte: Autoria própria

As características energéticas referentes ao desempenho dos veículos no procedimento adotado são mostradas na Tabela 12, conforme valores encontrados na literatura e fichas técnicas dos veículos. A partir desses valores base, os resultados padronizados, obtidos da simulação dos veículos no ciclo citados podem ser avaliados e tomados como referência.

Tabela 12: Valores para o ciclo SAE J1634 (valores em unidades SI)

Parâmetro	GMEV1	Scooter
Distância total percorrida (Range)	125,86 km	50,00 km
Energia consumida total	12,84 kWh	1,68 kWh
Potência média durante o ciclo	4,06 kW	1,14 kW
Eficiência energética na roda	101,9 Wh/km	33,6 Wh/km
Energia específica da bateria	26,3 Wh/kg	84,0 Wh/kg
Meta de desempenho (Range alvo)	96,56 km	48,00 km

Fonte: (ELECTRIC TRANSPORTATION APPLICATIONS, 1996)

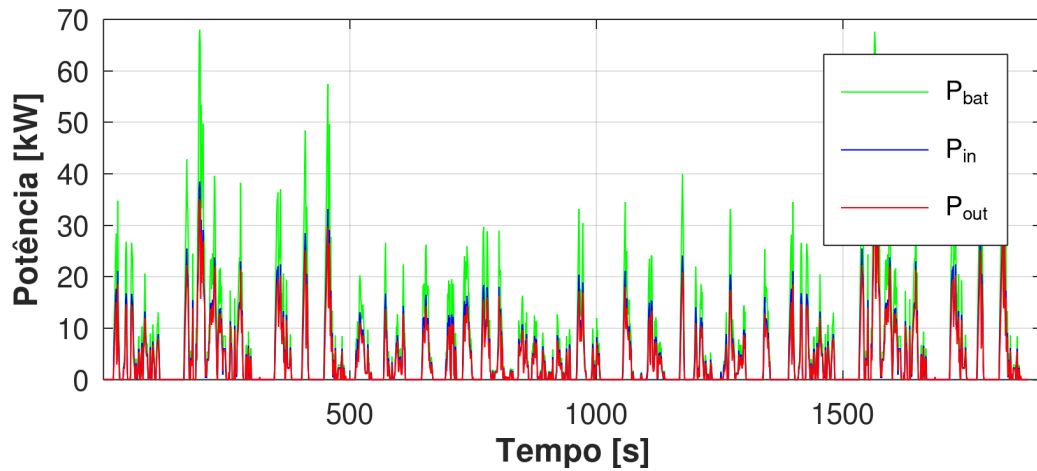
Os resultados obtidos com a simulação demonstraram boa aproximação em relação aos dados de referência, os quais mostram o GMEV1 percorrendo uma distância de 125,86 km e consumo de 12,84 kWh no ciclo padrão, enquanto a scooter, 50 km de alcance com consumo total de 1,68 kWh. Quando comparados aos valores obtidos nas simulações, Tabela 13, observam-se resultados coerentes: o GMEV1 atingiu 131,53 km com consumo de 12,34 kWh, e a scooter percorreu 59,60 km com gasto de 1,17 kWh, ambos com esgotamento total da bateria. As diferenças observadas podem estar relacionadas às condições específicas dos testes padronizados, que utilizam parâmetros e variáveis definidas de forma distinta daquelas consideradas no simulador, o que naturalmente implica em variações nos resultados de autonomia e consumo. As Figura 25 e Figura 26 mostram o comportamento das potências instantâneas entregues à roda (P_{out}), fornecidas ao motor (P_{in}) e consumidas na bateria (P_{bat}) ao longo do percurso.

Tabela 13: Resultados da simulação até o consumo total da bateria para os veículos elétricos

Parâmetro	GMEV1	Scooter
Distância total percorrida (Range)	131,53 km	59,60 km
Energia total entregue à roda (Consumida)	12,34 kWh	1,17 kWh
Energia total gasta na bateria	23,66 kWh	2,03 kWh
Número total de ciclos realizados	8	5
Tempo total do percurso	4,17 h	2,08 h
Nível restante na bateria	0,00 %	0,00 %
VSE médio do percurso	0,641 MJ/km	0,115 MJ/km
Economia energética média	17,81 kWh/100 km	3,1 kWh/100 km

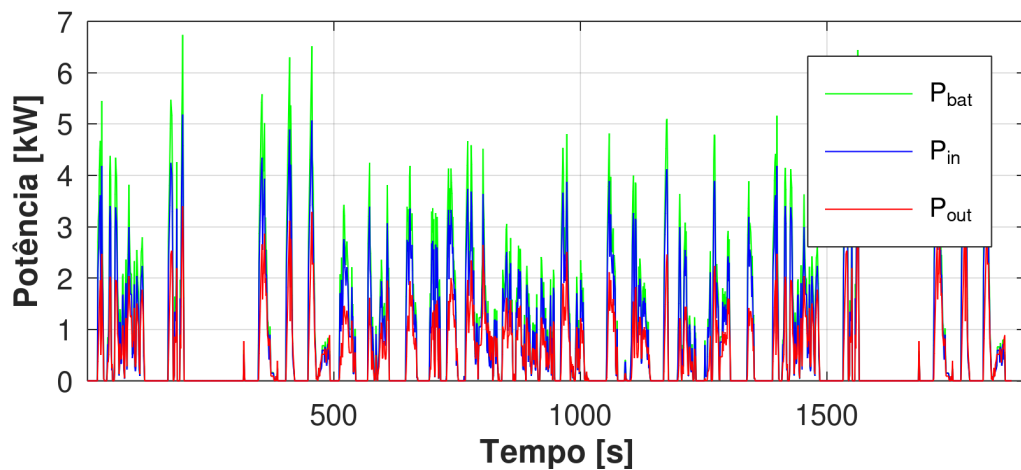
Fonte: Autoria própria

Figura 25: Potências no ciclo FTP-75 para o automóvel elétrico



Fonte: Autoria própria

Figura 26: Potências no ciclo FTP-75 para a motocicleta elétrica



Fonte: Autoria própria

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO DE AUTOMÓVEL A COMBUSTÃO

A validação do modelo de automóvel com motorização a combustão interna seguiu a mesma estrutura adotada na etapa dedicada aos veículos elétricos, com base na integração da equação diferencial da velocidade ao longo do tempo, utilizando o método de Runge-Kutta de quarta ordem. As principais diferenças residem na consideração da equação (3.5) para o cálculo de potência disponível no motor, e na implementação de uma lógica de trocas de marcha, com base nas faixas de rotação de operação ideais, e nas relações de transmissão do sistema mecânico. Utilizando os dados técnicos do veículo avaliado, mostrado na Tabela 14 de acordo com Renault

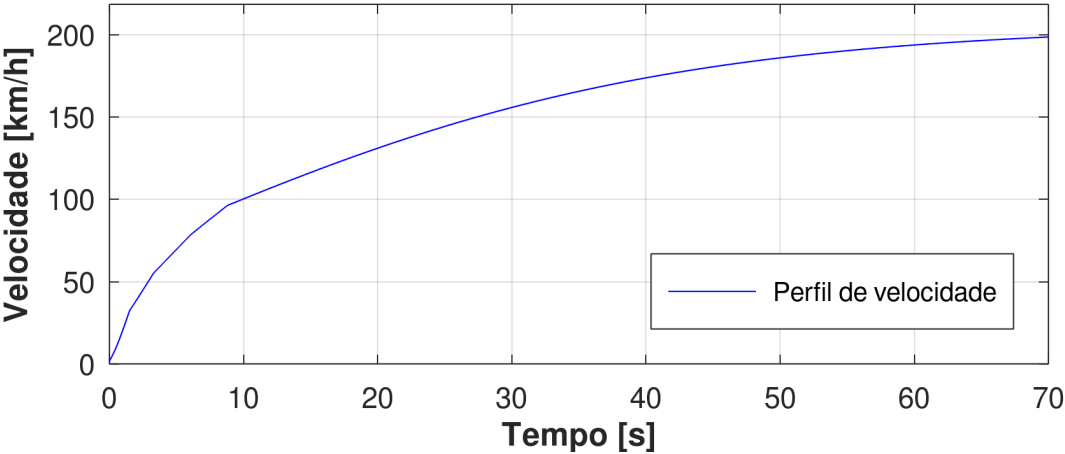
(2023) , foi possível realizar uma análise do modelo para as condições estabelecidas.

Tabela 14: Desempenho do Renault Fluence 2.0 (2013, manual)

Categoria	Parâmetro	Etanol (A)	Gasolina (G)
Desempenho	Velocidade máxima [km/h]	200	200
	Aceleração 0–100 km/h [s]	9,7	9,9

Fonte: (RENAULT, 2023)

Figura 27: Resultado do teste de performance para Renault Fluence



Fonte: Autoria Própria

Com o cenário adotado e utilizando a aplicação do teste de desempenho descrito nos capítulos anteriores, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 27. Pela imagem é possível verificar que o carro atinge 100 km/h em aproximadamente 10 segundos, coerente com a performance mostrada na Tabela 14. A escolha da eficiência máxima do motor adotada teve sua efetividade comprovada com base na comparação entre os resultados energéticos obtidos na simulação do modelo do veículo a combustão, sob o ciclo de condução FTP-75, e os dados oficiais disponibilizados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), Tabela 15. Esse ciclo, descrito na norma NBR 6601, é um dos procedimentos padronizados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) para avaliação do consumo em ambiente urbano.

A eficiência foi ajustada iterativamente até que o consumo energético simulado se aproximasse dos valores informados na planilha do PBEV para o veículo em questão, considerando o poder calorífico inferior (PCI) da gasolina. Dessa forma, após realização desse processo, foi

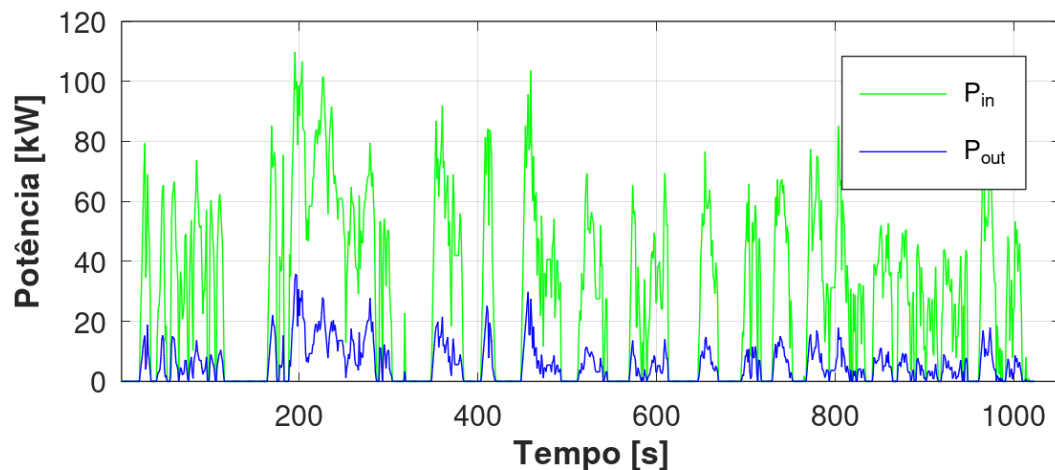
determinado um valor de 42% para o pico de rendimento atribuído a esse veículo específico, próximo do valor preliminar de 40% observado no tópico de modelagem de motores, para as condições adotadas.

Tabela 15: consumo e autonomia de um sedan 2.0 no FTP-75

Categoria	Parâmetro	Flex (A/G)	Gasolina (G)
Consumo [km/L]	Urbano	12,07	12,52
	Rodoviário	16,47	15,65
Autonomia [km]	Urbana	408	612
	Rodoviária	552	846

Fonte: (INMETRO, 2023)

Figura 28: Potências de entrada e saída do motor do Renault Fluence durante o ciclo FTP-75



Fonte: Autoria própria

A Figura 28 apresenta as potências instantâneas, fornecida ao motor e entregue por ele, ao longo do percurso simulado pelo Renault Fluence, no ciclo de condução FTP-75. Com base nas informações de potência e deslocamento, foi possível realizar uma análise de economia de energia do percurso. Os resultados são apresentados conforme os critérios previamente discutidos neste trabalho, utilizando o valor da energia específica (VSE), como métrica de desempenho energético, e a economia em km/l como parâmetro comparativo com dados de ficha técnica e literatura. Os valores encontrados da aplicação do ciclo são mostrados na Tabela 16. O valor para a economia energética média do veículo ao longo do ciclo foi de aproximadamente 12,07 km/L, resultado bastante próximo ao informado pelo Inmetro, o que reforça a coerência do modelo proposto.

Tabela 16: Resumo dos resultados da simulação

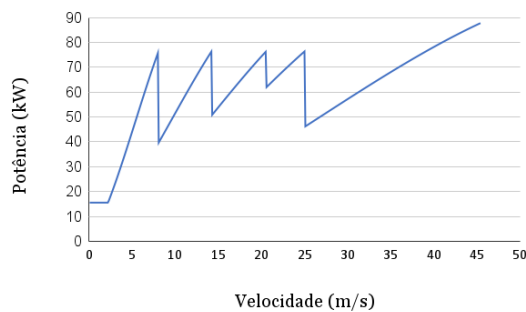
Parâmetro	Resultado
Distância total percorrida	17,77 km
Energia total gasta	42.368,76 kJ
Número total de ciclos realizados	1
Tempo total do percurso	0,52 horas
Nível restante no tanque	97,55%
VSE médio do percurso	2,38 MJ/km
Economia energética média	12,07 km/l

Fonte: Autoria própria

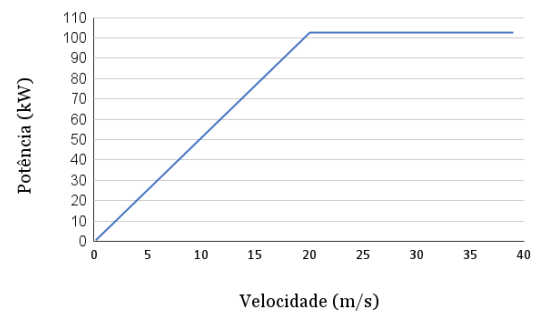
4.3 CURVAS DE POTÊNCIA GERADAS PARA OS VEÍCULOS

Nessa etapa, é realizado o procedimento descrito no tópico (3.2), para a geração das curvas de potência que foram implementadas no simulador, para cada veículo estudado. O resultado é demonstrado na Figura 29.

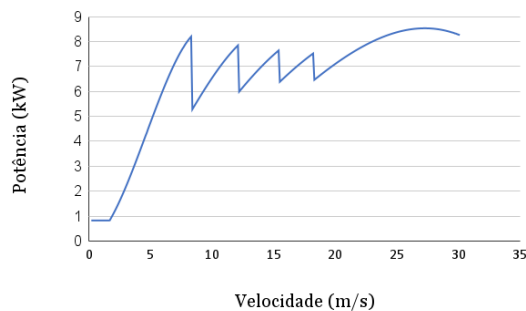
Figura 29: Comparativo das curvas de potência entre veículos a combustão e elétricos



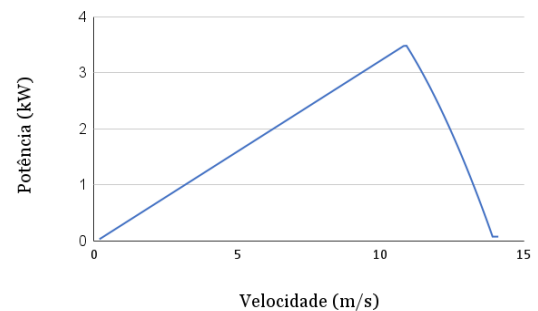
(a) Carro a combustão



(b) Carro elétrico



(c) Moto a combustão



(d) Moto elétrica

Fonte: Autoria própria

As potências máximas disponibilizadas por cada motor, em função da velocidade, são apresentadas nos gráficos acima, nos seguimentos da figura. As informações contidas nesses gráficos, aliados às características técnicas dos veículos selecionados, constituíram as variáveis de entrada utilizadas no simulador de tráfego. Com base neles, foi possível identificar comportamentos típicos dos diferentes tipos de motorização.

Nos veículos com motor a combustão, por exemplo, a influência das trocas de marcha manifesta-se por reduções abruptas na curva de potência. Já no motor elétrico de indução, ao atingir a rotação crítica, observa-se uma estabilização da potência, que se mantém constante ao longo do restante do percurso. Por sua vez, no motor de corrente contínua com escovas, a potência passa a decair a partir do momento em que a rotação crítica é alcançada.

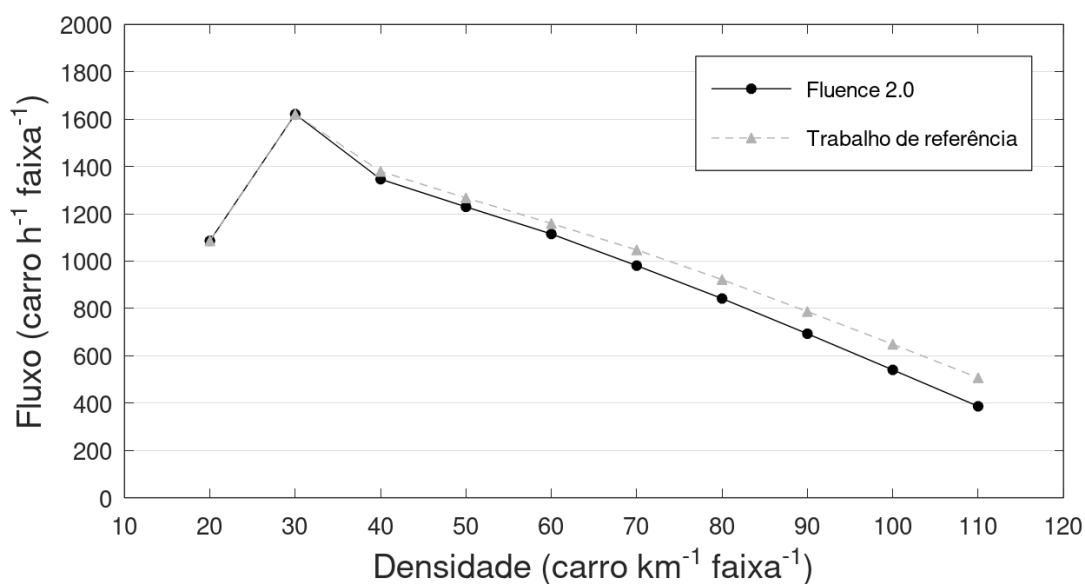
4.4 RESULTADOS DO SIMULADOR

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos com a simulação computacional realizada, cuja configuração se baseou nos modelos veiculares e de motores previamente descritos. As curvas de potência, discutidas no capítulo anterior, foram utilizadas como entrada no simulador, permitindo analisar o desempenho dinâmico dos diferentes tipos de veículos em um sistema de tráfego controlado.

Inicialmente, foi realizada uma simulação considerando apenas os veículos a combustão, com os mesmos parâmetros adotados em Araújo (2021). Essa abordagem teve como objetivo avaliar o impacto da substituição do modelo de veículo a combustão pelos parâmetros do Renault Fluence, utilizando o diagrama fundamental como ferramenta comparativa. O diagrama de referência, extraído do trabalho citado, bem como novo diagrama fundamental gerado com base nos conceitos discutidos anteriormente, estão presentes na Figura 30. A partir da simulação com o modelo do Renault Fluence, Os resultados obtidos demonstraram que o comportamento do fluxo veicular em função da densidade manteve-se coerente com o trabalho base, permitindo validar a fidelidade do novo modelo adotado. Essa comparação pode ser sustentada pela análise de dois elementos principais.

A densidade crítica é definida como o valor da densidade de veículos em que o fluxo atinge seu valor máximo. Ela se configura como um ponto de inflexão no diagrama fundamental, marcando a transição entre o regime de escoamento livre e o regime de congestionamento. A partir desse ponto, qualquer aumento adicional na densidade implica uma redução do fluxo veicular. Observa-se, a partir dos diagramas apresentados, que o ponto em que o fluxo atinge seu

Figura 30: Comparativo do diagrama fundamental encontrado com o de referência



Fonte: Autoria própria

valor máximo ocorre em ambos os casos para 30 veículos por quilômetro por faixa, indicando consistência estrutural entre os modelos analisados. No entanto, apesar da coincidência no ponto de saturação, há uma diferença mínima no valor de fluxo correspondente a essa densidade, sendo que o modelo proposto apresenta um desvio de aproximadamente 0,5% em relação ao valor de referência.

Outro ponto analisado refere-se ao comportamento da curva diante do aumento da densidade veicular por faixa. Conforme observado na figura, ambos os modelos apresentam a mesma estrutura característica, principalmente no regime de tráfego livre, com as curvas se sobrepondo até um pouco depois do ponto crítico, onde ocorre o fluxo máximo. A partir deste ponto, ocorre uma redução progressiva no fluxo, de forma mais suave e com declive menos acentuado em relação à fase de crescimento. Nesse cenário, em condições de tráfego mais carregado, uma divergência entre os valores de fluxo passa a ser notada. No entanto, essa diferença foi considerada aceitável para a proposta do estudo, que não configura a calibração propriamente dita do simulador, e sim a utilização de um modelo já calibrado, que para as configurações adotadas, apresentou uma diferença máxima de 110 carros por hora por faixa em relação ao modelo de referência, como mostrado em Tabela 17.

A diferença observada nos valores de fluxo em relação ao modelo usado como base, especialmente em situações de tráfego mais denso, provavelmente está atribuída às características dos veículos adotados na modelagem. O modelo desenvolvido considerou veículos com dimensões

superiores às do modelo de referência, o que impacta diretamente na ocupação espacial das faixas de tráfego. Como resultado, veículos maiores acabam por reduzir a capacidade máxima de fluxo em condições de congestionamento, já que ocupam um volume maior da via. Essa questão se torna menos perceptível em tráfego livre, onde a limitação não é física, mas sim operacional, mas se acentua à medida que a densidade aumenta e o espaço disponível se torna um fator crítico.

Tabela 17: Comparativo da diferença máxima de fluxo entre os modelos

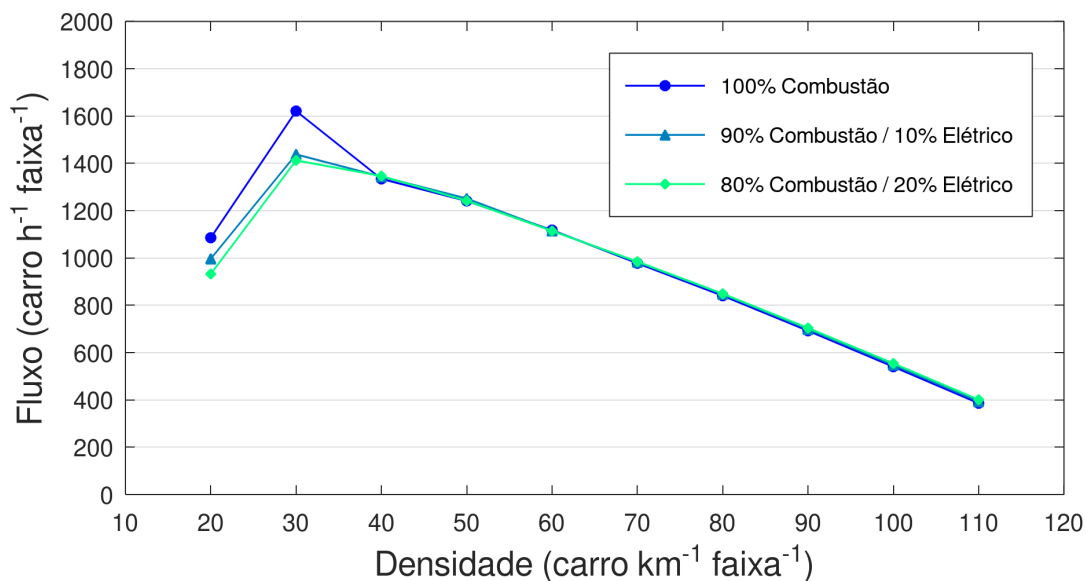
Faixa de Densidade Analisada	Diferença Máxima Observada	Unidade
Até o ponto de fluxo máximo	≈ 1	veículos h^{-1} faixa $^{-1}$
Após o ponto de fluxo máximo	≈ 110	veículos h^{-1} faixa $^{-1}$

Fonte: Autoria própria

4.4.1 Impacto do Aumento de Veículos Elétricos no Diagrama Fundamental

Com a validação do modelo de tráfego a partir do estudo do diagrama fundamental desenvolvido, tornou-se possível iniciar a análise do tráfego com foco na influência do aumento da participação de veículos com motorização elétrica. Utilizando o diagrama fundamental gerado como ferramenta comparativa, aplicou-se a metodologia descrita nos capítulos anteriores para investigar os efeitos de diferentes proporções de veículos elétricos no fluxo veicular. A princípio, avaliou-se o impacto da substituição de 10% da frota por veículos elétricos, mantendo 90% de veículos a combustão. A Figura 31 contempla o diagrama fundamental obtido para essa configuração. Ao comparar visualmente os resultados com o cenário base, composto exclusivamente por veículos a combustão, observa-se uma redução de aproximadamente 11% no fluxo máximo, evidenciada na densidade crítica.

Figura 31: Diagrama fluxo densidade para proporções 90-10 e 80-20

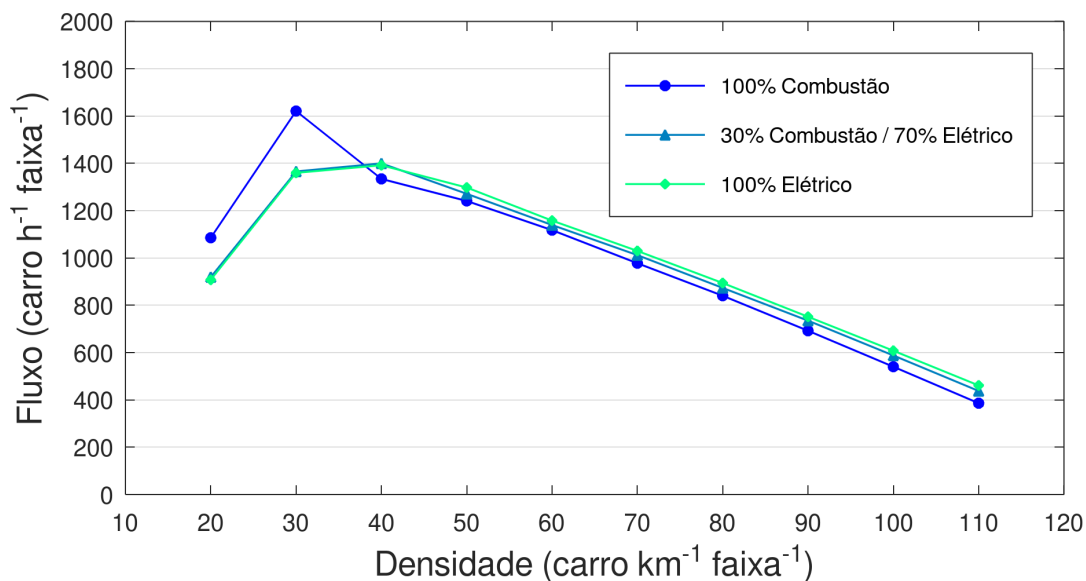


Fonte: Autoria própria

Para verificar a consistência desse comportamento, realizou-se uma nova simulação com 80% de veículos a combustão e 20% elétricos. A Figura 31 ilustra novamente esse resultado. Outra vez, observa-se uma leve redução do fluxo na densidade crítica, porém com uma redução percentual relativa na casa dos 2%, reforçando a hipótese de que o aumento da proporção de veículos elétricos impacta negativamente o fluxo máximo do sistema viário. Essa tendência foi mantida até a simulação com 30% de veículos a combustão e 70% elétricos, onde os impactos sobre o fluxo foram discretos e pontuais, principalmente nas densidades de 20 e 30 veículos por quilômetro por faixa. Para outras densidades, as alterações foram pouco expressivas e não indicaram uma variação significativa.

Entretanto, a partir da simulação com 30% de veículos a combustão e 70% elétricos, observou-se uma mudança estrutural no diagrama: a densidade crítica foi deslocada para 40 veículos por quilômetro por faixa. Esse fenômeno representa uma alteração no ponto de saturação do sistema e pode ser verificado na Figura 32. Essa nova configuração persistiu até a simulação com 100% de veículos elétricos, indicando a possibilidade de que a mudança na densidade crítica pode ser associada a altos percentuais de eletrificação da frota.

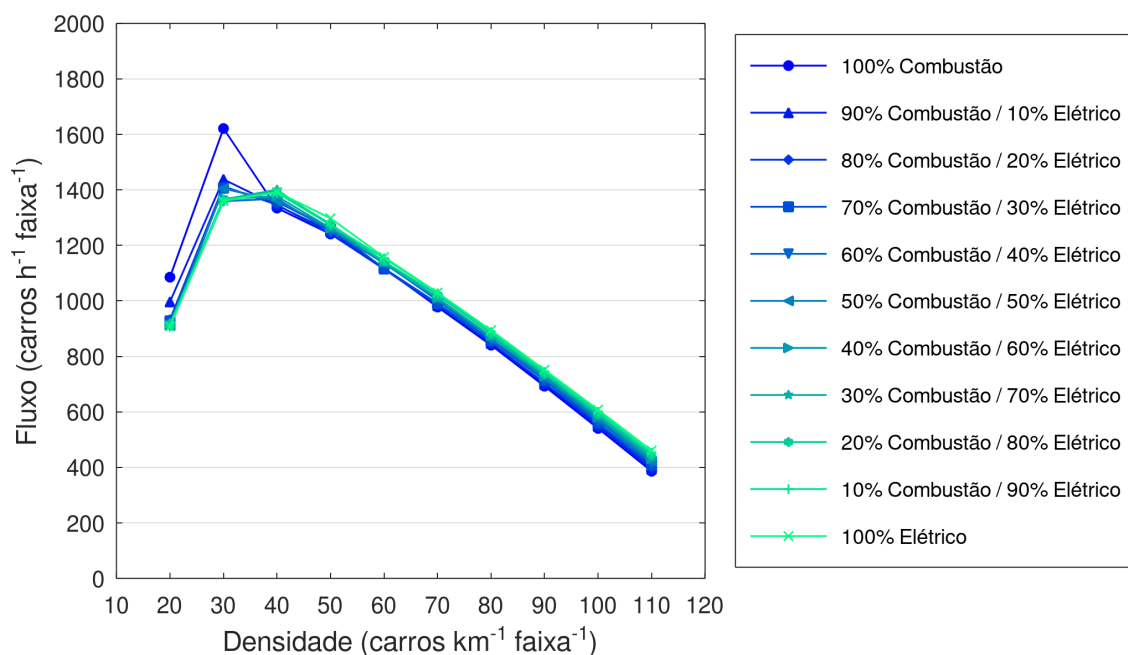
Figura 32: Diagrama fluxo densidade para 20% combustão e 80% elétrico



Fonte: Autoria própria

Por fim, após a execução dos onze cenários de simulação propostos na metodologia, foi possível consolidar os resultados em um único gráfico comparativo, apresentado na Figura 33. Esse diagrama reúne os diferentes perfis de fluxo veicular em função da densidade para cada proporção entre veículos com motorização a combustão e elétrica. A partir dessa representação, observa-se que o fluxo de veículos é sensivelmente influenciado pela variação na composição da frota. À medida que aumenta a proporção de veículos elétricos, há uma redução gradual no fluxo máximo e um deslocamento da densidade crítica para valores mais elevados. Isso indica uma mudança no ponto de saturação do sistema, sugerindo que a dinâmica do tráfego é impactada não apenas pelo volume de veículos, mas também pelas características de sua motorização. Além disso, percebeu-se que, para densidades de automóveis por faixa a cima de 40, as configurações que continham uma maior quantidade de veículos elétricos apresentaram um maior fluxo de veículos no tráfego.

Figura 33: Diagrama fluxo densidade para diferentes proporções de veículos elétricos



Fonte: Autoria própria

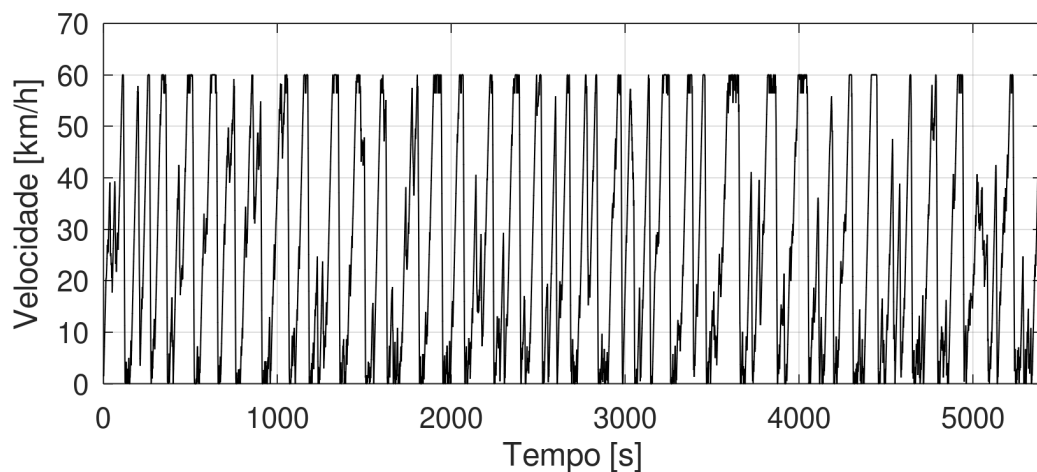
Nesse contexto, embora o carro elétrico apresente desempenho compatível com seu equivalente a combustão, a scooter elétrica mostra limitações, especialmente em termos de velocidade. Em diversas situações, a scooter não consegue atingir a velocidade máxima da via, o que reduz a fluidez do tráfego em faixas com maior presença desse tipo de veículo. Com isso, o regime de congestionamento tende a se iniciar com um número menor de veículos na pista, o que provavelmente desloca a densidade crítica para valores mais baixos à medida que aumenta a participação de veículos elétricos na composição do tráfego.

Em contraponto, para densidades mais elevadas, o aumento do percentual de VEs possibilita fluxos levemente superiores. Nesses regimes, o sistema entra em condições de tráfego denso, onde a movimentação é dominada mais pela dinâmica coletiva e menos pela capacidade de aceleração individual. Os modelos de veículos elétricos tendem a apresentar menor variabilidade de comportamento, com acelerações mais suaves e torque entregue de forma instantânea na roda, o que pode contribuir para uma fluidez mais estável e redução de perturbações no fluxo, elevando o valor total de veículos que conseguem transitar por hora em situações congestionadas.

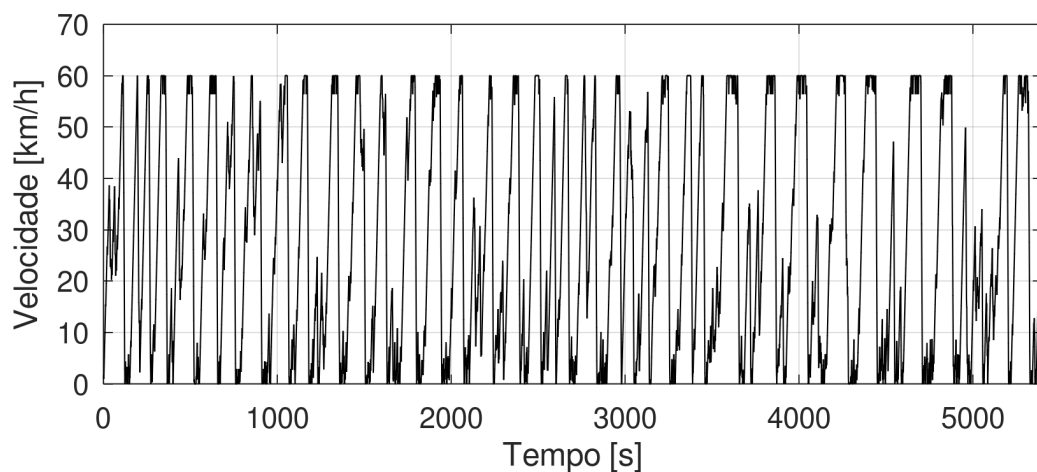
4.4.2 Análise de um Perfil de Velocidades no Tráfego

Além da relação entre fluxo de veículos e densidade, o simulador de tráfego também fornece, como saída, os perfis de velocidade de cada veículo ao longo do tempo durante o percurso simulado. A partir da análise individual desses vetores, que representam a dinâmica de cada automóvel frente às condições impostas pelo tráfego, foi possível desenvolver os gráficos apresentados na Figura 34, os quais ilustram, de forma mais tangível, o comportamento dinâmico dos veículos simulados. Essa figura foi dividida em dois perfis distintos: um representando veículos com motorização elétrica e outro referente a veículos com motor a combustão interna.

Figura 34: Perfis de velocidade no tempo para diferentes tipos de motorização no tráfego



(a) Automóvel a combustão



(b) Automóvel elétrico

Fonte: Autoria própria

Os perfis de condução mostrados foram gerados a partir da seleção de perfis correspondentes a automóveis escolhidos aleatoriamente em uma simulação com densidade ligeiramente superior à densidade crítica, com intuito de aproximar uma situação de tráfego em início de congestionamento. Para esse teste, considerou-se uma densidade de 50 veículos por quilômetro por faixa e uma composição veicular com 50% de automóveis elétricos e 50% a combustão, assegurando uma distribuição equilibrada entre os dois tipos de motorização. A intenção, nesse caso, não é representar um comportamento médio ou generalizado, mas ilustrar de forma pontual os efeitos do tráfego congestionado sobre a dinâmica veicular. Com base nesses ciclos, foi realizada uma análise cinemática dos veículos considerados, permitindo extrair parâmetros como acelerações, tempos de percurso, variações de velocidade e eventos de parada. Esses resultados evidenciam o impacto direto das condições de tráfego na operação e servem de base para interpretações energéticas e dinâmicas ao longo do trajeto simulado.

A partir do desenvolvimento dos gráficos ilustrados a cima, foi possível analisar o comportamento desses dois automóveis ao longo do percurso de tráfego sujeito ao estudo. Dessa forma, a avaliação cinemática dos perfis é ilustrada na Tabela 18.

Tabela 18: Comparação dos parâmetros cinemáticos entre Automóveis a combustão e elétrico

Variável	Carro a Combustão	Carro Elétrico
Distância percorrida (km)	40,10	41,44
Velocidade média (km/h)	26,73	27,63
Aceleração média (m/s ²)	0,364	0,362
Desaceleração média (m/s ²)	0,977	0,951
Tempo total do percurso (h)	1,50	1,50
Número de ciclos simulados	1	1

Fonte: Autoria própria

A análise dos dados simulados revela diferenças sutis, porém relevantes, entre os veículos com motorização a combustão e os elétricos ao trafegarem sob as mesmas condições. Ambos completaram o percurso em 1,5 horas, com o automóvel elétrico percorrendo uma distância ligeiramente maior, o que se refletiu em uma velocidade média superior (27,63 km/h contra 26,73 km/h). As médias de aceleração foram praticamente equivalentes, indicando que o comportamento de ganho de velocidade frente às variações do tráfego foi semelhante. Esse resultado, no entanto, se mostrou contraintuitivo, uma vez que se esperava um desempenho mais expressivo do veículo elétrico nesse aspecto. Isso porque, automóveis elétricos possuem

entrega de torque praticamente instantânea, característica do modelo que geralmente proporciona respostas mais ágeis em termos de aceleração.

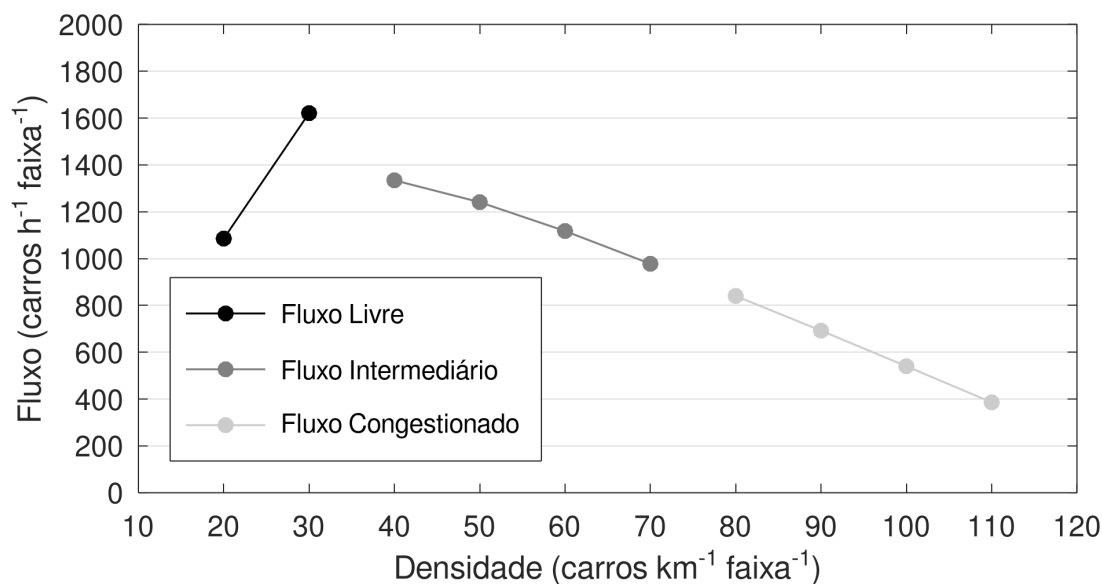
Por fim, observou-se uma ligeira diferença na desaceleração média entre veículos elétricos e a combustão, possivelmente relacionada ao controle dos sistemas regenerativos de frenagem na modelagem. No entanto, esse efeito mostrou-se pequeno, resultando apenas em um discreto ganho de suavidade na condução e em um aumento pouco significativo da distância percorrida. Assim, embora exista uma tendência de operação mais contínua nos elétricos, os resultados não indicam impacto relevante no comportamento do tráfego.

4.5 ANÁLISE ENERGÉTICA DO TRÁFEGO

Por fim, foi realizada uma análise energética para diferentes configurações de densidade veicular e proporção de veículos elétricos em tráfego misto. Cada veículo presente no tráfego segue um perfil de condução distinto, resultado das condições e parâmetros definidos no simulador. Diante disso, a análise realizada se afasta da abordagem individualizada de automóveis e motocicletas e passa a considerar o comportamento coletivo dos veículos, agrupados conforme suas categorias, cujo desempenho energético foi avaliado a partir dos valores médios da velocidade, do consumo energético e da economia de energia. Cada uma dessas variáveis foi determinada individualmente para os respectivos grupos de veículos que compõem o tráfego simulado, de modo que essa segmentação permita observar tendências gerais de desempenho e identificar padrões de comportamento energético para cada tipo de veículo em circulação.

A primeira etapa da análise consistiu em estudar o comportamento energético dos veículos sob condições de fluxo livre, fluxo intermediário e fluxo congestionado. Para isso, foi utilizado o gráfico da Figura 35, elaborado seguindo o mesmo raciocínio empregado Araújo (2021), porém aplicando os resultados encontrados no desenvolvimento desse trabalho. A partir dessa análise, foi definido que as densidades de 20 a 30 veículos por quilômetro por faixa serviriam como representativas do fluxo livre, 40 a 70 para o fluxo intermediário e 80 a 110 veículos por quilômetro por faixa para caracterizar o tráfego congestionado. Para cada um desses grupos, foram calculadas as médias dos indicadores avaliados considerando todas as simulações pertencentes ao respectivo intervalo de densidade e discriminando os resultados por proporção de veículos elétricos.

Figura 35: Diagrama fundamental representado a classificação do tráfego



Fonte: Adaptado de Araújo (2021)

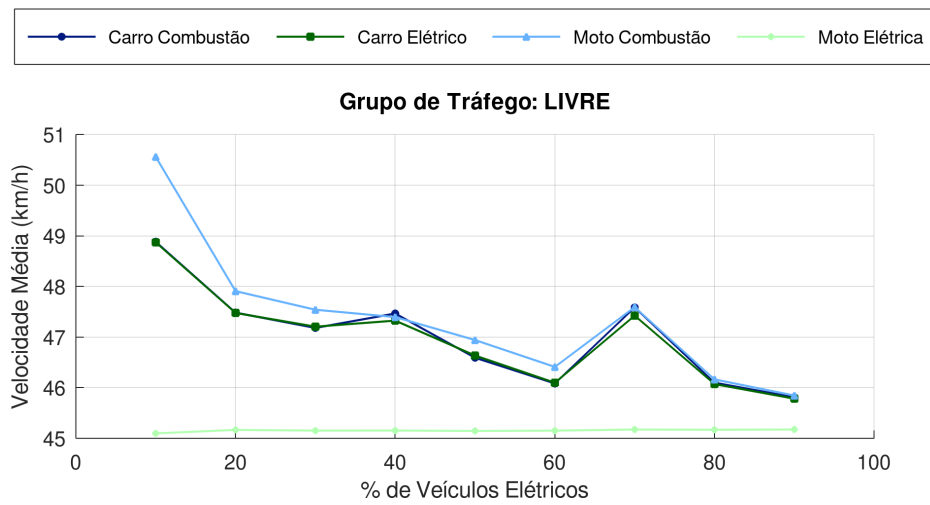
4.5.1 Fluxo Livre

A primeira análise realizada é pautada no grupo referente ao fluxo livre. Nesse cenário, a velocidade média dos veículos apresentou uma tendência de redução conforme aumento da proporção de veículos elétricos na frota. Os dados indicam que, até aproximadamente 20% de eletrificação, a velocidade média se mantém relativamente alta e estável para os veículos a combustão, tanto carros quanto motos, oscilando em torno de 54 a 55 km/h. No entanto, à medida que a participação de veículos elétricos cresce além desse ponto, verifica-se uma queda progressiva da velocidade média dos três tipos de veículos motorizados que participam ativamente do fluxo, até um patamar próximo de 48 km/h quando a porcentagem de veículos elétricos atinge cerca de 80%. Esse comportamento sugere que o aumento na representação de veículos elétricos na via, em uma condição de tráfego livre, impactou a fluidez do trânsito na simulação.

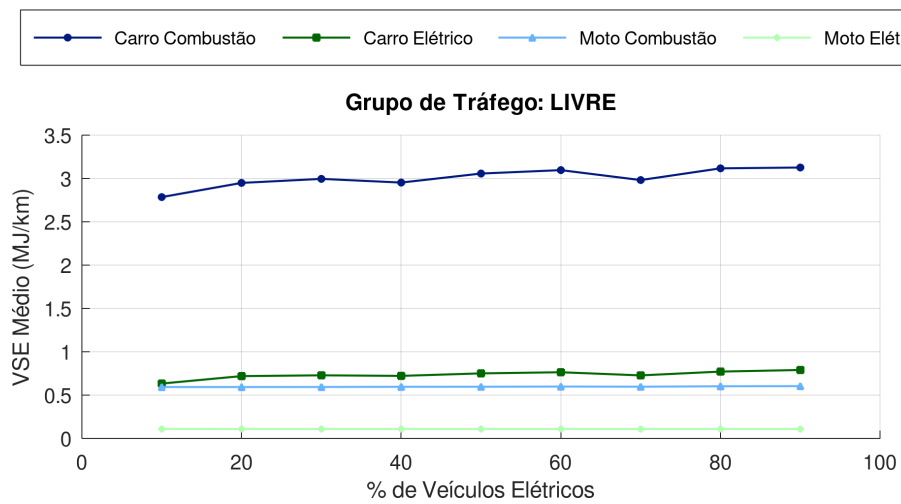
Além disso, como observado no gráfico, a moto elétrica mantém uma velocidade média relativamente inferior aos demais veículos. Com o aumento da proporção de veículos elétricos na frota, cresce também a chance de veículos mais rápidos ficarem momentaneamente atrás de motos elétricas em trechos do trajeto. Mesmo que não haja congestionamento, essa simples limitação de ultrapassagem ou redução momentânea para manter distância segura pode gerar pequenas perdas de velocidade acumuladas.

Figura 36: Gráfico demonstrando variação das variáveis com aumento de VE's

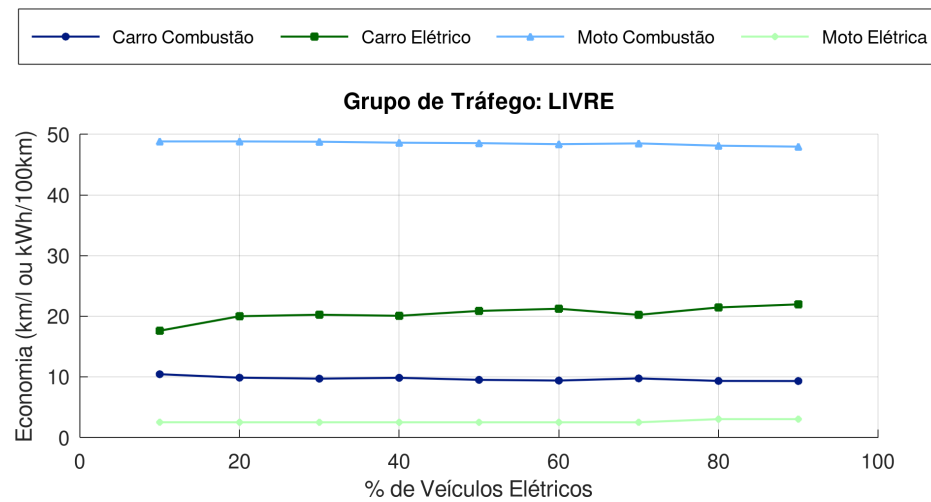
(a) Velocidade média dos veículos



(b) VSE médio dos veículos



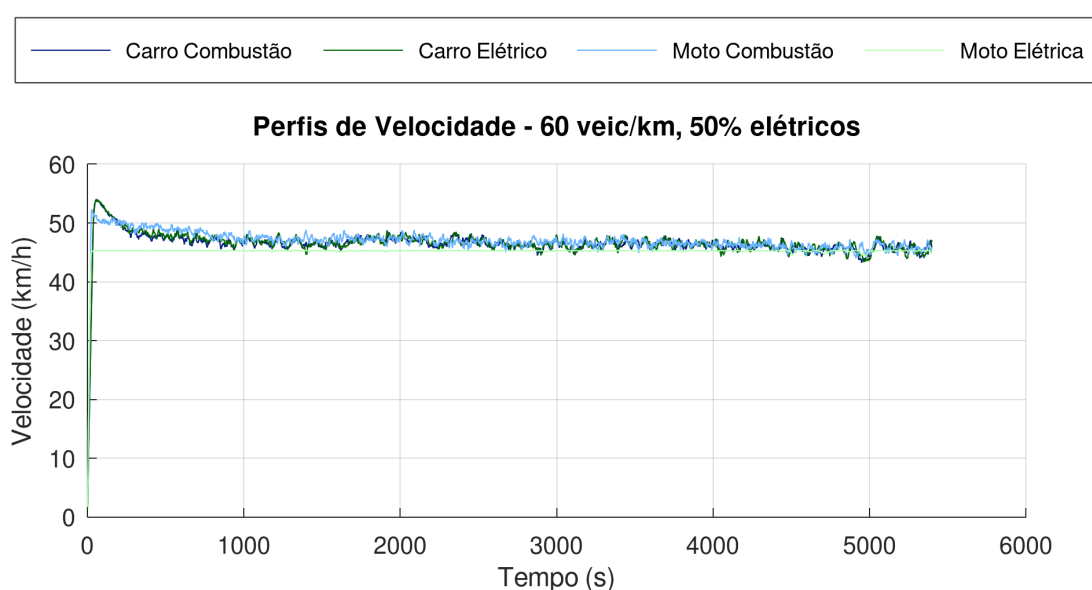
(c) Economia média dos veículos



Fonte: Autoria própria

Complementando essa análise, também foi gerado um gráfico representativo do perfil de velocidade do grupo em questão, e consequentemente, ampliado aos demais nos próximos tópicos. As curvas de velocidade apresentadas ao longo do tempo representam o comportamento dinâmico dos automóveis e motocicletas simulados sob uma mesma densidade de tráfego. O gráfico gerado considera um percentual de 50% de veículos elétricos na frota, em uma densidade que constitui o grupo avaliado, e exprime um perfil de velocidades médias para cada um deles ao longo do tempo.

Figura 37: Perfis de velocidades médias dos veículos no tráfego livre



Fonte: Autoria própria

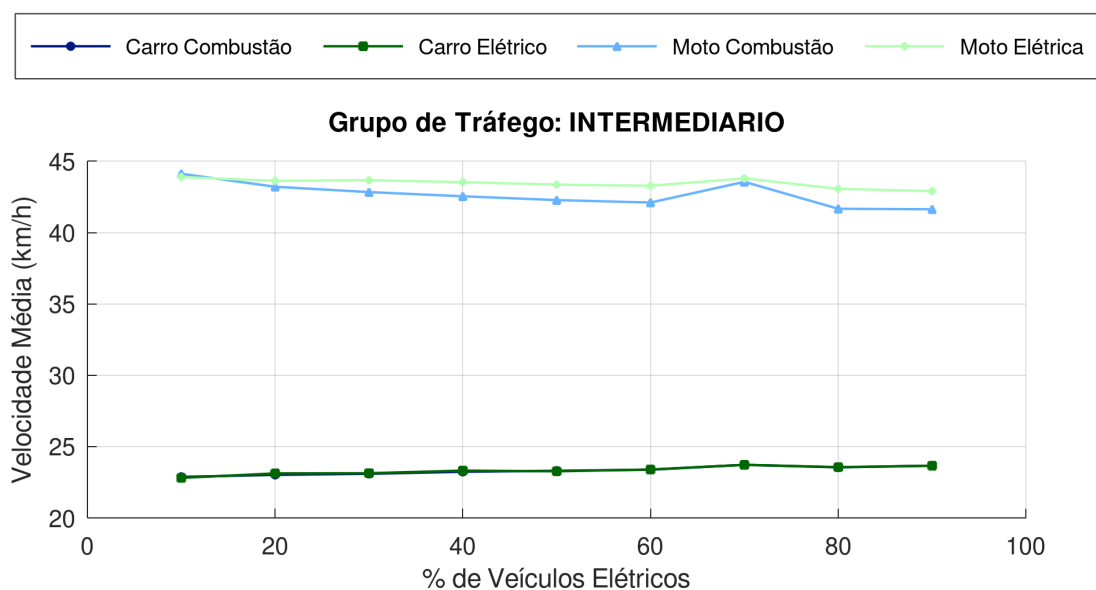
4.5.2 Fluxo Intermediário

No cenário de tráfego intermediário, observa-se que a velocidade média dos veículos a combustão apresenta uma leve tendência de queda conforme aumenta a proporção de veículos elétricos, enquanto os veículos elétricos mostram uma variação sutil, porém positiva, ao longo da mesma faixa. Essa elevação quase imperceptível na velocidade média dos elétricos pode estar relacionada à menor agressividade de aceleração e frenagem no modelo desses veículos, o que contribui para um fluxo ligeiramente mais regular. Nas motocicletas, tanto elétricas quanto a combustão, esse comportamento de estabilidade é ainda mais evidente: as velocidades médias permanecem praticamente constantes, com variações mínimas entre os diferentes percentuais de eletrificação da frota.

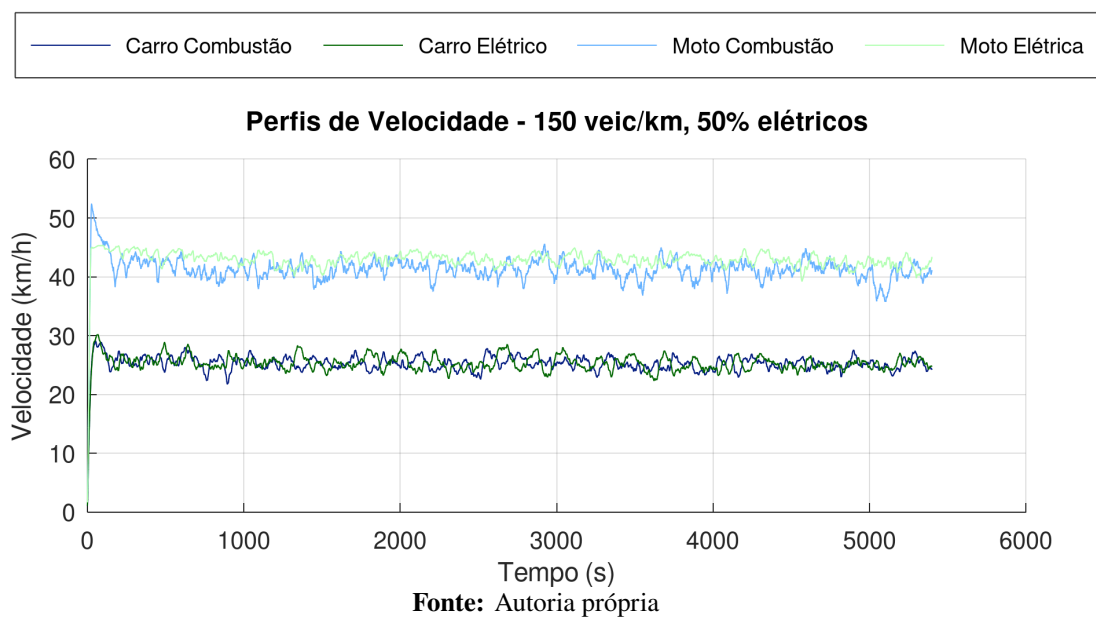
De forma geral, o aumento na proporção de veículos elétricos não altera de maneira significativa a velocidade média dos veículos no tráfego intermediário, sugerindo que a composição da frota tem impacto limitado sobre esse parâmetro, ao menos neste regime de circulação. Foi selecionada a densidade referente a 150 veículos por quilômetro por faixa para representar esse subgrupo do tráfego como mostrado na Figura 38.

Figura 38: Análise da velocidade média e do perfil de velocidade no grupo intermediário

(a) Velocidade média em função da proporção de veículos elétricos.



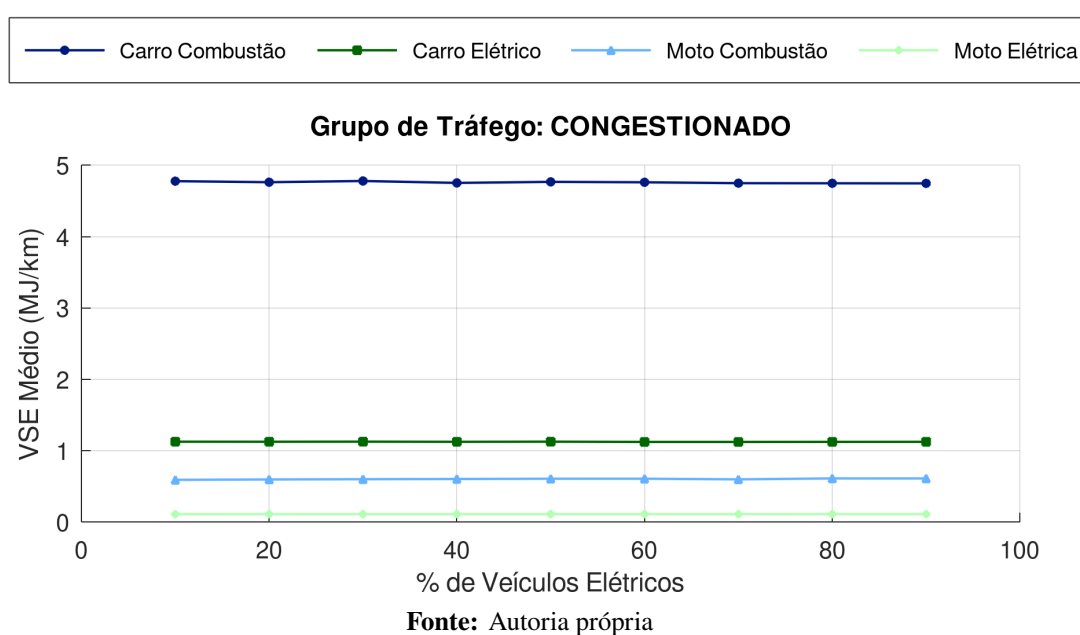
(b) Perfil de velocidade com 50% de veículos elétricos.



4.5.3 Fluxo Congestionado

Ao final, é realizada uma análise do cenário congestionado. Nessa condição, o aumento na proporção de veículos elétricos não exerce influência significativa sobre os valores absolutos dos parâmetros avaliados. Esse comportamento pode ser observado na Figura 39, em que a variação na presença de veículos elétricos na via não gerou alterações perceptíveis no VSE médio para os veículos modelados.

Figura 39: Gráfico mostrando a análise da economia para congestionamento



A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações realizadas nesse tópico. Nela, é possível observar diferenças marcantes no desempenho energético e operacional dos veículos em diferentes condições de tráfego. A análise dos indicadores de velocidade média, economia e VSE permite uma avaliação comparativa entre tipos de veículos e regimes de circulação.

No caso dos carros a combustão, a queda acentuada na velocidade média à medida que o tráfego se intensifica, com redução de mais de 84,9% do tráfego livre para o congestionado, revela uma maior sensibilidade à diminuição do desempenho em cenários urbanos de tráfego intenso. Essa redução acarreta menor aproveitamento energético e aumento do VSE, possivelmente devido ao funcionamento ineficiente do modelo do motor em regimes de baixa velocidade e paradas frequentes. No total, o VSE apresenta um crescimento superior a 58,25%, refletindo o impacto operacional sobre a eficiência. Nos carros elétricos, embora a velocidade média também

Tabela 19: Resultados médios por tipo de veículo em diferentes grupos de tráfego

Grupo de Tráfego	Tipo de Veículo	Velocidade Média	Economia	VSE
Livre	Carro a Combustão	47.02 km/h	9.67 km/l	3.0090 MJ/km
	Carro Elétrico	46.99 km/h	20.41 kWh/100km	0.7346 MJ/km
	Moto a Combustão	47.37 km/h	48.52 km/l	0.5976 MJ/km
	Moto Elétrica	45.15 km/h	2.61 kWh/100km	0.1087 MJ/km
Intermediário	Carro a Combustão	23.31 km/h	8.00 km/l	3.6836 MJ/km
	Carro Elétrico	23.33 km/h	25.14 kWh/100km	0.9052 MJ/km
	Moto a Combustão	42.67 km/h	47.71 km/l	0.6077 MJ/km
	Moto Elétrica	43.46 km/h	3.14 kWh/100km	0.1130 MJ/km
Congestionado	Carro a Combustão	7.10 km/h	6.10 km/l	4.7608 MJ/km
	Carro Elétrico	7.11 km/h	31.20 kWh/100km	1.1232 MJ/km
	Moto a Combustão	45.09 km/h	48.23 km/l	0.6012 MJ/km
	Moto Elétrica	45.12 km/h	3.02 kWh/100km	0.1088 MJ/km

Fonte: Autoria própria

caia, os valores variam relativamente menos entre os cenários, sugerindo maior estabilidade no deslocamento. Ainda assim, o consumo e o VSE aumentam cerca de 52,88%, possivelmente devido à necessidade de fornecer torque frequente para retomadas, mesmo com a atuação do sistema de regeneração. Apesar disso, os valores absolutos permanecem inferiores aos dos carros a combustão, evidenciando, mesmo que de forma aproximada, sua vantagem energética.

As motos a combustão mantêm desempenho praticamente constante mesmo em tráfego denso, com redução inferior a 5% na velocidade média, o que pode ser explicado por sua capacidade de manobra, no sentido de poder trafegar pelas 5 faixas e 3 corredores, e menor interferência no fluxo, junto com o fato de existir poucas motocicletas na pista. A estabilidade na economia indica que seu motor modelado opera na simulação de forma eficiente mesmo em condições adversas. As motos elétricas, por sua vez, apresentam variações de consumo e VSE inferiores a 4%, reforçando sua alta eficiência e baixo impacto do tráfego na performance. A Tabela 20 apresenta as variações no VSE conforme os grupos de tráfego para cada veículo.

Portanto, a análise revela que automóveis, tanto elétricos quanto a combustão, são prejudicados de forma energética e operacional em tráfego intenso, com aumento de consumo e VSE proporcional à piora das condições de circulação. Por outro lado, as motocicletas, especialmente as elétricas, mantêm desempenho quase constante.

Tabela 20: Variação percentual do VSE em relação ao grupo de tráfego Livre

Tipo de Veículo	Intermediário (%)	Congestionado (%)
Carro a Combustão	+22.43%	+58.25%
Carro Elétrico	+23.23%	+52.88%
Moto a Combustão	+1.69%	+0.60%
Moto Elétrica	+3.95%	+0.09%

Fonte: Autoria própria

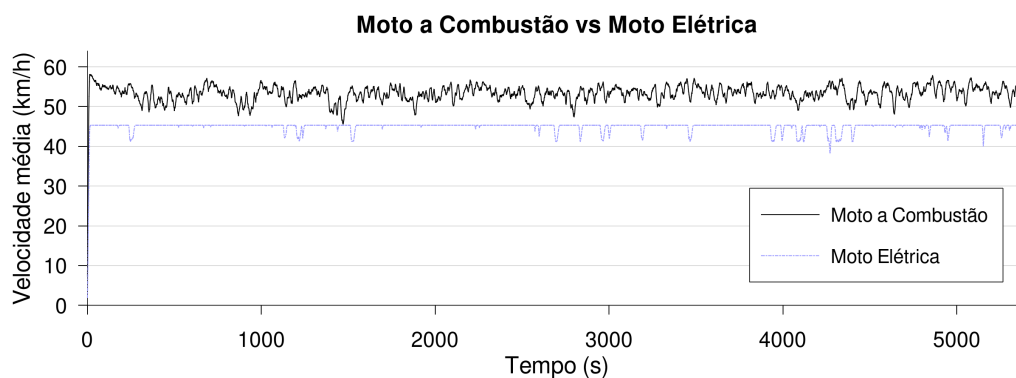
4.6 LIMITAÇÕES DO SISTEMA ADOTADO

Durante a simulação do tráfego veicular, foi identificado um comportamento atípico relacionado exclusivamente à motocicleta elétrica. O problema está associado ao funcionamento da frenagem aleatória no modelo do tráfego do simulador utilizado, um mecanismo introduzido para representar pequenas variações inesperadas de velocidade, simulando reações humanas ou condições ambientais não previstas. Essa frenagem atua com uma desaceleração fixa e é aplicada com certa probabilidade, desde que respeite duas condições fundamentais: não permitir que a velocidade do veículo fique negativa e não ultrapassar o limite de desaceleração máxima segura, a fim de evitar colisões.

No caso da motocicleta, que trafega majoritariamente pelos corredores, observou-se que ela quase nunca encontra obstáculos ou veículos à frente, o que lhe confere uma liberdade quase total para atingir sua velocidade desejada. Como consequência, a velocidade-alvo da moto permanece constantemente igual à velocidade máxima da via. No entanto, devido aos parâmetros do modelo físico implementado no simulador, incluindo massa, resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento e limitações do motor elétrico, a motocicleta não consegue ultrapassar os 47 km/h. Assim, a frenagem aleatória, ao tentar reduzir a velocidade a partir de um valor que já é inferior à velocidade desejada máxima, acaba não sendo efetiva. O resultado é que a moto opera praticamente em velocidade constante, a menos que encontre outro veículo e precise desacelerar por conta de uma interação real.

Para evidenciar de forma mais clara esse comportamento, é interessante comparar o perfil de velocidade da motocicleta elétrica com o de uma motocicleta a combustão, Figura 40. Esta última, mesmo em condições semelhantes, tende a apresentar oscilações mais frequentes de velocidade, refletindo com maior fidelidade as variações típicas do tráfego urbano.

Figura 40: Exemplo de gráfico de velocidades média das motocicletas com o tempo



Fonte: Autoria própria

A comparação permite destacar visualmente como a ausência de flutuações na condução da moto elétrica compromete a eficácia da frenagem aleatória e, por consequência, a representação realista de seu comportamento dinâmico. Em razão disso, optou-se por focar a maior parte da análise nos automóveis, que apresentaram respostas mais condizentes com as flutuações esperadas em um cenário de tráfego.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou contribuições relevantes tanto no âmbito acadêmico quanto prático, ao analisar os impactos da crescente eletrificação da frota veicular e integrar essa abordagem mediante o aumento da densidade de tráfego nas cidades brasileiras, com foco direcionado a cidade de Recife. Um dos principais avanços do trabalho foi a modelagem e validação do motor elétrico, que possibilitou a obtenção de curvas de desempenho fundamentais para a análise. Essa etapa foi fundamental para a resolução do trabalho, pois garantiu a possibilidade de estender um simulador previamente calibrado para a aplicação em veículos com motorização elétrica.

Este estudo adotou metodologias consolidadas em simulação veicular e análise de tráfego, utilizando a via previamente calibrada (Via Mangue), e um simulador de tráfego pautado em interações microscópicas entre os veículos, para validar e expandir trabalhos anteriores, como os de Araújo (2021) e Santos (2019). Ao aplicar diferentes configurações de frota em cenários controlados, foi possível avaliar com maior profundidade os impactos da eletrificação veicular em um ambiente urbano simulado. A modelagem de diferentes proporções entre veículos a combustão e elétricos, aliada à variação da densidade veicular, permitiu uma caracterização detalhada do sistema por meio de parâmetros como o diagrama fundamental, gráficos para velocidade média, consumo energético específico e economia relativa de energia. Diferentemente de abordagens que focam apenas no desempenho individual dos veículos, este trabalho adotou, além desse viés, uma análise coletiva, em que automóveis e motocicletas foram agrupados de acordo com sua denominação e motorização, o que possibilitou identificar padrões de comportamento energético sistemáticos sob distintos regimes de tráfego: livre, intermediário e congestionado. Além disso, a incorporação de modelos de motores elétricos ao simulador originalmente voltado para veículos a combustão ampliou significativamente sua aplicabilidade, em que, novo ambiente desenvolvido pode servir de base para futuras análises que busquem tratar desse tema.

Nesse cenário os resultados obtidos demonstram que a presença de veículos elétricos impacta positivamente o desempenho energético do tráfego. Observou-se uma redução no consumo médio por quilômetro rodado com o aumento da participação desses veículos, especialmente em condições de fluxo intermediário e congestionado. Além disso, os diagramas fundamentais de tráfego indicaram um escoamento mais homogêneo, com menor variabilidade nas velocidades e maior estabilidade no decorrer dos trajetos. Essa suavização do fluxo está diretamente associada

ao comportamento mais estável dos elétricos, que apresentam aceleração menos agressiva e maior capacidade de manter velocidade constante. Portanto, a combinação entre modelagem veicular, análise de tráfego e simulação energética desenvolvida neste trabalho possibilita avaliar os efeitos da eletrificação em diferentes cenários urbanos de forma aproximada.

Do ponto de vista pessoal, este trabalho foi fundamental para o autor no desenvolvimento de competências em áreas multidisciplinares, como desempenho energético de veículos, simulação computacional e análise de tráfego. Além de expandir o conhecimento em engenharia mecânica aplicada à mobilidade elétrica, o estudo permitiu explorar conceitos de eletrônica veicular, modelagem matemática e dinâmica veicular até então pouco aprofundados durante a graduação.

Como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- A adoção de modelos de veículos mais atuais, especialmente no caso dos veículos elétricos, considerando que atualmente existem tecnologias mais avançadas e eficientes;
- O desenvolvimento de um modelo de veículo real para motocicleta elétrica, que nesta versão assume parâmetros genéricos, sendo recomendada a comparação com dados originados de modelos comercializados no Brasil;
- A calibração propriamente dita do modelo, contendo agora a possibilidade de se alterar a participação de veículos, para outras avenidas de Recife.
- A modelagem de baterias de lítio, com a proposta de inserir equações específicas de descarga, capacidade residual e influência da temperatura, o que contribuiria para análises energéticas mais realistas;
- A inclusão de uma análise ambiental e econômica, relacionando o consumo energético aos níveis de emissões e ao custo operacional dos veículos, o que permitiria uma comparação mais abrangente entre as duas tecnologias motrizes.

Referências

ABNT. **NBR 7024: Veículos rodoviários automotores – Determinação do consumo de combustível**. [S.l.: s.n.], 2002. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ARAUJO, Fernando Wesley Cavalcanti de. **Construção de ciclos de condução veiculares adaptados às várias condições de tráfego de uma via a partir de monitoramento por vídeo**. 2021. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Engenharia Mecânica, Recife. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO VEÍCULO ELÉTRICO. **Eletrificados superam previsões, passam de 170 mil e batem todos os recordes em 2024**. [S.l.: s.n.], 2024. <<https://abve.org.br/eletrificados-superam-previsoes-passam-de-170-mil-e-batem-todos-os-recordes-em-2024/>>. Acesso em: 24 jul. 2025.

BEN-CHAIM, Michael; SHMERLING, Efraim; KUPERMAN, Alon. Analytic modeling of vehicle fuel consumption. **Energies**, v. 6, n. 1, p. 117–127, 2013. DOI: <10.3390/en6010117>. Disponível em: <<<https://doi.org/10.3390/en6010117>>>.

BOLDEA, Ion; NASAR, Syed A. **Electric Machines: Steady State, Transients, and Design with MATLAB**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015. ISBN 978-1-4822-3176-0. Disponível em: <<<https://www.crcpress.com/Electric-Machines-Steady-State-Transients-and-Design-with-MATLAB/Boldea-Nasar/p/book/9781482231760>>>.

CAMARGO, Isabella Mاتيacci; HORA CARACIOLO FERREIRA, Heitor da; RODRIGUES, Diego Samuel. Diagramas Fundamentais de Fluxo de Tráfego Veicular: Revisão Teórica e Aplicação Prática. In: XXX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP. Campinas, SP: [s.n.], 2022.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. São Paulo, Brasil: McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-85-7726-034-2.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. **Análise do impacto da frota de veículos nos Municípios brasileiros**. Brasília, 2023. Estudo Técnico de Transporte e Mobilidade Urbana. Acesso em: 24 jul. 2025.

CONTAS DO ESTADO DE PERNAMBUCO, Tribunal de. **Via Mangue**. [S.l.: s.n.], 2024. <<https://www.tce.pe.gov.br/especial50/viamangue.html>>. Ponte estaiada da Via Mangue, Recife/PE. Equipe: Antônio Paim, Conrado Montenegro e Carlos Frederico. Acompanhamento das obras da Via Mangue, iniciadas em 2011. O TCE analisou a licitação das 2ª e 3ª etapas e acompanhou os contratos, verificando economicidade e qualidade. A obra foi entregue em 2016. Acesso em: 3 ago. 2025.

DRAKE, Joseph S.; SCHOFER, Joseph L.; MAY, Adolf D. A Statistical Analysis of Speed–Density Hypotheses. **Highway Research Record**, v. 154, p. 53–87, 1965.

ELECTRIC TRANSPORTATION APPLICATIONS. **General Motors EV1 Vehicle Specifications**. United States, 1996. Prepared under DOE Award No. DE-FC-07-91ID-13079. Disponível em: <<<https://www.energy.gov>>>.

FAIZ, Asif; WEAVER, Christopher S; WALSH, Michael P. **Air pollution from motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions**. [S.l.]: World Bank Publications, 1996.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. 6. ed. Porto Alegre, Brasil: Bookman, 2004.

FONTARAS, Georgios; ZACHAROF, Nikiforos; CIUFFO, Biagio. The relevance of laboratory tests and emissions data for the real world: a review of recent studies and examples. **Energy Reports**, Elsevier, v. 3, p. 255–265, 2017.

GREENBERG, Herman. An Analysis of Traffic Flow. **Operations Research**, INFORMS, v. 7, n. 1, p. 79–85, 1959. DOI: <10.1287/opre.7.1.79>.

HE, Hongwen et al. State-of-charge estimation of the lithium-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved Thevenin model. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 60, n. 4, p. 1461–1469, 2011.

HUERTAS, JI; QUIRAMA, LF; GIRALDO, LE. Comparative analysis of driving cycles for regulatory and real driving conditions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Elsevier, v. 67, p. 131–144, 2019.

INMETRO. **Tabela do Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular – PBEV**. [S.l.: s.n.], 2023. <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/veiculos/pbev-programa-brasileiro-de-etiquetagem-veicular>>. Acesso em: 15 jul. 2025.

LARMINIE, James; LOWRY, John. **Electric Vehicle Technology Explained**. 2. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2012.

NI, Daiheng; HENCLEWOOD, Dwayne. Simple engine models for VII-enabled in-vehicle applications. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 57, n. 5, p. 2695–2702, 2008. DOI: <10.1109/TVT.2008.917229>. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1109/TVT.2008.917229>>>.

RENAULT. **Ficha Técnica e Lista de Equipamentos: Novo Fluence 2.0 16V Hi-Flex**. [S.l.], 2023. Documento técnico fornecido pela Renault. Disponível em: <<%5BURL % 20do % 20documento,%20se%20dispon%C3%ADvel%5D>>.

RENAULT DO BRASIL. **Renault Fluence – Manual Técnico 2015 (Brasil)**. Brasil, 2015. Acesso em: 10 jun. 2025.

SANTOS, M. P. M. de N. **A importância do motor na simulação de carros e motos em situação de tráfego**. [S.l.: s.n.], 2019. <<https://www.ufpe.br>>. Trabalho acadêmico, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

TREIBER, Martin; KESTING, Arne. **Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation**. Berlin: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-32459-8.

TREMBLAY, Olivier; DESSAINT, LA; DEKKICHE, Abdel Illah. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles. **IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference**, IEEE, p. 284–289, 2007.

UNDERWOOD, R. T. Speed, Volume, and Density Relationships. Edição: W. R. Debou. **Quality and Theory of Traffic Flow**, Yale Bureau of Highway Traffic, New Haven, p. 141–188, 1961.

WILDI, Theodore. **Electrical Machines, Drives, and Power Systems**. 6. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2006. ISBN 978-0131776913.

ZHANG, Xu et al. Lithium-ion battery systems for electric vehicles: From cell to pack. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 113, p. 109264, 2020.