

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO WESLEY CAVALCANTI DE ARAUJO

**CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO VEICULARES ADAPTADOS ÀS
VÁRIAS CONDIÇÕES DE TRÁFEGO DE UMA VIA A PARTIR DE
MONITORAMENTO POR VÍDEO**

Recife

2021

FERNANDO WESLEY CAVALCANTI DE ARAÚJO

**CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO VEICULARES ADAPTADOS ÀS
VÁRIAS CONDIÇÕES DE TRÁFEGO DE UMA VIA A PARTIR DE
MONITORAMENTO POR VÍDEO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani.

Recife

2021

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

A663c Araújo, 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 / Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo – Recife, 2021.
159 f.: figs., quad., tabs., abrev. e siglas.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2021.
Inclui referências e anexos.

1. Engenharia Mecânica. 2. Ciclos de condução. 3. Diagrama fundamental. 4. Modelo microscópico. I. Magnani, Fábio Santana (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG / 2021 - 243

FERNANDO WESLEY CAVALCANTI DE ARAÚJO

CONSTRUÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO VEICULARES ADAPTADOS ÀS
VÁRIAS CONDIÇÕES DE TRÁFEGO DE UMA VIA A PARTIR DE
MONITORAMENTO POR VÍDEO

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título do Doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 01/10/2021

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Darlan Karlo Elisiário de Carvalho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Leonardo Herszon Meira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Elievam Bessa Júnior (Examinador Externo)
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto (Examinador Externo)
Universidade Federal do Ceará

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter me dado condições de executar esse projeto.

À minha esposa, Milly, pelo amor e companheirismo em nossa convivência: você traz muita alegria à minha vida.

Aos meus pais, Jurandir e Fernanda, por terem me apoiado e me educado com muito amor, sem medir esforços. Ao meu irmão, Marcos, pelo suporte ao longo de nossas vidas. A minha vó Valdemira, *in memoriam*, que me cuidou com um amor que sou incapaz de descrever. A meus sogros Deijardins e Hulda e aos meus cunhados que sempre me incentivaram nesse trajeto.

A todos do meu local de trabalho, o Departamento de Nutrição da UFPE. Às chefas: Leopoldina e Edigleide; às professoras: Ana Paula, Beth, Goretti, Juliana, Regiane, Raquel e Surama; à Isinete por todo carinho; à Ana Cristina; ao Professor Rubem; aos recém-doutores Rafael e Regina. Obrigado pelo incentivo!

Aos meus amigos de Podcast (Claudio, o “X” e Thiago, o “Y”) pela amizade e conversas no melhor estilo “Lewis-Tolkien”.

À Autarquia de Trânsito da Cidade do Recife (CTTU), que através do Sr. Fabiano Ferraz (Gerente Geral) e do Sr. Dalmário Barros concederam dados fundamentais para este trabalho.

A Guilherme e Maurício, por dividirem das dificuldades, dos anseios, das expectativas e das alegrias da vida de pesquisador.

Ao Professor Fábio Magnani pela confiança em me receber no LOST, pelas incontáveis palavras de encorajamento, pelas muitas manhãs e tardes que passamos discutindo este trabalho (e diversos outros assuntos não relacionados a ele) e por não ter medido esforços para orientar. Muito obrigado!

RESUMO

O comportamento representativo dos veículos nas vias urbanas é relevante para que pesquisadores, fabricantes e governos definam aspectos técnicos que influenciam o desempenho, o consumo e as emissões dos veículos. O presente trabalho tem como objetivo contribuir na compreensão desse comportamento representativo, considerando que uma via pode ser avaliada tanto do ponto de vista macroscópico quanto microscópico. Além disso, avalia-se quantas condições diferentes de tráfego pode haver em uma via ininterrupta, criando ciclos de condução específicos para cada condição através de simulação. Na avaliação macroscópica, foram observados vídeos da Via Mangue, uma via expressa em Recife, aferindo-se fluxo e densidade da via por 276 minutos. Foi obtido um diagrama fundamental com capacidade de 1547 carros h^{-1} faixa $^{-1}$ e densidade crítica de 28 carros km^{-1} faixa $^{-1}$. Para avaliar de forma microscópica, um modelo de tráfego *car-following* de distância segura (Modelo Gipps-Santos) foi calibrado através do ajuste de oito parâmetros de entrada, obtendo um erro de 2% em relação ao fluxo e de 7,5% em relação à demanda energética veicular (DEV). A partir do diagrama fundamental e do modelo microscópico, verificou-se que essa via pode ser classicamente caracterizada por três condições distintas (tráfego livre, intermediário e congestionado) com erro médio de 5,0% em relação aos parâmetros característicos. Os três ciclos de condução foram construídos através do método da Cadeia de Markov e Monte Carlo, com densidade média de 15,6/54,9/92,3 carros km^{-1} faixa $^{-1}$, desvios médios de 3,5/3,9/3,5% em relação aos parâmetros característicos, e 0,29/0,36/0,35 MJ/km de demanda energética. Os ciclos de condução construídos foram comparados com outros ciclos ao redor do mundo em termos dos parâmetros cinemáticos e demanda de energia. Também foi calculado que utilizar apenas um ciclo para representar todas as condições da via pode resultar em um erro de até 35%.

Palavras-chave: ciclos de condução; diagrama fundamental; modelo microscópico.

ABSTRACT

The representative behavior of vehicles in urban roads is relevant for researchers, manufacturers, and government to define technical aspects that influence the vehicle's performance, fuel consumption, and emissions. This study aims to contribute in the comprehension of the representative behavior, considering that a track may be evaluated from a macroscopic and microscopic point of view. In addition, it is evaluated how many traffic conditions an uninterrupted track can present, developing a specific driving cycle for each condition through simulation. In the macroscopic evaluation, video footage from Via Mangue, an express road in Recife, measured vehicle flow and density for 276 minutes. It was obtained a fundamental diagram with vehicle capacity = $1547 \text{ cars h}^{-1} \text{ lane}^{-1}$ and critical density = $28 \text{ cars km}^{-1} \text{ lane}^{-1}$. To evaluate the track in a microscopic approach, a car-following safe distance traffic model (Model Gipps-Santos) was calibrated from the adjust of eight input parameters, yielding an error of 2% regarding the flow and 7,5% regarding the vehicular energy demand. From the fundamental diagram and microscopic model, it was verified that the track can be characterized in three distinct conditions (free flow, intermediate flow and congested flow) within the average error of 5,0% regarding the characteristic parameters. The three driving cycles were developed through the Markov Chain-Monte Carlo method, with average density $15.6/54.9/92.3 \text{ cars km}^{-1} \text{ lane}^{-1}$, average deviation of 3.5%/3.9%/3.5% with regard to characteristic parameters and $0.29/0.36/0.35 \text{ MJ km}^{-1}$ of vehicular energy demand. The three developed driving cycles were compared to other local driving cycles around the world in terms of its kinematic parameters and energy demand. It was also found that employing just one driving cycle to represent every track condition could provide up to 35% of error.

Keywords: driving cycles; fundamental diagram; microscopic traffic model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de diagrama fundamental (fluxo x densidade)	23
Figura 2 - Exemplo do comportamento de velocidade individual em um diagrama fundamental.....	24
Figura 3 - a) Ciclo Padrão FTP-75 e b) Ciclo Padrão HWFET	25
Figura 4 - Ilustração da importação e tratamento de dados de vários veículos para obter um ciclo de condução local Fonte: O autor (2021).....	27
Figura 5 - Exemplo de diagramas fluxo-densidade e fundamental obtido por medições empíricas.....	32
Figura 6 - Exemplo de diagramas fundamentais.....	33
Figura 7 - Exemplo do diagrama fundamental com suas propriedades	34
Figura 8 - Perfil de velocidade para um veículo em teste real.....	35
Figura 9 - Velocidade de cinco veículos simulados em função do tempo	36
Figura 10 - Balanço de forças que atuam no veículo	41
Figura 11 - Principais ciclos de condução padrão ao redor do mundo.....	47
Figura 12 - Ciclo de condução local criado para carros em horário fora de pico na cidade de Chennai, Índia.....	48
Figura 13 - Início do ciclo FTP 75 com as três primeiras micro-viagens	52
Figura 14 - Exemplo de MTP onde cada elemento contém a probabilidade de passar de um estado específico a outro.....	55
Figura 15 - Exemplo da curva de função de probabilidade acumulada.....	56
Figura 16 - Seleção da área de coleta de dados em vias chinesas: a) JinZhai Road e b) Highway G2 Fonte: a) Lv et al. (2013) Licença 5113190251236 (Elsevier) e b) Guo et al (2018) – Open Access	58
Figura 17 - Seção observada para coleta de dado através do fluxo em a) Japão – Fukuoka e b) China – Nanjing	58
Figura 18 - Resumo do processo de calibração.....	61
Figura 19 - a) Localização do Recife no mapa do Brasil b) Localização da Via Mangue e indicação do local da câmera.	71
Figura 20 - Visão do software de monitoramento de tráfego da via estudada.	72
Figura 21 - Exemplo da delimitação da área para coleta de dados.....	73
Figura 22 - Ilustração da pista modelada	76

Figura 23 - Diferentes formas de mensurar o fluxo: a) Pista Real, b) Pista simulada, c) Sensor	82
Figura 24 - Exemplo de sensibilidade para velocidade máxima e comprimento do veículo	84
Figura 25 - Ilustração do diagrama fundamental com locais de fluxo a) livre, b) intermediário e c) congestionado.....	93
Figura 26 - Exemplo do tráfego a) livre b) intermediário e c) congestionado. A área marcada corresponde ao trecho onde fluxo e densidade são analisados	94
Figura 27 - Fluxo em função da densidade observados na via	95
Figura 28 - Pontos eliminados da análise a partir do método da distância de Cook	96
Figura 29 - Diagrama fundamental para o fluxo observado experimental	97
Figura 30 - Fluxo instantâneo para diversas condições	99
Figura 31 - Fluxo médio em diferentes tempos de descarte.....	101
Figura 32 - Fluxo médio na pista e no sensor	102
Figura 33 - Fluxo médio de veículos em diferentes intervalos de tempo.....	104
Figura 34 - Análise de sensibilidade do fluxo para P_{mf} , d_{al} , P_{fa} e D_{min}	105
Figura 35 - Análise de sensibilidade do fluxo para D_{min} , a_{max} , d_{max} , V_{max} e L	105
Figura 36 - Curvas de calibração para a velocidade máxima.....	107
Figura 37 - Curvas de calibração para a distância mínima entre os veículos	108
Figura 38 - Curva inicial de calibração para a aceleração máxima	110
Figura 39 - Curva final de calibração para a aceleração máxima.....	110
Figura 40 - Curva de calibração para a probabilidade de frenagem aleatória	111
Figura 41 - Curva de calibração para a desaceleração máxima	112
Figura 42 - Pontos observados, diagrama fundamental e modelo calibrado.....	113
Figura 43 - Fluxo de carros na via em várias condições de repetições e intervalos de tempos de análise – Caso 1: 1 repetição; Caso 2: média de 5 repetições	115
Figura 44 - Fluxo para diversas condições de tempo em 20 repetições	116
Figura 45 - Validação do modelo calibrado	117
Figura 46 - Exemplo de trajetórias reais e simulada	118
Figura 47 - Ciclo de condução gerado para o caso de apenas um grupo	120

Figura 48 - Diagrama fluxo-densidade dividido em três grupos pelo método das k-medias	121
Figura 49 - Erro de cada densidade em relação ao centro do cluster	122
Figura 50 - Ciclo de condução obtido para condição livre (grupo 1)	126
Figura 51 - Ciclo de condução obtido para condição intermediária (grupo 2)	126
Figura 52 - Ciclo de condução obtido para condição congestionada	127
Figura 53 - Desvios médios dos PCs em cada densidade em relação ao ciclo de condução	127
Figura 54 - Demanda energética veicular em função da densidade para o modelo calibrado	128
Figura 55 - Composição da demanda energética veicular em função das densidades	129
Figura 56 - Curva de fluxo para o modelo calibrado e diagrama fundamental	130
Figura 57 - Curvas de velocidade para diferentes situações de densidade	131
Figura 58 - Parâmetros Característicos relacionados à velocidade	132
Figura 59 - Parâmetros Característicos relacionados à aceleração	133
Figura 60 - Parâmetros Característicos relacionados à Proporção de tempo	133
Figura 61 - Demanda energética veicular para os grupos e ao redor do mundo	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição dos parâmetros característicos	44
Tabela 2 - Valores dos parâmetros cinemáticos para os principais ciclos de condução	49
Tabela 3 - Parâmetros cinemáticos para o ciclo FTP-75, Fortaleza (Azevedo <i>et al</i> , 2017), Chennai - Índia (Arun <i>et al</i> , 2017) e Recife (Andrade <i>et al</i> , 2021)	50
Tabela 4 - Capacidade e densidade crítica de artigos publicados	60
Tabela 5 - Trabalhos que realizaram calibração e validação	62
Tabela 6 - Trabalhos que desenvolvem ciclos de condução com o método da cadeia de Markov	64
Tabela 7 - Parâmetros dos veículos	77
Tabela 8 - Parâmetros de entrada do modelo microscópico de tráfego.	84
Tabela 9 - Parâmetros característicos e suas definições	88
Tabela 10 - Condições adicionais para os parâmetros característicos	88
Tabela 11 - Minutos observados em fluxo livre e congestionado	94
Tabela 12 - Fluxo de carros na faixa em diferentes repetições	100
Tabela 13 - Maior intervalo de tempo de descarte e tempo de análise em que o fluxo simulado está com 1% de diferença do fluxo médio pela primeira vez.....	101
Tabela 14 - Diferenças entre dados observados e simulados.....	102
Tabela 15 - Influência dos parâmetros característicos no fluxo.....	106
Tabela 16 - Condições de calibração inicial da velocidade máxima.....	107
Tabela 17 - Condições de calibração final da velocidade máxima	108
Tabela 18 - Condições de calibração para a distância mínima	109
Tabela 19 - Condições iniciais de calibração para a aceleração.....	109
Tabela 20 - Condições finais de calibração para a aceleração	109
Tabela 21 - Condições finais de calibração para a probabilidade de frenagem aleatória	111
Tabela 22 - Condições finais de calibração para a desaceleração máxima.....	112
Tabela 23 - Valores dos parâmetros de entrada no modelo calibrado	113
Tabela 24 - Erro global dos métodos em função da quantidade de grupos escolhidos.....	120

Tabela 25 - Parâmetros característicos médios de cada grupo e do ciclo de condução proposto	125
Tabela 26 - Densidades médias de cada grupo	128
Tabela 27 - Demanda Energética Veicular do ciclo de condução de cada grupo .	129
Tabela 28 - Parâmetros característicos para ciclos locais e padrão ao redor do mundo	134
Tabela 29 - Demanda energética veicular para ciclos ao redor do mundo	137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Pseudoalgoritmo da seleção de curva de fluxo livre	75
Quadro 2 - Pseudoalgoritmo com a seleção da curva de fluxo congestionado	75
Quadro 3 - Obtenção dos grupos pelo método das k-médias	88
Quadro 4 - Intervalo de tempo de análise para diversas repetições na região crítica.....	114
Quadro 5 - Distribuição dos pontos observados nos grupos separados pelo método das k-médias	124
Quadro 6 - Fluxograma da metodologia parte 1	150
Quadro 7 - Fluxograma da metodologia parte 2.....	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CCL	Ciclo de condução local
CCP	Ciclo de condução padrão
CCR	Ciclo de condução representativo
CMMC	Cadeia de Markov - Monte Carlo
DEV	Demanda Energética Veicular
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test Cycle</i>
IDM	Modelo do Motorista Inteligente
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
JC	<i>Japanese Cycle</i>
MTP	Matriz de Transição de Probabilidades
NEDC	<i>New European Driving Cycle</i>
OVM	Modelo de Velocidade Ótima
PC	Parâmetro Cinemáticos / Característicos
WLTC	<i>Worldwide Cycle for Light-duty Vehicles</i>

LISTA DE VARIÁVEIS

Δt_{ag}	Intervalo de tempo agregado
Δt_{an}	Intervalo de tempo de análise
Δt_{ba}	Intervalo de tempo básico
Δt_{de}	Intervalo de tempo de descarte
E_{aer}	Energia devido à aerodinâmica
E_{ine}	Energia devido à inércia
E_{rol}	Energia devido à rolagem
F_A	Força de resistência aerodinâmica
F_C	Forças resistivas
F_F	Força de frenagem
F_G	Força de resistência gravitacional
F_P	Força de propulsão
F_R	Força de resistência à rolagem
F_{res}	Força resultante
P_E	Parâmetro de entrada da análise de sensibilidade
P_S	Parâmetro de saída da análise de sensibilidade
P_{ij}	Probabilidade de transição do estado i ao j
$P_m(\omega_m)$	Curva de potência do motor
P_{max}	Potência máxima do motor
Q_{DF}^{sen}	Diagrama fundamental da via
Q_{exp}	Fluxo de veículos mensurado a partir de observação de vídeo
Q_{exp}^{sen}	Fluxo de veículos mensurado a partir de observação de vídeo na região do sensor
\bar{Q}_{sim}^{sen}	Fluxo de veículos médio na simulação na região do sensor
Q_{sim}	Fluxo de veículos obtidos através de simulação
Q_{sim}^{pis}	Fluxo de veículos na pista obtido a partir de simulação
V_C	Velocidade média corrida do veículo
V^{pis}	Velocidade na pista (real ou simulada)
V^{sen}	Velocidade no sensor (real ou simulado)
\bar{V}_{sim}^{pis}	Velocidade média na pista obtida de forma simulada na região do sensor

X_k	Definição de processo estocástico
a_{ref}	Aceleração de referência do veículo
b_{of}	Desaceleração máxima do veículo atual
b_{of}^-	Desaceleração máxima do veículo na outra faixa
e_{DEV}	Erro relacionado à demanda energética
e_{fluxo}	Erro relacionado ao fluxo
e_{global}^{PC}	Erro médio dos parâmetros característicos avaliados em cada grupo
f_0	Termo adimensional do teste de coastdown
f_2	Termo das forças quadráticas do teste de coastdown
gap_{of}^-	Distância para o veículo atrás
gap_{of}^+	Distância para o veículo à frente
s_i	Estado do veículo
t_{ref}	Percentual de tempo de referência
v_{livre}	Velocidade de tráfego livre
v_{max}	Velocidade máxima na via
v_{ref}	Velocidade de referência do veículo
v_{seg}	Velocidade de segurança para não colisão
η_{max}	rendimento máximo do motor
η_{trans}	Eficiência do sistema de transmissão
μ_{RD}	Coeficiente de atrito entre o pneu e a via
μ_n	rendimento do motor em relação à rotação
μ_p	rendimento do motor em relação à carga
ρ_{crit}	Densidade crítica de veículos
$\rho_{exp,crit}^{sen}$	Densidade crítica mensurada a partir de observação de vídeo na região do sensor
$\rho_{exp,max}^{sen}$	Densidade máxima mensurada a partir de observação de vídeo na região do
	do
ρ_{exp}^{sen}	Densidade mensurada a partir de observação de vídeo na região do sensor
ρ_{max}	Densidade máxima na via
ρ_{sim}^{pis}	Densidade média em toda a pista obtida a partir da simulação
ω_p	rotação da potência máxima do motor
ω_t	rotação de torque máximo do motor

C	Classe do veículo
D	Distância percorrida pelo veículo
F	Matriz bidimensional dos estados dos veículos
L	Distância percorrida em um ciclo de condução
N	Número de veículos
Q	Fluxo de veículos na via
S	Sensibilidade dos parâmetros de entrada em relação ao fluxo
T	Matriz bidimensional de transição de probabilidades
TA	Proporção do tempo em aceleração
TC	Proporção de tempo em cruzeiro
TD	Proporção do tempo desacelerando
TR	Proporção de tempo em repouso
V	Velocidade média dos veículos na via
a	Aceleração média do veículo
d	Desaceleração média do veículo
e	Erro ponderado considerando fluxo e demanda energética
g	Gravidade
m	Massa do veículo
t	Intervalo de tempo
x	Posição na via
α	Percentual de potência do veículo
β	Percentual de frenagem do veículo
θ	Inclinação da via
μ	Valor aleatório escolhido no método de monte carlo
ρ	Densidade de veículos na via

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	28
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	28
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	TRÁFEGO MACROSCÓPICO DE VEÍCULOS.....	29
2.1.1	Observação e métricas do tráfego	29
2.1.2	Diagrama fundamental	31
2.2	TRÁFEGO MICROSCÓPICO DE VEÍCULOS.....	34
2.2.1	Dados de carro flutuante	34
2.2.2	Velocidade dos veículos e o diagrama fundamental	35
2.2.3	Modelos de tráfego	36
2.2.3.1	Modelos de tráfego microscópicos	37
2.2.3.2	Modelo microscópico de Gipps-Santos	38
2.2.4	Análise dinâmica e energética dos veículos	40
2.2.4.1	Demanda energética veicular	43
2.2.5	Parâmetros característicos	43
2.3	CICLOS DE CONDUÇÃO	44
2.3.1	Ciclo de condução padrão	44
2.3.2	Ciclo de condução local	47
2.3.3	Parâmetros característicos de um vetor de velocidade	48
2.4	CONSTRUÇÃO DE UM CICLO DE CONDUÇÃO: CADEIA DE MARKOV E MÉTODO DE MONTE CARLO	50
2.4.1	Construção com o método de micro-viagem	51
2.4.2	Construção com o método de Cadeia de Markov e Monte Carlo	52
2.4.2.1	Cadeia de Markov.....	53
2.4.2.2	Método de Monte Carlo	55
2.5	SIMBOLOGIA DAS VARIÁVEIS	56
3	ESTADO DA ARTE	57
3.1	ANÁLISE DE VÍDEOS PARA ANÁLISE DE TRÁFEGO	57
3.2	CALIBRAÇÃO DE MODELOS MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO.....	60
3.2.1	Calibração a partir de dados de GPS	61
3.2.2	Calibração e validação utilizando dados de vídeo	62

3.3	MÉTODO DA CADEIA DE MARKOV E MONTE CARLO EM CICLOS DE CONDUÇÃO.....	64
3.4	COMPARAÇÃO DO TRABALHO COM A LITERATURA	66
3.4.1	Obtenção de dados através da análise dos vídeos	66
3.4.2	Seleção da via comparada com outras da literatura	67
3.4.3	Diagrama fundamental	68
3.4.4	Simulador de tráfego microscópico.....	68
3.4.5	Calibração do modelo de tráfego microscópico.....	69
4	METODOLOGIA.....	70
4.1	OBTENÇÃO DO DIAGRAMA FUNDAMENTAL A PARTIR DA OBSERVAÇÃO DE VÍDEOS	70
4.1.1	Cálculo de fluxo e densidade no trecho selecionado	71
4.1.2	Obtenção das curvas do diagrama fundamental	73
4.1.2.1	Eliminação de pontos outliers.....	74
4.1.2.2	Regressão dos pontos observados	74
4.2	DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DE TRÁFEGO.....	75
4.2.1	Submodelo do motor.....	76
4.2.2	Submodelo do veículo	77
4.2.3	Submodelo do tráfego.....	78
4.2.3.1	Movimento de mudança de faixa	78
4.2.3.2	Movimento longitudinal	79
4.3	ESTUDO COMPUTACIONAL SOBRE A SIMULAÇÃO.....	80
4.3.1	Avaliação do número de repetições, intervalo de tempo de descarte e intervalo de tempo de análise.....	80
4.3.2	Estudo sobre os diferentes tipos de medição do fluxo	81
4.4	CALIBRAÇÃO DO MODELO MICROSCÓPICO DE TRÁFEGO	83
4.4.1	Análise de sensibilidade de fluxo	84
4.4.2	Processo de calibração do modelo.....	85
4.4.3	Validação dos dados	86
4.5	GERAÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO REPRESENTATIVOS.....	86
4.5.1	Avaliação dos parâmetros característicos	87
4.5.2	Seleção da quantidade de grupos que representa o diagrama fundamental	88
4.5.3	Seleção das trajetórias utilizadas como dados no Markov.....	90

4.5.4	Método da Cadeia de Markov e Monte Carlo para obtenção dos ciclos de condução	90
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	93
5.1	DETERMINAÇÃO DO DIAGRAMA FUNDAMENTAL.....	93
5.1.1	Dispersão dos pontos de fluxo versus densidade da via	93
5.1.2	Densidade de motos na via	96
5.1.3	Diagrama fundamental da via observada	96
5.2	CALIBRAÇÃO DO MODELO MICROSCÓPICO DE TRÁFEGO	98
5.2.1	Experimentos computacionais sobre a simulação.....	98
5.2.1.1	Avaliação do número de runs	98
5.2.1.2	Avaliação do intervalo de tempo de descarte e de análise	100
5.2.2	Discussão sobre os tipos de fluxos estudados.....	102
5.2.3	Análise de sensibilidade do fluxo	104
5.2.4	Calibração dos parâmetros.....	107
5.2.4.1	Zona crítica encontrada durante a calibração.....	114
5.2.5	Validação dos dados	117
5.3	GERAÇÃO DOS CICLOS.....	119
5.3.1	Obtenção do número de grupos a partir do método de k-medias	119
5.3.1.1	Ciclo de condução para o caso $k = 1$	119
5.3.2	Erros para as demais quantidades de grupos	120
5.3.3	Seleção do número de trajetórias	123
5.3.4	Proposta de ciclos de condução representativos	124
5.3.4.1	Comparação dos ciclos de condução obtidos com os dados do diagrama fundamental.	127
5.3.5	Demanda Energética Veicular	128
5.4	ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE TRAJETÓRIAS E DIAGRAMA FUNDAMENTAL.....	130
5.4.1	Trajetoárias em função da densidade no diagrama fundamental	130
5.4.2	Comportamento dos parâmetros característicos	131
5.4.3	Parâmetros característicos de outros ciclos ao redor do mundo.....	134
5.4.4	Demanda energética veicular de ciclos ao redor do mundo	136
6	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	138
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
	APÊNDICE A - DADOS ORIGINAIS PARA CÁLCULO DE FLUXO E DENSIDADE.....	148

APÊNDICE B - FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DO TRABALHO .	150
APÊNDICE C - PRECIPITAÇÃO EM MM DURANTE DIAS DE TESTE..	152
ANEXO A - TRABALHOS ACADÊMICOS PRODUZIDOS SOBRE O TEMA DE DUAS RODAS NO LOST - UFPE	153
ANEXO B - PUBLICAÇÕES PRODUZIDAS NO LOST (ÁREA: DUAS RODAS)	154
ANEXO C - CAPA DAS PUBLICAÇÕES PRODUZIDAS NO DOUTORADO	155

1 INTRODUÇÃO

O transporte de pessoas é fundamental para a manutenção da qualidade de vida e garante acesso à moradia, educação, bens de consumo, lazer e empregos. A presença de tráfego de veículos é uma forma de identificar o crescimento da economia de uma localidade, enquanto a sua ausência pode indicar uma situação de recessão econômica (FALCOCCHIO; LEVINSON, 2015). No entanto, com a presença excessiva de veículos, a sociedade passa a enfrentar problemas como a existência de congestionamentos, aumento da poluição e de acidentes, que impactam a vida dos cidadãos direta e indiretamente.

A frota brasileira cresceu nas últimas duas décadas: a quantidade de automóveis registrados aumentou 152%, de 23 para 58 milhões de automóveis entre 2003 e 2021, enquanto a frota de motocicletas e motonetas aumentou mais de 380%, de 6 para 29 milhões no mesmo período (DENATRAN, 2021). O aumento na quantidade de veículos no Brasil reflete no consumo de energia. O setor de transportes é responsável pela maior fatia do consumo de energia no país, sendo que de 2009 a 2018 a proporção no consumo total aumentou de 28,5% para 32,7%. Neste mesmo período, o consumo de gasolina comum cresceu 54%, enquanto que as vendas de etanol hidratado aumentaram cerca de 32% (BRASIL, 2019).

O aumento na quantidade de veículos é sentido no cotidiano dos brasileiros, que enfrentam congestionamentos com regularidade. Em geral, o sistema de transporte público é visto com baixa confiança e é usado principalmente por quem precisa. Além disso, o transporte público apresenta tempo de viagem significativamente maior do que o transporte individual no mesmo percurso (VASCONCELLOS, 2018). As desvantagens presentes no transporte público motivam a aquisição de veículos individuais, desejados por fornecer *status*, sensação de liberdade e a conveniência ao seu proprietário (STEG, 2005).

Considerando que parte da frota nacional saia às ruas diariamente, milhões de viagens são realizadas por condutores com características distintas de condução (e.g.: agressivas ou calmas), que dirigem veículos com diferentes características (e.g.: moto, carros *hatch*, SUV), percorrendo diferentes trajetórias em diferentes horários. Cada um dos condutores de seu veículo tem, ao final do dia, um valor de consumo, de velocidade média, entre outros que dependem de fatores pessoais de direção, do veículo que está conduzindo e das características da via.

Baseado em todo o contexto heterogêneo da sociedade, encontrar um comportamento representativo dos condutores é uma tarefa difícil. O termo “representativo”, usado ao longo deste trabalho, sugere que essa trajetória especial representa estatisticamente todas as trajetórias possíveis para aquela condição. A compreensão deste comportamento representativo é relevante para que o governo, as fabricantes e os pesquisadores tracem diretrizes que fomentem melhorias aos veículos, as quais refletirão em melhorias no desempenho, em redução de consumo veicular, redução de acidentes, entre outros (LV *et al.*, 2013).

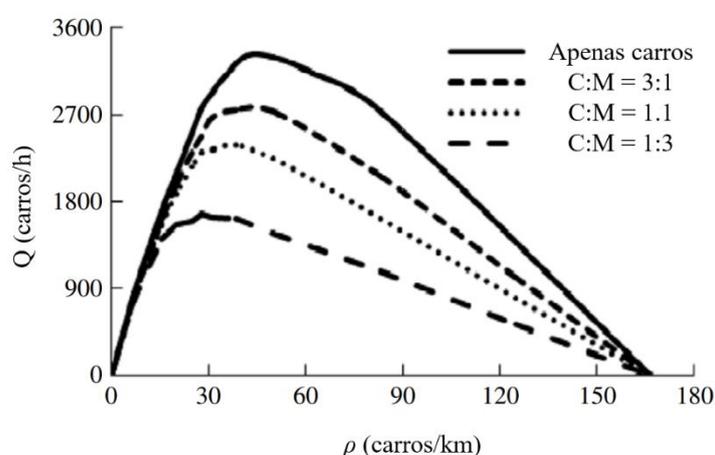
O comportamento representativo microscópico é usado para avaliar o “valor oficial de consumo”, obtido através de um teste no qual o veículo segue um ciclo de condução padrão (CCP). Todos os automóveis vendidos no Brasil são submetidos a esse teste, onde percorrem um perfil padronizado de acelerações, desacelerações e manutenção da velocidade sobre um dinamômetro de chassi. A partir dos resultados desse teste, o INMETRO fornece a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) classificando o veículo de A (mais econômico) a E (menos econômico). Dessa forma, o CCP é usado para representar uma visão microscópica (velocidade x tempo) do que ocorre na via.

Mas o comportamento em uma via pode ser compreendido de duas formas: macroscópica ou microscópica, lembrando a analogia hidrodinâmica na qual se pode avaliar uma partícula isolada em um fluido, ou o comportamento médio do fluido como um todo. Macroscopicamente são avaliados o fluxo médio, a densidade e a velocidade média dos veículos, e microscopicamente se avalia o veículo, compreendendo como sua velocidade e posição se comportam em função do tempo. Ambas as formas são relevantes para compreender o que ocorre na via, em escalas diferentes (TREIBER; KESTING, 2013).

As duas abordagens nem sempre são executadas simultaneamente nos trabalhos que estudam o tráfego. Por exemplo, vários trabalhos analisam o comportamento macroscópico do tráfego (*e.g.*, fluxo médio, densidade de veículos na via) e não avaliam o comportamento individual dos veículos que a percorrem. Por outro lado, trabalhos que focam na compreensão do que ocorre no veículo de forma microscópica (*e.g.*, velocidade em função do tempo) podem desconsiderar as variações que acontecem na via ao longo do dia. (VAN WAGENINGEN-KESSELS *et al.*, 2015).

Na abordagem macroscópica, dispor apenas do fluxo de veículos não é suficiente para compreender o comportamento da via e é necessário conhecer pelo menos outra variável (velocidade média ou densidade média), já que um valor de fluxo médio pode representar duas condições de densidades distintas em um diagrama fundamental. Um exemplo de diagrama fundamental está na Figura 1 onde Lan *et al.* (2010) avaliaram o fluxo de carros por hora (Q) em função da densidade de carros na via (ρ) onde as curvas de fluxo indicam diferentes proporções de carros (C) e motos (M).

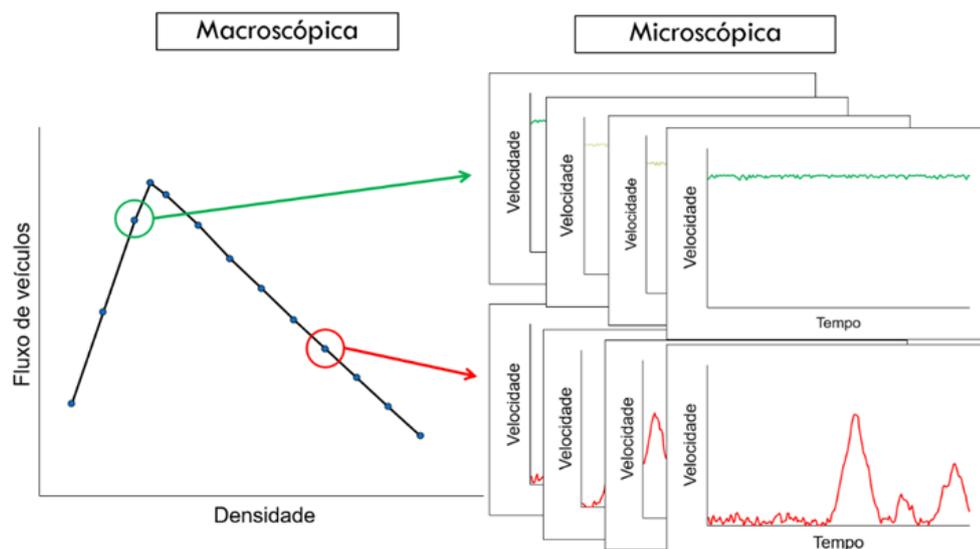
Figura 1 – Exemplo de diagrama fundamental (fluxo x densidade)



Fonte: Adaptado de LAN *et al.*, (2010) - Licença 5113160477235 (Elsevier).

O veículo possui comportamento microscópico distinto em cada localidade do diagrama fundamental. A Figura 2 ilustra o diagrama fundamental e a velocidade de veículos em duas condições distintas. Assim, o perfil de velocidade de um veículo (perspectiva microscópica) difere ao longo do diagrama fundamental (perspectiva macroscópica), e também difere entre os veículos que estão na mesma condição macroscópica. Neste trabalho, uma forma de verificar se é o comportamento macroscópico ou microscópico que está sendo avaliado é através da variável no eixo das abscissas. Na abordagem macroscópica é avaliada a densidade, enquanto que na abordagem microscópica se avalia o veículo em função do tempo (Figura 2).

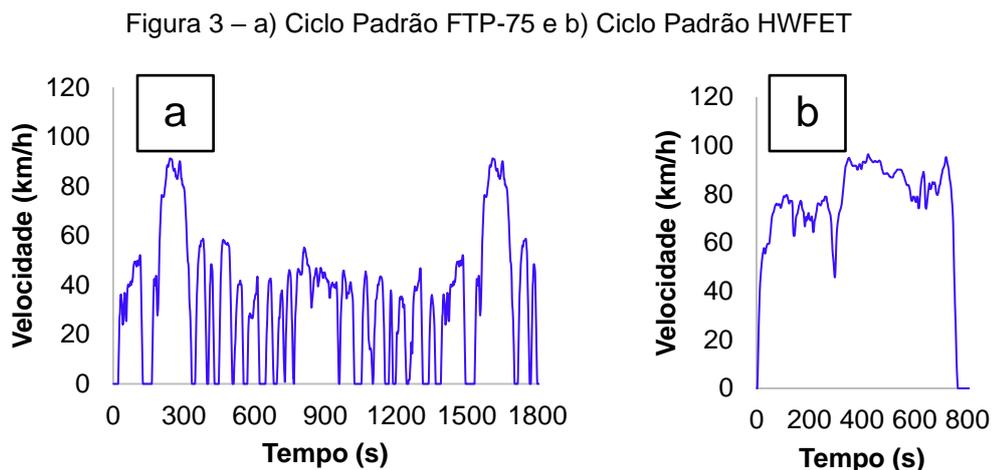
Figura 2 – Exemplo do comportamento de velocidade individual em um diagrama fundamental



Fonte: O autor (2021)

Na Figura 3 são exibidos os ciclos de condução padrão (CCPs) que estão na norma ABNT NBR 7024 (responsável por mensurar o consumo de combustível dos carros de passeio vendidos no Brasil). A Figura 3a exibe o ciclo FTP-75, utilizado no Brasil para representar os carros em situação urbana, enquanto a Figura 3b exibe o ciclo HWFET que é utilizado em teste de estrada. No entanto, vários estudos indicam que existe uma diferença significativa entre o consumo dos veículos quando realizam o teste de certificação (os CCPs) e em seus percursos no cotidiano. Em geral os veículos possuem consumo até 50% maior na vida real, quando comparado ao consumo obtido no teste de certificação (HUERTAS *et al.*, 2019; MA *et al.*, 2019).

A discrepância entre os valores de consumo e emissão gera discussão se os CCPs representam bem a sociedade. Os CCPs usados no Brasil, por exemplo, foram elaborados na década de 70 para representar as vias dos EUA (GIAKOUMIS, 2016). Assim, vários trabalhos propõem desenvolver perfis de velocidade que são uma alternativa aos CCPs. Esses perfis são elaborados para representar a região estudada e são chamados de ciclos de condução locais (CCLs). Vários CCLs foram desenvolvidos ao redor do mundo, mas poucos ciclos foram propostos no Brasil até o presente momento: Fortaleza – CE, Santa Maria – RS, e Recife – PE (ANDRADE *et al.*, 2021; AZEVEDO *et al.*, 2017; ROSO; MARTINS, 2016).



Fonte: O autor (2021)

Os CCLs podem ser criados a partir de através da simulação computacional utilizando modelos de tráfego. Neste estudo, foi empregada a simulação com uma das classes de modelos microscópicos mais utilizadas na literatura: o modelo carro seguidor (*car-following*) de distância segura. Ele considera que o veículo que segue deve sempre manter uma distância segura para o veículo que está à sua frente de forma evitar a colisão e trafegar com a maior velocidade possível. O modelo microscópico utilizado nesse trabalho (Modelo Gipps-Santos) foi desenvolvido pelo doutorando Maurício Santos em sua dissertação (SANTOS, 2019) e aperfeiçoado em sua tese de doutorado que está em andamento (SANTOS, 2022). Esse modelo é baseado no tradicional modelo de distância segura de Gipps.

Qualquer modelo selecionado, entretanto, não representará a via estudada de forma precisa caso se utilize quaisquer valores de parâmetros de entrada (e.g., velocidade máxima da via, aceleração máxima). Isto é, se faz necessário realizar o ajuste dos parâmetros de entrada: a calibração do modelo. Assim, os resultados gerados pelo modelo podem representar o que ocorre na via real, dentro de uma margem de erro. A calibração de um modelo microscópico pode ser realizada de diversas formas, sendo uma delas a comparação dos resultados de fluxo entre o modelo e dados reais (PAZ *et al.*, 2015). Os valores reais de fluxo de veículos podem ser obtidos de várias formas, sendo uma delas a partir de observações de vídeo, como foi realizado por Lv *et al.* (2013) e Hoogendoorn e Hoogendoorn (2010).

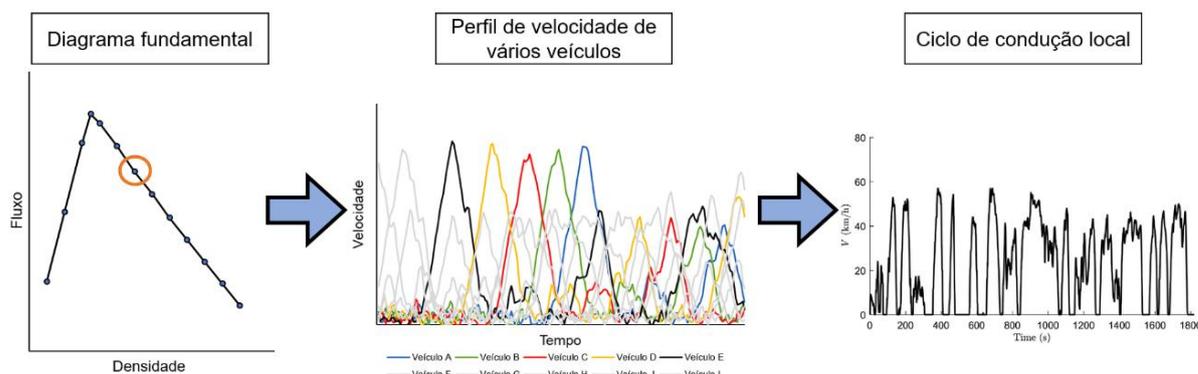
Mas mesmo em uma simulação com valores fixos de fluxo e densidade, cada veículo apresenta um perfil de velocidade diferente devido à estocasticidade do

processo (Figura 2). Uma forma que torna possível a comparação do comportamento de diferentes veículos é através da comparação dos seus parâmetros característicos (PC). Os PCs são combinações da velocidade em função do tempo (*e.g.*, velocidade média, aceleração média, percentual do tempo em aceleração). Assim, à medida em que se variam as condições da via (*i.e.*, densidade), o comportamento dos veículos e consequentemente seus PCs também variam.

Como uma via possui diversas condições de tráfego (de totalmente livre a congestionado), para entender a via de forma macroscópica deve-se compreender quantas condições distintas a via possui e avaliar o comportamento médio de cada uma dessas condições (*i.e.*, conjunto de dados, grupo). O comportamento médio dos veículos em cada uma destas condições pode ser definido através de CCLs. Vários métodos são empregados na literatura para gerar os ciclos locais, sendo o método da Cadeia de Markov e Monte Carlo (CMMC) um dos métodos mais utilizados nos últimos anos (SANTOS *et al.*, 2020).

A cadeia de Markov é um método estocástico que tem como aspecto principal compreender que o que ocorre em um determinado instante de tempo depende apenas das condições do instante de tempo imediatamente anterior. O método CMMC assegura que os estados (*e.g.*, velocidade, aceleração) que ocorrem com maior probabilidade serão os mais selecionados. Caso o perfil de velocidade gerado pelo método CMMC cumpra os requisitos necessários, como baixo erro quando comparado aos dados importados, pode ser considerado que o perfil de velocidade representa o grupo (a condição da via) e assim considerá-lo como um CCL da condição (grupo) avaliada.

Figura 4 – Ilustração da importação e tratamento de dados de vários veículos para obter um ciclo de condução local



Fonte: O autor (2021)

Na figura 4 há uma ilustração do procedimento de criação de um CCL (perfil de velocidade à direita na figura 4). Cada ponto do diagrama fundamental informa a condição de fluxo e densidade de vários veículos, mas não informa o perfil de velocidade dos veículos em cada situação, o que é fundamental para o cálculo da energia e de emissões. Uma forma de obter o perfil de velocidade de todos os veículos é através de simulação. Supondo que o perfil de velocidade dos veículos presentes seja o do ponto marcado no diagrama fundamental da figura 4, efetuando o tratamento de dados é possível obter um CCL capaz de representar a condição de fluxo e densidade avaliadas. Para que o CCL seja considerado adequado, os PCs do CCL devem possuir uma margem de erro (e.g., <10%) quando comparado à média dos PCs de todos os veículos avaliados (ANDRADE *et al.*, 2020; MA *et al.*, 2019).

O autor desse trabalho é integrante do grupo LOST (Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos e de Estudos Sobre Motocicletas) da UFPE. O LOST busca contribuir com a sociedade através da avaliação de fenômenos presentes no trânsito, focando (mas não se limitando) a compreender aspectos relacionados à dinâmica do motor, às forças que atuam sobre o veículo e do comportamento dos veículos no tráfego, frequentemente integrando essas três abordagens. No LOST, há ênfase no estudo das motocicletas, frequentemente discriminadas pela sociedade e pesquisadores. No Anexos B e C estão presentes os trabalhos de conclusão de curso, dissertações, teses e artigos que foram desenvolvidos pela área de “duas rodas” do grupo desde a sua criação.

Este trabalho busca auxiliar a literatura ampliando o conhecimento sobre o comportamento médio dos veículos, em uma via, abordando a via de forma macroscópica e microscópica. A via é estudada através de simulação computacional, a partir de um modelo microscópico que é calibrado a partir de dados reais macroscópicos obtidos a partir da observação da via a partir de vídeos. É construído um diagrama fundamental para a via e encontra-se a quantidade de grupos que representam a via. São gerados ciclos de condução representativos para representar cada um desses grupos dentro de uma margem de erro. Por fim, verifica-se relações entre os parâmetros de condução (e.g., velocidade média) dos ciclos locais obtidos e o diagrama fundamental em diversas condições de densidade da via.

1.1. OBJETIVOS DO TRABALHO

Abaixo, encontram-se os objetivos do presente trabalho:

- Obter um diagrama fundamental que represente as condições da via estudada, a partir de dados de vídeo.
- Propor uma metodologia de calibração para o modelo microscópico de tráfego.
- Determinar a quantidade de ciclos de condução representativos que caracterizem o diagrama fundamental.
- Construir esses ciclos de condução representativos.

1.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Após terminada esta introdução, o segundo capítulo é dedicado à fundamentação teórica do trabalho, onde são revisados os principais aspectos do tráfego macroscópico e microscópico de veículos, os ciclos de condução e os seus métodos de construção. O terceiro capítulo contém o estado da arte, onde são apresentados os principais e mais recentes trabalhos da área. No quarto capítulo é apresentada a metodologia do trabalho, com seções que espelham os objetivos. Os resultados, em conjunto com as discussões, são apresentados no quinto capítulo. No último capítulo são apresentadas as conclusões, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta uma revisão das ideias necessárias para a compreensão do trabalho. Primeiro, apresenta-se a teoria básica de tráfego sobre o fenômeno macroscópico que ocorre na pista. Segundo, apresenta-se uma revisão sobre o tráfego microscópico. Terceiro, apresenta-se os ciclos de condução e os principais métodos utilizados para a sua construção. Por fim, explica-se como as variáveis serão apresentadas ao longo do texto.

2.1 TRÁFEGO MACROSCÓPICO DE VEÍCULOS

O tráfego de veículos em uma via é um sistema complexo, afetado por fatores externos e internos tais como a dinâmica dos veículos, a infraestrutura do sistema e o comportamento do ser humano (TREIBER; KESTING, 2013). Nesta seção serão apresentadas as principais informações da visão macroscópica do tráfego na via. Também é apresentado o conceito do diagrama fundamental, utilizado para representar as métricas em condições estacionárias.

2.1.1 Observação e métricas do tráfego

O comportamento de veículos nas pistas tem sido estudado desde as primeiras décadas do século passado (GREENSHIELDS, 1934; LIGHTHILL; WHITHAM, 1955). Desde então, diversos pesquisadores trabalham para desenvolver modelos e compreender mais sobre esse fenômeno. Com a evolução da tecnologia, há uma quantidade crescente de dados que podem ser obtidos a partir das mais diversas fontes. Diferentes fontes fornecem informações com diferentes perspectivas e de acordo com Kessels (2019), podem ser agrupadas em quatro perspectivas:

- *Perspectiva local*: fixa no espaço (ex.: um sensor ou radar, que fica fixo em uma posição da rodovia);
- *Perspectiva instantânea*: fixa em relação ao tempo (ex.: foto que mostre a informação de diversos veículos);

- *Perspectiva local e instantânea*: Combina as perspectivas anteriores, observando o tráfego em um período e espaço limitados (ex.: uma câmera em um prédio observando a rodovia);
- *Dados de carro flutuante (floating car data)*: verifica o veículo em movimento (ex.: sensor coleta a posição do veículo equipado durante seu percurso).

Caso seja possível obter os dados de velocidade para todos os veículos em uma via em um intervalo de tempo específico, esse conjunto de dados é chamado de dados de trajetória (*trajectory data*). Esses dados podem ser obtidos através da utilização de GPS em todos os veículos que estão na via, ou da obtenção dos dados de localização de celulares monitorados pela Apple ou Google. Mas também podem ser obtidos através de softwares que processam vídeos (como por exemplo a partir de câmeras presentes em pontos altos como torres de transmissão) obtendo a velocidades dos veículos que estão percorrendo a via. Devido à complexidade e alto custo para obtenção dessas informações a partir dos experimentos práticos com veículos equipados, uma alternativa é a obtenção na forma de simulação computacional do tráfego.

Um ponto importante é que os dados obtidos diferem dependendo da perspectiva utilizada. Por exemplo, os dados de carro flutuante fornecem informações apenas do veículo que está equipado com o aparelho GPS. Na perspectiva local, o sensor ou radar estão em um ponto fixo na via e fornecem medições temporais das variáveis; entretanto, a densidade também é uma variável espacial. Isto é, algumas variáveis como a velocidade e a densidade podem ser medidas de *forma espacial* (todos os veículos presentes na via em um instante fixo do tempo) e de *forma temporal* (apenas os veículos que passam em uma localidade fixa na via durante um intervalo de tempo). Utilizar a velocidade temporal pode induzir erros sistemáticos e é necessário tratar os dados obtidos apropriadamente (TREIBER; KESTING, 2013).

A perspectiva local e instantânea obtém informações de vários veículos por um determinado período de tempo e espaço da via, e as informações podem ser agregadas (em médias temporais). Os dados agregados mais relevantes que podem ser obtidos nesta etapa são o fluxo de veículos Q , a velocidade aritmética média V e a densidade de veículos ρ . Essas variáveis são baseadas na relação hidrodinâmica. O fluxo de veículos $Q(x, t)$, equação 1, é representado pelo número de veículos que atravessam a seção transversal x da via em um intervalo de tempo Δt .

$$Q(x, t) = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (1)$$

A densidade $\rho(x, t)$ (equação 2) pode ser encontrada a partir da relação entre fluxo e a velocidade média dos veículos, e a velocidade média dos veículos $V(\Delta x, \Delta t)$ (equação 3) pode ser definida a partir da média da velocidade dos ΔN veículos que atravessam a seção transversal durante o intervalo de tempo estudado.

$$\rho(x, t) = \frac{Q(x, t)}{V(x, t)} \quad (2)$$

$$V(x, t) = \frac{1}{\Delta N} \sum_{n=1}^{n=N} v_n \quad (3)$$

2.1.2 Diagrama fundamental

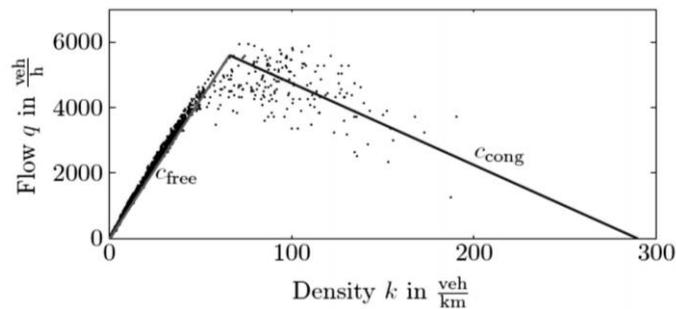
A primeira relação entre a densidade (inversamente proporcional à distância entre os veículos) e a velocidade de veículos em uma via foi encontrada por Greenshields em 1934. A partir de observações, ele propôs uma relação na qual a velocidade dos veículos decrescia linearmente em função do aumento de densidade na pista, e o fluxo apresentava uma forma parabólica em relação à densidade. Essa observação de Greenshields foi chamada posteriormente de diagrama fundamental. O termo diagrama fundamental corresponde a qualquer relação entre duas das três variáveis macroscópicas apresentadas: fluxo, velocidade e densidade (KESSELS, 2019). Obtendo duas das variáveis, a terceira pode ser encontrada pela relação existente entre as mesmas (equação 2).

No presente trabalho, o termo diagrama fundamental será empregado para descrever a relação entre o fluxo e a densidade dos veículos na via. Embora o diagrama fundamental represente o fluxo nas ordenadas em função da densidade nas abscissas, há uma diferença importante entre o diagrama fundamental e um diagrama fluxo-densidade. Treiber e Kesting (2013) indicam que o *diagrama fundamental* é uma relação teórica que descreve o estado estacionário com veículos idênticos. Já o

diagrama fluxo-densidade representa os dados que são obtidos de forma empírica e que estão em estado não-estacionário.

Existem diversas razões pelas quais um diagrama fluxo-densidade não irá coincidir com o diagrama fundamental, tais como: o processo de medições possui erros sistemáticos; o tráfego não está em equilíbrio, e; o tráfego é heterogêneo com unidades motorista-veículo diferentes entre si. Exemplo de um diagrama fluxo-densidade (a nuvem de pontos) está presente na Figura 5, onde é possível ver o diagrama fundamental (duas linhas retas) proposto pelos pesquisadores.

Figura 5 – Exemplo de diagramas fluxo-densidade e fundamental obtido por medições empíricas



Fonte: Daamen et al. (2015)

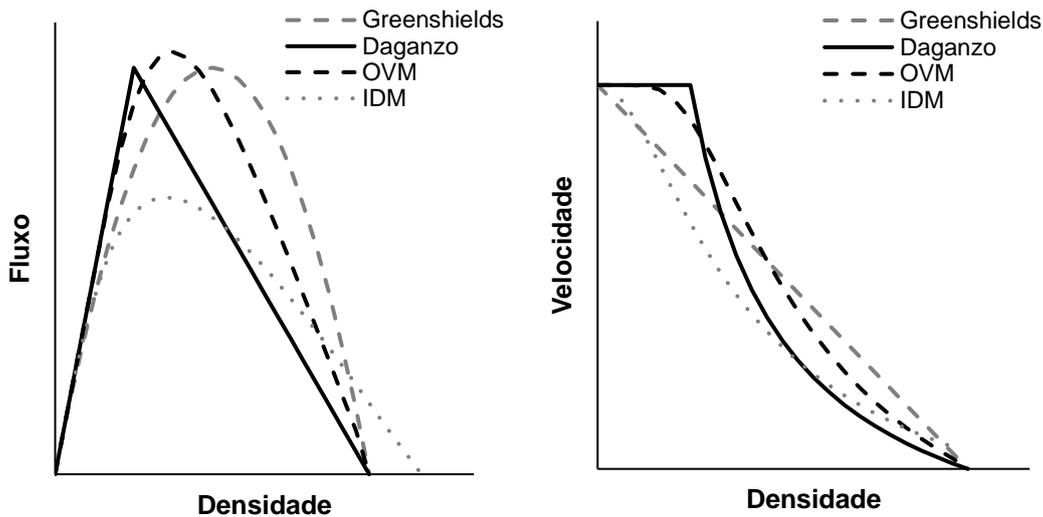
Depois de Greenshields, muitos outros formatos foram propostos para o diagrama fundamental. Um dos modelos mais utilizado atualmente é o bi-linear (ou triangular) e foi proposto por Daganzo em 1994, o qual é bi-linear em relação ao plano de fluxo e densidade. Outros formatos para o diagrama fundamental existentes na literatura são o Modelo da Velocidade Ótima - OVM (BANDO *et al.*, 1995) e o Modelo do Motorista Inteligente - IDM (TREIBER; HENNECKE; HELBING, 2000).

Na Figura 6 são exibidos o formato de alguns diagramas fundamentais, exibindo o fluxo em função da densidade, e a velocidade média em função da densidade na via. Mas para que o mesmo seja considerado um diagrama fundamental, alguns requerimentos são necessários. Kessels (2019) informa que três propriedades são requeridas e três são opcionais para considerar o diagrama como fundamental. Entre os requerimentos necessários:

1. Existe uma velocidade máxima finita que é alcançada à medida que a densidade tende a zero: $V(\rho)_{\lim \rho \rightarrow 0} = v_{max}$

2. Existe uma densidade máxima e nessa densidade a velocidade dos veículos é zero: $V(\rho)_{\lim \rho \rightarrow \text{cong}} = 0$;
3. Quando a densidade aumenta, a velocidade não aumenta. E quando a densidade diminui, a velocidade não diminui: $dV/d\rho \leq 0 \quad \rho \in (0, \rho_{jam}]$.

Figura 6 – Exemplo de diagramas fundamentais



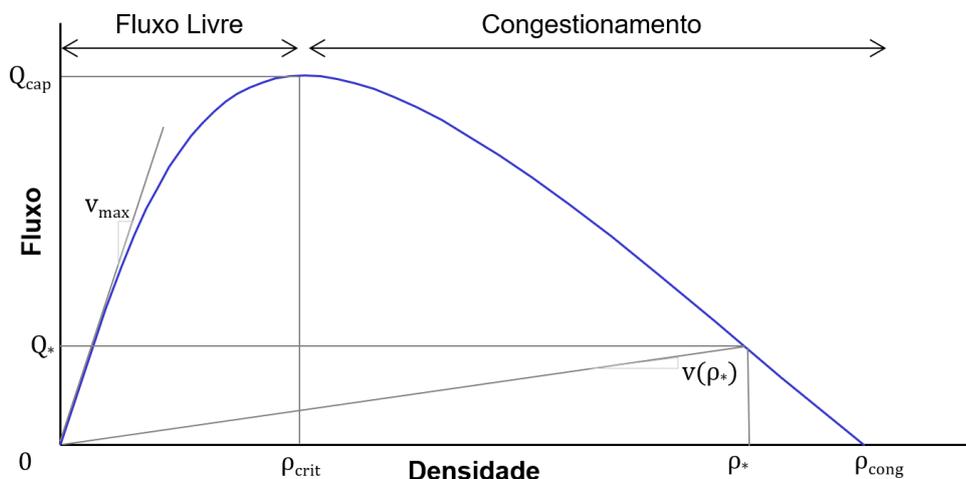
Fonte: O autor (2021)

E os requerimentos opcionais propostos são:

4. A velocidade do diagrama fundamental deve poder ser definida como função única da densidade;
5. O diagrama fundamental deve ser contínuo;
6. O diagrama fundamental deve ser côncavo.

A partir do diagrama fundamental podem ser obtidas algumas definições: o ponto de fluxo máximo no diagrama fundamental é chamado de capacidade da via. Esse ponto indica a velocidade crítica e densidade crítica (ρ_{crit}), separando o diagrama em duas partes (Figura 7): 1) Fluxo livre de veículos: quando a densidade está abaixo da crítica, com fluxo que aumenta com o aumento da densidade, e 2) Fluxo congestionado: com densidade acima da crítica e fluxo que diminui à medida que a densidade decresce (VAN WAGENINGEN-KESSELS *et al.*, 2015).

Figura 7 – Exemplo do diagrama fundamental com suas propriedades



Fonte: Adaptado de Kessels (2019)

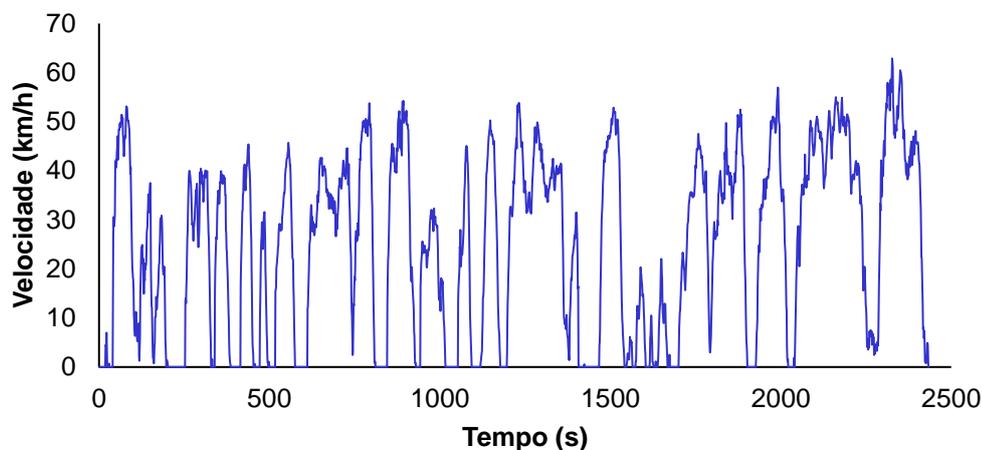
2.2 TRÁFEGO MICROSCÓPICO DE VEÍCULOS

Nesta seção será descrito o comportamento do veículo no tráfego. Inicialmente se explica sobre a relação entre o diagrama fundamental e a velocidade do veículo em diferentes densidades. Depois, o modelo microscópico usado como base é introduzido, o modelo de Gipps. Posteriormente, são apresentadas as forças que atuam sobre o veículo durante seu movimento e a demanda energética veicular. Por fim, é explicado sobre a caracterização paramétrica de uma trajetória.

2.2.1 Dados de carro flutuante

Quando há um GPS equipado no veículo, é possível obter um conjunto de dados de sua posição (e sua velocidade) em função do tempo. Na Figura 8 há o obtido pelo autor deste trabalho quando conduzia um automóvel monitorado a partir do GPS de celular, com frequência de 1Hz, em situação de tráfego livre na cidade do Recife (ANDRADE, 2020).

Figura 8 – Perfil de velocidade para um veículo em teste real



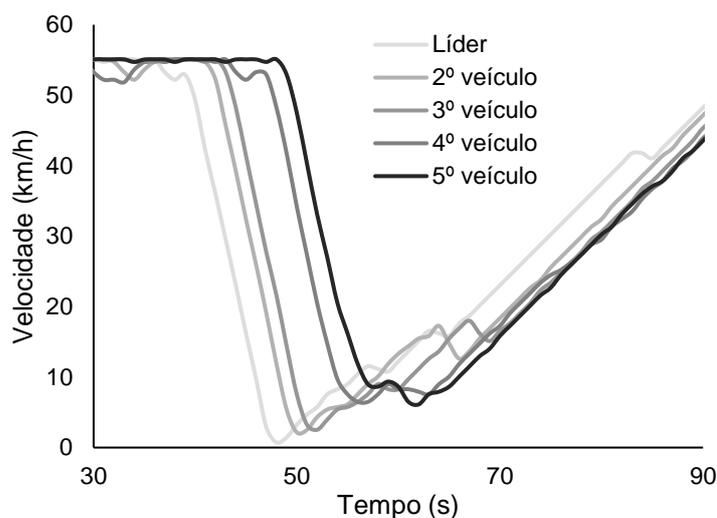
Fonte: O autor (2021)

2.2.2 Velocidade dos veículos e o diagrama fundamental

Na Figura 8 se tem a velocidade de um veículo equipado com um GPS, mas não é possível compreender a partir desse dado qual a condição média da pista (*i.e.*, fluxo médio ou densidade média da via) no momento em que o veículo era monitorado. Em contrapartida, o diagrama fundamental (Figura 7) é responsável por informar as métricas em condições homogêneas, não exibindo o comportamento individual dos veículos (e.g., velocidade e aceleração em função do tempo). Mas as duas condições estão indiretamente relacionadas pelo modelo do tráfego. A Figura 2 presente na introdução exibe como o comportamento microscópico varia em função das condições macroscópicas.

Além disso, na vida real os veículos presentes em uma via não se movem sozinhos, e seu movimento também depende da interação com outros veículos. Um exemplo dessa interação está na Figura 9, onde são exibidas as velocidades de cinco veículos que se movem em pelotão, em uma condição simulada de densidade intermediária de $50 \text{ carros km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$. É possível verificar que a frenagem executada pelo veículo líder influencia diretamente os demais veículos seguidores que estão na mesma faixa de rodagem.

Figura 9 – Velocidade de cinco veículos simulados em função do tempo



Fonte: O autor (2020)

2.2.3 Modelos de tráfego

Para representar o mundo real, primeiro é necessário compreender como o sistema se comporta e se desenvolve em função do tempo a partir de condições lógicas e ou matemáticas, e modelos podem ser utilizados para representar o mundo real (ARASAN; KOSHY, 2005). Os modelos de tráfego podem ser categorizados em várias escalas: escala temporal (contínuo ou discreto), escala da aplicação (via, região, cidade), da escala de detalhe que possuem (microscópico, mesoscópico e macroscópico).

Em relação à escala de detalhe, quando o modelo considera a dinâmica do conjunto motorista-veículo de forma individual, esse modelo é chamado de *microscópico*. Caso represente apenas o comportamento médio dos veículos na via, é chamado de *macroscópico* (HOOGENDOORN; BOVY, 2001; ZEGEYE *et al.*, 2013). Existe outra forma de categorizar o tráfego, com a escala *mesoscópica*, mesclando as anteriores. Uma discussão detalhada sobre as características de cada escala pode ser encontrada em Van Wageningen-Kessels *et al.*, (2015) e Chen e Shi, (2015).

2.2.3.1 Modelos de tráfego microscópicos

Os modelos de tráfego microscópicos são baseados na descrição do movimento individual de cada veículo no tráfego (abordagem *Lagrangeana*), tanto do comportamento espaço-temporal do conjunto motorista-veículo, como das interações que os veículos executam entre si, com alto nível de detalhes (VAN WAGENINGEN-KESSELS *et al.*, 2015). Esse tipo de modelo pode descrever o movimento longitudinal (*car-following*) que indica o movimento do carro seguidor em relação ao carro líder, lateral (*lane-changing*) para verificar o comportamento na decisão de mudança de faixa e na aceitação de brecha (*gap acceptance*) utilizado quando o veículo converge em outras vias e situação de redução do número de faixas (HOOGENDOORN; HOOGENDOORN, 2010).

Os modelos microscópicos *car-following* podem ser divididos em algumas categorias: modelos de distância segura (*safe-distance*), modelos de resposta ao estímulo (*stimulus-response*), modelo de ponto de ação (*action point*). Outra categoria é do modelo autômato celular (*cellular automata*). Mesmo com princípios distintos, todos os modelos são guiados indiretamente pelo princípio da distância mínima de segurança, de forma que colisões são evitadas na simulação.

O primeiro modelo microscópico desenvolvido foi um modelo de distância segura, onde a distância mínima em relação ao veículo à frente é controlada pela velocidade do veículo líder. Pipes (1953) propôs uma regra de segurança que é a manutenção de um carro de distância ao veículo da frente para cada dez milhas/h de velocidade. Outros modelos de distância segura são o de Gipps (1981) e Newell (1961, 2002). Na categoria de modelos de resposta ao estímulo, a resposta do motorista seguidor é baseada no estímulo do veículo analisado em relação ao veículo líder, por exemplo, a variação da velocidade relativa entre eles. Modelos relevantes nesta categoria são o GHR de Gazis, Herman e Rothery (1961), o OVM - Modelo de Velocidade Ótima (BANDO *et al.*, 1995) e o IDM - Modelo do Motorista Inteligente (TREIBER *et al.*, 2000).

Nos modelos de ponto de ação, os motoristas apenas agem após um limiar ser alcançado, considerando os aspectos do comportamento do veículo no tráfego. Nesses modelos, o motorista não é influenciado por nenhum veículo ao seu redor quando está em tráfego livre e é totalmente influenciado pelos veículos ao seu redor em congestionamentos. A categoria dos modelos autômato celulares é a mais recente

dentre as apresentadas. O primeiro modelo foi introduzido por Cremer e Ludwig (1982), mas se tornou conhecido com Nagel e Schreckenberg (1992). Nesses modelos o espaço, tempo e velocidade são discretizados, tornando-os computacionalmente eficientes.

2.2.3.2 Modelo microscópico de Gipps-Santos

Nesse trabalho é utilizado o Modelo de Gipps-Santos, modelo microscópico de distância segura desenvolvido pelo doutorando Maurício Santos (SANTOS, 2022) *tese em andamento*, a partir de sua dissertação de mestrado (SANTOS, 2019) baseado no modelo de Gipps (1981, 1986). O modelo foi adaptado para considerar características da via estudada, com presença de carros e motos, e considera a influência do motor e da dinâmica do veículo (limitando a aceleração máxima baseado nas características físicas do motor e do veículo), algo que o modelo de Gipps não faz.

O modelo microscópico de Gipps é amplamente usado academicamente e também é utilizado nos simuladores comerciais AIMSUM e Dracula (BARCELÓ, 2010). Uma das principais vantagens está em sua simplicidade, que torna possível a aplicação em diversos casos. Foi desenvolvido inicialmente em 1981, onde Gipps propôs a abordagem carro seguidor (*car following*) e em 1986 o modelo foi aprimorado, apresentando o movimento de mudança de faixa (*lane changing*). As duas abordagens são apresentadas a seguir.

- *Movimento carro seguidor de Gipps*

A velocidade do veículo no instante de tempo posterior (Equação 4) é a mínima entre duas velocidades: a velocidade do veículo em tráfego livre (v_{livre}) e a velocidade de segurança do veículo (v_{seg}).

$$v(t + \tau) = \min(v_{livre}, v_{seg}) \quad (4)$$

Velocidade de tráfego livre (v_{livre}): Essa variável tem como objetivo verificar que o veículo não irá ultrapassar a velocidade máxima da via. Além disso, ajusta a aceleração para que seja maior quando a velocidade é baixa e que diminua para zero

à medida que a velocidade do veículo se aproxima da velocidade máxima permitida da via (Equação 5).

$$v_{livre} = v(t) + 2,5a_{max} \tau(1 - v(t)/V_{max}) (0,025 + v(t)/V_{max})^{0,5} \quad (5)$$

Onde:

$v(t)$ = velocidade do veículo no instante t (m/s)

a_{max} = aceleração máxima (m/s²)

τ = tempo de reação (s)

V_{max} = velocidade desejada (m/s)

Velocidade de segurança para não colisão (v_{seg}): A velocidade de segurança considera a distância que o veículo percorrerá até parar considerando sua velocidade atual e a desaceleração máxima do veículo, indicando uma frenagem de emergência para evitar a colisão. Além desses parâmetros, a equação 6 considera que o veículo seguidor estima a desaceleração máxima do veículo líder (b^+) e considera um tempo de reação (τ).

$$v_{seg} = b\tau + \sqrt{\left(b^2\tau^2 - b \left[2[x^+(t) - S - x(t)] - v(t)\tau - \frac{(v^+(t))^2}{b^+}\right]\right)} \quad (6)$$

Onde:

b = desaceleração máxima desejada pelo veículo seguidor (m/s²)

b^+ = desaceleração máxima do veículo líder estimada pelo veículo seguidor (m/s²)

x^+ = posição da parte frontal do veículo líder (m)

x = posição da parte frontal do veículo seguidor (m)

S = comprimento do veículo mais uma distância mínima entre o veículo seguidor e o veículo líder (m)

v^+ = velocidade do veículo líder (m/s)

- *Movimento de mudança de faixa de Gipps*

A decisão de mudar de faixa é o resultado de diversos conflitos que ocorrem, tais como: se é necessário mudar de faixa, se é possível mudar de faixa, e se há vantagem ao motorista após realizar esse procedimento (P.G.GIPPS, 1986). O modelo de mudança de faixa de Gipps pode ser usado em conjunto ao modelo carro

seguidor e aplicado em situações de tráfego real, com a presença de semáforos, obstruções e veículos pesados na via.

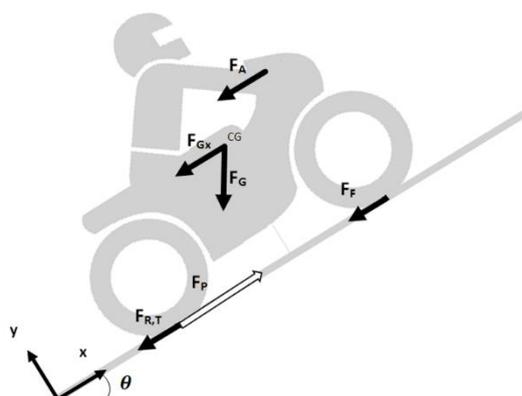
No trabalho do Gipps (1986) há um fluxograma que contém 13 etapas explicando o processo de mudança de faixa detalhadamente. O fluxograma completo contém 15 perguntas e de acordo com o próprio autor, algumas perguntas são objetivas (ex.: o veículo estudado é de transporte público? existe faixa exclusiva para veículos de transporte público?) e outras subjetivas (ex.: o espaço para mudança de faixa é suficiente?) Dessa forma, o modelo deve ser ajustado para representar o cenário estudado. As 13 etapas apresentadas são:

- 1) Escolha da faixa alvo;
- 2) Verificação da viabilidade da mudança de faixas;
- 3) Comportamento do motorista próximo à mudança da faixa;
- 4) Urgência para mudança de faixa;
- 5) Faixas exclusivas e veículos de transporte público;
- 6) Entrada de veículos particulares nas faixas de transporte público;
- 7) Saída de veículos particulares das faixas de transporte público;
- 8) Comportamento do motorista em média distância;
- 9) Vantagens relativas da faixa atual e da faixa alvo;
- 10) Presença de veículos pesados;
- 11) Efeito dos veículos próximos;
- 12) Critérios de segurança; e
- 13) Mudança para a faixa alvo.

2.2.4 Análise dinâmica e energética dos veículos

Essa subseção tem como objetivo descrever o balanço de forças sobre o qual o veículo está submetido, com intuito final de avaliar a demanda energética veicular. A Figura 10 ilustra como as forças atuam sobre o veículo durante seu movimento. Nesse trabalho, o veículo é considerado como um ponto material, sendo todas as forças atuantes aplicadas no mesmo ponto.

Figura 10 – Balanço de forças que atuam no veículo



Fonte: Adaptado de CUNHA (2016)

Para obtenção da força resultante (F_{res}) é necessário somar todas as forças envolvidas. A força resultante no veículo é composta pela força de propulsão (F_P) e pelas forças resistivas (F_C). As forças resistivas são compostas pelas forças que atuam, em geral, no sentido contrário ao movimento do veículo: força de frenagem (F_F), resistência aerodinâmica (F_A), resistência à rolagem (F_R) e resistência gravitacional (F_G). A equação 7 contém os termos envolvidos em sua forma simplificada.

$$F_{res} = F_P + F_C = F_P + F_F + F_A + F_R + F_G \quad (7)$$

Onde:

- F_{res} : Força resultante
- F_C : Força resistiva
- F_P : Força de propulsão
- F_F : Força de frenagem
- F_A : Força de resistência aerodinâmica
- F_R : Força de resistência à rolagem
- F_G : Força de resistência gravitacional devido à inclinação θ

Força de propulsão

A força de propulsão F_P (Equação 8) é função da potência máxima possível do motor na rotação de análise (P), a eficiência do sistema de transmissão (η_{trans}), o percentual de potência necessário do veículo (α) entre 0 e 1, onde 0 é a situação sem potência e 1 com demanda total de potência, e a velocidade do veículo (V).

$$F_P = \alpha \frac{\eta_{trans} P}{V} \quad (8)$$

Força de frenagem

A força de frenagem F_F (Equação 9) considera o peso do veículo (mg), a inclinação da via (θ), o coeficiente de atrito entre o pneu e a via (μ_{RD}) e um percentual de frenagem (β) aplicado pelo condutor, entre 0 e 1.

$$F_F = \beta \mu_{RD} mg \cos\theta \quad (9)$$

Força de resistência à rolagem

A resistência à rolagem (F_R) ocorre principalmente pela deformação do pneu e/ou do piso, e determinada pela equação 10:

$$F_R = C_R mg \cos\theta \quad (10)$$

Resistência aerodinâmica

A força de arrasto aerodinâmico é função da área frontal do automóvel (A). Durante o movimento a corrente de ar pode atuar em três direções do veículo: longitudinal, lateral e verticalmente. Apenas a direção longitudinal (vento frontal) é considerada neste trabalho. A força de arrasto (F_A) equação 11 é função do coeficiente de arrasto (C_d), da densidade do ar (ρ), da área frontal do veículo (A), de sua velocidade (V) e da velocidade do vento (W).

$$F_A = \frac{1}{2} \rho C_d A (V - W)^2 \quad (11)$$

Força gravitacional

A força resistiva que atua nas superfícies que apresentam inclinações, (F_G) sendo o componente do peso do veículo que age na direção da inclinação. Partindo da equação de forças, temos que para uma inclinação (θ), a força é dada na equação 12.

$$F_G = mg \sin\theta \quad (12)$$

Dessa forma, a força atuante sobre o veículo pode ser dada pela equação 13, em termos diferenciais.

$$m \frac{dV}{dt} = \alpha \frac{\eta_{trans} P}{V} - \beta \mu_{RD} mg \cos\theta - K_A (V - W)^2 - C_R mg \cos\theta - mg \sin\theta \quad (13)$$

2.2.4.1 Demanda energética veicular

Para que o veículo realize o movimento desejado, sendo ele de aceleração ou de manutenção da velocidade, é necessário que a potência que a roda recebe seja suficiente para vencer o somatório das resistências que encontra: rolagem, aerodinâmica, gravitacional e inercial (ANDRADE, 2020; ANDRADE *et al.*, 2021). A partir da equação 13 considerando simplificações como alguns parâmetros constantes, podemos expressar a potência desejada nas rodas ou demanda energética veicular instantânea (DEV_i), exposta na equação 14.

$$DEV_i = P_{des} = (ma_i + F_C) V_i = (ma_i + f_0 + f_2 V_i^2) V_i \quad (14)$$

Os termos f_0 em N e f_2 em $N/(km.h^{-1})^2$ são empregados baseados na nomenclatura presente na ABNT NBR 10312 a qual aproxima a equação da demanda energética para uma parábola em função da velocidade. Os termos f_0 e f_2 são levantados de forma experimental, através de um procedimento chamado de teste de resistência ao deslocamento (ou teste de *Coast Down*) (ANDRADE, 2020). A demanda energética veicular (DEV) obtida de forma integral é apresentada na equação 15, que utiliza a energia devido à inercia (E_{ine}), energia devido a rolagem (E_{rol}), energia devido ao arrasto aerodinâmico (E_{aer}) e distância percorrida pelo veículo (d) considerando os incrementos (i) entre tempo inicial (t_0) e final (t_f).

$$\begin{aligned}
 DEV &= \frac{E_{ine} + E_{rol} + E_{aer}}{d} = \\
 &= \frac{\sum_{i=t_0}^{i=t_f} m \left(\frac{V_i - V_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) (x_i - x_{i-1}) + \sum_{i=t_0}^{i=t_f} f_0 (x_i - x_{i-1}) + \sum_{i=t_0}^{i=t_f} f_2 V_i^2 (x_i - x_{i-1})}{\sum_{i=t_0}^{i=t_f} x_i} \quad (15)
 \end{aligned}$$

2.2.5 Parâmetros característicos

Até agora, foi explicado sobre a velocidade do veículo e a relação com o diagrama fundamental, além de análises das forças e energia existentes no processo. Agora será analisado como comparar os diferentes perfis de velocidade dos veículos ao longo do tempo: a partir da caracterização de seus parâmetros característicos ou cinemáticos (PCs). Esses PCs são resultantes da combinação de dados de velocidade e do tempo (e.g.: velocidade média, aceleração positiva média, percentual de tempo em velocidade de cruzeiro) (HUERTAS *et al.*, 2019). Os PCs utilizados nesse trabalho são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Definição dos parâmetros característicos

Parâmetros	Símbolo	Definição
Distância de viagem	L (m)	Distância total viajada em um ciclo
Duração do ciclo	t (s)	Tempo do ciclo de condução
Velocidade média	V (km/h)	Velocidade média incluindo o período em neutro
Velocidade média corrida	V _c (km/h)	Velocidade média excluindo o período em neutro
Aceleração média	a (m/s ²)	Aceleração média acima de 0 m/s ²
Desaceleração média	d (m/s ²)	Aceleração média abaixo de 0 m/s ²
Percentual do tempo em repouso	TR (%)	Proporção de tempo onde V(t) = 0 m/s e a(t) = 0 m/s ²
Percentual do tempo em aceleração	TA (%)	Proporção de tempo onde a(t) > 0 m/s ²
Percentual do tempo em cruzeiro	TC (%)	Proporção de tempo onde V(t) > 0 m/s e a(t) = 0 m/s ²
Percentual do tempo desacelerando	TD (%)	Proporção de tempo onde a(t) < 0 m/s ²

Fonte: Andrade *et al.*, (2021).

Na Tabela 1, o critério de cada parâmetro varia de acordo com o pesquisador. Por exemplo, algum pesquisador pode considerar que o veículo está em movimento apenas quando sua velocidade está acima de 1 m/s, enquanto outro considera quando está imediatamente acima de 0 m/s. Outro pesquisador pode calcular a aceleração média considerando-a apenas quando acima de 0,1 m/s². Portanto, é importante definir a forma de cálculo dos parâmetros e compreender quais autores utilizam parâmetros diferentes no momento da comparação dos resultados (ANDRADE *et al.*, 2020; ARUN *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2008).

2.3 CICLOS DE CONDUÇÃO

Nesta subseção serão apresentados a definição do ciclo de condução, quando ele é considerado um ciclo de condução padrão ou um ciclo de condução local. Se comenta sobre a diferença entre os ciclos de condução e um perfil de velocidade qualquer obtido em um teste de rua. Por fim, será explicado o processo de caracterização dos ciclos.

2.3.1 Ciclo de condução padrão

Um ciclo de condução é definido como uma sequência de pontos de velocidade que pode ser reproduzida por um veículo em um teste em uma via ou em um dinamômetro de chassi. Quando essa sequência de pontos é definida e utilizada para avaliação da eficiência, emissão e/ou do consumo de combustível para propósitos oficiais ou de legislação, é chamado de ciclo de condução padrão - CCP (em inglês, *type-approval driving cycle*) (HUERTAS *et al.*, 2019).

Os CCPs são importantes porque são usados em todo mundo para calcular de forma padronizada o consumo de combustível e estimar a emissão veicular em veículos com sistema de propulsão de combustão interna (MA *et al.*, 2019; WANG *et al.*, 2019). Os CCPs também são usados no desenvolvimento dos veículos elétricos e híbridos devido ao estudo do gerenciamento da energia da bateria (MAYAKUNTLA; VERMA, 2018; WANG *et al.*, 2008). A utilização do mesmo ciclo possibilita a comparação de diferentes veículos e motores que são expostos à mesma operação (GIAKOUMIS, 2016).

No Brasil, o consumo e a emissão dos veículos são testados sob as normas ABNT NBR 6601 e NBR 7024. A primeira contém o procedimento para registrar a emissão de gases (hidrocarbonetos, CO, CO₂, NO_x, e material particulado) enquanto a segunda é responsável por aferir o consumo de combustível do veículo. Ambas as normas utilizam o mesmo ciclo de condução padrão, baseado no ciclo americano FTP-75 (*Federal Test Procedure*), apresentado na 0.

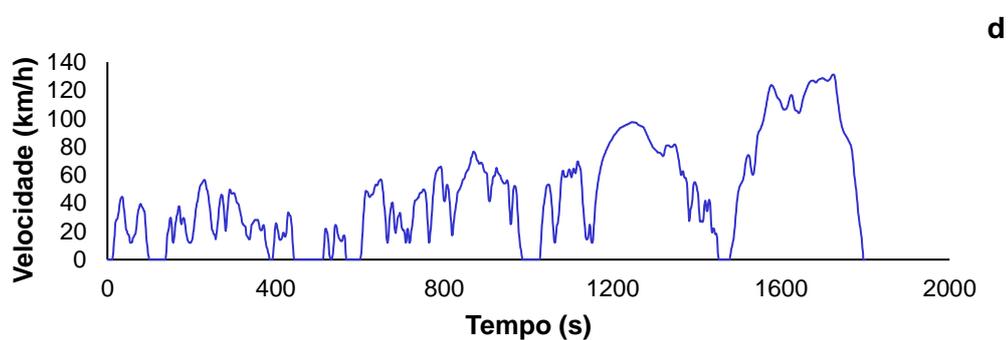
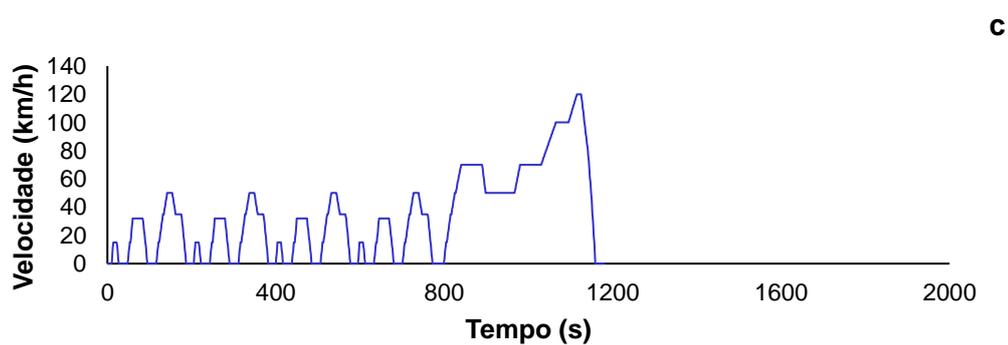
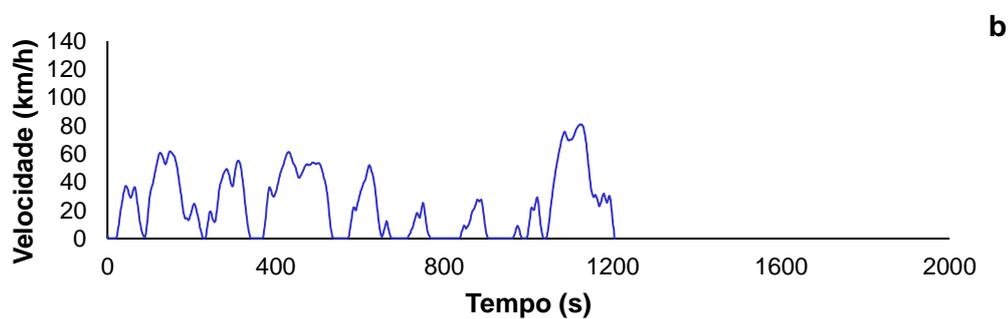
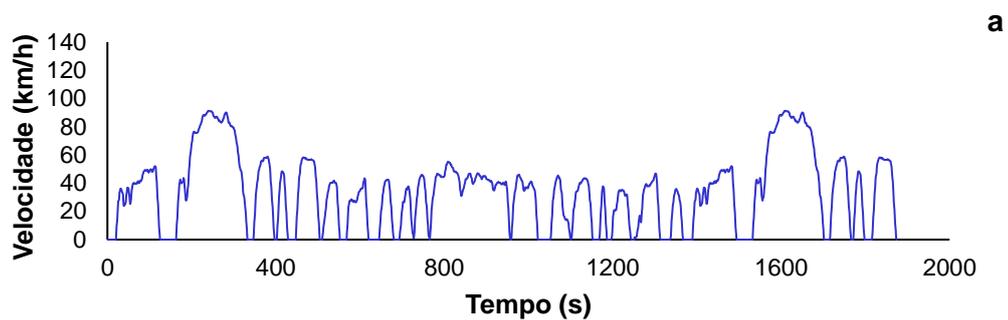
Mais três CCPs também podem ser vistos na Figura 11. O JC08 é utilizado no Japão e nesse ciclo o veículo é submetido ao mesmo perfil de velocidade duas vezes, sendo a primeira vez em partida a frio, e a segunda considerando a temperatura do

motor estabilizada. A temperatura do motor é relevante nas análises porque afeta as emissões. O NEDC (*New European Driving Cycle*) é um ciclo estacionário composto por quatro segmentos que representam situação urbana e um segmento final com velocidade maior para simular situação de estrada. O NEDC foi utilizado pela União Europeia para certificação de veículos automotivos leves entre a década de 90 e o final da década passada. O WLTC (*Worldwide Cycle for Light-duty Vehicles*) é o mais moderno entre os ciclos exibidos e foi produzido pela Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa e substituiu o NEDC desde janeiro de 2019. O ciclo presente na Figura 11 é o da classe 3 do WLTC, que engloba os carros de passeio vendidos no Brasil.

No Brasil, apenas um ciclo de condução é utilizado para testar todos os veículos. Esse tipo de abordagem é considerada como uma das responsáveis por colaborar com a discrepância dos testes com a realidade, pois as fabricantes focam que os veículos tenham aprovação nos testes de consumo e emissão, negligenciando as demais situações (GIAKOUMIS, 2016).

Nos Estados Unidos, onde a diferença entre o obtido nos testes reais e a medição de laboratório é uma das menores do mundo, é utilizado um método composto por cinco ciclos da EPA (*Environmental Protection Agency*). São utilizados o FTP-75 e HWFET que medem os valores de economia para situações de ciclo urbano e estrada, respectivamente, aliados a Procedimentos Suplementares de Testes Federais (SFTP, em inglês: *Supplemental Federal Test Procedure*) com medições em situações de alta velocidade (US06) e quando o ar condicionado está ligado (SC03). O FTP-75 é realizado duas vezes, sendo um em temperatura fria (–6°C) e outro em temperatura ambiente (ANDRADE, 2020; EPA, 2021).

Figura 11 – Principais ciclos de condução padrão ao redor do mundo



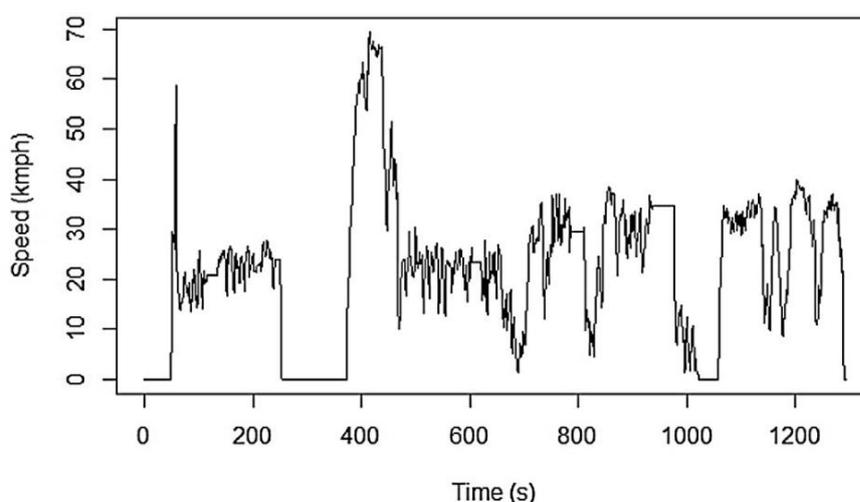
a) FTP - 75 e NBR 6601; **b)** JC08 = Ciclo Japonês; **c)** NEDC = New European Driving Cycle; **d)** WLTC = Worldwide Harmonized Light Vehicle Cycle
 Fonte: Baseado em Kuhlwein, German e Bandivadekar (2014)

2.3.2 Ciclo de condução local

Os CCPs apresentados no parágrafo anterior são desenvolvidos considerando características de tráfego do local onde são criados: EUA para o FTP-75, Europa para o NEDC e WLTC e Japão para o JC08 (AMIRJAMSHIDI; ROORDA, 2015; MA *et al.*, 2019). Mas quando se estuda o tráfego de outra localidade, é necessário considerar fatores como a topografia, perfil da frota (*e.g.*, motocicleta, carro, caminhão), perfil do motorista (*e.g.*, se são agressivos), horário do dia (pico ou fora de pico) para que a localidade estudada seja bem representada. Quando comparado aos países de primeiro mundo, o Brasil tem características distintas, como proporção de automóveis e motocicletas por habitante, o perfil de veículo utilizado (automóveis mais leves e menos potentes do que EUA e Europa), entre outros (MAGNANI *et al.*, 2021).

Para minimizar as diferenças entre os resultados obtidos em tráfego real e quando utilizando CCPs, diversos trabalhos focam na criação de um ciclo de condução local (CCL) que gera um perfil de velocidade que considera fatores importantes na área estudada. Esses estudos são realizados principalmente na Índia e China, mas existem CCLs desenvolvidos em todo o mundo. Mais informações podem ser encontradas em um artigo publicado pelo LOST que compara 40 CCLs ao redor do mundo (ANDRADE *et al.*, 2020). Na Figura 12 está um CCL que representa os automóveis na cidade de Chennai, na Índia.

Figura 12 – Ciclo de condução local criado para carros em horário fora de pico na cidade de Chennai, Índia



Fonte: Arun *et al.* (2017) – Licença 5113170648537 (Elsevier)

2.3.3 Parâmetros característicos de um vetor de velocidade

A Tabela 2 exibe alguns parâmetros cinemáticos (PCs) dos CCPs descritos nesse trabalho: FTP-75, NEDC, WLTP e JC08. Através dos valores dos PCs da Tabela 2 pode-se compreender mais detalhes dos ciclos. O NEDC é um ciclo que possui maior parte do tempo em cruzeiro (40%) quando comparado aos demais, e tem a maior aceleração positiva média. Em contraste a ele, o WLTC é mais dinâmico, com maior velocidade máxima, velocidade média e duração. O JC08 possui pouco tempo em cruzeiro (apenas 2%), aceleração média e desaceleração média e velocidade média menores. O FTP-75 é um ciclo baseado em uma trajetória real e possui valores médios em seus parâmetros quando comparado aos demais. Também é possível verificar a demanda energética veicular (DEV), que mostra que o WLTC é o ciclo que mais demanda energia, enquanto o NEDC e FTP-75 apresentam consumo semelhante, e o ciclo japonês é o menos exigente do ponto de vista energético.

Tabela 2 – Valores dos parâmetros cinemáticos para os principais ciclos de condução

Parâmetro		FTP-75 (média)	NEDC	JC08	WLTC
Duração	s	1369	1180	1204	1800
Distância	km	11,99	11,03	8,17	23,27
Velocidade média	km/h	31,5	33,6	24,4	46,5
Velocidade máxima	km/h	91,2	120,0	81,6	131,3
Paradas		18	14	12	9
Tempo parado	s (%)	241(18%)	280(24%)	346(29%)	226(12%)
Tempo em cruzeiro	s (%)	109(08%)	475(40%)	21 (2%)	66 (4%)
Tempo acelerando	s (%)	544(39%)	247(21%)	432(36%)	789(44%)
Tempo desacelerando	s (%)	475(35%)	178(15%)	405(33%)	719(40%)
Aceleração média positiva	m/s ²	0,50	0,59	0,42	0,41
Desaceleração média	m/s ²	-0,58	-0,82	-0,45	-0,45
Desaceleração mínima	m/s ²	-1,48	-1,39	-1,19	-1,50
DEV	MJ/km	0,35	0,37	0,29	0,45

Fonte: O autor (2021)

A comparação entre PCs pode ser realizada entre quaisquer dados, sejam obtidos de um vetor de velocidade, de CCPs, de CCLs ou dos dados reais obtidos para um veículo monitorado (*floating car data*). A Tabela 3 exibe os PCs para o CCP utilizado no Brasil para situações urbanas (FTP-75), e três CCLs: Fortaleza – CE (Azevedo et al, 2017) , Chennai na Índia (Arun et al, 2017) e para carros em horários fora de pico em Recife (Andrade et al, 2021).

Na Tabela 3 é possível verificar que a velocidade média para os CCLs de Recife e Fortaleza são próximas e a aceleração média de Recife foi próxima do FTP-75. No CCL apresentado da cidade de Chennai, na Índia, a velocidade média é inferior às demais cidades, porém a aceleração é semelhante a Recife e ao FTP-75. O FTP-75 é o ciclo com maior velocidade média quando comparado aos demais ciclos, o que sugere uma divergência na comparação da velocidade média dos veículos nos EUA com outros países. Em termo da DEV, os ciclos de Recife (em horário fora de pico), Fortaleza e FTP-75 apresentaram consumo semelhante, maior do que o obtido para a cidade indiana.

Tabela 3 – Parâmetros cinemáticos para o ciclo FTP-75, Fortaleza (Azevedo *et al*, 2017), Chennai - Índia (Arun *et al*, 2017) e Recife (Andrade *et al*, 2021)

Parâmetro		FTP-75 (média)	Fortaleza Brasil	Chennai Índia	Recife Brasil
Duração	s	1369	1216	1065	1820
Distância	km	11,99	8,4	5,23	11,4
Velocidade média	km/h	31,5	23,8	17,7	22,6
Velocidade máxima	km/h	91,2	76,0	50,4	NI*
Paradas		18	9	9	15
Tempo parado (percentual)	s	241(18%)	523(43%)	NI*	437(24%)
Tempo em cruzeiro (percentual)	s	109(08%)	0(0%)	NI*	91(5%)
Tempo acelerando (percentual)	s	544(39%)	365(30%)	NI*	692(38%)
Tempo desacelerando (perc.)	s	475(35%)	328(27%)	NI*	600(33%)
Aceleração média positiva	m/s ²	0,50	NI*	0,49	0,48
Desaceleração média	m/s ²	-0,58	NI*	-0,71	-0,43
Desaceleração mínima	m/s ²	-1,48	-5,6	NI*	-2,98
DEV	MJ/km	0,35	0,35	0,25	0,33

* - Não informada

Fonte: O autor (2021).

2.4 CONSTRUÇÃO DE UM CICLO DE CONDUÇÃO: CADEIA DE MARKOV E MÉTODO DE MONTE CARLO

O processo de construção de um ciclo de condução é dividido em três etapas: seleção de locais e horários, coleta de dados e a construção do ciclo propriamente dita (ARUN *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2019; ZHAO *et al.*, 2020).

Seleção de locais e horários

A etapa de seleção de locais envolve a escolha de uma rota representativa que considere locais e horários do dia nos quais um cidadão costuma trafegar (ARUN *et*

al., 2017). Critérios como inclinação média na via, a classificação da via, fluxo médio de veículos, ocorrência de congestionamento e aumento do tráfego em horário de pico devem considerados para a escolha do local de testes (YANG *et al.*, 2019).

Coleta de dados

A coleta dos dados pode ser feita *on-board* ou por um método à distância como câmeras e sensores. O método de medição *on-board* obtém as condições do veículo com alta precisão; porém é mais caro e só é possível de obter as informações do veículo equipado. Através de câmeras e sensores é possível verificar o comportamento de vários veículos; porém a desvantagem é que a região monitorada é pequena e a precisão nos dados é menor. A frequência de coleta de dados de 1 Hz é aceitável e bastante utilizada (ARUN *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2019).

Construção do ciclo de condução

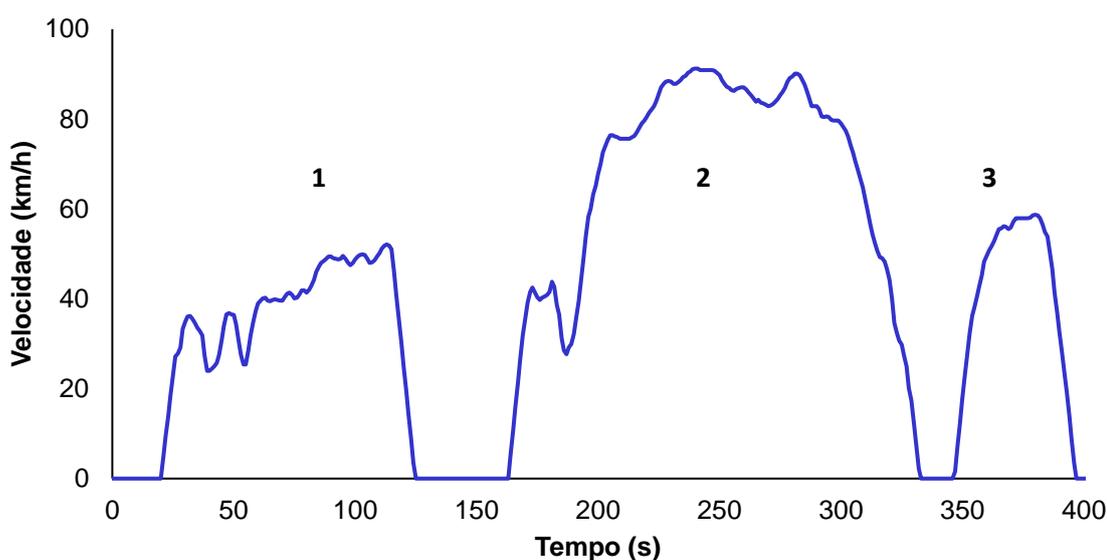
A literatura apresenta diversos métodos para construção dos ciclos de direção. Os dois mais utilizados são: o método de micro-viagens (em inglês, *micro-trips*) e da combinação do método da cadeia de Markov com o método Monte Carlo (CMMC). Ambos os métodos são estocásticos e produzem um ciclo diferente cada vez que o processo é executado (HUERTAS *et al.*, 2019). A seguir, ambos os métodos serão apresentados com mais detalhes.

2.4.1 Construção com o método de micro-viagem

A micro-viagem é definida como o perfil da velocidade que está em um intervalo de tempo no qual o veículo está em movimento e possui como características: começam e terminam com velocidade zero e o tempo parado é incluído no final da micro-viagem, podendo ter quaisquer quantidades de aceleração e desaceleração. A Figura 13 mostra as três primeiras micro-viagens do ciclo FTP-75. A construção de um ciclo de condução nesse método é realizada a partir da combinação e permutação de diversos segmentos de micro-viagens, obtidos a partir de dados reais ou simulados (ANDRADE *et al.*, 2021; MAYAKUNTLA; VERMA, 2018).

O primeiro ciclo de condução padrão importante que usou o método de Micro-trip foi desenvolvido pelo em 1992, o LA-92, e vários ciclos foram desenvolvidos desde então. Uma das vantagens desse método é a preservação e utilização de dados reais indicando uma trajetória que já foi obtida e é possível de ser replicada. Esse método deve ser usado com precaução em casos de rodovia pois o veículo pode viajar por horas sem a necessidade de parar (SANTOS *et al.*, 2020a).

Figura 13 – Início do ciclo FTP 75 com as três primeiras micro-viagens



Fonte: O autor (2021).

2.4.2 Construção com o método de Cadeia de Markov e Monte Carlo

O método da cadeia de Markov com Monte Carlo (CMMC) é um método estocástico utilizado para gerar resultados que representam estatisticamente o conjunto inicial de dados e é utilizado em várias áreas da estatística, econometria, física e ciência da computação (ANDRIEU *et al.*, 2003; GIAKOUKIS, 2016). A Cadeia de Markov é uma teoria matemática que modela um processo aleatório que possui uma propriedade específica: o que acontece no estado de tempo posterior depende inteiramente da condição do estado anterior (WANG *et al.*, 2019). A construção de ciclos de condução utilizando a cadeia de Markov ocorreu pela primeira vez na tese de doutorado da Jie Lin, em 2002, no qual os padrões de direção (aceleração, repouso) foram definidos como estados no processo de Markov (LIN; NIEMEIER, 2003). Poucos trabalhos usaram esse método até Gong *et al.* (2011) comunicarem

que conseguiram ótimo ajuste nos dados quando consideraram o padrão de velocidade e aceleração na análise.

Sabendo como a velocidade se comporta em função do tempo, é possível criar uma matriz que armazena a quantidade de transições do tempo $t-1$ para o tempo t . Essa matriz recebe o nome de Matriz de Transição de Probabilidade (MTP). A partir da MTP, o método Monte Carlo é usado. Nesse método são gerados valores aleatórios a cada instante de tempo sem relação com o momento anterior (YANG *et al.*, 2018). O estado posterior de velocidade é escolhido a partir da comparação da probabilidade presente na MTP e do valor aleatório sorteado. O estado posterior selecionado torna-se o atual e a operação é repetida sucessivamente até que as condições para a construção do ciclo sejam alcançadas ou que o ciclo seja descartado. Esse método assume que a probabilidade mais alta na matriz é aquela com maior oportunidade de ser selecionada (ARUN *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2019).

2.4.2.1 Cadeia de Markov

A cadeia de Markov é um processo aleatório, definido em um estado de espaço, onde a probabilidade condicional ocorre: Seja $\{X_k\}$ um processo estocástico discreto no tempo $k > 0$ em um espaço $S = \{s_1, s_2, \dots, s_r\}$ com $j = 1, 2, \dots, r$. Por exemplo, $s_k = (V_k, a_k)$ é um estado que compreende velocidade e aceleração no tempo k . Se $P\{(X_{k+1} \in s_j) | X_0, X_1, \dots, X_k\} = P\{(X_{k+1} \in s_j) | X_k\}$, então $\{X_k\}$ é dito como um processo estocástico discreto no tempo de Markov (HEREIJGERS *et al.*, 2017; NYBERG; FRISK; NIELSEN, 2015).

A probabilidade P de que o sistema passe do estado atual $s_i \in S$ para um novo estado $s_j \in S$, denominado como P_{ij} é $P_{ij} = P(X_{k+1} \in s_j | X_k = s_i)$. Essa probabilidade de transição de estados independe dos demais instantes de tempo, e dessa forma é possível dizer que a cadeia de Markov é um processo estocástico desmemoriado, onde os resultados da tentativa atual dependem apenas do resultado da tentativa anterior, sendo essa condição conhecida como propriedade de Markov.

A cadeia de Markov pode ter n dimensões. Em uma cadeia de Markov bidimensional, todas as probabilidades de transições P_{ij} de um estado s_i em um tempo t_k para um novo estado s_j em um tempo t_{k+1} e podem ser capturados em uma Matriz de Transição de Probabilidades (MTP) onde a seguinte propriedade ocorre:

$$\sum_j p_{ij} = \sum_j p(X_{k+1} = s_j | X_k = s_i) = 1 \quad (16)$$

Neste cenário, a MTP é uma matriz bidimensional $F \in \mathbb{R}^{M \times N}$ com m linhas e n colunas (Equação 17), representando o número de classes das variáveis estudadas. Cada elemento dessa matriz consiste de uma célula, e cada uma dessa célula consiste da probabilidade de ir de um estado atual s_i em um tempo t_k para o próximo estado de tempo s_j em um tempo t_{k+1} .

$$F = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (17)$$

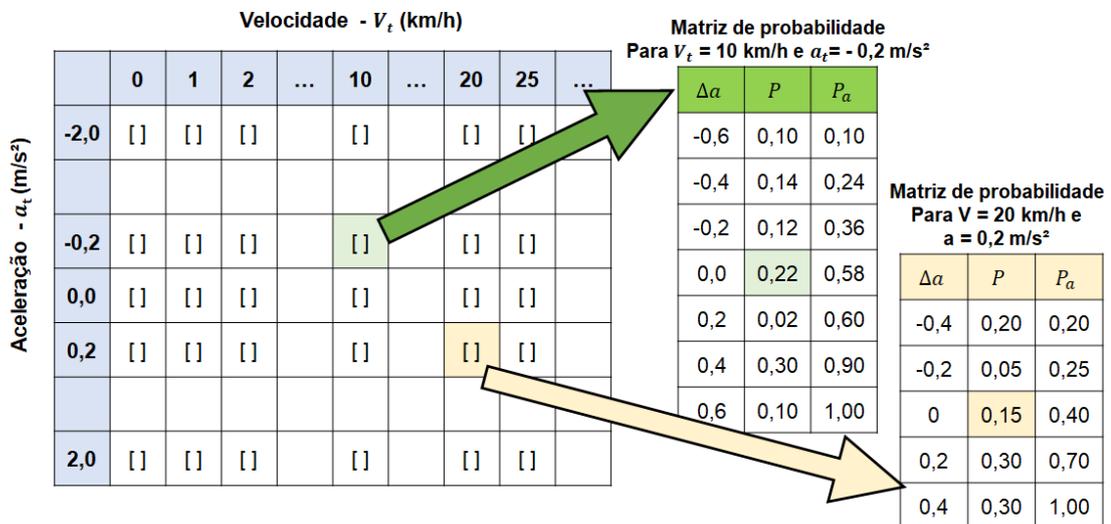
Os dados devem ser processados antes de serem utilizados, como por exemplo separando-os em intervalos de segmento fixo a . Dessa forma, serão gerado um número M de classes a partir do valor máximo e mínimo do dado processado. Tomando como exemplo o vetor de velocidades $v(t) = [v_1, v_2, \dots, v_n]$, cada dado pode ser descrita em uma classe C^i , onde i refere-se à posição da classe em função de um valor a , $C^1 = [0, a]$, $C^2 = [a, 2a], \dots, C^n = [(n-1)a, na]$ e assim por diante. Todas as velocidades do vetor proposto então farão parte de alguma classe. Da mesma forma ocorrerá para aceleração (TAZELAAR *et al.*, 2009).

As MTPs seguem duas propriedades das matrizes estocásticas: 1) Todos os elementos da matriz são maiores ou iguais a zero; e 2) a soma dos elementos em cada linha é igual a 1 (MAGELA, 2015). Para cada estado atual s_i , isto é, da MTP F , é possível obter a soma acumulada de probabilidades para ir ao próximo estado s_j , que resulta em uma distribuição entre 0 e 1 para cada estado atual s_i . A probabilidade somada para cada estado atual s_j é salva em uma matriz $T \in \mathbb{R}^{M \times N}$ (Equação 18). Considere que as variáveis analisadas são α e β , que poderiam ser a velocidade, aceleração, inclinação da via, da demanda energética, entre outras (HEREIJGERS *et al.*, 2017; NYBERG; FRISK; NIELSEN, 2015).

$$T_{C_i^\alpha, C_i^\beta}(C_j^\alpha, C_j^\beta) = \sum_{C_i^\alpha, C_i^\beta} T_{C_i^\alpha, C_i^\beta}(C_j^\alpha, C_j^\beta) \quad (18)$$

A Figura 14 ilustra uma MTP hipotética. As duas classes avaliadas são a velocidade e a aceleração, que possuem incrementos $\Delta V = 1 \text{ km/h}$ e $\Delta a = 0,2 \text{ m/s}^2$. Caso o veículo tenha desacelerado dentro do intervalo da classe ($a = -0,2 \text{ m/s}^2$) e esteja na classe ($V = 10 \text{ km/h}$, *i.e.*, $10 \leq V < 11$), ele terá uma possibilidade (P) de não acelerar ($a = 0,0 \text{ m/s}^2$) de 22 % no próximo instante de tempo. Caso o mesmo veículo estivesse no estado ($a = 0,2 \text{ m/s}^2$ e $V = 20 \text{ km/h}$) a probabilidade (P) de manter a velocidade é de 15%.

Figura 14 - Exemplo de MTP onde cada elemento contém a probabilidade de passar de um estado específico a outro



Fonte: Baseado de Nyberg et al., (2015)

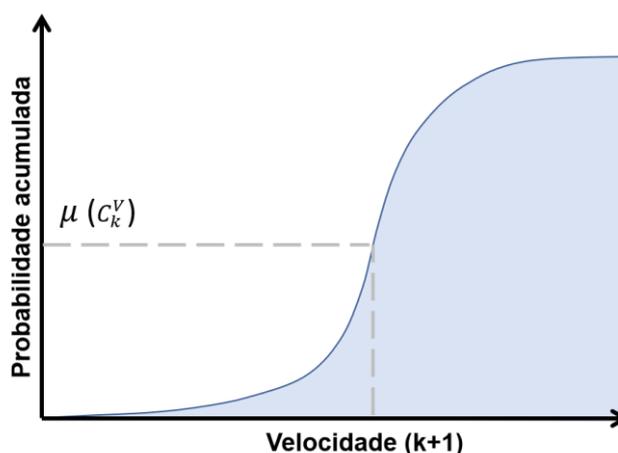
2.4.2.2 Método de Monte Carlo

Nesse método, um valor aleatório $\mu \in [0,1]$ é gerado. O primeiro índice na linha correspondente a $T_{C_i^\alpha, C_i^\beta}$ para o qual a condição $\mu \leq T_{C_i^\alpha, C_i^\beta}(z^\alpha, z^\beta)$ ocorre, é o índice selecionado. Nesta condição, C_i^α e C_i^β representam as classes das variáveis estudadas no tempo atual t_k e o parâmetro z representa o índice da amostra que será selecionada. Após isso, os índices das classes correspondentes C_j^α e C_j^β são utilizados no próximo instante de tempo, e o ponto posterior será obtido a partir deles.

Avaliando novamente a Figura 14 o estado $a = -0,2 \text{ m/s}^2$ e $V = 10 \text{ km/h}$. Caso o valor aleatório gerado seja $\mu = 0,20$, o próximo estado selecionado será $\Delta a = -0,4$

m/s², pois o valor fica na região da coluna de probabilidade acumulada ($0,10 < P_a < 0,24$). Para que o veículo pudesse acelerar o máximo disponível na tabela ($\Delta a = 0,6$ m/s²), o valor sorteado deverá ser $\mu > 0,90$. A Figura 15 ilustra o processo de seleção de uma nova velocidade para o tempo $k + 1$, baseando-se que a curva exibida já possui seu o parâmetro anterior definido para a velocidade (C_k^V).

Figura 15 – Exemplo da curva de função de probabilidade acumulada



Fonte: O autor (2021)

2.5 SIMBOLOGIA DAS VARIÁVEIS

As variáveis principais no diagrama fundamental são o fluxo (Q), a velocidade (V) e a densidade (ρ). Essas variáveis podem compreender situações distintas, e para diferenciar o caso informado serão utilizados termos em subscrito ou sobrescrito. Por exemplo, o fluxo de carros pode ser obtido a partir da observação do experimento (Q_{exp}) ou a partir do modelo simulador de tráfego (Q_{sim}). A velocidade à qual se deseja referir pode ser a média de toda a pista (V^{pis}) ou apenas dos veículos quando cruzam a região física onde o sensor se encontra (V^{sen}).

As variáveis tempo (t) e o intervalo de tempo (Δt) também possuem diversas definições, e também apresentarão termos que às acompanham. Um exemplo é em o intervalo de tempo de análise (Δt_{an}) e tempo de descarte (Δt_{de}). Os termos adicionais empregados em cada variável serão informados quando as mesmas forem apresentadas.

3 ESTADO DA ARTE

Nesta seção é realizada uma revisão dos trabalhos recentes relacionados aos tópicos abordados. Primeiro, são apresentados os estudos relacionados à análise de vídeos para obtenção de dados macroscópicos. Segundo, são mostrados estudos que realizam calibração de modelos microscópicos. Terceiro, revisa-se estudos que utilizam o método da cadeia de Markov e Monte Carlo para construir ciclos de condução. A seção é concluída apresentando a contribuição deste trabalho.

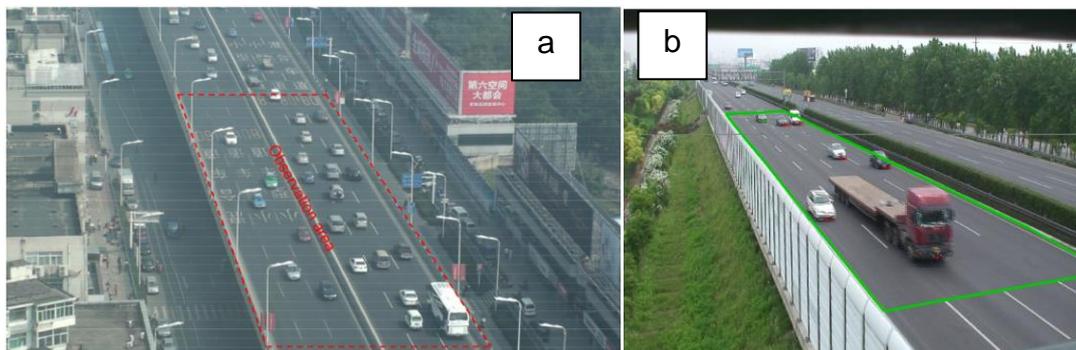
3.1 ANÁLISE DE VÍDEOS PARA ANÁLISE DE TRÁFEGO

Em relação aos trabalhos que obtêm dados de fluxo da via a partir da observação de vídeos, Lan e Chang (2005) foram um dos pioneiros e avaliaram o tráfego heterogêneo de veículos analisando duas horas de vídeo em um trecho de 30 metros de uma via em Taipei – Taiwan. Nesse trabalho foi calculado o fluxo e densidade média a cada minuto, sendo esses dados posteriormente utilizados para calibrar e simular um modelo microscópico de tráfego. Por fim, foi obtido uma diferença menor do que de 5% entre os dados observação e os simulados, sugerindo que o modelo foi validado corretamente.

O trabalho de Lv *et al.* (2013) também aferiu o fluxo de veículos a partir de vídeos. Seu trabalho teve como objetivo verificar que o processo de troca de faixa de veículos não é instantâneo, e para avaliar esse fenômeno foi realizada uma contagem de veículos em duas vias de três faixas na China. Os autores utilizaram uma câmera no 28º andar de um prédio para avaliar uma das vias, e uma câmera acima de um viaduto para avaliar a outra. O tempo total de estudo é de 200 segundos para a JinZhai Road e 152 segundos para a NanYiHuan Road (Figura 16a).

Em seu trabalho, Lv *et al.* (2013) realizaram a medição de densidade da via considerando a toda a movimentação dos veículos em cada segundo para analisar a densidade da via. Todos os dados de cada segundo são agrupados gerando uma média geral a cada minuto. Em seu trabalho, assim como o de Lan e Chang (2005), foi verificado que as velocidades máximas dos veículos podem variar dentro do simulador dependendo da situação analisada. No caso do Lan e Chang (2005) houve a variação entre a velocidade máxima de carros e motos, enquanto no de Lv *et al.* (2013) a velocidade máxima dos carros foi diferente nas vias estudadas.

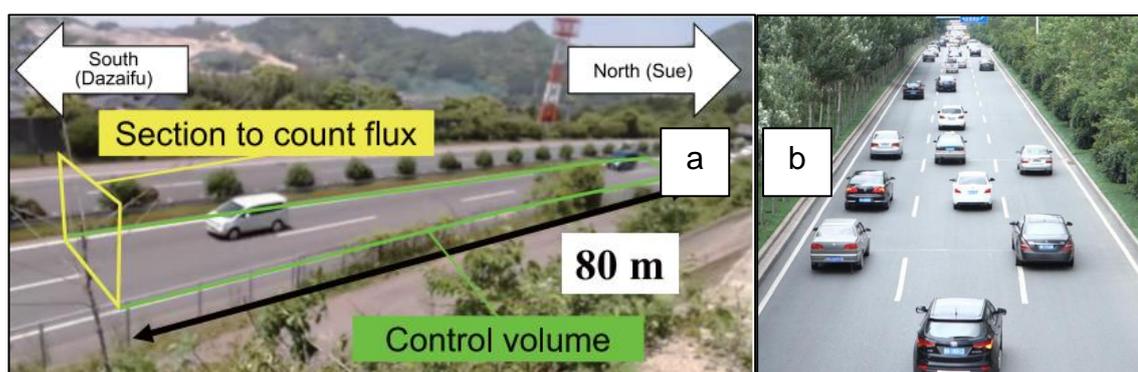
Figura 16– Seleção da área de coleta de dados em vias chinesas: a) JinZhai Road e b) Highway G2



Fonte: a) Lv et al. (2013) Licença 5113190251236 (Elsevier) e b) Guo et al (2018) – Open Access.

Tanimoto *et al.* (2015) avaliaram o fluxo em uma via expressa japonesa durante uma semana. O fluxo e densidade de veículos foi avaliado em intervalos de 1 minuto em um trecho de via com comprimento de 66.63 m. Em adição aos trabalhos anteriores, Tanimoto *et al.* (2015) avaliaram a presença de diferentes classes de veículos (e.g., sedãs, ônibus, caminhões), considerando propriedades específicas de comprimento para cada classe. O objetivo desse trabalho era compreender a mudança de faixa dos veículos, e dessa forma não houve motos e nem calibração do modelo em sua análise.

Figura 17– Seção observada para coleta de dado através do fluxo em a) Japão – Fukuoka e b) China – Nanjing



Fonte: a) Fukuda et al. (2016) - Licença RNP/21/JUL/042447 (SciPris) e b) Feng et al. (2015) - Licença 5113191327671 (Elsevier)

O trabalho do Tanimoto *et al.* (2015) foi continuado em Fukuda *et al.* (2016), dessa vez com o objetivo de utilizar a observação para validar um modelo autômato celular. Mais medições foram realizadas em um trecho de 80m em outra rodovia

japonesa durante 3 dias (Figura 17a). Foi mantida a lógica de coleta de dados e de seleção dos veículos. Ambos os trabalhos japoneses diferiram dos anteriores na forma de exibir os resultados, mostrando os gráficos de fluxo em função da densidade total da via, ao invés da densidade por faixa (carros km^{-1} faixa $^{-1}$). De acordo com os autores, através de dados obtidos de câmeras foi possível obter as relações entre velocidade e faixa utilizada pelos veículos em função da densidade, entre outros dados.

Feng *et al.* (2015) verificaram o impacto da mudança de faixa pelos veículos no fluxo total, utilizando um modelo celular autômato modificado. Os dados de vídeo foram coletados de uma via no distrito de Nangang, na China (Figura 17b), onde uma seção de 200 metros, contendo três faixas de rolagem, sem semáforos ou faixas de pedestres foi observada. Mesmo sem haver semáforos, os autores obtiveram dois grupos de veículos: os mais rápidos com velocidade média de 20 m/s e os mais lentos com velocidade média de 16 m/s. Os dados foram avaliados utilizando frequência de 10 Hz.

Guo, Wu e Zhu, (2018) investigaram o comportamento de mudança de faixa em rodovias chinesas, com comprimentos de 81, 100 e 120 m (Figura 16b). Em seu trabalho, a extração das informações de densidade e fluxo é realizada com auxílio de um aplicativo onde o pesquisador pode marcar a posição dos veículos a cada segundo, obtendo-se a velocidade. Como o objetivo do trabalho é mensurar a taxa de mudança de faixa, também não há resultados referentes ao diagrama fundamental.

Todos os trabalhos apresentados nesta seção tiveram como fator em comum a realização da aferição dos dados em dias ensolarados, em uma via sem interseções, faixas de pedestre ou outra interrupção que possa ocorrer ao fluxo. A frequência de coleta de dados em geral é de 1 Hz (ARUN *et al.*, 2017; YANG *et al.*, 2019) mas alguns trabalhos coletam com frequências mais altas como 10 Hz. Compreende-se que frequências acima de 15 Hz não adicionam informações relevantes sobre a cinemática veicular e exigem uma capacidade de armazenamento e processamento de dados muito superiores quando comparados a situação de 1 Hz (RECHKEMMER *et al.*, 2019).

Zhao *et al.* (2020) informam que o coeficiente de correlação entre os dados nos instantes de tempo subsequentes, quando usando a amostragem é de 10 Hz, o coeficiente de correlação foi 99.5%, enquanto quando a amostragem é 1 de Hz, o coeficiente foi 98.2%. Como a carga computacional quando a frequência de 10 Hz é 10 vezes maior quando comparada ao caso de 1 Hz, houve a escolha por trabalhar

com 1 Hz. A Tabela 4 exibe um resumo dos valores encontrados para capacidade e densidade crítica dos trabalhos referenciados. Na tabela, os valores são aproximados pois são obtidos de análise visual.

Tabela 4 – Capacidade e densidade crítica de artigos publicados

Trabalho	Capacidade (veículos h⁻¹ faixa⁻¹)	Densidade crítica (veículos km⁻¹ faixa⁻¹)
Lan e Chang (2005)	3600 (70% de motos)	80
Lv <i>et al.</i> (2013)	1800	Entre 40 a 60
Tanimoto <i>et al.</i> (2015)	2520 (faixa rápida) 1800 (faixa lenta)	-
Fukuda <i>et al.</i> (2016)	3000 (faixa rápida) 2160 (faixa lenta)	25
Das e Chattaraj (2019)	2280 (55% de motos)	35
Feng <i>et al.</i> (2015)	1800	40
Guo <i>et al.</i> (2015)	1680	-
Reina e Ahn (2020)	1830	-

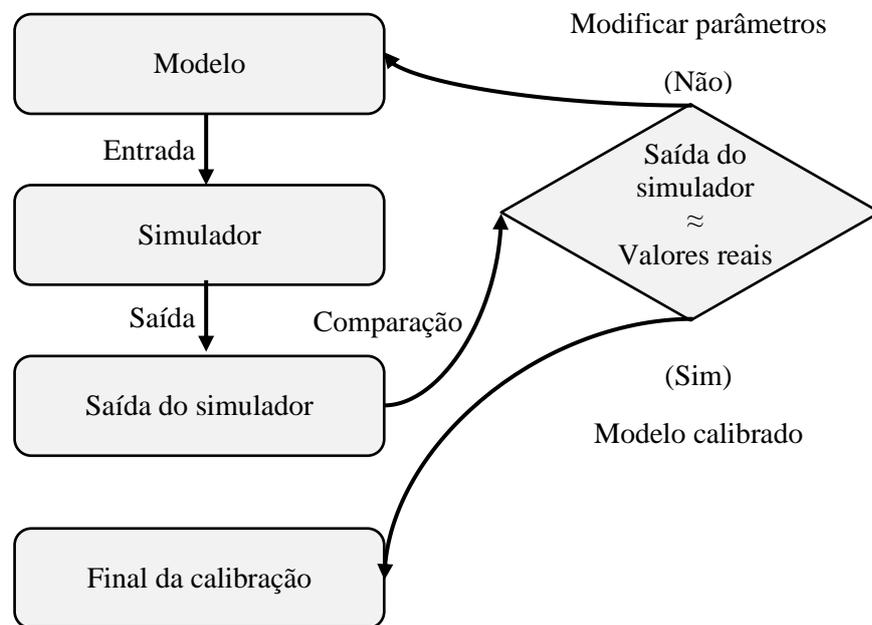
Fonte: O autor (2021).

3.2 CALIBRAÇÃO DE MODELOS MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO

A calibração e validação são fundamentais no estudo de modelos microscópicos de tráfego. Essa etapa é considerada difícil devido à falta de métodos padronizados. Uma estrutura básica da calibração de modelos é disposta na Figura 18 (BROCKFELD; KÜHNE; WAGNER, 2004).

Em 2005, Arasan e Koshy estudaram o tráfego heterogêneo de carros e motos na Índia, considerando que o trânsito é caótico e que os motoristas não respeitam as faixas na via. Para isso coletaram as informações de volume, composição do tráfego, largura e comprimento da via. Outros parâmetros avaliados foram a velocidade máxima de cada veículo, dimensões, características de aceleração e desaceleração, e limites de espaço transversal. De acordo com os autores, o modelo foi calibrado e apresentou um erro menor do que 5% (ARASAN; KOSHY, 2005).

Figura 18 - Resumo do processo de calibração



Fonte: Adaptado de Paz *et al.* (2015)

Também em 2005, Punzo e Simonelli utilizaram um GPS de alta precisão que permitiu coletar a trajetória de quatro veículos em Nápoles, Itália. Essas informações foram utilizadas para analisar o comportamento de quatro modelos, entre eles o de Gipps. Nas conclusões desse trabalho foi verificado que o modelo mais simples teve o melhor desempenho global, enquanto o modelo com mais parâmetros apresentou os menores desvios. As dificuldades dos modelos microscópicos na reprodução do fenômeno de real surgem não apenas devido à complexidade de calibração e validação, mas também devido à variabilidade inter- e intra-motoristas (PUNZO; SIMONELLI, 2005).

Em 2008, Kesting e Treiber calibraram o IDM e o VDM (*Velocity Difference Model*) a partir de três trajetórias de um teste realizado em 1995. Nesse teste, um carro equipado com sensor obteve velocidade relativa e distância para o carro à sua frente. A duração dos testes foram 250 s, 400 s e 300 s. Para calibrar o modelo, consideraram o erro da distância entre os veículos. Além disso, o erro foi calculado utilizando uma fórmula mista, ao invés de erro relativo ou absoluto. Os autores argumentaram que os erros relativo e absoluto sistematicamente superestimam os erros em baixas e altas velocidades, respectivamente. Os erros da calibração

estiveram entre 11% e 29%, considerado na faixa de erro típica dos estudos anteriores (KESTING; TREIBER, 2008).

Treiber e Kesting (2013) também investigaram a calibração e validação de modelos microscópicos carro-seguidor com dados reais ou obtidos de outras fontes. Semelhante ao trabalho dos autores de 2008, foram utilizados os modelos IDM e OVM e foi considerado o erro da distância entre os veículos com frequência de 10 Hz. Uma das conclusões desse trabalho é que a calibração global considerando o erro das distâncias entre os veículos é mais confiável do que uma calibração considerando o erro da velocidade, e que a frequência de 1 Hz na coleta de dados é suficiente que o modelo seja calibrado apropriadamente. A Tabela 5 contém exemplos de trabalhos que realizaram calibração e validação e valores de erro obtidos durante o processo.

Tabela 5 – Trabalhos que realizaram calibração e validação

Autores	Variável calibrada	Erro na etapa de calibração/validação
Brockfeld, Kühne e Wagner (2004)	Tempo entre veículos	C: 12% a 17% V: 17% a 22%
Ranjitkar, Nakatsuji e Asano (2004)	Velocidade e Distância	C: 4% a 20%
Punzo e Simonelli (2005)	Velocidade, Distância e Tempo	C: 7% a 23% V: 13% a 45%
Kesting and Treiber (2008)	Distância entre veículos	C: 11% a 29%
Ciuffo, Punzo e Torrieri (2009)	Fluxo, velocidade e distância	C: 18% a 28%
Wang et al. (2008)	Fluxo, velocidade e densidade	NI
Treiber e Kesting (2012)	Funções da velocidade média	NI
Treiber e Kesting (2013)	Distância entre veículos	NI
Paz <i>et al.</i> (2015)	Fluxo e velocidade	C: < 5% para 85% dos casos
Punzo e Montanino (2016)	Velocidade e Distância	C: 9% a 63%

C = Calibração; V = validação; NI = Não informada

Fonte: O Autor (2021).

3.2.2. Calibração e validação utilizando dados de vídeo

Lan e Chang (2005) fizeram a validação do seu modelo autômato celular, comparando o resultado encontrado no modelo computacional com a observação de fluxo e densidade em uma via de Taipei – Taiwan por 2 horas. Os dados de fluxo e densidade obtidos a partir da observação foram agrupados em intervalos de tempo de um minuto. Após obter que a velocidade média era de 55 km/h com desvio padrão de 11,8 km/h, o modelo foi ajustado para que as velocidades máximas dos veículos correspondessem a obtida na via. Nesse caso em particular, carros e motos apresentaram a mesma velocidade máxima para a via.

Hoogendoorn e Hoogendoorn (2010) propuseram uma abordagem genérica para calibrar um modelo microscópico carro seguidor a partir de várias fontes de dados. A união entre dados provenientes de diferentes fontes é possível devido à uma técnica de estimação estatística dos parâmetros. Em seu trabalho, utilizaram duas fontes como exemplo: Através de dados empíricos obtidos de câmera de alta definição instalada em um helicóptero, que coletou os dados com frequência de 10 Hz e de dados de trajetória obtidos de simuladores de direção, obtendo bons resultados e indicando que essa abordagem pode ser extrapolada para qualquer modelo microscópico carro-seguidor (HOOGENDOORN; HOOGENDOORN, 2010).

Lv *et al.* (2013) investigaram o procedimento de mudança de faixa dos veículos. Em seu processo, utilizaram um modelo microscópico de resposta ao estímulo, com uma equação para velocidade ótima que necessitava de pelo menos dois parâmetros calibrados. Após a obtenção dos valores de fluxo e densidade a partir da observação da via, várias simulações foram realizadas variando parâmetros de probabilidade de frenagem do veículo e o ângulo de conversão de faixa. Uma das conclusões desse trabalho é que a mudança de faixa ocorre com maior frequência nas densidades entre 15 e 35 veículos km^{-1} faixa $^{-1}$ e que o processo de mudança pode induzir em uma redução de até 18% no fluxo de veículos na via no diagrama fundamental.

Fukuda *et al.* (2016) continuaram o trabalho de Tanimoto *et al.* (2015), com objetivo de validar um modelo microscópico autômato celular. Uma das características desse trabalho é que a observação dos fluxos foi realizada separadamente nas faixas lenta e rápida de trânsito e houve verificação de um comportamento típico dos Japoneses: os veículos devem sempre trafegar na faixa lenta, exceto no momento em que desejam ultrapassar.

Feng *et al.* (2015) também analisaram dados obtidos de vídeos para calibrar um modelo autômato celular também com foco em compreender mudança de faixa no comportamento global do trânsito. É ressaltado durante trabalho que durante a observação pode ocorrer erros aleatórios do modelo e durante a medição, gerando resultados discrepantes. Esses casos são considerados como flutuações aleatórias e podem gerar diferença relevante entre observações reais e simulação. A calibração não é explicada no trabalho, mas a validação é realizada por comparação de alguns parâmetros relacionados a fluxo, densidade e taxa de mudança de faixa.

3.3. MÉTODO DA CADEIA DE MARKOV E MONTE CARLO EM CICLOS DE CONDUÇÃO

No que se refere à utilização do método da cadeia de Markov e Monte Carlo para o desenvolvimento de ciclos de conduções, o método foi usado inicialmente por Lin e Niemeier (2002, 2003) e Dai, Niemeier e Eisinger (2008) onde se encontra a metodologia básica do método. Posteriormente, Bishop, Axon e McCulloch (2012) utilizaram o método da cadeia de Markov considerando velocidade e aceleração, provando que o método era confiável.

Shi *et al.* (2016) validaram o método mostrando a correlação dos dados em t segundos com os estados anteriores em $t-1$, $t-5$, e $t-100$ em uma cidade chinesa. Quando avaliando a correlação dos dados em t com $t-1$, a correlação foi de 0.9918, considerada excelente. Entre 2017 e 2020 pelo menos mais dez trabalhos de ciclos de condução foram desenvolvidos utilizando o método da cadeia de Markov (Tabela 6), o que indica a capacidade desse método em desenvolver ciclos de condução representativos. Dessa forma, o método da cadeia de Markov vem sendo utilizado tanto quanto o método de micro-viagens (em inglês: *micro-trip*), que é o método mais tradicional nesta área (Santos *et al.*, 2020).

Tabela 6 – Trabalhos que desenvolvem ciclos de condução com o método da cadeia de Markov

Autores	Localidade	Veículo	Distância (km) ou tempo (h)
Lin e Niemeier (2002)	Los Angeles, EUA	Automóvel	NI
Dai <i>et al.</i> (2008)	California, EUA	Automóvel	91.7 h
Bishop, Axon e McCulloch (2012)	Oxford, Inglaterra	Scooters	1.180 km
Brady e O'Mahony (2016)	Dublin, Ireland	Automóvel	6 meses*
Hereijgers <i>et al.</i> (2017)	ND	Automóvel	1.200 km
Gong <i>et al.</i> (2018)	Beijing, China	Automóvel	45.384 km
Ma <i>et al.</i> (2019)	Beijing, China	Automóvel	3,3·10 ⁶ km
Huertas <i>et al.</i> (2019 a,b)	México	Ônibus	9,990 km*
Wang <i>et al.</i> (2019)	Beijing, China	Automóvel	6 meses*
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Beijing, China	Automóvel	32.800 h
Peng <i>et al.</i> , (2020)	Fuzhou, China	Automóveis	666,2 h
Rechkemmer <i>et al.</i> (2020)	Shanghai, China	Motocicletas	635~761km*
Zhao <i>et al.</i> (2020)	Xi'an, China	Automóvel	NI

* Os trabalhos apenas fornecem um período de coleta de dados, sem informar exatamente a quilometragem ou tempo efetivo.

NI = Não informada

Na Tabela 6 é possível ver que o método da cadeia de Markov com Monte Carlo já foi usado para desenvolver ciclos de conduções para ônibus, automóveis e motocicletas. Quando comparado ao método de micro-viagens, o método de Markov

apresenta uma diferença essencial que fomenta sua utilização: a capacidade de gerenciar e processar uma quantidade muito maior de dados de entrada.

Por exemplo, Brady e O'Mahony (2016) equiparam 7 veículos elétricos e monitoraram seus percursos por seis meses, utilizando os dados para gerar um ciclo para Dublin. Huertas *et al.* (2019 a,b) monitoraram 15 ônibus que viajavam entre as cidades do México e Toluca, por vários meses. Ma *et al.* (2019) utilizaram o método de Markov a partir de dados reais de 459 carros particulares que percorreram aproximadamente 3,3 milhões de km. É notável a grande quantidade de dados utilizados nos trabalhos chineses (Tabela 6). Trabalhos como Wang *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2019) informam que os dados utilizados em seus trabalhos são provenientes da Plataforma Nacional Chinesa de Monitoramento de Veículos Elétricos, onde em 2019 eram monitorados mais de 2,3 milhões de veículos elétricos incluindo táxis, ônibus, caminhões e automóveis.

A principal finalidade quando se utiliza o método da Cadeia de Markov e Monte Carlo é que o ciclo representativo tenha resultados próximos aos dados reais, e vários trabalhos apresentaram resultados considerados satisfatórios nesse aspecto. O critério de comparação da proximidade em alguns trabalhos é a média do erro absoluto entre os parâmetros característicos dos ciclos considerados aprovados e os dados reais. Quanto menor, melhor. Trabalhos como o de Bishop, Axon e McCulloch (2012) e Zhao *et al.* (2020) obtiveram diferença menor do que 5% entre os parâmetros característicos, enquanto Silvas *et al.* (2016) e Hereigers *et al.* (2017) obtiveram diferença menor do que 15%.

Embora o método da cadeia de Markov seja capaz de gerar ciclos representativos, Huertas *et al.*, (2019a) alertam que o método da cadeia de Markov produziu menos ciclos do que o método de micro-viagens, quando avaliou ambos os métodos para o mesmo número de simulações totais. O método alternativo ao da Cadeia de Markov, método de micro-viagens, por sua definição não pode ser empregado em condições onde o veículo não para, como ocorre nas densidades mais baixas deste projeto. Isto é, o método CMMC é capaz de produzir resultados representativos, mas é necessário ser utilizado com uma grande quantidade de dados de entrada, o que deve ser conferido na etapa de coleta de dados e na etapa de simulação computacional do projeto. O método CMMC também pode ser utilizado em todas as condições do diagrama fundamental. Mas caso se deseje avaliar uma

quantidade menor (apenas um ou poucos veículos monitorados, por exemplo), o método de micro-viagens é a opção mais adequada (Santos *et al.*, 2020).

3.4. COMPARAÇÃO DO TRABALHO COM A LITERATURA

Esta seção é dedicada para discutir de forma técnica as semelhanças e diferenças que entre os métodos utilizados neste trabalho quando comparados aos trabalhos que já foram publicados.

3.4.1. Obtenção de dados através da análise dos vídeos

Neste trabalho, para alcançar o objetivo de analisar resultados macroscópicos e microscópicos, decidiu-se trabalhar com a observação dos vídeos. A coleta de dados em uma área da pista ao longo do tempo evita um viés que ocorre quando se realiza a medição de apenas uma variável em ponto fixo (em um intervalo de tempo os veículos mais rápidos são contados com frequência maior do que os veículos mais lentos). De acordo com Treiber e Kesting (2013) é possível usar dados macroscópicos de uma via para calibrar modelos microscópicos e macroscópicos, mas não é possível calibrar um modelo macroscópico a partir de dados microscópicos. Assim, informações macroscópicas relevantes foram obtidas considerando o aspecto espacial e temporal para realizar a calibração do modelo.

A obtenção de dados macroscópicos através de vídeos é uma técnica promissora e deverá ser mais empregada à medida em que se aumenta a quantidade de câmeras de alta resolução para monitorar as vias de grandes cidades. Essa técnica, aliada aos computadores que possuem maior capacidade de processamento, sugere que em alguns anos a obtenção de dados aliada à simulação dos modelos irá ser realizada de forma automatizada com alto grau de precisão e exatidão.

Nesse trabalho, optou-se por aferir o fluxo por coleta através de observação manual, como executado nos trabalhos do Lv *et al.* (2013), Tanimoto *et al.* (2015) e Fukuda *et al.* (2016). Nesses trabalhos, definiu-se uma seção transversal onde a contagem dos veículos foi realizada. Já a densidade foi mensurada a partir de uma área observada, semelhante aos demais trabalhos apresentados no estado da arte, mas os trabalhos variam o intervalo de tempo da aferição.

Lv *et al.* (2013) contaram todos os frames do vídeo analisado, mas dentre os trabalhos é o que analisa o menor tempo total (menos de 6 minutos). Já os trabalhos

japoneses de Tanimoto *et al.* (2015) e Fukuda *et al.* (2016) avaliaram a densidade através de fotos do vídeo, verificando a quantidade de veículos na via a cada intervalo de tempo de 15 segundos. Em compensação, houve o monitoramento do comportamento da via por um tempo consideravelmente maior (vários dias). No presente trabalho optou-se por realizar as medições de densidade com um intervalo de tempo básico de 1 segundo. Motivos adicionais para essa escolha são: 1) devido à forma de ajuste do tempo no aplicativo empregado para visualização dos vídeos, que será apresentado na metodologia; 2) trabalhar com a frequência de 1 Hz.

Esta técnica de coleta de fluxo e densidade também foi utilizada de forma semelhante em nosso grupo de pesquisa por Oliveira (2017) e Silva (2018) em seus Trabalhos de Conclusão de Curso. Há uma pequena variação em relação à medição do fluxo de veículos, onde nos trabalhos anteriores foi considerada a quantidade de veículos que entram e saem da área de controle, ao invés de cruzar a seção transversal. Esta abordagem não altera o comportamento geral da via em baixas densidades, mas é possível verificar que a densidade de veículos nos TCCs não ultrapassa $80 \text{ carros km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$, o que mostra que essa abordagem impacta fortemente os resultados de densidade em condições de congestionamento.

3.4.2. Seleção da via comparada com outras da literatura

A via selecionada para avaliação do fluxo segue o padrão dos demais trabalhos mostrados no estado da arte, onde o estudo é realizado em uma seção de via onde não há intersecções, faixas de pedestres ou alguma forma que permita interrupção do fluxo. A Via Mangue, localizada em Recife se enquadrava nessa condição por cumprir essas características. A distância é de pelo menos 1,5 km até a saída mais próxima. Antes do local de aferição dos resultados (cerca de 200m) há uma via local (Rua Tomé Gibson), mas dela não há fluxo suficiente para alterar a condição geral da via. Antes dela, o ponto de entrada de veículos mais próximo está cerca de 1,5 km antes do local da aferição.

3.4.3. Diagrama fundamental

O diagrama fundamental é um indicador importante do comportamento global da via e é pouco estudado no Brasil. Em uma pesquisa realizada de forma virtual na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e no Catálogo de Teses e Dissertações da CAPES em junho/2021 não foi encontrado nenhum resultado (tese ou dissertação) quando o termo “diagrama fundamental” foi pesquisado de forma

ampla. Poucos trabalhos foram encontrados quando o termo curva de fluxo-velocidade foi utilizado. As curvas fluxo-velocidade e a curva apresentada no diagrama fundamental deste trabalho diferem entre si em relação à essência de coleta de dados. Enquanto as curvas fluxo-velocidade focam em valores obtidos através de sensores fixos, o diagrama fundamental foi obtido através de dados de vídeo.

Neste trabalho buscou-se encontrar um diagrama fundamental a partir do conjunto de pontos do diagrama fluxo densidade, de forma que os resultados macroscópicos que são gerados na simulação possam ser diretamente comparados nos resultados obtidos a partir da observação em cada densidade. Uma das contribuições do presente trabalho é gerar um diagrama fundamental.

3.4.4. Simulador de tráfego microscópico

Foi comentado na revisão da literatura que existem várias categorias de modelos microscópicos, e vários modelos dentro da mesma categoria. Existem diversos trabalhos que focam na comparação de diferentes modelos os comparando com dados obtidos de testes reais. Brockfeld, Kuhne e Wagner (2004) analisaram 10 diferentes modelos microscópicos e Ranjiktar, Nakatsujo e Asano (2005) compararam seis modelos microscópicos a partir de dados de GPS. Ambos os trabalhos concluíram que os modelos avaliados apresentaram resultados semelhantes após a calibração, incluindo entre eles o modelo de Gipps.

Nesse trabalho foi empregado um modelo microscópico de distância segura (modelo Gipps-Santos), escolhido por ser contínuo em relação ao espaço. O autor deste trabalho utilizou um modelo discreto em relação ao espaço em sua dissertação de mestrado (ARAUJO, 2017). O modelo de tráfego empregado foi desenvolvido pelo doutorando Maurício Santos para ser empregado em seu projeto de Tese que tem previsão de conclusão em 2022.

Em relação aos simuladores utilizados no estado da arte, Lan e Chang (2005), Fukuda *et al.*, (2016), Feng *et al.*, (2015), Das e Chattaraj (2019) empregaram modelos microscópicos celular autômatos, que são discretos em relação ao espaço e tempo e possibilitam maior eficiência computacional. Apenas Lv *et al.*, (2013) utilizaram um modelo contínuo em relação à distância, o modelo de velocidade ótima (OVM).

3.4.5. Calibração do modelo de tráfego microscópico

Vários trabalhos propuseram calibrar o tráfego empregando diferentes abordagens. Um resumo pode ser visto em Yu e Fan (2017), que apresentaram uma tabela com 17 trabalhos que calibraram modelos, e apresentaram dados como o número de parâmetros usados na calibração (que variou entre 2 e 12), a métrica avaliada (e.g., velocidade média, fluxo) e a função utilizada para cálculo do erro.

Alguns trabalhos realizam a calibração a partir de uma função que utiliza apenas uma variável, sendo o fluxo (CIUFFO; PUNZO; TORRIERI, 2009), a velocidade, ou a distância entre veículos; mas a calibração também pode ser realizada por uma combinação entre mais de uma variável, como a velocidade e distância (PAZ *et al.*, 2015). Outra forma de calibrar é a partir da avaliação da diferença entre a Distribuição de Frequência de Velocidade e Aceleração (do inglês SAFD, *Speed Acceleration Frequency Distribution*). O SAFD é encontrado a partir da diferença entre a aceleração média simulada e real para cada velocidade avaliada.

Neste trabalho foi empregada uma função que avaliou a diferença de forma mista, considerando fluxo e a demanda energética do veículo. Como ambos os valores variam dependendo da densidade em que são avaliados, também se considera as densidades em que as métricas são mensuradas.

4. METODOLOGIA

A metodologia empregada para obtenção dos resultados foi dividida em três etapas.

- 1) *Obtenção do diagrama fundamental a partir de observação de vídeos*: descreve-se como as informações de fluxo e densidade são obtidas a partir da análise dos vídeos. A partir dos pontos obtidos, há o tratamento para remover os pontos discrepantes (*outliers*) obtendo as curvas do tráfego em condição livre e congestionada e o diagrama fundamental.
- 2) *Calibração do modelo microscópico de tráfego*: descreve-se o modelo e a quantidade de repetições de simulação, e o intervalo de tempo de descarte e análise que são necessárias para que os resultados sejam reproduzíveis. Também são avaliados como a localização da medição de fluxo e densidade na pista e no sensor afetam o resultado. Também há a análise de sensibilidade de oito parâmetros de entrada para definir o procedimento de calibração do modelo microscópico localmente e globalmente, contra o diagrama fundamental obtido na etapa 1.
- 3) *Geração dos ciclos representativos da localidade*: com o modelo microscópico calibrado na etapa 2, são simuladas diversas condições de densidade obtendo velocidade e parâmetros característicos. Estuda-se a quantidade de ciclos capaz de reproduzir as distintas condições da via (um, dois, três ou quatro). Após definir o número de grupos, os perfis de velocidade são selecionados de forma proporcional à presença delas no diagrama fluxo-densidade de via, para cada grupo. Esses perfis são empregados no método da cadeia de Markov e Monte Carlo até obter um ciclo de condução representativo.

4.1. OBTENÇÃO DO DIAGRAMA FUNDAMENTAL A PARTIR DA OBSERVAÇÃO DE VÍDEOS

Essa etapa explica como fluxo e densidade da via foram coletados a partir da análise dos vídeos e como se obteve o diagrama fluxo-densidade, que exhibe o comportamento heterogêneo existente na via. Também se descreve como o diagrama

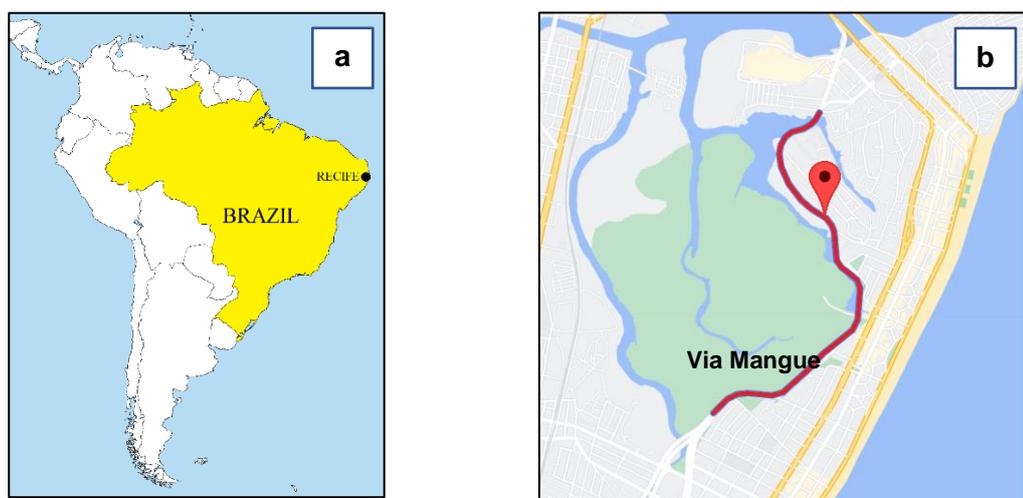
fundamental (fluxo-densidade) foi obtido, o qual é utilizado para representar um comportamento estacionário para a via.

4.1.1. Cálculo de fluxo e densidade no trecho selecionado

A coleta de dados de fluxo e velocidade foi realizada a partir da observação de gravações de vídeo realizadas pela CTTU (Autarquia de Trânsito e Transporte Urbano do Recife). A CTTU gerencia mais de 148 câmeras de monitoramento de tráfego na cidade do Recife, e por meio da Lei 12.527/2011 (Lei de acesso à informação) é possível solicitar os vídeos e imagens; desde que se informe a câmera e horário desejados dentro do prazo de até sete dias após o evento. A câmera selecionada está em um trecho da Via Mangue onde não há interseções, rotatórias e passagem de pedestres (Figura 19). A inclinação da via nesta região é considerada nula.

Esse trecho foi selecionado porque o fluxo de veículos não é interrompido por alguma ação a não ser a quantidade de veículos acima da capacidade da via. A CTTU disponibiliza os vídeos em um software que tem como *layout* padrão o exibido na Figura 20. Nela, é possível ver a região delimitada onde a coleta de fluxo e densidade dos veículos foram realizadas.

Figura 19 – a) Localização do Recife no mapa do Brasil b) Localização da Via Mangue e indicação do local da câmera



Fonte: Santos *et al.*, (2020) e Google Maps

Figura 20 – Visão do software de monitoramento de tráfego da via estudada.



Fonte: CTTU

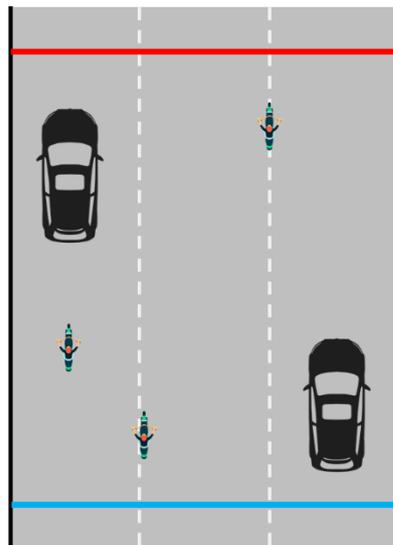
Nesse trabalho foi usado um método simples para avaliar a via: a contagem manual. Esse método foi baseado no procedimento utilizado por Lv *et al.* (2013) e Fukuda *et al.*, (2016) e nele o fluxo de veículos (Q_{exp}^{sen}), equação 19, é obtido a partir da quantidade de veículos que passam a sessão transversal delimitada na linha azul a cada minuto (Figura 20 e Figura 21) em cada faixa i e instante de tempo j . A densidade (ρ_{exp}^{sen}), equação 20, também é calculada a partir da mesma metodologia utilizada pelo Lv *et al.* (2013) onde há um intervalo de tempo agregado (Δt_{ag}) de um minuto em nosso trabalho, e um intervalo tempo básico (Δt_{ba}) de um segundo.

O sobrescrito “*sen*” indica que a variável é analisada em uma região (área chamada informalmente de “sensor” – região entre as linhas da Figura 20 e Figura 21 que também é delimitada no simulador), enquanto o subscrito “*exp*” significa que a variável foi obtida a partir da observação dos vídeos (experimento). No cálculo da densidade (ρ_{exp}^{sen}), *i.e.*, densidade na região estudada e obtido por observação de vídeo, são considerados os veículos que se encontram no volume de controle limitado entre as linhas azul e vermelha da Figura 20.

$$\bar{Q}_{exp}^{sen} = \frac{1}{3} \frac{1}{\Delta t_{ag} / \Delta t_{ba}} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{\Delta t_{ag} / \Delta t_{ba}} Q_{exp,i}^{sen} \quad (19)$$

$$\rho_{exp}^{sen} = \frac{1}{L} \frac{1}{\Delta t_{ag} / \Delta t_{ba}} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{\Delta t_{ag} / \Delta t_{ba}} N_{ij} \quad (20)$$

Figura 21 – Exemplo da delimitação da área para coleta de dados



Fonte: O autor (2021)

Nesse trabalho, foram solicitados vídeos da Via Mangue para o horário das 07:00 às 17:00 horas de quatro dias úteis de 30/09/2019 a 03/10/2019. Nos horários observados da gravação não ocorreram situações incomuns ao condutor tais como: acidentes, incidentes, obras na via ou fortes chuvas (Apêndice C).

4.1.2. Obtenção das curvas do diagrama fundamental

Para representar a via, foi escolhido o diagrama fundamental com formato bi linear (ou triangular) de Daganzo (1994) devido à semelhança do formato obtido com os pontos observados e porque é um dos mais utilizados para representar fluxo e densidade (KESSELS, 2019). A partir do conjunto de pontos, foram empregados dois passos: eliminação de pontos *outliers* e a regressão dos pontos para obtenção da curva com maior coeficiente de correlação.

4.1.2.1. Eliminação de pontos *outliers*

O primeiro passo consistiu na identificação dos *outliers*, através do método da distância de Cook (COOK, 1977). Identificaram-se os *outliers* em cada um dos grupos estudados: fluxo livre e fluxo congestionado. Até o presente momento, a divisão entre os fluxos é realizada pelo ponto crítico (subscrito “*crit*”). Em caso de dois ou mais pontos com mesmo fluxo máximo o analista deve selecionar o ponto crítico a partir de sua experiência. A região de fluxo livre compreende aos pontos com densidade menor que a crítica, enquanto o fluxo congestionado contém os pontos com densidade maior. Foram considerados como *outliers* as observações nas quais a distância de Cook é maior do que $4/(n - p)$, sendo n o número de observações e p o número de variáveis independentes (*i.e.*, fluxo e densidade) (ZERVAS; DIAMANTOPOULOS, 2009).

4.1.2.2. Regressão dos pontos observados

Um procedimento simples foi aplicado com objetivo de gerar as duas curvas referentes ao diagrama bi linear: a curva que representa a situação de tráfego livre ($0 \leq \rho_{exp}^{sen} \leq \rho_{exp,crit}^{sen}$) e a curva referente ao tráfego congestionado ($\rho_{exp,crit}^{sen} \leq \rho_{exp}^{sen} \leq \rho_{exp,max}^{sen}$). O subscrito “*crit*” refere-se que ao ponto crítico enquanto “*max*” refere-se à densidade máxima avaliada.

Em nosso trabalho foi definido $\rho_{exp,max}^{sen} = 110 \text{ carros km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$, pois nessa densidade a velocidade média dos veículos é aproximadamente 1 m/s, que é a condição utilizada para considerar que o veículo saiu do repouso. Foi realizado um procedimento para obter a reta com o maior coeficiente de correlação linear (r) em cada um dos grupos de fluxo, descrito nos pseudocódigos (Algoritmo 1 e Algoritmo 2). O ponto crítico do diagrama fundamental ($\rho_{exp,crit}^{sen}$) foi obtido a partir da condição de igualdade entre as equações de fluxo livre e congestionado. O conjunto de curvas obtido é denominado de diagrama fundamental da via (Q_{DF}^{sen}) para o presente trabalho sendo utilizado como a representação do comportamento homogêneo do tráfego na via.

Quadro 1 – Pseudoalgoritmo da seleção de curva de fluxo livre

Algoritmo 1: Seleção da curva de fluxo livre

-
- 1 Inicialização**
 - 2 Importar todos os pontos (fluxo x densidade) desde a origem do gráfico até o ponto de densidade no qual o fluxo é máximo.
 - 3 Organizar os pontos em ordem crescente em relação à densidade.
 - 4 **for** ($i = 1; i \leq \rho_{exp,crit}^{sen}; i++$)
 - 5 Selecionar n pontos, sendo do primeiro ponto até i_n .
 - 6 Realizar a regressão linear para o conjunto de pontos selecionados.
 - 7 Armazenar o coeficiente de regressão linear para o conjunto de pontos $r(i_n)$.
 - 8 **end for**
 - 9 Selecionar o caso onde há o maior $r(i_n)$.
 - 10 Utilizar o conjunto n de pontos para criar a reta que representará a região de fluxo livre
 - 11 Final do procedimento**
-

Quadro 2 – Pseudoalgoritmo com a seleção da curva de fluxo congestionado

Algoritmo 2: Seleção da curva de fluxo congestionado

-
- 1 Inicialização**
 - 2 Importar todos os pontos (fluxo x densidade) a partir do ponto de densidade no qual o fluxo é máximo até o ponto com a densidade máxima.
 - 3 Organizar os pontos em ordem decrescente em relação à densidade.
 - 4 **for** ($i = \rho_{exp,max}^{sen}; i = \rho_{exp,crit}^{sen}; i--$)
 - 5 Selecionar n pontos, sendo do primeiro ponto (densidade máxima) até i_n .
 - 6 Realizar a regressão linear para o conjunto de pontos selecionados.
 - 7 Armazenar o coeficiente de regressão linear para o conjunto de pontos $r(i_n)$.
 - 8 **end for**
 - 9 Selecionar o caso onde há o maior $r(i_n)$.
 - 10 Utilizar o conjunto n de pontos para criar a reta que representará a região de fluxo livre
 - 11 Final do procedimento**
-

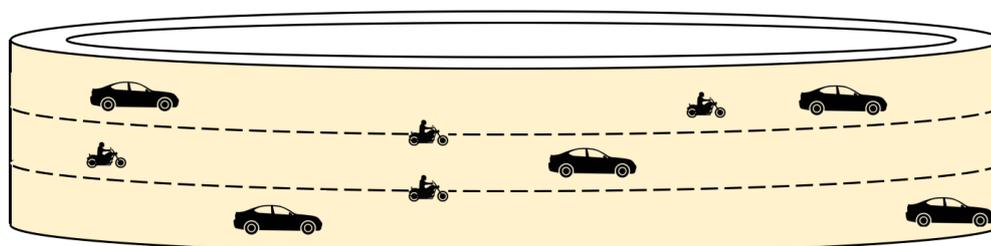
4.2. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR DE TRÁFEGO

O comportamento dos veículos na pista foi definido a partir da integração de três submodelos: do motor, do veículo e do tráfego. O modelo do motor, em conjunto com o modelo do veículo, foi usado para verificar a viabilidade do movimento dos veículos e avaliar sua demanda energética, enquanto o modelo de tráfego foi responsável por avaliar as regras que os veículos seguem no trânsito, representando o comportamento dos motoristas e pilotos. A integração de submodelos para compreensão do tráfego tem sido aplicada em vários trabalhos do grupo de pesquisa LOST (ARAUJO, 2017; GARCIA NETO, 2014; MAGNANI *et al.*, 2021; SANTOS, 2019).

Nesse trabalho, foi empregado o modelo de tráfego (Modelo Gipps-Santos) desenvolvido pelo Maurício Novaes Santos, doutorando no LOST, que tem o doutorado previsto para conclusão em 2022. Esse modelo é um aprimoramento do que foi feito durante seu mestrado (SANTOS, 2019). Nesse modelo, os veículos

percorrem uma pista oval que possui 5 km de extensão. A pista possui três faixas de tráfego, onde qualquer veículo (carro ou moto) pode trafegar nelas. Entre as faixas de tráfego existem dois “corredores”, que serão utilizados apenas pelas motos durante a simulação (Figura 22). Antes de iniciar a simulação, todos os veículos são distribuídos aleatoriamente na pista, não havendo adição ou remoção de carros ou motos durante a simulação. Isso ocorre porque a pista é um sistema fechado, onde os veículos que chegam na posição final da pista são transportados para a posição inicial com as mesmas condições que teriam caso a pista não houvesse terminado. Essa condição de contorno é responsável por manter a densidade da pista constante durante toda a simulação.

Figura 22 – Ilustração da pista modelada



Fonte: O autor (2021)

4.2.1. Submodelo do motor

O submodelo do motor foi empregado para avaliar se é possível que o veículo execute o movimento que o motorista deseja, por exemplo limitando o movimento em casos de acelerações irrealistas. A curva da potência do motor foi obtida a partir de um modelo empírico, aproximada por uma equação cúbica (Equação 21) onde a curva de potência no motor é função de sua rotação (ω_m), e informações obtidas do manual do veículo (Tabela 7): potência máxima (P_{max}) rotação da potência máxima (ω_p) e rotação do torque máximo (ω_t) (NI; HENCLEWOOD, 2008).

$$P_m(\omega_m) = \frac{P_{max}(3\omega_p - \omega_t)\omega_m}{2\omega_p^2} - \frac{P_{max}(\omega_m - \omega_t)^2\omega_m}{2\omega_p^2(\omega_p - \omega_t)} \quad (21)$$

O modelo do motor também avalia o rendimento. Para isso foi escolhido o modelo empírico de Ben-Chaim *et al.* (2013) dado na equação 22, que considera o

rendimento do motor (η_{max}), o desempenho do motor em relação à carga (μ_p) e à rotação (μ_n). Nesse trabalho foi considerado um rendimento máximo de 30%.

$$\eta(\omega_m) = \eta_{max}\mu_p\mu_n \quad (22)$$

4.2.2. Submodelo do veículo

No submodelo do veículo foi considerado que veículo pode acelerar, manter a velocidade constante ou desacelerar. São analisadas as forças sob as quais o veículo está submetido (rolagem, aerodinâmica e inercial), verificando qual a demanda energética na roda (DEV_i) no instante de tempo i , descritas na Equação 23, Equação 14 e de forma discreta na Equação 5. A Tabela 7 exhibe os parâmetros dos veículos simulados, selecionados a partir de valores de veículos populares brasileiros (MAGNANI et al., 2021).

$$DEV_i = \left(m \frac{dV}{dt} + C_R mg + K_A (V - W)^2 \right) V \quad (23)$$

Tabela 7 - Parâmetros dos veículos

Parâmetro	Carro	Motocicleta
Potência máxima	53,7 kW	8,5 kW
Volume do motor	1000 cm ³	125 cm ³
Rotação da potência máxima	6250 rpm	8250 rpm
Rotação do torque máximo	4500 rpm	6000 rpm
Rotação mínima	900 rpm	1400 rpm
Eficiência máxima do motor		30%
Coeficiente de resistência à rolagem		0,02
Massa (veículo + piloto)	1010 kg	177 kg
Eficiência de transmissão		0,95

Fonte: (MAGNANI et al., 2017)

4.2.3. Submodelo do tráfego

Maurício Santos (SANTOS, 2022) baseado no modelo desenvolvido por Gipps (1981). Este modelo possui grande relevância neste trabalho, sendo uma evolução em relação ao modelo discreto no espaço que foi empregado nos primeiros trabalhos do grupo de pesquisa (GARCIA NETO, 2014; ARAÚJO, 2017). Abaixo serão descritos os principais aspectos do modelo e mais informações podem ser encontradas na dissertação (SANTOS, 2019) e em (SANTOS *et al.*, 2020). O modelo foi adaptado para a via estudada, considerando três faixas e os corredores. O modelo analisa o movimento do veículo de duas formas: primeiro se há mudança de faixa, e depois a aceleração desejada pelo condutor no movimento longitudinal. É relevante lembrar que o modelo necessita ser calibrado para que possa produzir resultados coerentes com a realidade, sendo a calibração um dos objetivos deste trabalho.

4.2.3.1. Movimento de mudança de faixa

Ambos os veículos são livres para mudar de faixa na pista. Os carros podem mudar entre as três faixas, enquanto as motos podem mudar entre as três faixas e os dois corredores disponíveis (Figura 22). São necessárias que duas condições sejam satisfeitas para que os veículos mudem de faixa: segurança e vantagem. Nas variáveis descritas a seguir, quando a informação se referir aos veículos que estão na faixa ou corredor adjacente, será utilizado o subscrito *of* (“outra faixa”), se estiverem a frente e atrás do veículo estudado será usado o sobrescrito “+” e “-” respectivamente.

Em relação à condição de segurança na mudança de faixa, a lógica utilizada seguiu o apresentado nos modelos autômato celular utilizados em trabalhos anteriores do grupo (ARAUJO, 2017; SANTOS, 2019). Verifica-se se a distância para os veículos que estão à frente (gap_{of}^+) e atrás (gap_{of}^-) nas faixas adjacentes é maior do que zero. Também se verifica a desaceleração do veículo seguidor que está na outra faixa (b_{of}^-) e do veículo atual (b_{of}) de forma que elas devem ser menores do que a desaceleração máxima (d_{max}) para evitar a colisão. Em adição às condições já definidas, também foi calculada a velocidade de segurança caso o veículo permaneça na faixa (V_{seg}) ou mude de faixa ($V_{seg,of}$). A mudança de faixa ocorre se a velocidade de segurança for

maior do que um valor limite ($\Delta V_{lim} = 0,2$ m/s) (Santos, 2019). Nessa avaliação, o tempo de reação foi considerado nulo e a desaceleração máxima foi igual entre veículos da mesma categoria. Todas condições são apresentadas na equação 24.

$$\begin{aligned} gap_{of}^+ > 0 \text{ e } gap_{of}^- > 0 \text{ e } b_{of} \geq d_{max} \text{ e } b_{of}^- \geq d_{max} \text{ e } (V_{seg,of} - V_{seg}) \\ \geq \Delta V_{lim} \end{aligned} \quad (24)$$

4.2.3.2. Movimento longitudinal

O modelo microscópico de Gipps tem condições que dependem da velocidade do veículo em tráfego livre (v_{livre}) e da velocidade de segurança (v_{seg}). Para isso, são usados parâmetros como velocidade máxima da via (V_{max}), distância mínima (D_{min}) entre os veículos, entre outros. Esses parâmetros foram empregados no modelo, mas necessitam ser calibrados para representar a via de forma coerente, conforme será explicado posteriormente na subseção de calibração (Seção 4.4). A atualização da velocidade do veículo para o instante de tempo posterior é dada na equação 25.

$$V(t + \Delta t) = \min(V_{max}, \frac{d_{max}\Delta t}{2} + \sqrt{K_1 + K_2}) \quad (25)$$

Onde:

$$K_1 = (-d_{max} \Delta t^2 / 2)$$

$$K_2 = ((V(t)^+)^2 - d_{max}[2(gap^+ - D_{min}) - V(t)\Delta t])$$

Algumas definições foram aplicadas, como o fato de todos os veículos da mesma classe apresentarem a mesma desaceleração máxima, e do tempo de reação dos condutores ser nulo, considerando que a resposta é executada em conjunto ao movimento dentro intervalo de tempo $\Delta t = 1$ s). A aceleração do modelo é encontrada a partir da equação 26.

$$a(t + \Delta t) = \begin{cases} \min(a_1, a_{max}), & \text{para } a_1 \geq 0 \\ \min(a_1, d_{max}), & \text{para } a_1 < 0 \end{cases} \quad (26)$$

Onde:

a_{max} = aceleração máxima possível (m/s²)

d_{max} = desaceleração máxima possível (m/s²)

$$a_1 = [V(t + \Delta t) - V(t)]/\Delta t$$

4.3. ESTUDO COMPUTACIONAL SOBRE A SIMULAÇÃO

Nesse tópico é descrito uma etapa prévia à calibração, onde se estuda o número mínimo de repetições, e o intervalo de tempo de descarte (i.e., tempo de aquecimento de rede ou *warm up*) e intervalo de tempo de análise necessários para que os resultados obtidos durante a calibração sejam reproduzíveis.

4.3.1. Avaliação do número de repetições, intervalo de tempo de descarte e intervalo de tempo de análise

As simulações devem ser executadas com o menor tempo possível pelo processador e fornecendo resultados coerentes e reproduzíveis. Neste trabalho, o tempo de simulação (t_s) é função do número de repetições executadas (n_{run}) e da soma dos intervalos de tempo de descarte e análise (Δt_{de} e Δt_{an}), equação 27.

$$t_s = n_{run} \cdot (\Delta t_{an} + \Delta t_{de}) \quad (27)$$

O intervalo de tempo de descarte (Δt_{de}) e o intervalo de tempo de análise (Δt_{an}) variam de forma discreta em função do intervalo de tempo básico ($\Delta t_{ba} = 1s$). O Δt_{de} reflete a condição em que os veículos são distribuídos de forma aleatória na via, saindo do estado inicial até chegarem ao estado estacionário. O tempo de descarte não será utilizado para avaliação do comportamento dos veículos pois reflete o estado de transição no sistema. Já o intervalo de tempo de análise (Δt_{an}) considera que os veículos não estão mais sob influência da distribuição aleatória inicial e que as interações entre os veículos são definidas apenas pela dinâmica do tráfego; portanto, é o intervalo de tempo considerado para as avaliações.

Foi realizado um teste para verificar se os resultados de fluxos convergem quando expostos a diferentes condições iniciais. Foram avaliadas as densidades de carros $\rho_{sim}^{pis} = \{10, 20, 28, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 \text{ e } 110\}$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$ e executada a simulação com o caso base (Tabela 8). Utilizando $\Delta t_{de} = \Delta t_{an} = 1800$ s,

foi avaliado para cada densidade (ρ_{sim}^{pis}) a diferença entre o fluxo médio (\bar{Q}_{sim}^{pis}) obtido quando se simula apenas uma vez, com a média de fluxos nas mesmas densidades para 10 repetições ($\bar{Q}_{sim,n=10}^{pis}$) e 30 repetições ($\bar{Q}_{sim,n=30}^{pis}$), sendo "n" o número de repetições e "sim" o termo que se refere a obtenção de resultados pelo método de simulação no subscrito (Equação 28).

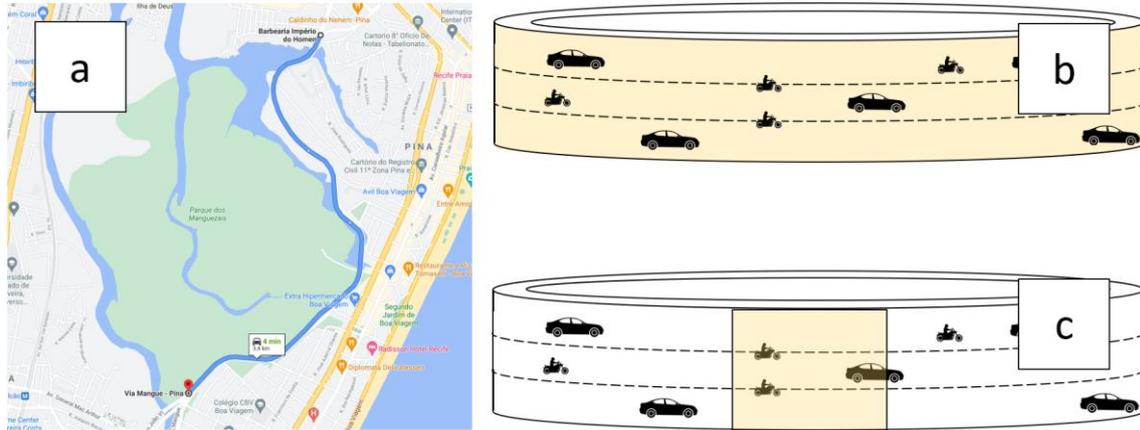
$$\bar{Q}_{sim,i=N}^{pis} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{Q}_{sim,i}^{pis} \quad (28)$$

Para definir o Δt_{de} e Δt_{an} , estuda-se para $\rho_{sim}^{pis} = \{20, 40, 50, 70, 80, 100\}$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$ qual o intervalo de tempo necessário para que o fluxo médio da via (\bar{Q}_{sim}^{pis}) fique com no máximo 1% de diferença ao fluxo médio quando a simulação é realizada com tempo de análise muito mais alto ($\Delta t_{de} = 1000$ s e $\Delta t_{an} = 9000$ s), considerando cinco repetições.

4.3.2. Estudo sobre os diferentes tipos de medição do fluxo

A Figura 23 exibe o trecho avaliado no mapa, e mostra as duas formas nas quais se pode calcular o fluxo no simulador: considerando o fluxo médio na pista completa (sobrescrito "pis") e apenas na área do sensor (sobrescrito "sen"). A densidade também pode ser avaliada da mesma forma, para a pista toda e para o sensor. Essas avaliações são relevantes porque os valores não serão iguais para os dois fluxos e para as duas densidades.

Figura 23 – Diferentes formas de mensurar o fluxo: a) Pista Real, b) Pista simulada, c) Sensor



Fonte: O autor (2021)

Existem três variáveis relacionadas ao fluxo que foram avaliadas utilizando o intervalo de tempo de análise (Δt_{an}). O fluxo experimental no sensor (\bar{Q}_{exp}^{sen}) (Equação 19), foi obtido a partir da observação de vídeo dos veículos na região delimitada (Figura 21), e há dois fluxos obtidos a partir da simulação com o modelo microscópico: o fluxo considerando apenas a área do sensor (\bar{Q}_{sim}^{sen}) (Equação 29), e o fluxo médio considerando toda a pista (\bar{Q}_{sim}^{pis}) (Equação 31). As variáveis de fluxo simuladas são função da densidade de veículos e dos tempos de descarte e análise, e dos parâmetros de entrada: (e.g.: $Q_{exp}^{sen}(\rho_{sim}^{pis}, \Delta t_{de}, \Delta t_{an}, P_E)$).

$$\bar{Q}_{sim}^{sen} = \frac{1}{3} \frac{1}{\Delta t_{an} / \Delta t_{ba}} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{\Delta t_{an} / \Delta t_{ba}} Q_{exp,i,j}^{sen} \quad (29)$$

Para obter a velocidade média da via (\bar{v}_{sim}^{pis}), equação 30, durante a simulação, foi necessário coletar a velocidade instantânea do veículo i para todos os N veículos na densidade simulada (ρ_{sim}^{pis}).

$$\bar{v}_{sim}^{pis} = \frac{1}{\Delta t_{an} / \Delta t_{ba}} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^{\Delta t_{an} / \Delta t_{ba}} v_{i,j} \quad (30)$$

E a partir da velocidade média e da densidade da via, temos:

$$\bar{Q}_{sim}^{pis} = \rho_{sim}^{pis} \bar{v}_{sim}^{pis} \quad (31)$$

Para verificar se os intervalos de tempo (Δt_{de} e Δt_{an}) fornecem um resultado de fluxo estável, foi avaliada a diferença dos fluxos simulados para o sensor e a via nas densidades (ρ_{sim}^{pis}) estudadas, com objetivo de verificar se essas duas variáveis de fluxo tendem ao mesmo valor.

4.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO MICROSCÓPICO DE TRÁFEGO

A calibração do modelo foi iniciada com a análise de sensibilidade do fluxo médio simulado na via (\bar{Q}_{sim}^{pis}) em relação a todos os parâmetros de entrada. A partir da observação das curvas de sensibilidade, decidiu-se os parâmetros que foram calibrados. Concluiu-se com a realização da calibração dos parâmetros através da variação dos valores dos parâmetros, que objetiva minimizar o erro relativo de fluxo de veículos e da demanda energética veicular.

4.4.1. Análise de sensibilidade de fluxo

No modelo microscópico de tráfego foram considerados oito parâmetros de entrada (P_E), dispostos na Tabela 8. Foi realizada uma análise de sensibilidade variando os parâmetros de entrada para verificar sua influência no fluxo (JIE *et al.*, 2013). O parâmetro de saída (P_S) avaliado é o fluxo de veículos na pista (Q_{sim}^{pis}). A sensibilidade (S) dos parâmetros de entrada, equação 32, foi avaliada na modalidade “one-at-a-time” (HORA; MAGNANI, 2009; SALTELLI *et al.*, 2008), onde cada parâmetro de entrada (P_E) é variado enquanto os demais permanecem fixos.

$$S(P_E, P_S) = \frac{d(P_S)}{d(P_E)} \frac{P_E}{P_S} \quad (32)$$

Na avaliação de sensibilidade, os valores dos parâmetros de entrada foram avaliados no intervalo de testes descrito na Tabela 8, onde o intervalo de testes foi dividido em cinco intervalos iguais. Os valores considerados como base para a calibração também estão descritos, com exceção da desaceleração aleatória e probabilidade de frenagem aleatória, que foram definidos pelo autor.

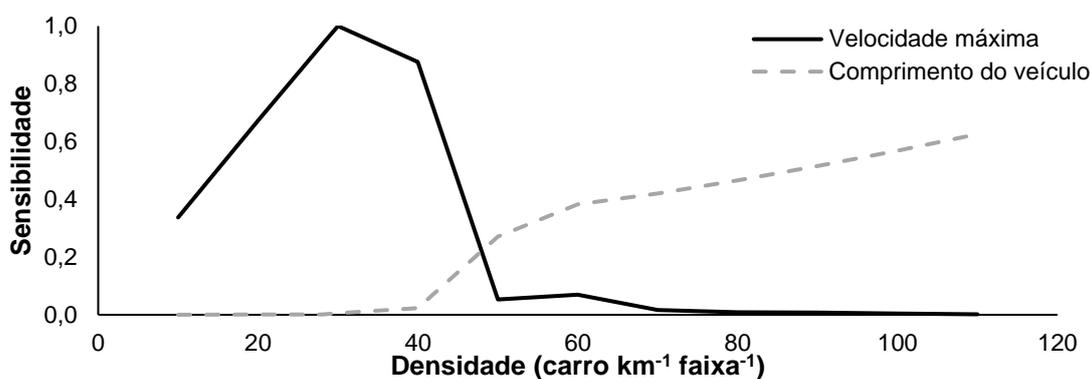
Tabela 8 – Parâmetros de entrada do modelo microscópico de tráfego

Parâmetros de entrada, símbolo	Valor base	Intervalo dos testes	Referência
Probabilidade de mudança de faixa, P_{mf}	1,1%	0 – 10%	Guo <i>et al.</i> , 2018
Desaceleração aleatória, d_{al}	1,0 m/s ²	0,7 – 1,9 m/s ²	
Probabilidade de frenagem aleatória, P_{fa}	10 %	8% – 16%	
Distância mínima entre os veículos, D_{min}	1.2 m	1,0 – 3,0 m	Maheshwary <i>et al.</i> , 2019
Aceleração máxima, a_{max}	1,4 m/s ²	0,3 – 2,0 m/s ²	Ni, D. (2016), Long (2000)
Desaceleração máxima, d_{max}	1,8 m/s ²	1,0 – 2,4 m/s ²	Ni, D. (2016)
Velocidade máxima, V_{max}	60 km/h	50 – 70 km/h	Sinalização da via
Comprimento do veículo, L	4.1 m	3,5 m – 4,5 m	Estudo do autor*

* - Um estudo contendo o comprimento médio da frota está presente em um artigo submetido para publicação.

Um exemplo de como a sensibilidade varia em função da variação do parâmetro estudado se comporta, está na Figura 24. Dois comportamentos distintos são exibidos: para a velocidade máxima, a maior variação do fluxo ocorre na região de baixa densidade até aproximadamente $\rho_{sim}^{pis} = 40$ carros km⁻¹ faixa⁻¹, e o valor tende a zero em densidades altas. Para o comprimento do veículo, a variação do fluxo é basicamente nula nas densidades baixas, assim no tráfego livre o comprimento do veículo não afeta o fluxo, mas essa variável é relevante à medida em que a densidade de veículos aumenta.

Figura 24 – Exemplo de sensibilidade para velocidade máxima e comprimento do veículo



Fonte: O autor (2020)

4.4.2. Processo de calibração do modelo

Nesse trabalho, a calibração do simulador se refere a: 1) minimizar o erro médio entre os fluxos (e_{fluxo}) de veículos na pista do simulador (\bar{Q}_{sim}^{pis}) e os fluxos do diagrama fundamental obtido após a observação da via (\bar{Q}_{DF}^{sen}) nas densidades estudadas ($0 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq \rho_{max}$); e 2) minimizar o erro relacionado à Demanda Energética Veicular (e_{DEV}) em situação de densidade muito baixa de carros ($\rho_{sim}^{pis} = 10$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$). Os resultados para demanda energética veicular foram comparados apenas nesta condição de densidade porque foi a única onde se obtiveram dados a partir de testes reais, exibidos posteriormente na validação do modelo. O erro final (e) é composto de forma ponderada, com o erro do fluxo responsável por 75% do erro final e o erro da demanda energética compondo 25% do erro final, equação 33. Essa proporção (3:1) foi assumida (um *educated guess*) após algumas avaliações, pois há maior participação de dados de fluxo (12 pontos de densidade) do que de demanda energética (apenas um ponto de densidade) na avaliação global.

$$e = 0,75e_{fluxo} + 0,25e_{DEV} \quad (33)$$

O erro relacionado ao fluxo é apresentado na equação 34 e considera: no numerador a distância aos pontos de densidade mais próximos como uma forma de considerar a faixa de densidade avaliada; no denominador é considerado o fluxo médio da via ao invés do erro relativo ou absoluto, que ampliam erros em baixas e altas velocidades, respectivamente (KESTING; TREIBER, 2008).

$$e_{fluxo} = \frac{\sum_{i=\rho_0}^{i=\rho_{max}} (\bar{Q}_{sim,i}^{pis} - Q_{DF,i}^{pis}) (\rho_{sim,i+1}^{pis} - \rho_{sim,i-1}^{pis})}{\frac{1}{n} \sum_{i=\rho_0}^{i=\rho_{max}} (\bar{Q}_{sim,i}^{pis} - Q_{DF,i}^{pis}) \rho_{sim,i}^{pis}} \quad (34)$$

E o erro relacionado à demanda energética veicular é exibido na equação 35.

$$e_{DEV} = \frac{(DEV_{sim}^{\rho=10} - DEV_{exp}^{\rho=10})}{DEV_{exp}^{\rho=10}} \quad (35)$$

Após a análise de sensibilidade, os parâmetros de entrada foram calibrados desde que eles não se enquadrassem em alguma das duas situações: 1) Caso exista parâmetro cuja curva tenha formato semelhante à curva de outro parâmetro, apenas um dos parâmetros será calibrado e os demais seriam mantidos constantes. 2) Caso o parâmetro não exerça influência significativa em nenhuma das densidades, é avaliado não o calibrar.

A calibração dos parâmetros foi feita de forma sequencial. Primeiramente houve a calibração local dos parâmetros. Na calibração local, foram alterados os parâmetros de entrada mais influentes apenas na região de densidade em que eles apresentaram sua influência, em ordem decrescente de sensibilidade. Após o término da calibração local, os demais parâmetros que não apresentaram a maior influência em alguma densidade foram calibrados globalmente. Foi considerado que o parâmetro de entrada está calibrado quando ele apresentar o menor erro final comparado aos demais outros valores no intervalo de análise avaliado.

4.4.3. Validação dos dados

A validação foi realizada na Via Mangue através da observação de vídeos gravados em dia posterior à calibração, e consistiu em observar e coletar os dados da mesma forma da calibração, comparando os resultados. Além da coleta dos vídeos para análise, também foi realizada uma medição do comportamento de dois veículos equipados com GPS na via, obtendo-se a velocidade em função do tempo em frequência de 1 Hz. Esse teste foi realizado no dia 23/06/2020 das 14 às 16 horas. Os pontos coletados foram colocados no diagrama fluxo densidade, sendo que cada ponto foi selecionado porque estava durante o intervalo de tempo que corresponde a dois minutos antes, o exato minuto, e os dois minutos posteriores a um dos dois pilotos passarem na região de medição dos dados.

4.5. GERAÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO REPRESENTATIVOS

Nesse tópico será mostrado como a partir da velocidade dos veículos foram obtidos os parâmetros característicos e gerados os ciclos de condução representativos. O termo ciclo de condução representativo (CCR) será empregado em

lugar de ciclo de condução local (CCL) para referir aos ciclos desenvolvidos ao longo deste trabalho. Após, avalia-se em quantos grupos o diagrama fundamental pode ser dividido. Por fim, o método de Cadeia de Markov e Monte Carlo foi utilizado até produzir uma trajetória que atenda aos requisitos de erro.

4.5.1. Avaliação dos parâmetros característicos

A partir do modelo microscópico de tráfego calibrado, foram obtidos os perfis de velocidade para todos os veículos simulados na pista em cada condição de densidade (ρ_{sim}^{pis} em carros km⁻¹ faixa⁻¹) apresentada a seguir.

$$\rho_{sim}^{pis} = \{5,10,15, 20,25, 30,35, 40,45, 50,55, 60,65, 70,75, 80,85, 90,95, 100,105, 110\}$$

A partir dos perfis obtidos, calculou-se os parâmetros característicos de todos os veículos simulados em cada densidade. Foram avaliados dez parâmetros característicos nesse trabalho, descritos na Tabela 9. Em adição às definições dos parâmetros da Tabela 9, outras definições são somadas às anteriores. Essas condições são aplicadas a todas as importações de dados, sejam provenientes dos veículos simulados no modelo microscópico, de dados experimentais, ou valores importados de outra fonte. Na Tabela 10 estão descritos os termos a_{max} e d_{max} que se referem à aceleração e desaceleração máximas que serão obtidas durante a calibração do modelo microscópico. A lógica desse conjunto de regras também foi empregada em outros dois trabalhos do grupo de pesquisa LOST (ANDRADE *et al.*, 2020, 2021).

Tabela 9 – Parâmetros característicos e suas definições

Parâmetro Característico	Definição
Velocidade média	Velocidade média incluindo a velocidade zero
Velocidade média em movimento	Velocidade média excluindo a velocidade zero
Desvio padrão da velocidade	Desvio padrão amostral da velocidade incluindo velocidade zero
Aceleração média	Aceleração média incluindo a aceleração zero
Desaceleração média	Desaceleração média excluindo aceleração zero
Aceleração média positiva	Aceleração média excluindo a aceleração zero
Percentual do tempo acelerando	Proporção do tempo onde a aceleração é maior do que zero
Percentual do tempo desacelerando	Proporção do tempo onde a aceleração é menor do que zero
Percentual do tempo parado	Proporção do tempo onde a velocidade e aceleração é igual a zero
Percentual do tempo em cruzeiro	O complementar dos 100% dos demais percentuais de tempo

Fonte: Adaptado de Andrade *et al.*, (2021)

Tabela 10 – Condições adicionais para os parâmetros característicos

Condição (se)	Resultado (então)	Motivo
$V < 1 \text{ m/s}$	$V = 0 \text{ m/s}$	Situação de velocidade nula (veículo parado)
$a < 0.1 \text{ m/s}^2$	$a = 0 \text{ m/s}^2$	Evitar flutuação de velocidade (modo de cruzeiro)
$d > -0.05 \text{ m/s}^2$	$d = 0 \text{ m/s}^2$	Evitar flutuação de velocidade (modo de cruzeiro)
$a > a_{max}$	a_{max}	Limitar aceleração máxima
$d < d_{max}$	d_{max}	Limitar desaceleração máxima

Fonte: Adaptado de Andrade *et al.*, (2020)

4.5.2. Seleção da quantidade de grupos que representa o diagrama fundamental

O método de agrupamento k-médias (em inglês, *k-means*) é frequentemente utilizado nos campos de mineração de dados e processamento de sinais, e tem como propósito organizar o conjunto de dados em k grupos (ou agrupamentos). O método, descrito no pseudocódigo Algoritmo 3 (Quadro 3), iniciou selecionando pontos aleatórios e os definindo como centroides dos grupos Z_1, Z_2 , até Z_k .

Quadro 3 – Obtenção dos grupos pelo método das k-médias

Algoritmo 3: Obtenção dos grupos pelo método das k-médias	
1	Inicialização
2	Selecionam-se K observações do conjunto de dados $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ como centros dos grupos $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_n\}$
3	for $i = 1$ to n do
4	Encontrar o centroide mais próximo do ponto i a partir da distância euclidiana quadrada
5	Recalcular o novo centroide do grupo $\{Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_n^*\}$ considerando os novos pontos adicionados ao grupo
	end for
6	Retornar centroides e grupos ao usuário
7	Final do procedimento

O método seguiu em modo iterativo com passos de alocação e atualização. No passo de alocação, cada um dos demais pontos da amostra foi alocado ao grupo que possui a menor soma da distância euclidianas entre o ponto e o centro dos grupos avaliados. Na fase de atualização, novos centroides dos grupos foram recalculados considerando os resultados do passo de alocação. Quando todos os pontos foram alocados a seu respectivo grupo e não houve mais variação dos centroides, o método foi encerrado (SHEN *et al.*, 2018)

Esse método permite que os dados sejam agrupados em relação à similaridade entre os centroides. Para avaliação do método, a função objetivo foi a soma dos erros quadrados cada elemento em relação ao centroide do grupo que faz parte (DAMASCENO, 2019). O método k-médias foi empregado em diversos trabalhos recentes de desenvolvimento de ciclos de conduções de carros (LIU *et al.*, 2018; PENG; ZHUANG; YANG, 2019; ZHAO *et al.*, 2020), ônibus (SHEN *et al.*, 2018) e inclusive com o método de micro-viagens (SUNDARKUMAR *et al.*, 2021).

Nesse trabalho, ele foi utilizado para agrupar todos os dados do diagrama fluxo-densidade em um, dois, três ou quatro grupos. Para verificar a situação em que o número de grupos é considerado otimizado, foi considerado o erro médio global (e_{global}^{PC}), que leva em consideração o erro médio dos parâmetros característicos em cada agrupamento k , equação 36.

$$e_{global}^{PC} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k e_i^{PC} \quad (36)$$

Para calcular o erro em cada grupo, algumas considerações foram feitas. O erro avaliado não é absoluto e nem relativo, pois ambos influenciam o resultado final em densidade de carros baixa e alta, respectivamente (KESTING; TREIBER, 2008). Para minimizar esse desvio, é utilizado o erro misto, no qual os PCs são divididos por parâmetros de referência: velocidade de referência ($v_{ref} = 10$ m/s), aceleração de referência ($a_{ref} = 1$ m/s²) e percentual de tempo de referência ($t_{ref} = 1\%$), dependendo da natureza do parâmetro. O erro médio em cada grupo considerou as médias de cada densidade avaliada em cada grupo (n_ρ) para os 10 parâmetros característicos avaliados, onde n_ρ varia de 0 a 110 carros km⁻¹ faixa⁻¹ em incrementos de 5 carros km⁻¹ faixa⁻¹, equação 37.

$$e_k^{PC} = \frac{1}{10} \frac{1}{n_\rho} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^{n_\rho} \frac{(PC_{i,j} - \overline{PC}_{i,j})}{PC_{ref}} \quad (37)$$

Também foram comparados os erros globais obtidos com o método de agrupamento k-médias para um, dois, três e quatro agrupamentos com o erro médio global obtido pelos integrantes do grupo de pesquisa LOST, que agruparam os dados baseados em sua experiência. Confere-se, desta forma, se o método das k-médias sempre produzirá resultado de menor erro mesmo sem considerar aspectos técnicos do problema.

4.5.3. Seleção das trajetórias utilizadas como dados no Markov

A seção anterior informa como se obtém o número de agrupamentos usados para representar as condições de tráfego. É necessário definir quais e quantos perfis de velocidade serão utilizadas em cada um dos grupos. Esses perfis de velocidade dos veículos são obtidos a partir do modelo calibrado.

Decidiu-se selecionar 100 perfis de velocidade para cada grupo, e essas trajetórias foram selecionadas de forma proporcional à ocorrência delas no diagrama fluxo-densidade. Em cada grupo foi utilizado um intervalo de densidade de 5 carros km^{-1} faixa $^{-1}$ para agrupar os dados, mas esse valor foi diferente em algumas regiões, como próximo da densidade crítica. O percentual de pontos escolhidos em cada faixa de densidade é a razão do número de pontos observados no diagrama fluxo densidade na faixa de densidade estudada sobre o total de pontos do grupo avaliado. Esse percentual é multiplicado por 100 e arredondado para o inteiro mais próximo.

4.5.4. Método da Cadeia de Markov e Monte Carlo para obtenção dos ciclos de condução

Nesta etapa foram aplicados dois métodos de forma consecutiva, o método da cadeia de Markov e o método de Monte Carlo. O método da cadeia de Markov foi utilizado para obtenção da Matriz de Transição de Probabilidades (MTP). Nesse trabalho foram empregados quatro MTPs, cada uma delas responsável por agrupar os resultados do veículo no instante de tempo anterior (aceleração, desaceleração,

cruzeiro ou repouso). Cada uma dessas quatro matrizes armazenou a velocidade e aceleração do veículo na respectiva situação.

Velocidades e acelerações foram agrupadas em classes $\Delta V = 1$ m/s e $\Delta a = 0,1$ m/s². Assim, há uma matriz bidimensional $T \in \mathbb{R}^{M \times N}$ com m linhas e n colunas, representando o número de classes das variáveis estudadas. A probabilidade P de que o sistema passe do estado atual $s_i \in S$ para um novo estado $s_j \in S$, denominado como p_{ij} é:

$$p_{ij} = P(X_{k+1} \in s_j \mid X_k = s_i). \quad (38)$$

E:

$$T = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Durante a importação das trajetórias no método da cadeia de Markov também foram avaliados os PCs de todos os veículos que compuseram o grupo importado, encontrando seu valor médio para todos os veículos nos instantes de tempo. Esses dados são relevantes para comparação dos ciclos gerados através do método Monte Carlo.

A construção do ciclo se iniciou a partir dos valores iniciais $V(0) = V$ e $a(0) = 0$. Essa decisão foi tomada, ao invés de considerar velocidade inicial igual a zero porque se o veículo está em condição de fluxo livre, ele não atinge a velocidade de zero durante sua simulação, gerando problemas numéricos no código devido à ausência de parâmetros na matriz. Após a definição dos parâmetros iniciais, o método consistiu em sortear um número aleatório (μ) entre 0 e 1 e comparar esse valor com a probabilidade acumulada da MTPs do estado do veículo.

Por exemplo, quando $t = 1$ s, o veículo anteriormente estava em condição de repouso, portanto o código selecionará essa MTP. Para todos os instantes de tempo, foi verificado em que velocidade o veículo se encontrava e em que situação o veículo estava (i.e., aceleração, desaceleração), sendo essa a linha da matriz onde a comparação de Monte Carlo foi efetuada. A partir da probabilidade acumulada, $V(t + 1)$ e $a(t)$ eram obtidos na condição onde $\mu \leq T_{C_i^V, C_i^a}(z^V, z^a)$ ocorria, e como informado

na fundamentação teórica, T é a MTP, C_i^V e C_i^a se referem às classes das variáveis e o parâmetro z representa o índice que foi selecionado. Neste trabalho, os valores foram agrupados em classes $\Delta V = 1$ m/s e $\Delta a = 0,1$ m/s², i.e. os dados de velocidade entre $0 \leq V < 1$ m/s são agrupados, e assim para $1 \leq V < 2$ m/s e sucessivamente; a mesma lógica se aplica às acelerações.

O ciclo que formado foi comparado aos PCs do grupo a partir tempo mínimo de 1200 s. Quando o desvio médio global é menor do que 4%, esse ciclo passa a ser considerado como o ciclo de condução representativo (CCR) do grupo. Caso o desvio do ciclo proposto seja maior do que 4% durante todo o tempo analisado, o ciclo é descartado após o tempo máximo de análise (1800 s) e o processo reiniciado. No apêndice B são apresentados fluxogramas que ilustram as relações entre todas as etapas do trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Essa seção é dividida em quatro subseções: 1) Obtenção do diagrama fundamental da via; 2) Calibração do modelo microscópico do tráfego, 3) Criação dos ciclos de condução representativos para a via e 4) Estudo da relação entre trajetórias e diagrama fundamental.

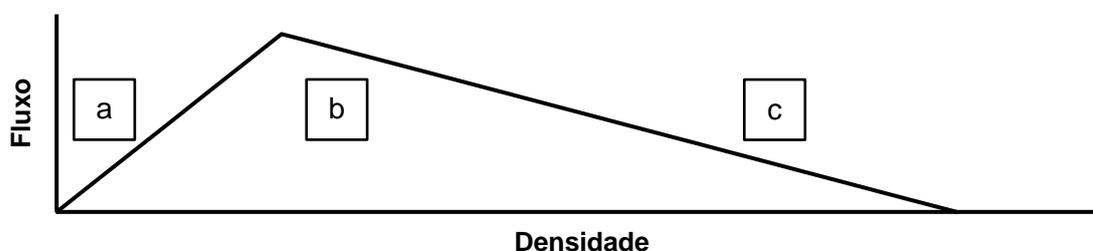
5.1. DETERMINAÇÃO DO DIAGRAMA FUNDAMENTAL

Nesse tópico estão descritos os resultados das etapas que vão da coleta dos dados de fluxo e densidade a partir da observação dos vídeos, obtenção do diagrama fluxo-densidade até a definição do diagrama fundamental (Figura 25).

5.1.1. Dispersão dos pontos de fluxo versus densidade da via

Durante a observação dos vídeos foi observado um padrão global para a via. Havia congestionamento na pista estudada (direção do subúrbio para o Centro, via à direita na Figura 26) apenas durante os horários matinais, aproximadamente das 7:30 h às 9:00 h. A condição é de tráfego livre após esse horário, e inclui outros momentos do dia em que poderiam ocorrer congestionamento como por volta de meio dia. Após às 16:30 h, não é possível observar o movimento dos veículos com precisão devido à ofuscação da câmera devido ao início do pôr do sol. Assim, é possível que haja maior congestionamento na via no início da noite, mas não foi possível de ser observado.

Figura 25 – Ilustração do diagrama fundamental com locais de fluxo a) livre, b) intermediário e c) congestionado



Fonte: O autor (2021)

Figura 26 – Exemplo do tráfego a) livre b) intermediário e c) congestionado. A área marcada corresponde ao trecho onde fluxo e densidade são analisados



Fonte: CTTU

O congestionamento apenas durante o horário matinal pode ser explicado pelo movimento pendular dos moradores, que saem para trabalhar e estudar durante a manhã e retornam às suas casas no decorrer do dia. Na Matriz Origem-Destino disponibilizada pelo Instituto da Cidade Pelópidas Silveira (ICPS), é possível verificar que o Bairro de Boa Viagem e a cidade de Jaboatão dos Guararapes (localizada ao sul de Recife) são as duas primeiras regiões em relação à origem de veículos individuais na RMR. Além disso, de acordo com a matriz, essas regiões são origem de pelo menos 30% dos veículos que vão aos bairros da Boa Vista, Joana Bezerra, Santo Antônio, São José e o Recife Antigo, os quais podem utilizar a Via Mangue em seu deslocamento (ICPS, 2020).

Na Tabela 11 estão a quantidade de minutos analisados a cada dia. Nos dois primeiros dias (30/09 e 01/10) a via foi analisada durante a manhã e tarde, obtendo-se mais pontos na condição de fluxo livre. Nesse momento da análise o fluxo é considerado livre quando o ponto de densidade observado é menor do que a densidade crítica.

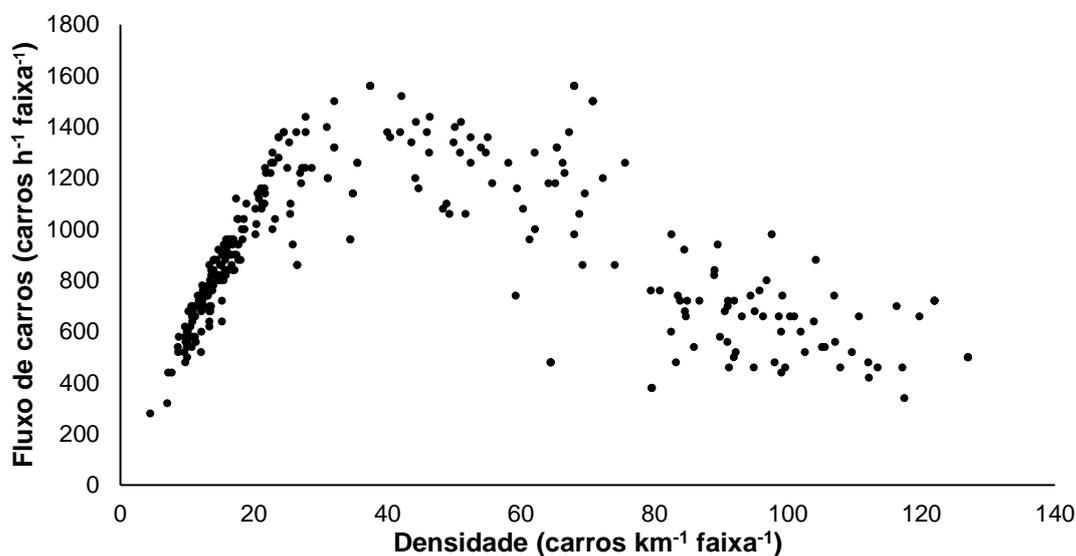
Tabela 11 – Minutos observados em fluxo livre e congestionado

Data	Minutos observados	Minutos em fluxo livre	Minutos em fluxo congestionado
30/09/2019	75	56	19
01/10/2019	90	65	25
02/10/2019	84	27	57
03/10/2019	23	8	19
Total	276	156	120

Como a maior quantidade de pontos obtidos nos primeiros dois dias foi na condição de tráfego livre, nos dias 02/10 e 03/10 a análise foi realizada durante o horário da manhã para coleta de mais pontos em fluxo congestionado. Ao final dos quatro dias, foram coletados 276 minutos apresentados na Figura 27, sendo 156 em

fluxo livre e os 120 restantes em fluxo congestionado. No Apêndice A estão apresentados os resultados para cada minuto avaliado.

Figura 27 – Fluxo em função da densidade observados na via

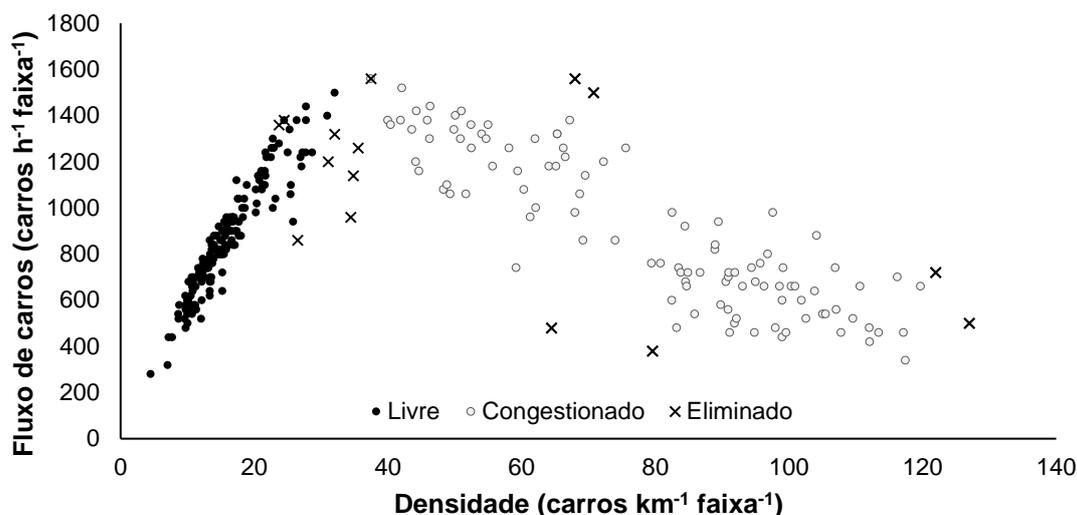


Fonte: O autor (2021)

Os 276 minutos (4 horas e 36 minutos) observados nesse trabalho constituem tempo acima da média de observação quando comparado a artigos publicados na área. Lan e Chang (2005) avaliaram três horas de vídeo em uma via no Taiwan. Lv *et al.* (2013) avaliaram o fluxo em uma via chinesa por 352 segundos. Tanimoto *et al.* (2015) e Fukuda *et al.* (2016) avaliaram o fluxo a cada 15 segundos por quatro dias em uma rodovia japonesa, mas não informaram o tempo total de análise. Guo, Wu e Zhu (2018) estudaram três vias na China por um total de 90 minutos.

Os dados presentes no diagrama fluxo-densidade (Figura 27) foram tratados para verificar pontos que poderiam ser considerados *outliers*. Foram considerados como *outliers* 15 pontos (nove da região de fluxo livre e seis do fluxo congestionado), que representa 5.5% dos dados obtidos. Seis dos pontos eliminados estão na região crítica, que será apresentada na calibração, e influenciam na regressão dos dados. Esse mesmo método, quando apresentado no trabalho do Zervas e Diamantopoulos (2009) também sugeriu remover cerca de 5% dos pontos.

Figura 28 – Pontos eliminados da análise a partir do método da distância de Cook



Fonte: O autor (2021)

5.1.2. Densidade de motos na via

Obteve-se uma densidade muito baixa de motos em todos momentos do dia. Enquanto a densidade de carros foi maior do que $100 \text{ carros km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$ por várias vezes, a maior densidade de motos verificada foi $13 \text{ motos km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$. Na média o valor foi $3,1 \text{ motos km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$. A partir da observação dos vídeos não foi possível definir um padrão ou motivo para variação do fluxo e densidade de motos durante o dia. Para o decorrer do estudo foi utilizado $\rho_{mot,sim}^{pis} = 10 \text{ motos km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$ como única densidade de motos. Além disso, decidiu-se calibrar todos os parâmetros das motos semelhante ao dos carros, com exceção da aceleração máxima que sempre será 50% maior do que a dos veículos de quatro rodas, e o comprimento que será de 2 m.

5.1.3. Diagrama fundamental da via observada

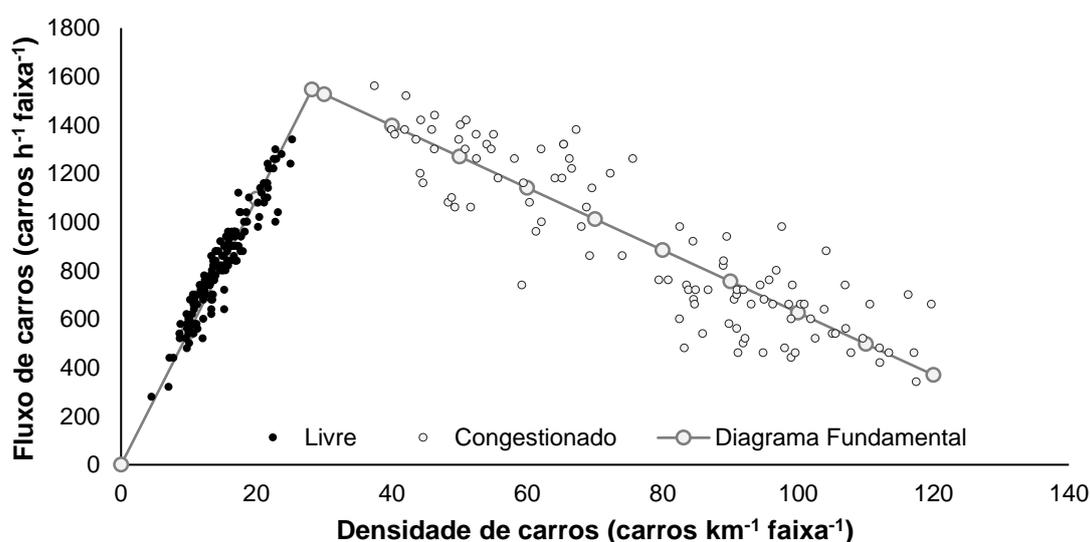
Os pontos de fluxo livre e congestionado presentes na Figura 28 foram processados obtendo duas retas: uma para representar o tráfego livre; e uma para representar o fluxo congestionado. As equações de fluxo (Q_{DF}^{livre}) e congestionado (Q_{DF}^{cong}) estão apresentadas nas equações 15 e 16 respectivamente. Nesta ocasião, o fluxo livre é válido abaixo da densidade crítica enquanto o fluxo congestionado é válido acima da densidade crítica ($\rho_{crit} = 28 \text{ carros km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$).

$$Q_{DF}^{livre} = 54,9\rho_{sim}^{pis} \quad (40)$$

$$Q_{DF}^{cong} = 1912,7 - 12,9\rho_{sim}^{pis} \quad (41)$$

A curva de fluxo livre considerou 143 pontos e teve coeficiente de regressão de 0,95, enquanto a curva de fluxo congestionado considerou 106 pontos e teve coeficiente de regressão de 0,88. O local de interseção das retas é o ponto crítico do diagrama fundamental. Esse ponto apresenta a capacidade (Q_{cap}) e a densidade crítica (ρ_{crit}^{pis}) do sistema estudado. Nesse estudo, $\rho_{crit} = 28$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$ e $Q_{cap} = 1547$ carros h^{-1} faixa $^{-1}$. O diagrama fundamental junto com os pontos utilizados para sua definição podem ser verificados na 0.

Figura 29 – Diagrama fundamental para o fluxo observado experimental



Fonte: O Autor (2021)

Nos diagramas de fluxo-densidade desse trabalho, a unidade do fluxo é carros h^{-1} faixa $^{-1}$, enquanto a densidade é carros km^{-1} faixa $^{-1}$. O fluxo máximo (capacidade) observado em nosso trabalho foi de 1560 carros h^{-1} faixa $^{-1}$. Comparando com outros trabalhos, o Highway Capacity Manual (HCM), um manual estadunidense que apresenta metodologias para estimar capacidade e nível de serviço em rodovias, informa que uma via com número de faixas e velocidade máxima da Via Mangue tem capacidade de 2000 ucp h^{-1} faixa $^{-1}$, onde ucp é unidade de carro de passeio.

A unidade de fluxo de veículos varia entre os trabalhos da área, e isso dificulta ou impossibilita a comparação de resultados. Lan e Chang (2005), Tanimoto *et al.*

(2015) e Fukuda *et al.* (2016) forneceram o fluxo máximo em veículos h^{-1} , mas não informam o número de faixas analisadas ou não fornecem a densidade em carros $km^{-1} faixa^{-1}$. Feng *et al.* (2015) obtiveram fluxo máximo de 1680 carros $h^{-1} faixa^{-1}$, Lv *et al.* (2013) encontraram aproximadamente 1800 carros $h^{-1} faixa^{-1}$, enquanto Das e Chattaraj (2019) estudaram tráfego heterogêneo e apresentaram capacidade de aproximadamente 2300 ucp $h^{-1} faixa^{-1}$. Conforme indicado no HCM, a capacidade varia conforme a configuração da via (e.g. ruas arteriais, rodovias de pista dupla expressas) e com a velocidade máxima, por isso o fluxo pode ser maior do que 2000 carros $h^{-1} faixa^{-1}$ em determinadas situações.

5.2. CALIBRAÇÃO DO MODELO MICROSCÓPICO DE TRÁFEGO

Antes de realizar a calibração, é realizada uma avaliação do tempo de simulação e número de repetições necessários para que os resultados sejam estáveis. Com a análise de sensibilidade, é definido se os parâmetros serão ou não calibrados, e a forma: localmente ou globalmente. Após a calibração, encontra-se o conjunto de parâmetros que melhor define o diagrama fundamental. Conclui-se validando os resultados do simulador comparando-os contra dados reais da mesma via.

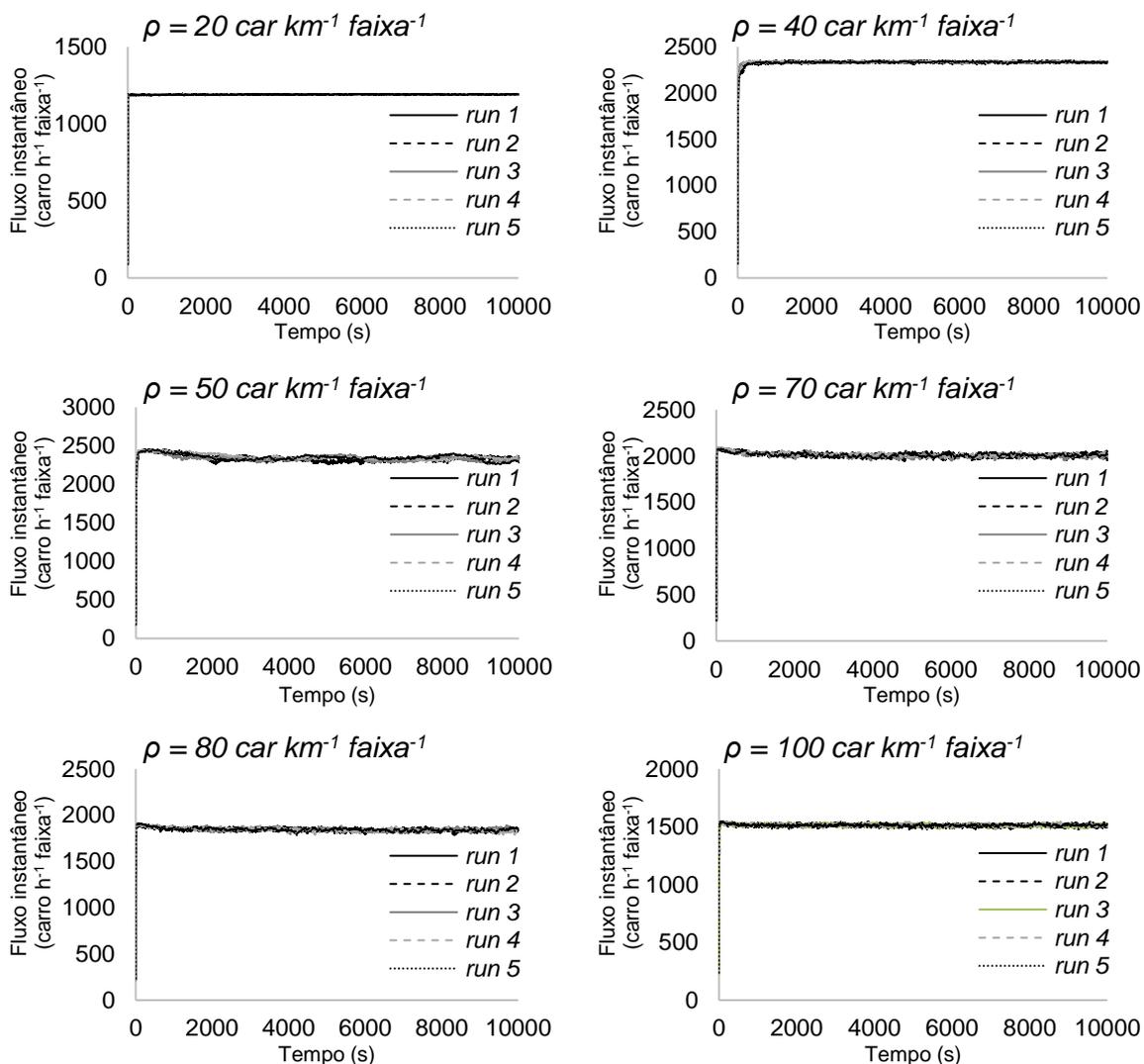
5.2.1. Experimentos computacionais sobre a simulação

Nesta etapa são discutidos os experimentos computacionais sobre o tempo de simulação do modelo de tráfego e são apresentadas as diferenças entre o fluxo médio na pista e no sensor. Deseja-se obter o intervalo de tempo de (Δt_d), de análise (Δt_a) e número de repetições (*runs*) que sejam capazes de reproduzir os resultados de fluxo de forma aceitável, com tempo computacional aceitável.

5.2.1.1. Avaliação do número de runs

Foi avaliado se os resultados de fluxo variavam quando diversas repetições foram realizadas, e depois foi decidido os intervalos de tempo que fornecem resultados coerentes. Na Figura 30 são exibidas cinco curvas de repetição (5 *runs*) para cada densidade avaliada.

Figura 30 – Fluxo instantâneo para diversas condições



Fonte: O autor (2021)

Verifica-se que em todos os casos de densidade, o comportamento do fluxo instantâneo foi semelhante, saindo do repouso e rapidamente alcançando uma região estacionária. Quando se avalia a variação dos resultados, o coeficiente de variação (razão entre desvio padrão e a média) quando foram realizadas 30 repetições foi sempre menor do que 0,6%, sendo esse valor obtido na condição $\rho_{sim}^{pis} = 50 \text{ carros km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$. Para os demais casos, os valores do coeficiente de variação tendem a zero, o que indica que houve pouca variação entre os resultados médios de fluxo.

Na Tabela 12, os resultados de fluxo médio encontrados na primeira simulação $Q_{sim,rep=1}^{pis}$ foram comparados com a média dos fluxos médios após 10 e 30 repetições

($\bar{Q}_{sim,rep=10}^{pis}$ e $\bar{Q}_{sim,rep=30}^{pis}$), para um conjunto maior de densidades. A diferença entre os fluxos médios esteve sempre abaixo de 1%, para quando há uma simulação e a média de 10 e de 30 repetições. Todos os fluxos simulados na Tabela 12 consideraram $\Delta t_{de} = \Delta t_{an} = 1800$ s, por razões explicadas adiante. A partir dessas observações foi considerado que é possível utilizar apenas uma simulação representar o fluxo médio na via de forma reproduzível.

Tabela 12 – Fluxo de carros na faixa em diferentes repetições

ρ_{sim}^{pis} (car km ⁻¹ faixa ⁻¹)	$Q_{sim,rep=1}^{pis}$ (car h ⁻¹ faixa ⁻¹)	$\bar{Q}_{sim,rep=10}^{pis}$ (car h ⁻¹ faixa ⁻¹)	Diferença	$Q_{sim,rep=1}^{pis}$ (car h ⁻¹ faixa ⁻¹)	$\bar{Q}_{sim,rep=30}^{pis}$ (car h ⁻¹ faixa ⁻¹)	Diferença
10	596	596	0.0%	596	596	0.0%
20	1191	1190	0.0%	1191	1190	0.0%
28	1662	1662	0.0%	1662	1662	0.0%
30	1779	1778	0.0%	1779	1778	0.0%
40	2335	2334	0.0%	2335	2335	0.0%
50	2360	2342	0.8%	2360	2336	1.0%
60	2168	2173	0.2%	2168	2173	0.2%
70	2010	2007	0.1%	2010	2008	0.1%
80	1848	1849	0.0%	1848	1847	0.0%
90	1676	1681	0.3%	1676	1683	0.4%
100	1517	1515	0.1%	1517	1516	0.1%
110	1347	1347	0.0%	1347	1347	0.0%

5.2.1.2. Avaliação do intervalo de tempo de descarte e de análise

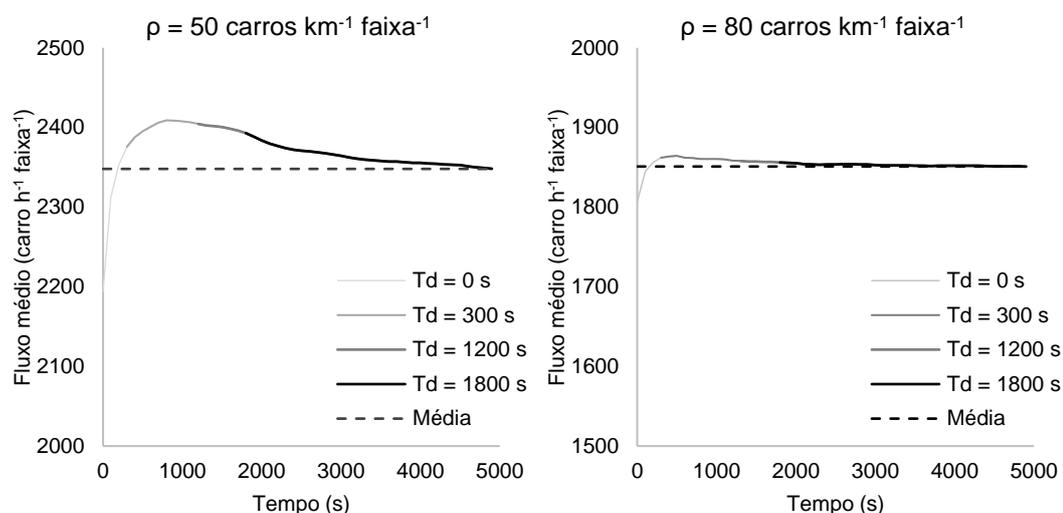
Além do número de repetições, foi necessário definir Δt_{de} e Δt_{an} para que cumpram as duas funções de prover um baixo tempo de simulação (t_s) e ser capaz de fornecer resultados reproduzíveis. A partir da abordagem descrita na metodologia, os resultados de Δt_{de} e Δt_{an} estão dispostos na Tabela 13, onde os valores apresentados são o maior tempo de Δt_{de} e Δt_{an} considerando cinco repetições utilizando o caso base.

Tabela 13 – Maior intervalo de tempo de descarte e tempo de análise em que o fluxo simulado está com 1% de diferença do fluxo médio pela primeira vez

ρ_{sim}^{pis} (carro km ⁻¹ faixa ⁻¹)	20	40	50	70	80	100
Δt_{de} (s)	100	700	800	200	100	100
Δt_{an} (s)	100	300	300	300	200	200

A partir da Tabela 13 verifica-se que $\Delta t_{de} = 800$ s e $\Delta t_{an} = 300$ s foram suficientes para fornecer um resultado de fluxo médio com erro máximo de 1%, quando comparado ao fluxo médio com um tempo de análise muito mais alto ($\Delta t_{de} = 1000$ s e $\Delta t_{an} = 9000$ s) A Figura 31 revela o comportamento do fluxo médio com a variação do tempo de descarte. É possível verificar que em ambos os casos o fluxo inicia com valor zero, ultrapassa a linha média, e move em direção à média. A densidade de 50 carros km⁻¹ faixa⁻¹ possuiu a maior variação no fluxo entre as estudadas, e foi colocada para representar o caso extremo de variação de fluxo.

Figura 31 – Fluxo médio em diferentes tempos de descarte



Fonte: O autor (2021)

A partir do resultado apresentado na Tabela 13 e Figura 31, e de mais observações realizadas, foi selecionado um intervalo de tempo de $\Delta t_{de} = \Delta t_{an} = 1800$ s. Esse valor maior para Δt_{de} e Δt_{an} foi selecionado porque durante o estudo foram avaliadas outras condições mais restritas, e esse conjunto de valores se comportou de forma razoável em todas as situações; mostrando ser um tempo de simulação considerado adequado.

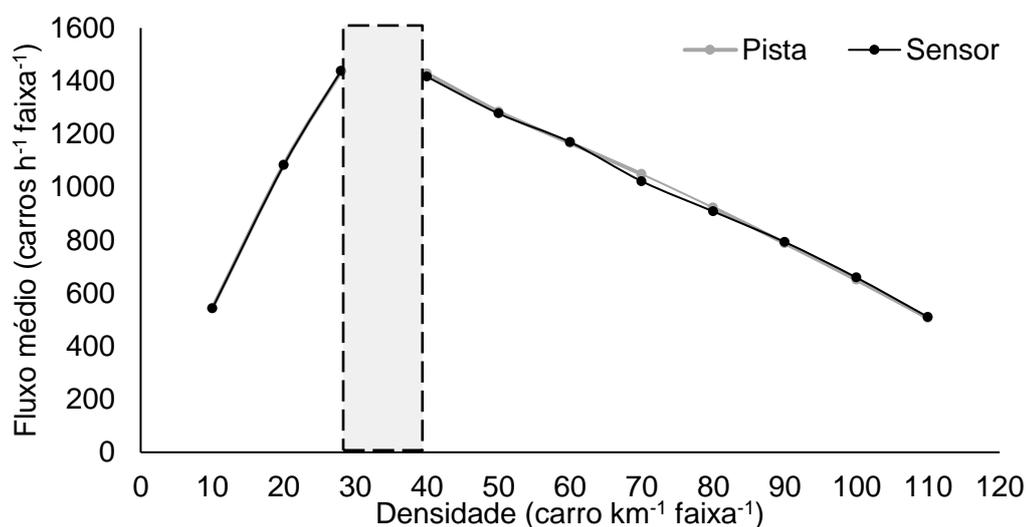
5.2.2. Discussão sobre os tipos de fluxos estudados

Nesta seção serão discutidos as semelhanças e diferenças nos aspectos relacionados ao fluxo. Na Tabela 14 são apresentadas as diferenças que existem durante a observação dos vídeos e nas considerações aplicadas na simulação.

Tabela 14 – Diferenças entre dados observados e simulados

Observação do vídeo	Simulação computacional
A pista é real e o veículo a percorre apenas uma vez	É uma pista oval, onde há condição periódica de contorno
Há física real no sistema	Há um conjunto de interações lógicas e matemáticas
Veículos com características e condições de manutenção diferentes	Os veículos possuem a mesma característica
Motoristas com perfis de agressividade diferentes	Todos seguem a mesma regra de distanciamento e aleatoriedade
A densidade é mensurada em uma região	A densidade pode ser mensurada na região ou na pista toda
O fluxo é mensurado no sensor	O fluxo pode ser mensurado no sensor ou na pista toda
O intervalo tempo de observação é de 60 segundos	O intervalo de tempo de análise é de 1800 segundos

Figura 32 – Fluxo médio na pista e no sensor



Fonte: O autor (2021)

Na Figura 32 há o fluxo médio na pista e no sensor para diversas densidades, com $\Delta t_{de} = \Delta t_{an} = 1800$ s. Para um longo intervalo de tempo, os resultados se comportam de forma semelhante e os dois fluxos representantes da via ou sensor

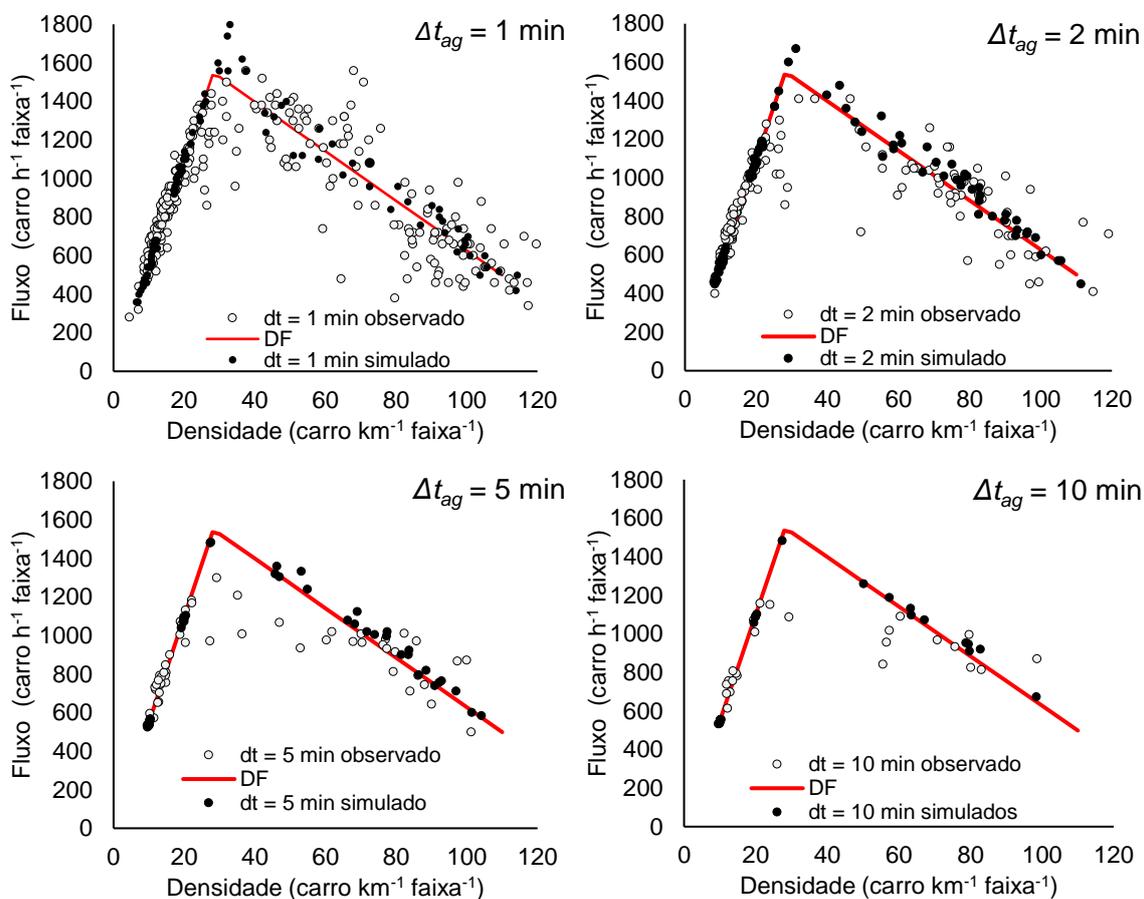
apresentam resultados semelhantes. Esse resultado não pode ser extrapolado para outras simulações de outras vias, necessitando-se realizar essa mesma análise para alcançar conclusão semelhante. A área que está marcada na Figura 32 será explicada durante a calibração.

Algumas variáveis de entrada do simulador influenciam no fluxo médio no sensor, por exemplo: tempo de agrupamento e comprimento do sensor. Em relação ao tempo de agrupamento do sensor, foi selecionado tempo de 1 minuto para agregar os dados seguindo padrões utilizados na grande maioria dos trabalhos. Como a maioria dos pontos foram observados de forma consecutiva, tratou-se os dados e também se obteve o valor médio do fluxo em intervalos de 2, 5 e 10 minutos. Na Figura 33 tem-se os gráficos do fluxo do sensor (observado no vídeo e simulado) e a curva do diagrama fundamental, considerando o modelo de tráfego calibrado.

A quantidade de pontos observados diminui proporcionalmente ao aumento do intervalo de tempo observado. São 276 pontos observados para $\Delta t_{ag} = 1$ minuto, 136 pontos para $\Delta t_{ag} = 2$ minutos, 53 pontos para $\Delta t_{ag} = 5$ minutos e 24 pontos para $\Delta t_{ag} = 10$ minutos. Nos dados simulados, o número de pontos plotados respeita a proporcionalidade da distribuição da densidade, mas o valor varia em função do arredondamento. Os pontos simulados em todos os intervalos de tempos possuem dispersão menor (em relação ao diagrama fundamental) quando comparados aos dados obtidos de forma observada. Isso pode ocorrer porque o modelo é calibrado e já considerou todos os tratamentos para remover pontos outliers, diminuindo o erro em relação ao DF.

A partir do disposto na Tabela 14 que exhibe diferenças entre o sistema real e o modelo analisado, e os resultados obtidos na Figura 33 que consideram as condições do sensor e dos tempos de agrupamento, verifica-se que no presente estudo não há prejuízo utilizar a curva de fluxo do sensor ou fluxo na via, visto que os resultados se aproximam e produzem erro que não é significativo para o decorrer da análise. Para algum outro trabalho que possa ser executado que considere utilizar essa abordagem, é recomendado conferir esses passos antes de definir os valores de fluxo que serão empregados.

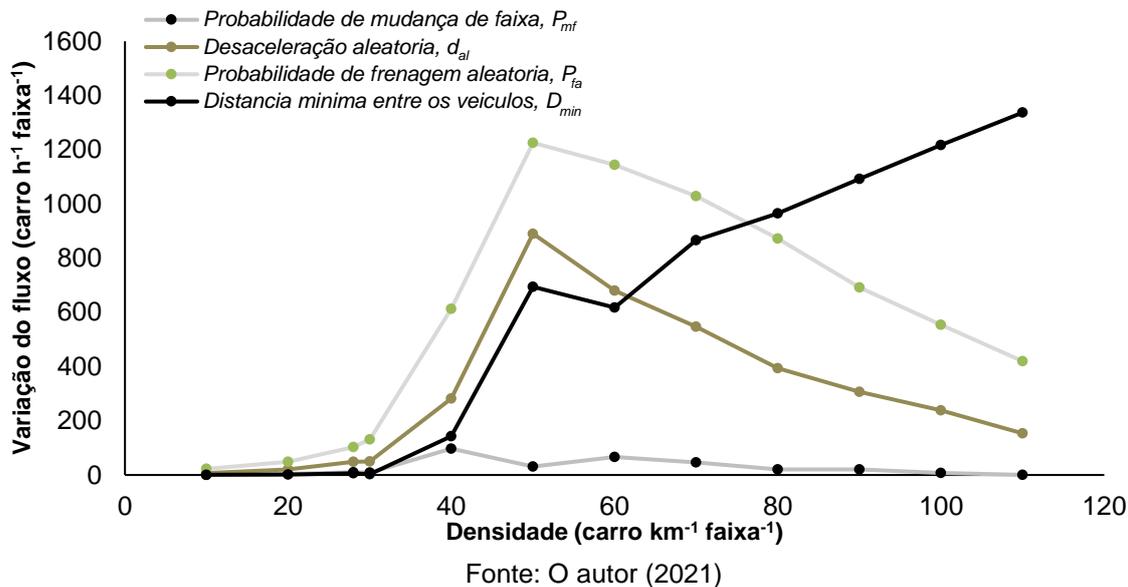
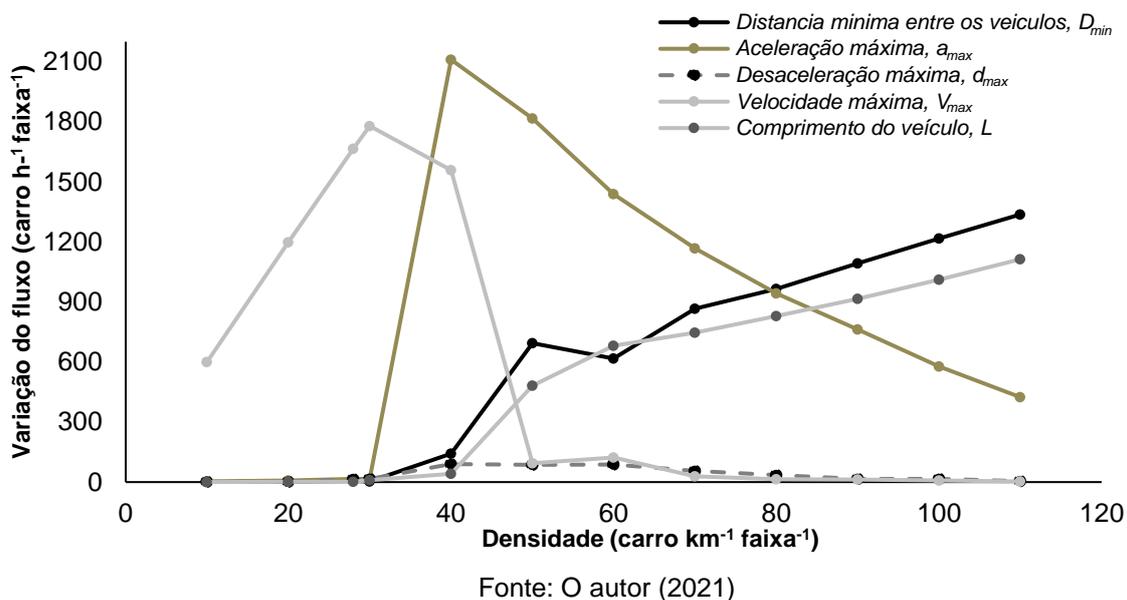
Figura 33 – Fluxo médio de veículos em diferentes intervalos de tempo



Fonte: O autor (2021)

5.2.3. Análise de sensibilidade do fluxo

A Figura 34 e a Figura 35 mostram a variação do fluxo de carros na pista (Q_{sim}^{pis}) a partir da alteração dos parâmetros de entrada como descritos na Tabela 8.

Figura 34 – Análise de sensibilidade do fluxo para P_{mf} , d_{al} , P_{fa} e D_{min} Figura 35 – Análise de sensibilidade do fluxo para D_{min} , a_{max} , d_{max} , V_{max} e L 

Nesses casos foi decidido não calibrar a variável julgada mais compreensível de ser determinada e calibrar a variável que apresenta maior incerteza. No caso 1 ficou determinado que o veículo apresenta $d_{al} = 1,0 \text{ m/s}^2$ e varia-se P_{fa} , que é um parâmetro onde não se encontrou um valor base na literatura. No caso 2, foi decidido variar a D_{min} e manter o comprimento $L = 4.10 \text{ m}$, que é o valor médio da frota nacional baseado em um estudo realizado pelo grupo de pesquisa. Esse valor é o valor de

comprimento aproximado dos novos veículos *hatches* (ex.: GM Onix, Renault Sandero e Peugeot 208 – modelos 2021).

Também há outro critério para não calibração de um parâmetro, que é se o mesmo variar pouco o fluxo ao longo da densidade. O parâmetro que se enquadrou nesse caso foi a probabilidade de mudança de faixa (P_{mf}) Variando P_{mf} entre 0% a 10%, não foi verificada variação significativa do fluxo quando comparado aos demais parâmetros. Nesse caso, foi considerado $P_{mf} = 1,1\%$ (Guo et al, 2018).

Outro parâmetro que apresentou pouca influência no fluxo foi a desaceleração máxima d_{max} , como também observado por Ciuffo, Punzo e Torrieri (2009). Entretanto esse parâmetro foi calibrado visto que o outro parâmetro de desaceleração (aleatória) foi considerado fixo. Na Tabela 15 está a influência da variação do fluxo dos parâmetros de entrada em todas as densidades de carros avaliadas.

Tabela 15 – Influência dos parâmetros característicos no fluxo

	Densidade de carros, ρ_{sim}^{pis} (carros km ⁻¹ faixa ⁻¹)											
	10	20	28	30	40	50	60	70	80	90	100	110
V_{max}	96%	95%	92%	91%	35%	2%	4%	1%	1%	0%	0%	0%
D_{min}	0%	0%	0%	0%	3%	18%	18%	28%	34%	42%	51%	61%
a_{max}	1%	1%	1%	1%	47%	46%	42%	37%	33%	30%	24%	19%
P_{fa}	3%	4%	6%	7%	14%	31%	34%	33%	31%	27%	23%	19%
d_{max}	0%	0%	1%	1%	2%	2%	3%	2%	1%	1%	1%	0%
Maior peso	V_{max}				a_{max}				D_{min}			
Ordem	1				3				2			

Como informado na metodologia, os parâmetros foram calibrados localmente, na região em que apresentam maior sensibilidade, em ordem decrescente de influência. Após a calibração dos parâmetros locais, a calibração global foi efetuada considerando os parâmetros remanescentes. Dessa forma, obtidos pela 0 temos a seguinte ordem de calibração:

- 1º. Calibração local: V_{max} , velocidade máxima ($10 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 30$)
- 2º. Calibração local: D_{min} , distância mínima entre os veículos ($80 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 110$)
- 3º. Calibração local: a_{max} , aceleração máxima ($40 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 70$)
- 4º. Calibração global: P_{fa} , probabilidade de frenagem aleatória ($10 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 110$)
- 5º. Calibração global: d_{max} , desaceleração máxima ($10 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 110$)

5.2.4. Calibração dos parâmetros

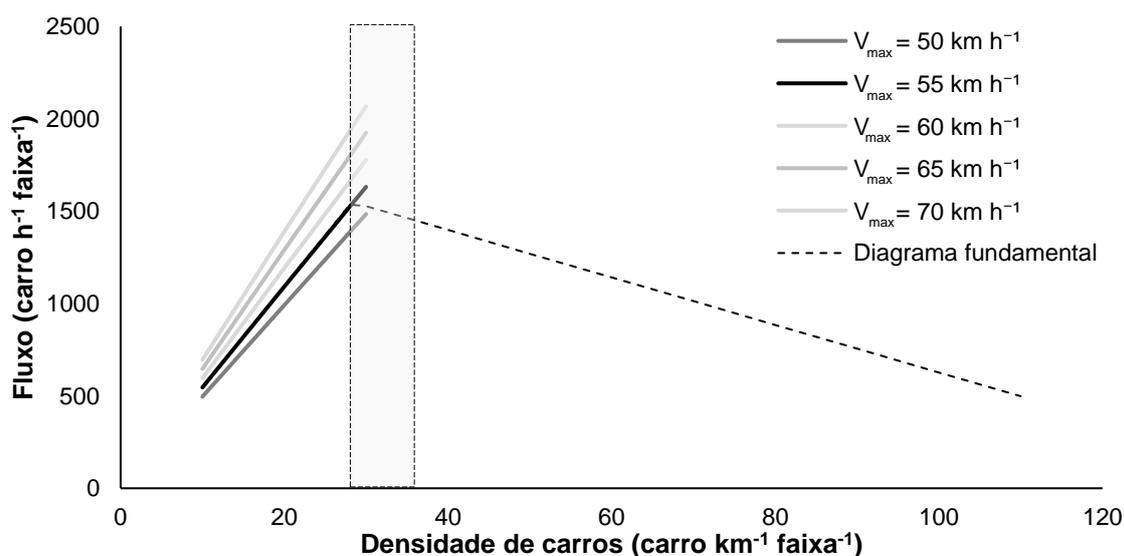
A calibração iniciou variando o parâmetro velocidade máxima (V_{max}) na região de densidade $\rho_{sim}^{pis} = \{10, 20, 28\}$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$. A calibração foi realizada nas velocidades exibidas na Tabela 16, que também exhibe os erros médios obtidos para o fluxo (\bar{e}_{fluxo}), a demanda energética veicular (\bar{e}_{DEV}) e o erro médio (\bar{e}) composto de forma ponderada pelo fluxo e DEV .

Tabela 16 – Condições de calibração inicial da velocidade máxima

V_{max} (km h $^{-1}$)	50	55	60	65	70
\bar{e}_{fluxo}	10,8%	0,7%	9,3%	19,3%	29,3%
\bar{e}_{DEV}	2,6%	9,8%	17,3%	25,2%	34,6%
\bar{e}	8,7%	3,0%	11,3%	20,8%	30,6%

A Figura 36 exhibe as curvas de velocidade obtidas no processo de calibração. Observa-se que nas figuras da etapa de calibração há uma região marcada, na região $29 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 39$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$. Os resultados nesta região não foram considerados na calibração porque foi verificado instabilidade nos resultados de fluxo. Um breve estudo para compreender o comportamento das curvas é exibido adiante, mas uma completa abordagem e compreensão do fenômeno é sugerida para trabalhos futuros.

Figura 36 – Curvas de calibração para a velocidade máxima



Fonte: O Autor (2021)

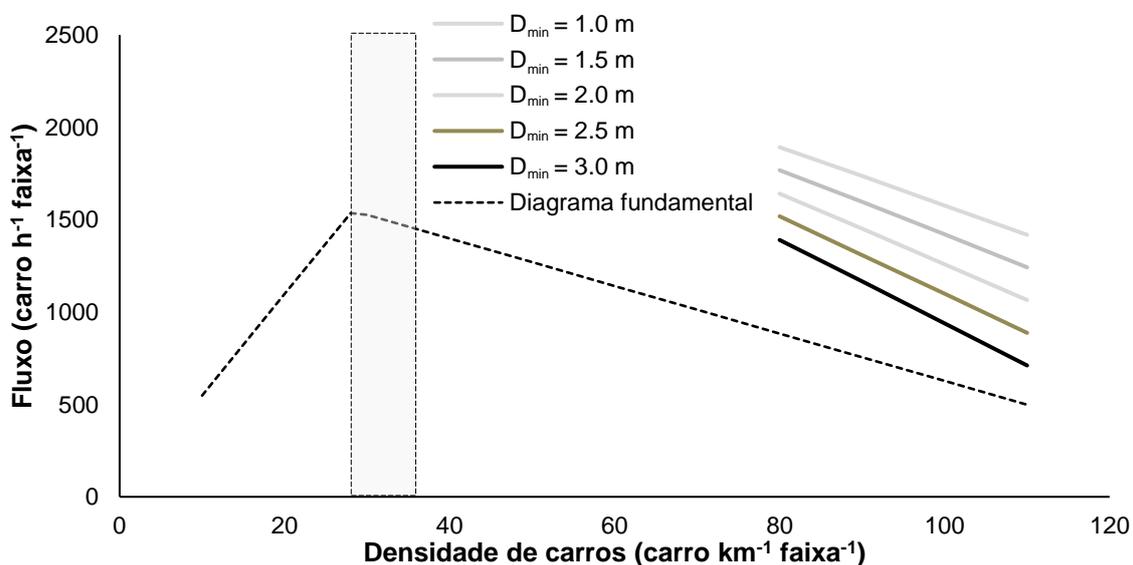
Na Figura 36 e Tabela 16 é possível verificar que a condição onde houve menor erro médio foi $V_{max} = 55$ km/h. A velocidade máxima permitida na via estudada é de 60 km/h, e o diagrama fundamental indica que a maioria dos veículos respeitam essa velocidade. O fato de a velocidade máxima ser cumprida pode ser justificado pela existência de câmeras de fiscalização que monitoram o fluxo e da existência de radares que aplicam multas. Foi analisado se outras velocidades máximas próximas de 55 km/h forneceriam erro médio menor, mas como pode ser visto na Tabela 17, $V_{max} = 55$ km/h teve menor erro global.

Tabela 17 – Condições de calibração final da velocidade máxima

V_{max} (km h ⁻¹)	54	55	56	57	58
\bar{e}_{fluxo}	2,7%	0,7%	1,3%	3,3%	5,4%
\bar{e}_{DEV}	9,0%	9,8%	11,3%	13,2%	14,7%
\bar{e}	4,3%	3,0%	3,8%	5,8%	7,7%

A segunda variável calibrada localmente foi a distância mínima entre os veículos (D_{min}) nas condições $\rho_{sim}^{pis} = \{80, 90, 100 \text{ e } 110\}$ carros km⁻¹ faixa⁻¹. Essa variável é responsável por informar o espaço entre veículos e afeta o fluxo nas condições de alta densidade. A variável D_{min} influencia diretamente o cálculo da velocidade de segurança (Equação 06). A D_{min} é a mesma para todas as densidades avaliadas nesse estudo. É possível ver os casos avaliados na Tabela 18 e o erro para o fluxo obtido em cada situação. Nessa situação não foi avaliado o erro relativo à DEV, que é avaliado apenas quando $\rho_{sim}^{pis} = 10$ carro km⁻¹ faixa⁻¹.

Figura 37 – Curvas de calibração para a distância mínima entre os veículos



Fonte: O autor (2021)

Tabela 18 – Condições de calibração para a distância mínima

D_{min} (m)	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
\bar{e}_{fluxo}	98,6%	83,3%	67,7%	52,3%	36,8%

Na Figura 37 as curvas ficam distantes do diagrama fundamental, e aumentando D_{min} a curva tende a convergir na direção do diagrama fundamental. Para que a curva tenha o menor erro possível, seria necessário ultrapassar o valor máximo de D_{min} proposto para o estudo, e isso não foi realizado. Dessa forma $D_{min} = 3,0$ m foi selecionado nessa etapa.

O terceiro parâmetro e último calibrado de forma local foi a aceleração máxima (a_{max}). Ela foi calculada nas densidades intermediárias ($40 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 70$) em duas etapas, e os valores usados inicialmente estão na Tabela 19. O resultado para a primeira etapa da calibração estão na Figura 38. Com exceção de $0,50$ m/s², os demais parâmetros ficaram demasiadamente separados do diagrama fundamental e com alto erro médio. Para trazer a curva para mais próximo ao diagrama fundamental, foi realizada uma segunda rodada de calibração com valores mais próximos a $0,50$ m/s². O resultado final pode ser visto na Tabela 20 e Figura 39 onde foi selecionado $a_{max} = 0,40$ m/s².

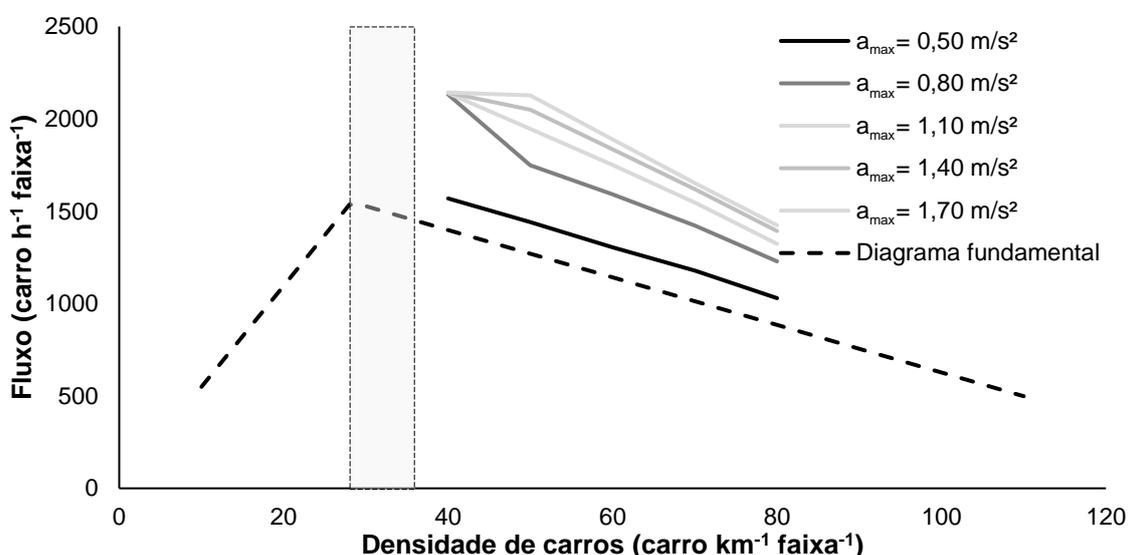
Tabela 19 – Condições iniciais de calibração para a aceleração

a_{max} (m/s ²)	0,50	0,80	1,10	1,40	1,70
\bar{e}_{fluxo}	16,7%	49,8%	61,5%	68,2%	72,2%

Tabela 20 – Condições finais de calibração para a aceleração

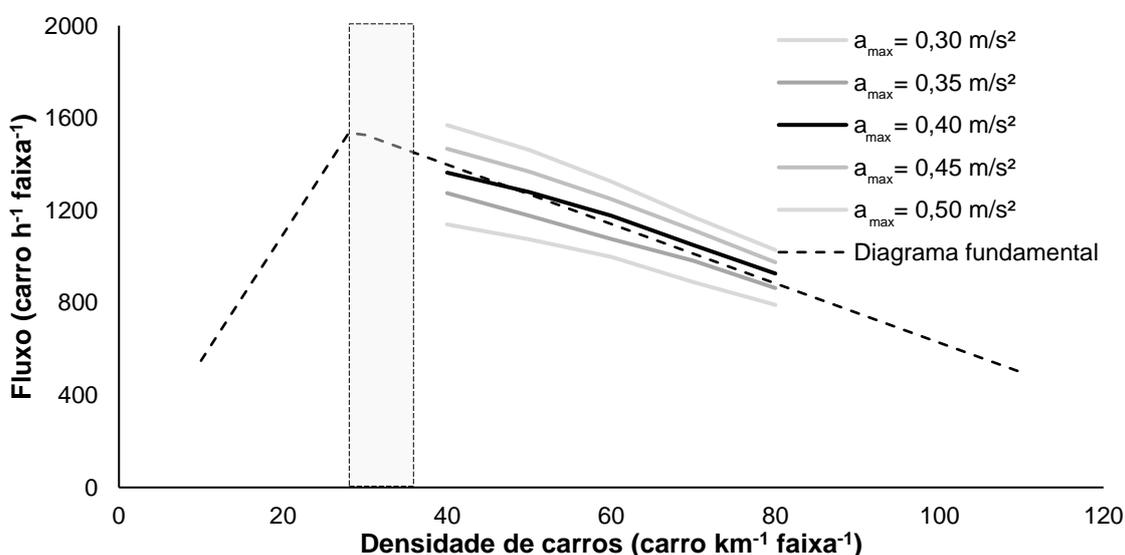
a_{max} (m/s ²)	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
\bar{e}_{fluxo}	16,8%	6,9%	3,3%	9,5%	17,3%

Figura 38 – Curva inicial de calibração para a aceleração máxima



Finalizada a calibração local dos parâmetros, os dois parâmetros remanescentes (P_{fa} e d_{max}) foram calibrados de forma global. O primeiro dos parâmetros globais calibrado foi a probabilidade de frenagem aleatória (P_{fa}), cujo valor base foi 10%. Isso é, a cada instante de tempo o veículo tem 10% de probabilidade de ter sua velocidade reduzida em 1 m/s. A frenagem aleatória é responsável por representar uma distração do motorista, e também para evitar que os veículos fiquem com o comportamento de vagões em um trem caso não exista aleatoriedade no sistema (Meng *et al.*, 2007).

Figura 39 – Curva final de calibração para a aceleração máxima



Fonte: O autor (2021)

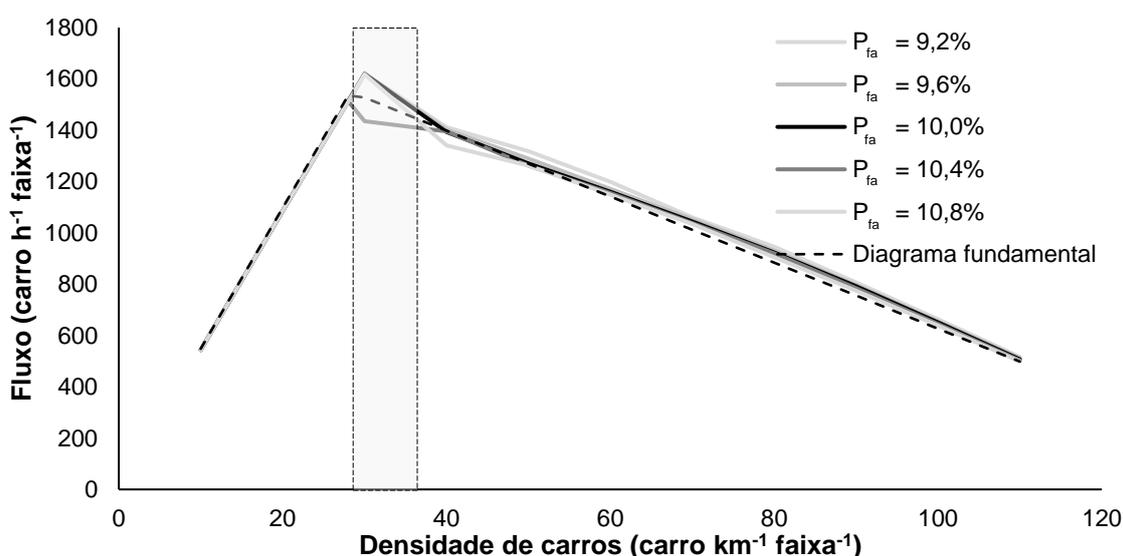
Tabela 21 – Condições finais de calibração para a probabilidade de frenagem aleatória

P_{fa}	9,2%	9,6%	10,0%	10,4%	10,8%
\bar{e}_{fluxo}	3,4%	2,4%	1,9%	1,7%	1,8%
\bar{e}_{DEV}	6,0%	6,8%	7,5%	8,6%	9,0%
\bar{e}	4,1%	3,5%	3,3%	3,4%	3,6%

A calibração para P_{fa} foi feita em duas etapas. A primeira considerou P_{fa} entre 8% e 16%; nessa situação, foi observado que $P_{fa} = 10\%$ fornecia o menor valor de erro médio. Outra análise foi realizada em um intervalo mais estreito de valores mostrado na Tabela 21. Na segunda análise o menor erro global também foi obtido quando $P_{fa} = 10\%$. As curvas de calibração estão na Figura 40.

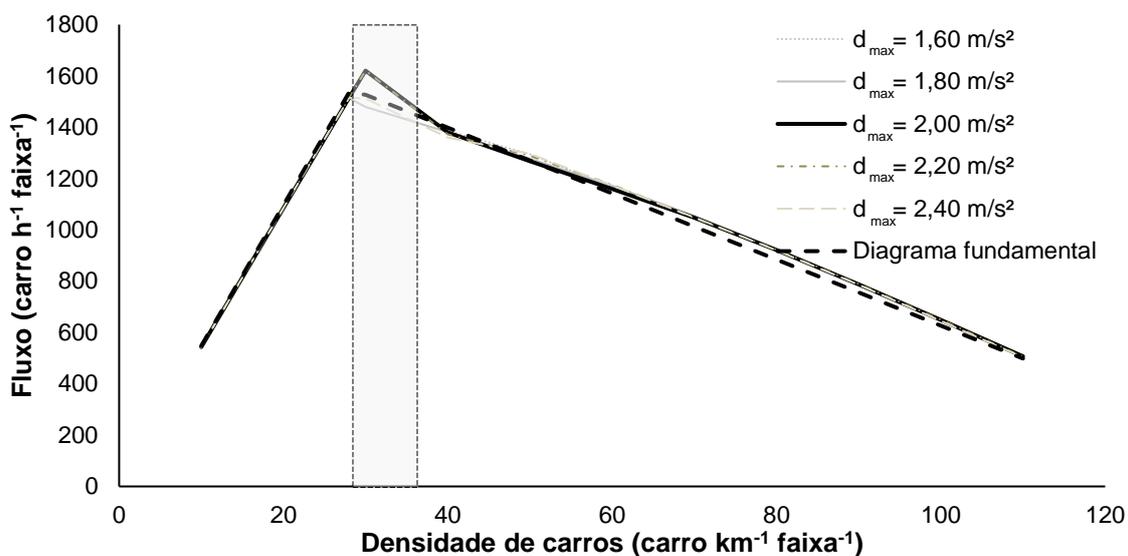
A partir desse ponto é possível verificar o comportamento irregular das curvas quando estão na região sombreada da figura, as quais não convergem para o padrão triangular esperado. Na última etapa da calibração foi realizada para a desaceleração máxima (d_{max}). O menor erro global ($\bar{e} = 3,4\%$) foi encontrado para o caso com $d_{max} = 2.0 \text{ m/s}^2$ (Tabela 22 e Figura 41), mas todas as situações apresentam valor de erro médio próximo, havendo sobreposição das curvas.

Figura 40 – Curva de calibração para a probabilidade de frenagem aleatória



Fonte: O autor (2021)

Figura 41 – Curva de calibração para a desaceleração máxima



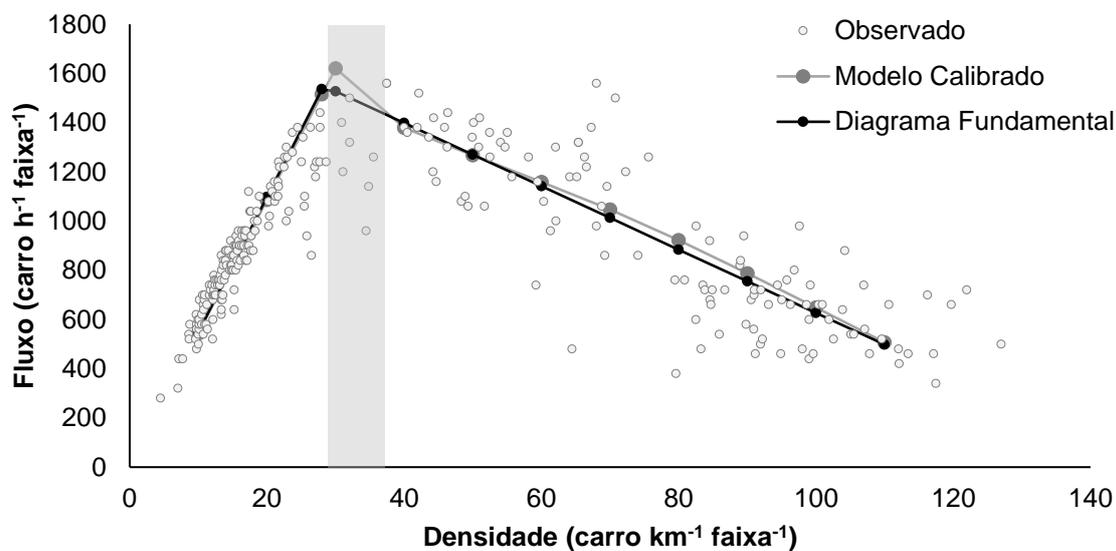
Fonte: O autor (2021)

Tabela 22 – Condições finais de calibração para a desaceleração máxima

d_{max} (m/s ²)	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
\bar{e}_{fluxo}	2,4%	2,3%	2,0%	2,3%	2,4%
\bar{e}_{DEV}	7,9%	7,5%	7,5%	7,5%	7,5%
\bar{e}	3,7%	3,6%	3,4%	3,6%	3,7%

A Figura 42 exibe os pontos coletados a partir da observação da via, o diagrama fundamental e a curva com o modelo de tráfego calibrado. O erro quando comparando o fluxo dos veículos foi de 2,0%, e quando se compara o VDE é de 7,5% para a condição $\rho_{sim}^{pis} = 10$ carros km⁻¹ faixa⁻¹. Os parâmetros que calibraram o modelo são apresentados na Tabela 23.

Figura 42 – Pontos observados, diagrama fundamental e modelo calibrado



Fonte: O autor (2021)

Tabela 23 – Valores dos parâmetros de entrada no modelo calibrado

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
Comprimento do Veículo, L	4.1 m

5.2.4.1. Zona crítica encontrada durante a calibração

Durante a calibração global dos parâmetros de entrada, foi verificado que na região $29 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 39$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$ os valores não convergiam para o formato triangular esperado para o diagrama fundamental. Para investigar o comportamento do fenômeno, foi analisado o Q_{sim}^{pis} após um conjunto de simulações variando o intervalo de tempo de análise simulado Δt_a e o número de repetições (*rep*). Deseja-se verificar se há convergência se utilizar um intervalo de tempo muito maior de análise e se há convergência se considerar o fluxo médio de várias repetições. As densidades avaliadas na zona crítica foram, em carros km^{-1} faixa $^{-1}$:

$$\rho_{sim}^{pis} = \{25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40\}$$

No Quadro 4 são mostrados os intervalos de tempo avaliados para diferentes repetições (*rep*). Nos casos 2 e 3, onde se tem mais do que uma repetição, é considerado o fluxo médio da via para cada densidade avaliada.

Quadro 4 – Intervalo de tempo de análise para diversas repetições na região crítica

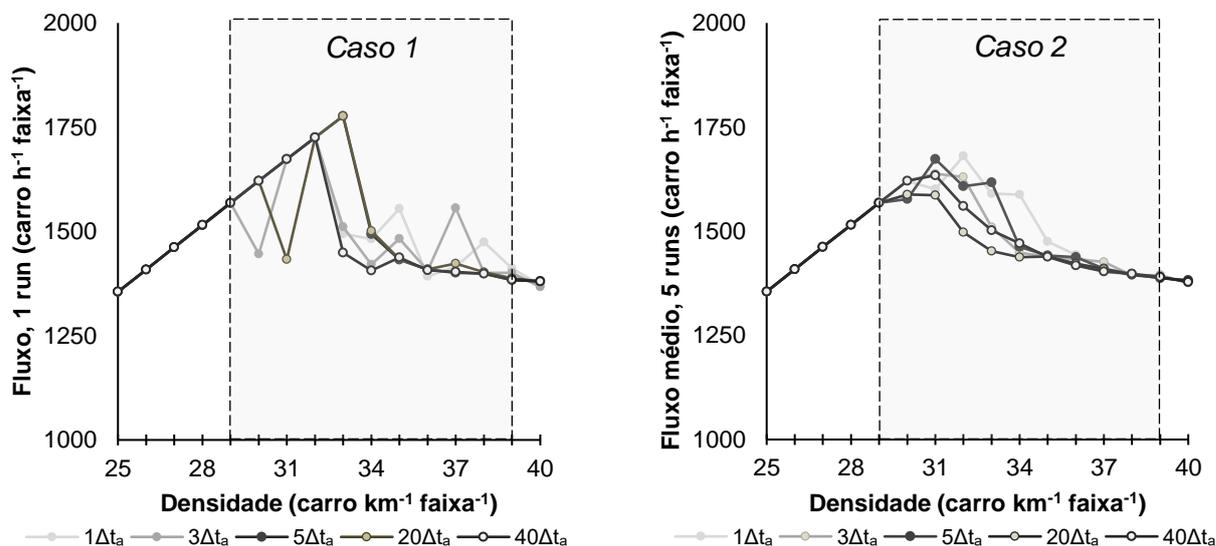
CASO 1 – <i>rep</i> = 1 :	$1\Delta t_{an}$	$3\Delta t_{an}$	$5\Delta t_{an}$	$20\Delta t_{an}$	$40\Delta t_{an}$
CASO 2 – <i>rep</i> = 5 :	$1\Delta t_{an}$	$3\Delta t_{an}$	$5\Delta t_{an}$	$20\Delta t_{an}$	$40\Delta t_{an}$
CASO 3 – <i>rep</i> = 20 :	$1\Delta t_{an}$	$3\Delta t_{an}$	$5\Delta t_{an}$		

As densidades (ρ_{sim}^{pis}) foram avaliadas em três casos diferentes: No caso 1, o fluxo de veículos (Q_{sim}^{pis}) foi avaliado em cinco intervalos de tempo de análise ($\Delta t_{an} = 1800$ s). O objetivo é verificar se aumentando Δt_{an} haveria convergência dos valores. No caso 2, se considerou a média dos fluxos (Q_{sim}^{pis}) obtidos em cinco repetições para cada Δt_a exibido no Quadro 4. No caso 3 considerou a média de 20 repetições, mas nesse cenário houve menos Δt_a avaliados, devido ao alto custo computacional. Nos casos 2 e 3 avalia-se se houve convergência aumentando o número de repetições, e o intervalo de tempo analisado.

A Figura 43 mostra resultados para os casos 1 e 2. Mesmo aumentando o intervalo de tempo de análise até $40 \Delta t_{an}$ ($40 \cdot 1.800$ s = 720.000 s = 200 h) não foi possível obter uma curva com o formato bi linear, e continuou havendo dispersão dos

pontos na região estudada. No caso 2 verificou-se que nos mesmos Δt_{an} , a curva diminui sua dispersão, mas não converge para o formato desejado.

Figura 43 – Fluxo de carros na via em várias condições de repetições e intervalos de tempos de análise – Caso 1: 1 repetição; Caso 2: média de 5 repetições



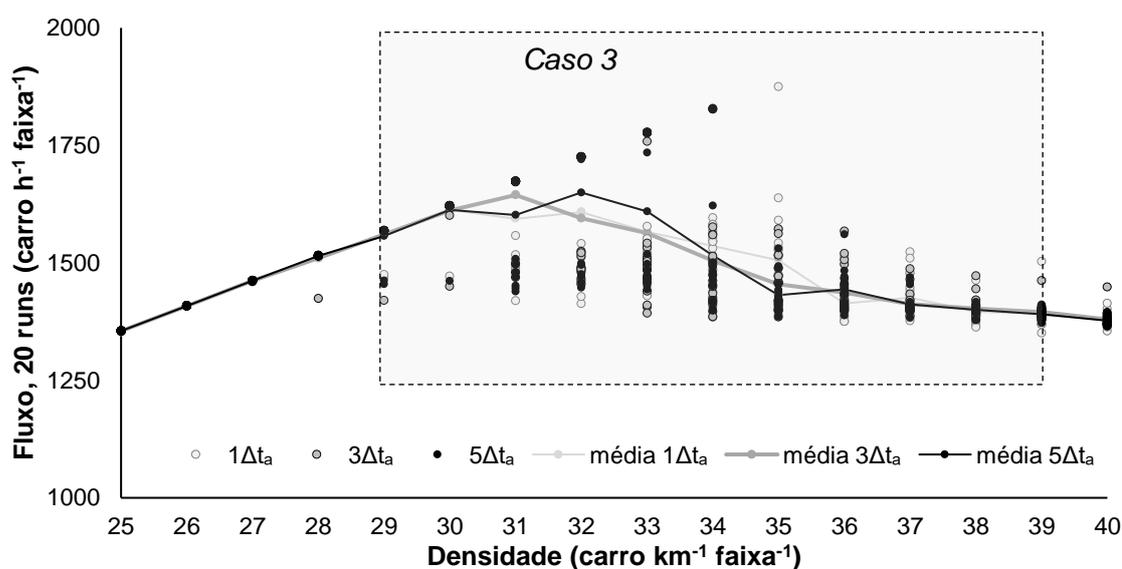
Fonte: O autor (2021)

No caso 3 verificou-se o comportamento de 20 repetições para os intervalos de $1\Delta t_a$, $3\Delta t_a$, e $5\Delta t_a$. A Figura 44 mostra como os valores de fluxo obtidos em cada uma das 20 repetições são dispersos (os pontos no gráfico) e a curva (que representa o valor de fluxo médio) para cada condição avaliada. A curva começou a apresentar padrão irregular na densidade $\rho_{sim}^{pis} = 30$ carros km^{-1} faixa⁻¹ voltando a convergir após $\rho_{sim}^{pis} = 37$ carros km^{-1} faixa⁻¹. Não foi possível obter conclusões a partir das curvas obtidas (e.g., se a curva em $40\Delta t_a$ tem fluxo menor do que as demais).

Quando avaliando condições macroscópicas, Seo *et al.* (2017) propuseram um diagrama fundamental onde a densidade crítica (ρ_{crit}) foi de 28,8 veículos km^{-1} . Para verificar a densidade crítica, velocidade máxima e capacidade, mantiveram as mesmas condições iniciais, realizaram 500 iterações e obtiveram valores de ρ_{crit} entre 25 e 33 veículos km^{-1} , com coeficiente de variação de 4,8%. Avaliando ρ_{crit} em trabalhos que usaram vídeos, Lan e Chang (2005) obtiveram vários diagramas fundamentais considerando as condições heterogêneas em seu modelo autômato celular, com ocupação crítica da via (*i.e.*, percentual de células ocupadas da via) entre

aproximadamente 15% a 40% (cerca de 16,5 a 44 carros km^{-1} faixa $^{-1}$ em uma conversão direta com a densidade máxima de 110 carros km^{-1} faixa $^{-1}$). Lv *et al.* (2013) e Das e Chattaraj (2019) estudaram o modelo microscópico com diversas situações diferentes, e ambos obtiveram ρ_{crit} variando entre 30 a 40 veículos km^{-1} faixa $^{-1}$.

Figura 44 – Fluxo para diversas condições de tempo em 20 repetições



Fonte: O autor (2021)

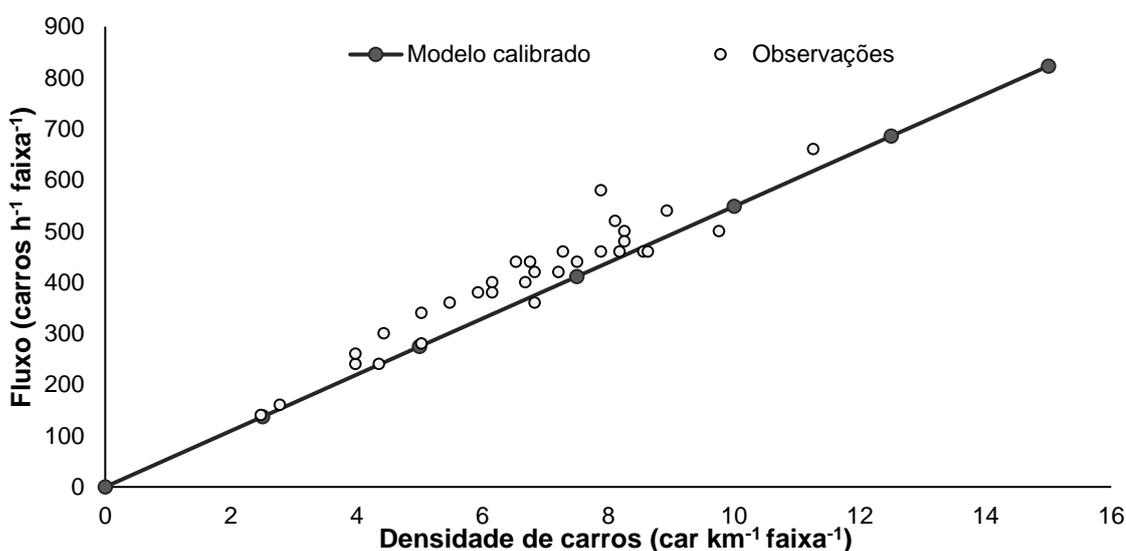
A dificuldade em observar os pontos na região crítica é conhecida desde a década de 1950. Lighthill e Whitham (1955) comentaram que pontos na condição crítica não são frequentemente observados, e isso influencia na curva final visto que a interpolação das curvas é difícil quando não há pontos na região intermediária. Kerner, Klenov e Wolf (2002) comentaram que o fluxo em rodovias é livre ou congestionado, mas que o diagrama fundamental pode ser dividido em três fases distintas: fluxo livre, fluxo sincronizado e amplo congestionamento em movimento. Neto *et al.* (2011) comentaram que a uma fase intermediária entre fluxo livre e congestionado é influenciada por parâmetros difíceis de serem mensurados, como a direção defensiva dos motoristas.

A partir das observações e do comportamento complexo verificado no sistema, foi decidido não considerar os valores de fluxo na região de densidade crítica, mas o único ponto de densidade estudado que está na região é $\rho_{sim}^{pis} = 30$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$. Uma abordagem mais detalhada para a compreensão do comportamento do veículo na densidade crítica é sugerida para trabalhos futuros.

5.2.5. Validação dos dados

Os resultados de fluxo e densidade obtidos a partir do simulador microscópico calibrado foram comparados com os dados coletados da mesma via no dia 23/06/2020 entre às 14 e 16 h. Nesse dia também houve um teste prático na Via Mangue, obtendo-se a velocidade instantânea de veículos equipados com GPS. A Figura 45 mostra o fluxo na via Q_{exp}^{sen} para as observações a cada minuto e a curva do modelo calibrado.

Figura 45 – Validação do modelo calibrado



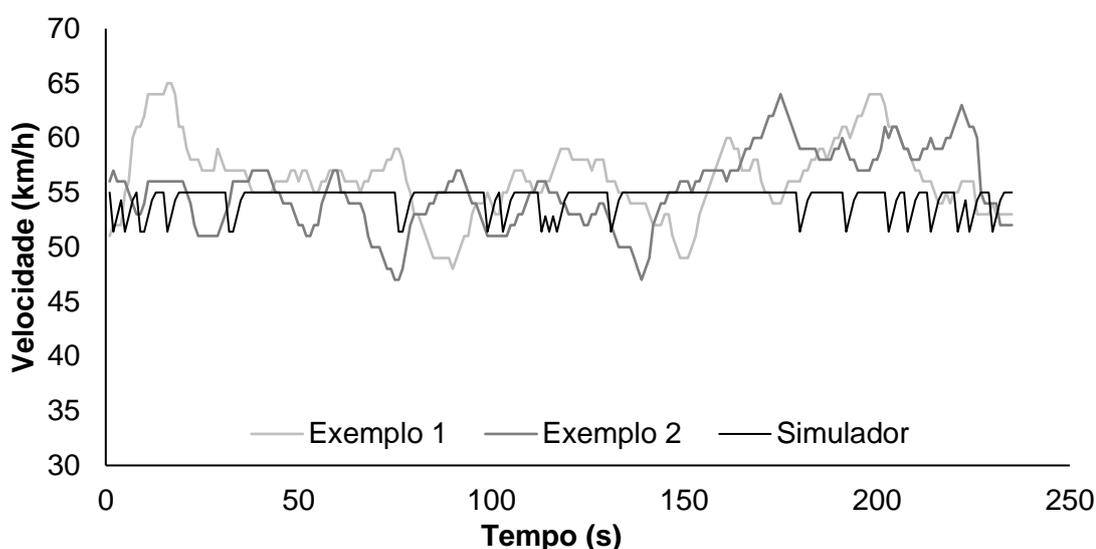
Fonte: O autor (2021)

Algumas considerações em relação à Figura 45. Foram observados 31 pontos e verifica-se que todos os pontos observados estão em condição de fluxo livre. Assim, os veículos tinham liberdade para trafegar próximo e acima da velocidade máxima da via em todo o momento analisado. O ponto de maior densidade obtido das observações desse dia foi $\rho_{obs}^{sen} = 12$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$.

A curva do modelo calibrado está cruzando a região inferior dos pontos observados na Figura 45, sendo dessa forma possível afirmar que a velocidade média dos veículos é levemente superior aos 55 km/h do modelo calibrado. Por sinal, quando se realiza a regressão dos pontos observados da Figura 45, obtém-se velocidade média de 59,8 km/h com coeficiente de correlação ($r = 0,95$). Como o modelo calibrado tenta representar todo o diagrama fundamental considerando o comportamento médio em todas as densidades observadas, alterar a calibração para considerar uma velocidade maior afetaria todos os demais resultados, e isso não foi realizado.

Na Figura 46 são exibidos dois exemplos de perfis de velocidade obtidos pelos GPS equipados nos veículos utilizados na validação. Junto às trajetórias, também foi exibido a velocidade de um veículo presente no simulador quando $\rho_{sim}^{pis} = 10$ carro km^{-1} faixa⁻¹. Os veículos equipados variaram sua velocidade entre 47 a 65 km/h, enquanto o veículo simulado possui um padrão de velocidade que não ultrapassa a velocidade máxima definida pelo simulador em nenhum momento.

Figura 46 – Exemplo de trajetórias reais e simulada



Fonte: O autor (2021)

Nos testes reais, houve variação suave de velocidade ao longo do percurso, enquanto no modelo simulado as variações de velocidade são mais abruptas e devidas à frenagem aleatória existente no modelo. Uma sugestão para trabalhos futuros é compreender como representar o comportamento do motorista de forma mais realista, por exemplo utilizando modelos microscópicos mais complexos, obtendo mais dados para calibração e de diversas fontes (HOOGENDOORN; HOOGENDOORN, 2010).

5.3. GERAÇÃO DOS CICLOS

A partir do método das k-médias foi decidido a quantidade de grupos (1, 2, 3 ou 4) que serão usados para representar a via. Decidido a quantidade de grupos, foram selecionadas as trajetórias que compõem os grupos, considerando a proporção de pontos presentes no diagrama fluxo-densidade (Figura 27). O conjunto foi importado no método da Cadeia de Markov Monte Carlo, executando-se o processo iterativo até obtenção de um ciclo com desvio médio dentro dos limites considerados.

5.3.1. Obtenção do número de grupos a partir do método de k-medias

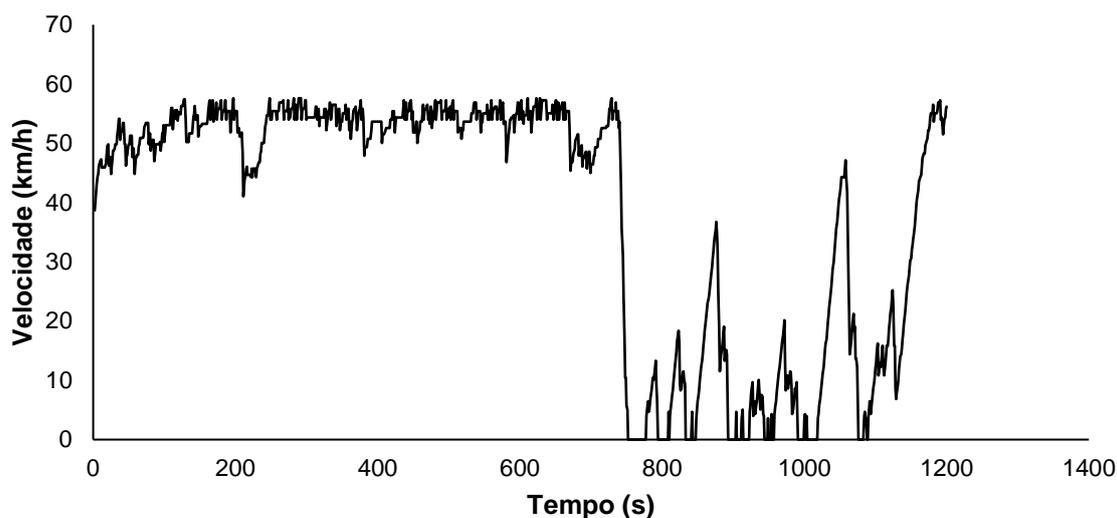
O agrupamento dos pontos presentes do diagrama fluxo-densidade por semelhança foi realizada com um método automatizado (k-medias), e com um método manual com a finalidade de: a) verificar a quantidade de grupos que fornece um erro global menor; b) definir a quantidade de grupos que será utilizada; e c) verificar se o método das k-médias sempre fornece o menor erro global quando comparado às escolhas manuais.

5.3.1.1. Ciclo de condução para o caso $k = 1$

A Figura 47 exibe o ciclo de condução gerado para o caso $k = 1$, isso é, não há divisão dos pontos do diagrama fundamental em grupos, sendo todos os dados analisados conjuntamente e tratando como apenas um ciclo para representar todas as possíveis situações. O ciclo encontrado tem desvio médio de 8,8%, maior do que cada um dos ciclos obtidos para com quantidade maior de grupos.

O desvio é reflexo da avaliação conjunta de todas as condições distintas do diagrama. Embora o desvio médio seja 8,8%, o desvio se o veículo estiver em condição de tráfego livre pode chegar a 35% (Figura 49). No ciclo gerado na Figura 47, a velocidade do veículo é próxima da máxima da via em mais de 50% do tempo, variando para uma condição de *stop-and-go* que representa uma condição de tráfego mais congestionada na tentativa de reproduzir as diversas condições presentes na via.

Figura 47 – Ciclo de condução gerado para o caso de apenas um grupo



Fonte: O autor (2021)

5.3.2. Erros para as demais quantidades de grupos

A Tabela 24 mostra o erro em cada agrupamento estudado. O erro apresentado é o e_{global}^{PC} (equação 36) para o método das k-médias onde também são exibidos os erros para os grupos selecionados pelos integrantes do grupo de pesquisa. Pela Tabela 24 é possível verificar que o e_{global}^{PC} minimiza à medida em que se aumenta o número de grupos, o que é esperado visto que a quantidade maior de grupos vai alocar os pontos semelhantes em torno de si com maior precisão. O maior número de grupos não é a condição mais desejada, visto que um número maior aumenta a quantidade de processamento, além de ser necessário mais testes em dinamômetro à medida em que se aumenta o número de ciclos.

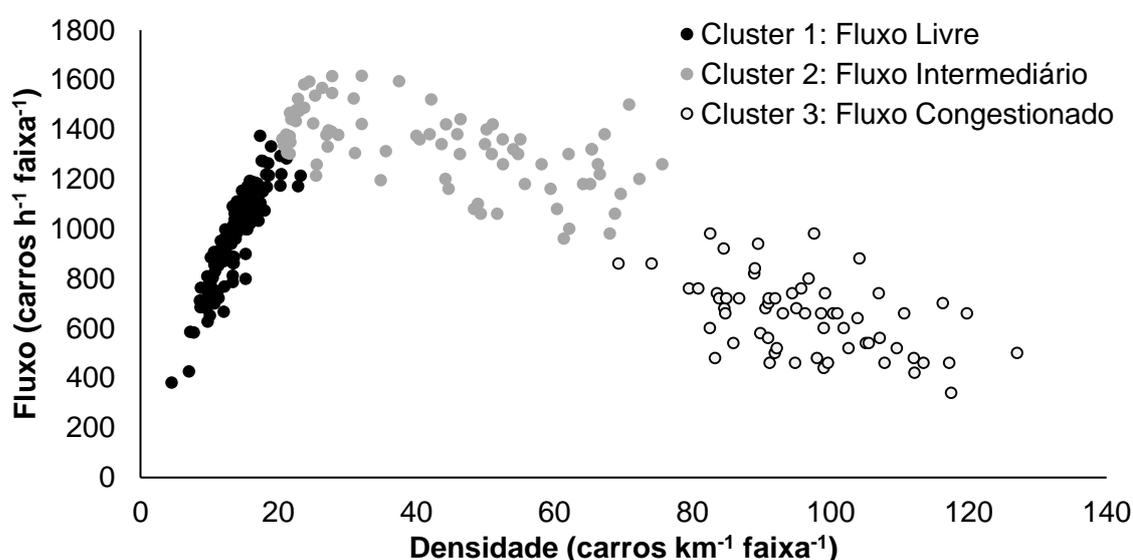
Tabela 24 – Erro global dos métodos em função da quantidade de grupos escolhidos

	2 GRUPOS	3 GRUPOS	4 GRUPOS
K-MÉDIAS	9.8%	5.0%	4.1%
INTEGRANTE 1	7.3%	5.2%	4.3%
INTEGRANTE 2	7.3%	6.1%	3.3%
INTEGRANTE 3	7.3%	5.2%	3.5%
INTEGRANTE 4	8.4%	5.8%	6.0%

Avaliando os resultados da Tabela 24 em relação à divisão dos pontos observados em dois grupos, o método das k-médias foi o método que apresentou o

maior e_{global}^{PC} . Na situação com quatro grupos, dois integrantes do grupo de pesquisa conseguiram obter e_{global}^{PC} menor do que o método das k-médias. Esse fenômeno pode ser explicado nesses dois casos pelo fato de os integrantes estarem cientes do comportamento desejado para os dados. Uma prova desse aspecto é que no caso com dois agrupamentos, três integrantes agruparam os pontos de forma semelhante. Quando estudando o método com três agrupamentos, o método das k-médias obteve o menor e_{global}^{PC} , com os pontos divididos conforme exibido na Figura 48.

Figura 48 – Diagrama fluxo-densidade dividido em três grupos pelo método das k-medias



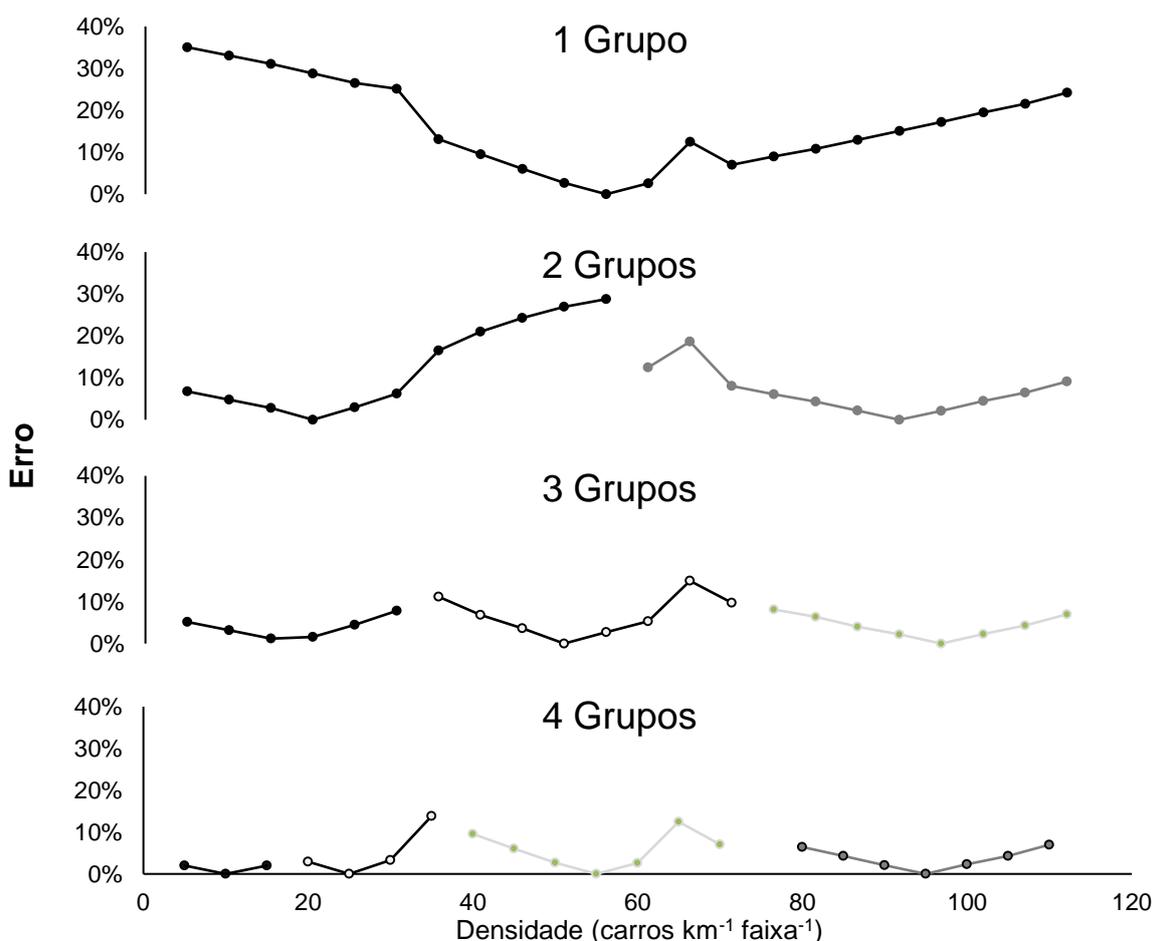
Fonte: O autor (2021)

O caso com o agrupamento dos dados em três grupos escolhidos pelo método das k-médias foi a selecionada. Foi julgado que a redução no erro entre a situação com três e quatro grupos (redução de 0,9% de erro) não compensa a posterior quantidade maior de operações e tempo de processamento (aumento em 33,3%). Alguns trabalhos que utilizam esse método também agruparam o diagrama fundamental em três regiões (KERNER; KLENOV; WOLF, 2002; PENG; ZHUANG; YANG, 2019; SHEN *et al.*, 2018).

Na Figura 49 é possível verificar como se comporta o erro médio dos dez parâmetros característicos em cada densidade em relação ao ponto de densidade central do grupo ao qual o ponto faz parte. São exibidos os erros pelo método das k-médias de um a quatro grupos obtidos. No caso de não haver a divisão em grupos, o erro máximo chega a 35% para os pontos que estão nas extremidades, quando

comparados ao ciclo gerado. Esse erro máximo é reduzido quando o número de grupos aumenta para dois. Neste caso o método das k-médias divide os grupos na região $\rho_{sim}^{pis} = 60 \text{ carros km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$, distante do ponto crítico, e cada grupo tem um erro de até 28%.

Figura 49 – Erro de cada densidade em relação ao centro do cluster



Fonte: O autor (2021)

Os erros máximos de cada grupo reduzem bastante nos casos em que se trabalha com três e quatro grupos. No caso de três grupos, os grupos livre, intermediário e congestionado possuem erro máximo de 7,8%, 14,9% e 8,1%. No caso com quatro grupos, o maior erro está na densidade 35 carros km⁻¹ faixa⁻¹, onde o erro máximo é 13,8%. Nas duas ocasiões, com três e quatro grupos, o erro é maior do que 10% apenas em duas densidades.

Dessa forma, considerando as condições expostas nesse trabalho, um ciclo de condução que informa que representa toda a via e não leva em consideração a

existência de diferentes condições de tráfego, pode encontrar um erro de até 35% em relação aos parâmetros característicos disponíveis.

5.3.3. Seleção do número de trajetórias

Foram selecionados três grupos para representar as condições de tráfego na via. Os pontos observados no diagrama fluxo-densidade (Figura 29) não podem ser utilizados diretamente para gerar os perfis de velocidade, pois só contém informações globais de fluxo e densidade. Para encontrar os perfis de velocidade dos veículos nessas condições, há a simulação das condições do diagrama fundamental utilizando o modelo microscópico de tráfego calibrado.

No momento de importar as trajetórias para o método da cadeia de Markov, a quantidade de veículos importada em cada uma região foi proporcional à quantidade de pontos nos intervalos de densidade dos grupos do diagrama fluxo densidade (Figura 27). Essa consideração foi usada porque os pontos presentes nos grupos não são distribuídos de forma homogênea. É possível ver no Quadro 5 que no grupo 1, que representa o fluxo livre, 41% dos pontos se encontram entre 10 e 15 carros km^{-1} faixa $^{-1}$. No grupo 2 há maior quantidade de veículos importados na $\rho_{sim}^{pis} = 65$ a 70 carros km^{-1} faixa $^{-1}$. No grupo 3 as densidades entre 90 e 100 carros km^{-1} faixa $^{-1}$ são responsáveis pela maior quantidade de pontos (Figura 48, Quadro 5). A distribuição dos pontos considerando as densidades são apresentados no Quadro 5.

No Quadro 5 verifica-se que o primeiro grupo é composto por 156 pontos observados, e que 12 desses pontos estão na região de densidade ($5 \leq \rho_{sim}^{pis} < 10$). Posteriormente, no método da cadeia de Markov, serão importados 100 perfis de velocidade para cada grupo, e no grupo 1 serão selecionados, a partir da composição proporcional ($12/156 = 7,7\%$), arredondado para 8% dos pontos. Assim, 8% do perfil de velocidade do primeiro grupo serão selecionadas na densidade média dessa região, nesse caso $\rho_{sim}^{pis} = 7,5$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$. Esse procedimento é aplicado para todos os grupos e todas as densidades avaliadas.

Quadro 5 – Distribuição dos pontos observados nos grupos separados pelo método das k-médias

Grupo	ρ	Pontos	Soma	Veículos
1	[5, 10)	12	156	8
	[10, 15)	65		41
	[15, 20)	43		28
	[20, 25)	22		14
	[25, 29)	14		9
2	[39, 45)	8	48	17
	[45, 50)	7		15
	[50, 55)	8		17
	[55, 60)	5		10
	[60, 65)	6		12
	[65, 70)	11		23
	[70, 75)	3		6
3	[75, 80)	3	53	6
	[80, 85)	10		19
	[85, 90)	6		11
	[90, 95)	11		21
	[95, 100)	11		21
	[100, 105)	6		11
	[105, 110)	6		11

5.3.4. Proposta de ciclos de condução representativos

Na cadeia de Markov, há a importação dos perfis de velocidade dos 100 veículos avaliados em cada grupo conforme disposto no Quadro 5. Durante a etapa de importação de dados, outra atividade que ocorre é a obtenção dos parâmetros característicos (PCs) médios do grupo importado. Esses PCs são relevantes porque o método de Monte Carlo, utilizado para criar o ciclo de forma aleatória, considerará que o ciclo gerado é representativo quando a diferença entre os PCs do ciclo gerado e do grupo importado avaliado forem menores do que 4%.

A Tabela 25 exhibe os PCs médios de cada grupo e os PCs dos ciclos propostos quando a metodologia foi usada. Também são exibidos os desvios, que são calculados considerando parâmetros médios, conforme definido na Metodologia. O desvio médio para todos os PCs em todos os grupos foi abaixo do desvio médio desejado de 4%. Esse desvio é menor do que outros trabalhos na área, que variam entre 5% a 15%.

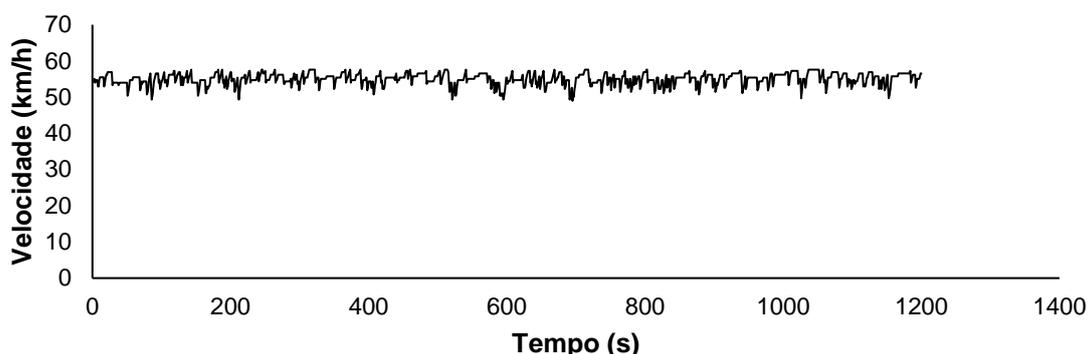
Tabela 25 – Parâmetros característicos médios de cada grupo e do ciclo de condução proposto

Grupo 1 (Livre)	V	V_c	σ_V	a	a_c	d	T_a	T_d	T_p	T_c
Valores médios	54.4	54.3	1.3	0.10	0.33	-0.83	28%	11%	0%	61%
Ciclo proposto	54.9	55.0	1.6	0.12	0.28	-0.81	37%	13%	0%	50%
<i>Desvio médio = 3,5%</i>	2%	2%	1%	1%	6%	2%	9%	2%	0%	11%
Grupo 2 (Intermediário)	V	V_c	σ_V	a	a_c	d	T_a	T_d	T_p	T_c
Valores médios	22.4	23.6	18.2	0.31	0.38	-1.01	48%	19%	3%	29%
Ciclo proposto	24.8	25.5	19.7	0.28	0.34	-1.08	54%	18%	3%	25%
<i>Desvio médio = 3,9%</i>	7%	5%	4%	3%	3%	6%	6%	2%	0%	4%
Grupo 3 (Congestionado)	V	V_c	σ_V	a	a_c	d	T_a	T_d	T_p	T_c
Valores médios	8.2	9.2	8.3	0.34	0.38	-0.90	38%	19%	6%	37%
Ciclo proposto	6.8	7.3	7.0	0.29	0.34	-0.81	37%	18%	9%	36%
<i>Desvio médio = 3,5%</i>	4%	5%	4%	5%	4%	9%	0%	1%	3%	2%

O ciclo de condução representativo do grupo 1 (Figura 50), situação de tráfego livre, teve desvio médio de 3,5% e o maior desvio ocorreu no PC de tempo em cruzei-ro (T_c). Um dos motivos que podem contribuir para isso é que no método de Monte Carlo, a abordagem numérica permite que a velocidade do veículo possa ser até 1 m/s maior do que a máxima, enquanto o simulador trava a velocidade máxima de forma constante. Essa condição existe no método de Monte Carlo pelo fato de ser necessário agrupar os valores de velocidade na matriz em classes (informado na fundamentação teórica), e para a velocidade eles são agrupados a cada 1 m/s, enquanto que as classes de aceleração são agrupadas em 0,1 m/s².

Devido a essa condição, o veículo pode ultrapassar a velocidade máxima no ciclo brevemente, se ajustando logo no instante de tempo posterior. Esse fenômeno pode ser um dos responsáveis pela variação do tempo de cruzei-ro (T_c). A forma com a qual o modelo microscópico também limita a velocidade máxima, como sendo um carro com limitador automático, certamente não é a mais apropriada para representar a frota nacional, sendo abordagens que podem ser aprimoradas em trabalhos futuros.

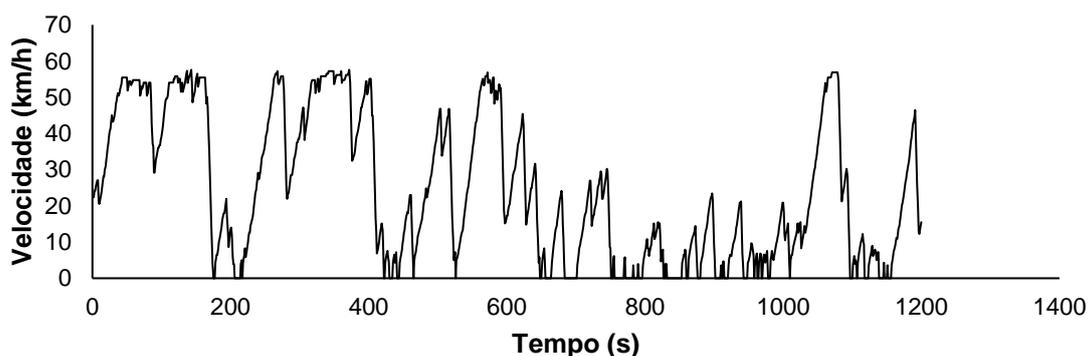
Figura 50 – Ciclo de condução obtido para condição livre (grupo 1)



Fonte: O autor (2021)

O ciclo de condução representativo proposto para o grupo 2 (Figura 51) obteve desvio médio de 3,98%. Dentre os PCs analisados, o maior desvio encontrado foi na velocidade média (7%). Pode ser visto como exemplo na Figura 57, e no ciclo obtido na Figura 51, em densidades intermediárias o veículo varia sua velocidade do repouso à velocidade máxima de forma contínua ao longo da pista. Neste modelo não há semáforos, faixas de pedestres, interseções ou outras atividades que possam efetivamente serem responsáveis por interromper o fluxo de veículos, sendo esse fenômeno devido à interação dos veículos entre si.

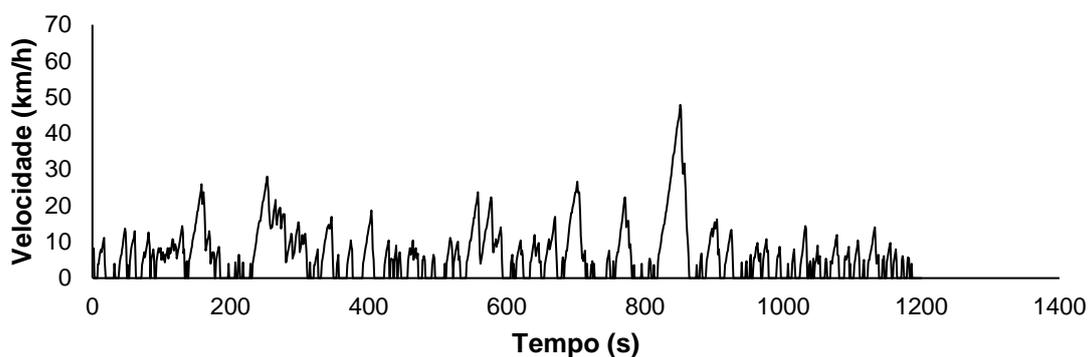
Figura 51 – Ciclo de condução obtido para condição intermediária (grupo 2)



Fonte: O autor (2021)

O ciclo de condução representativo obtido para a condição congestionada, grupo 3, (Figura 52) apresentou desvio médio de 3,5%. Nesta ocasião, os desvios relativos à proporção do tempo em cada situação foram menores quando comparados aos demais grupos, e a desaceleração média foi o PC que apresentou o maior desvio.

Figura 52 – Ciclo de condução obtido para condição congestionada

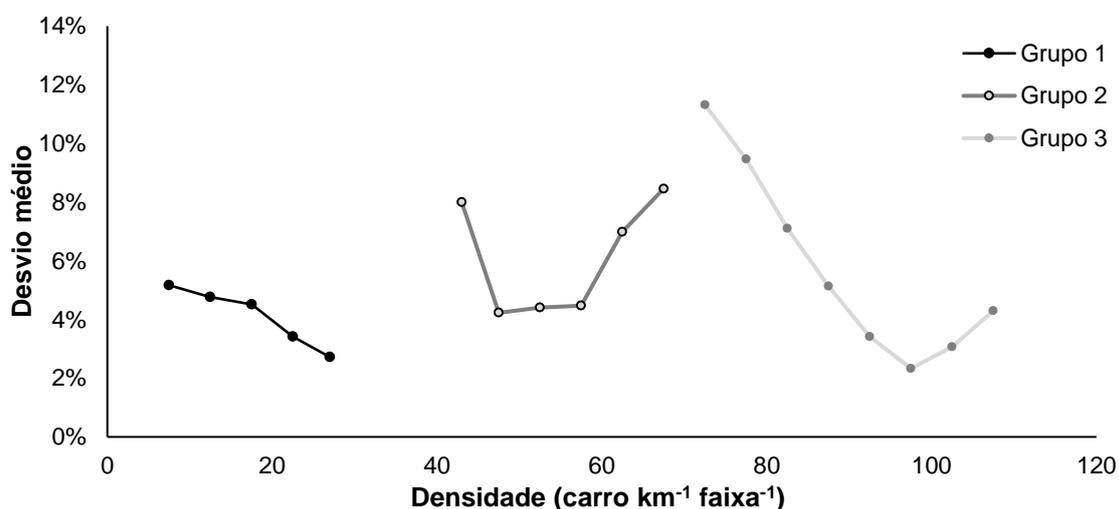


Fonte: O autor (2021)

5.3.4.1. Comparação dos ciclos de condução obtidos com os dados do diagrama fundamental.

A Figura 53 exibe os desvios médios dos PCs em cada densidade em comparação com o CCR obtido da respectiva região. Dessa forma, é possível verificar o quão discrepante os resultados podem ser dentro do mesmo grupo. Também são utilizados os valores de referência para velocidade, aceleração e percentual de tempo, como explicados na metodologia.

Figura 53 – Desvios médios dos PCs em cada densidade em relação ao ciclo de condução



Fonte: O autor (2020)

Para auxiliar na análise da Figura 53, as densidades médias de cada grupo são apresentadas na Tabela 26. Como apresentado no Quadro 5 e na Tabela 25, os pontos não são distribuídos uniformemente nos grupos. No primeiro grupo, o desvio médio varia de 5,2% na menor densidade até 2,7% na densidade mais alta. No grupo

2, as densidades na extremidade do grupo apresentam os maiores desvios. Nesse grupo, a densidade avaliada varia de 43 a 67,5 carros km⁻¹ faixa⁻¹, e a densidade média observada nesse grupo ($\bar{\rho}_{sen}^{obs}$) é de 54,9 carros km⁻¹ faixa⁻¹. Além disso, o grupo 2 é o que apresentou a menor quantidade de pontos dentro os grupos avaliados, e o que teve o maior erro no processo de convergir.

Tabela 26 – Densidades médias de cada grupo

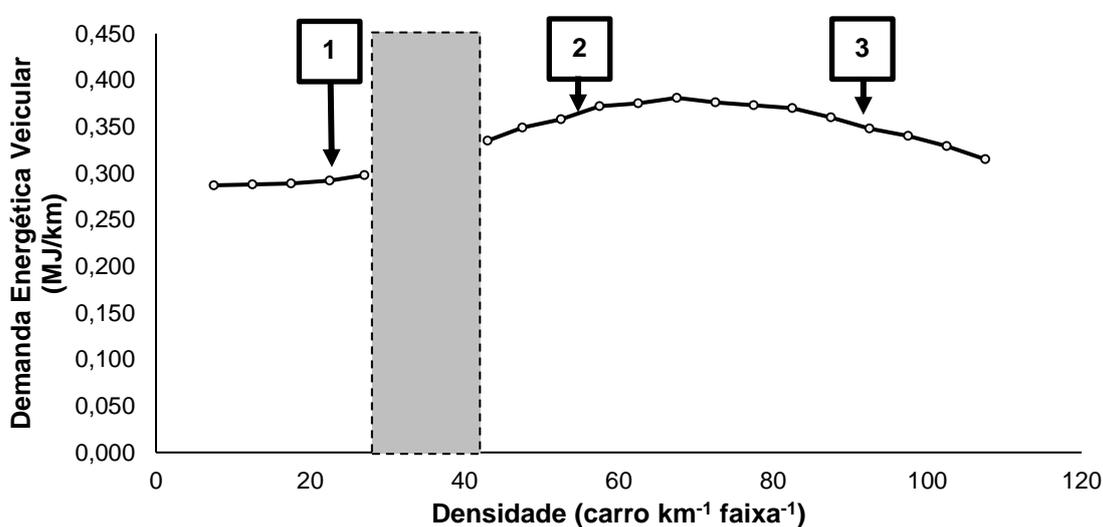
	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
$\bar{\rho}_{sen}^{obs}$	15,6	54,9	92,3

O grupo 3 apresentou densidade média de $\bar{\rho}_{sen}^{obs} = 92,3$ carros km⁻¹ faixa⁻¹ e também possui um comportamento no qual os pontos com menor densidade dentro do grupo apresentam o maior desvio entre todos avaliados, chegando a até 11,3% de desvio médio. Esse valor reduz para 2,3% de desvio quando a densidade média simulada é 97,5 carros km⁻¹ faixa⁻¹.

5.3.5. Demanda Energética Veicular

A Figura 54 mostra a curva da demanda energética veicular (*DEV*) em função da densidade para o modelo calibrado. A *DEV* tem um comportamento não-linear, aumentando da densidade inicial até $\rho_{sim}^{pis} = 65$ carros km⁻¹ faixa⁻¹, reduzindo seu valor até a densidade máxima. A Tabela 27 mostra os valores de *DEV* encontrados para os ciclos de condução gerados em cada grupo, com marcações onde eles se encontram na Figura 54.

Figura 54 – Demanda energética veicular em função da densidade para o modelo calibrado



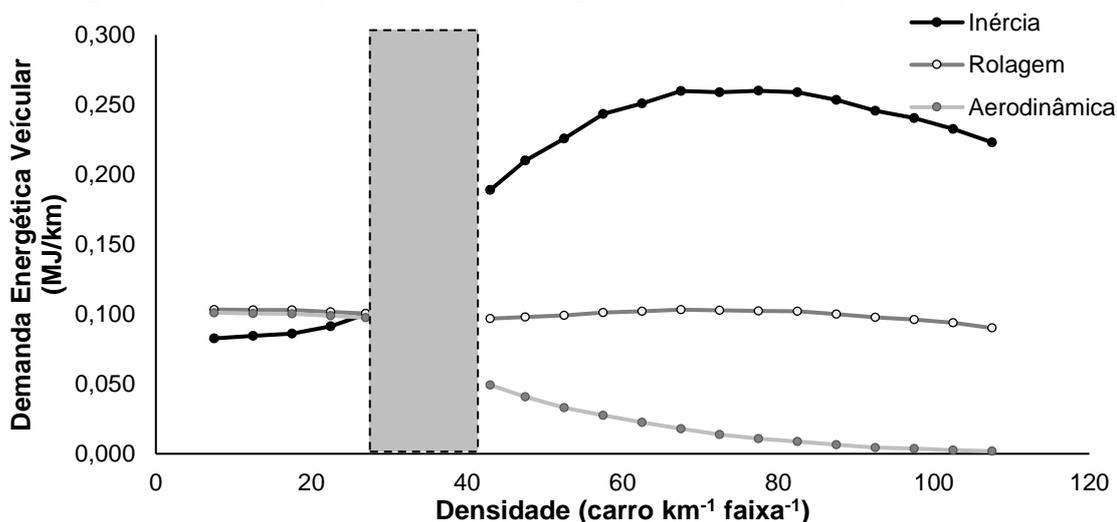
A Tabela 27 também exibe as frações que compõem a demanda energética veicular em cada ciclo obtido em: f_{ine} relativa à inércia, f_{rol} relativa à rolagem e f_{aero} relativa à aerodinâmica.

Tabela 27 – Demanda Energética Veicular do ciclo de condução de cada grupo

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
DEV	0,291	0,359	0,354
f_{ine}	30,1%	63,7%	70,3%
f_{rol}	35,2%	27,7%	28,2%
f_{aero}	34,7%	8,6%	1,5%

Na Figura 55 é possível ver como a demanda energética relacionada a cada componente se comporta de forma distinta em função das densidades. A componente aerodinâmica, dependente da velocidade do veículo e do vento ao quadrado (a velocidade do vento é nula no simulador) reduz com o aumento da densidade; devido à redução da velocidade média do veículo na via. A demanda energética relacionada à rolagem do veículo se mantém constante para todas as densidades, visto que ela não depende da aceleração ou da velocidade; apenas da massa do veículo multiplicada por uma constante.

Figura 55 – Composição da demanda energética veicular em função das densidades



Fonte: O autor (2021)

A composição da inercia define a curva de demanda energética mostrada na 0. Para baixas densidades ($\rho_{sim}^{pis} < 28 \text{ carros km}^{-1} \text{ faixa}^{-1}$) temos que a participação da inercia é a menor dentre as variáveis. A inércia é dependente da massa e da aceleração do veículo, e nessa condição ele está em aceleração baixa e com bastante

percentual de tempo em velocidade constante (Figura 60). À medida que a densidade aumenta, há um aumento da energia devido ao aumento do valor de aceleração média. Por fim, há um decréscimo da demanda relacionada à inércia em densidades muito altas em especial pela diminuição do tempo em aceleração do veículo na via.

5.4. ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE TRAJETÓRIAS E DIAGRAMA FUNDAMENTAL

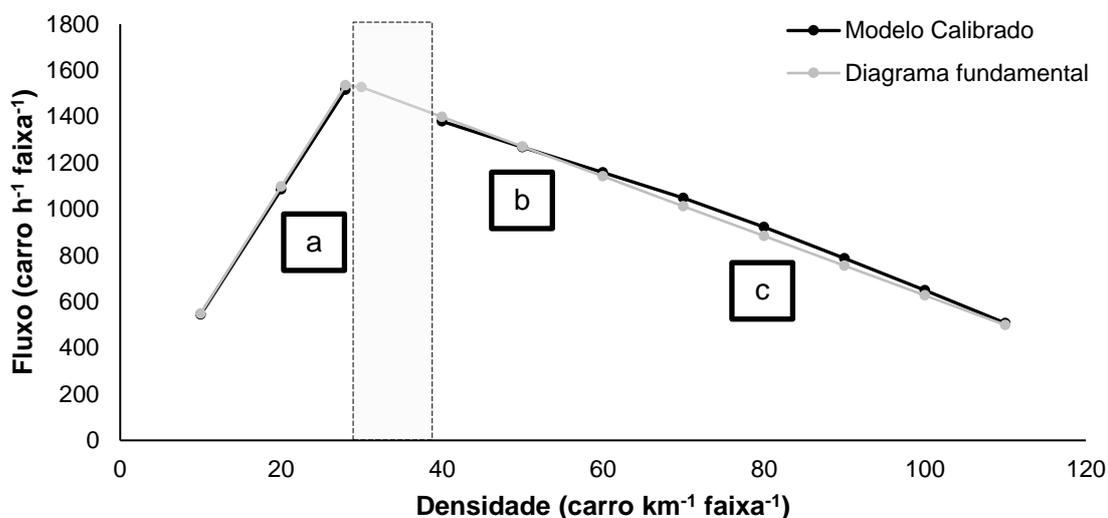
Essa seção exhibe os resultados de geração dos ciclos de condução representativos da via estudada. São mostrados exemplos de perfis de velocidade dos veículos no modelo calibrado. Além disso, são mostrados os Parâmetros Característicos (PCs) (Tabela 9) em função da densidade simulada (ρ_{sim}^{pis}). Os ciclos de condução representativos obtidos são comparados com valores dentro do modelo calibrado e com ciclos de condução padrão e locais ao redor do mundo.

5.4.1. Trajetórias em função da densidade no diagrama fundamental

A Figura 56 mostra o diagrama fundamental da via e a curva do modelo calibrado nos casos a, b e c que representam $\rho_{sim}^{pis} = 20, 50$ e 80 carros km^{-1} faixa $^{-1}$, respectivamente. Na Figura 57 é possível verificar o perfil de velocidade do primeiro veículo simulado durante 10 minutos em cada caso. A curva de velocidade de cada veículo é apenas um exemplo, pois varia a cada simulação.

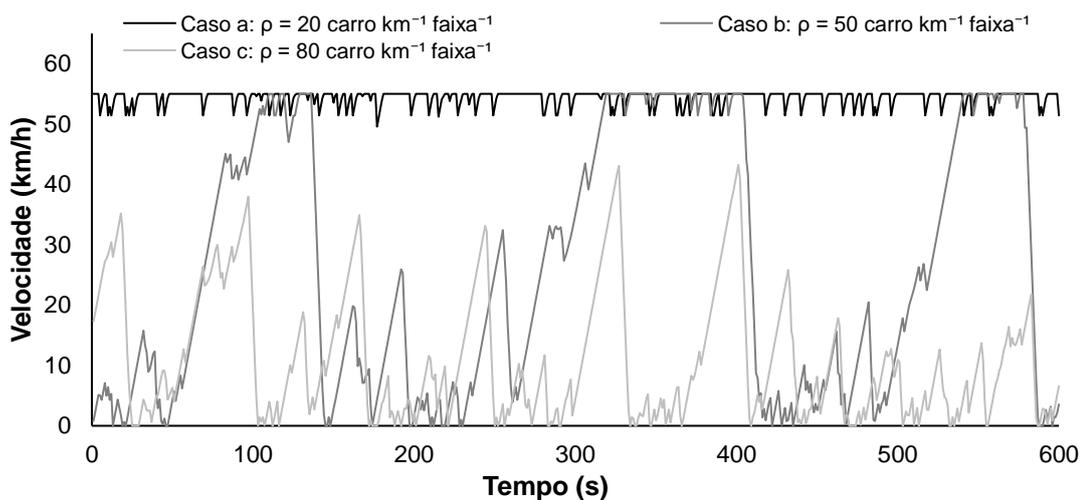
No caso a ($\rho_{sim}^{pis} = 20$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$) verifica-se que a velocidade do veículo é próxima de V_{max} durante todo o tempo e as variações de velocidade que ocorrem são resultado da desaceleração aleatória existente no modelo. No caso b ($\rho_{sim}^{pis} = 50$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$), uma situação de uma densidade intermediária, o veículo frequentemente varia sua velocidade entre o repouso e V_{max} . No caso c ($\rho_{sim}^{pis} = 80$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$), que é a densidade analisada mais alta, o veículo não alcança V_{max} em nenhum momento. Verifica-se também no caso c o padrão de aceleração e desaceleração consecutiva (*stop-and-go*) devido ao congestionamento.

Figura 56 – Curva de fluxo para o modelo calibrado e diagrama fundamental



Fonte: O autor (2021)

Figura 57 – Curvas de velocidade para diferentes situações de densidade



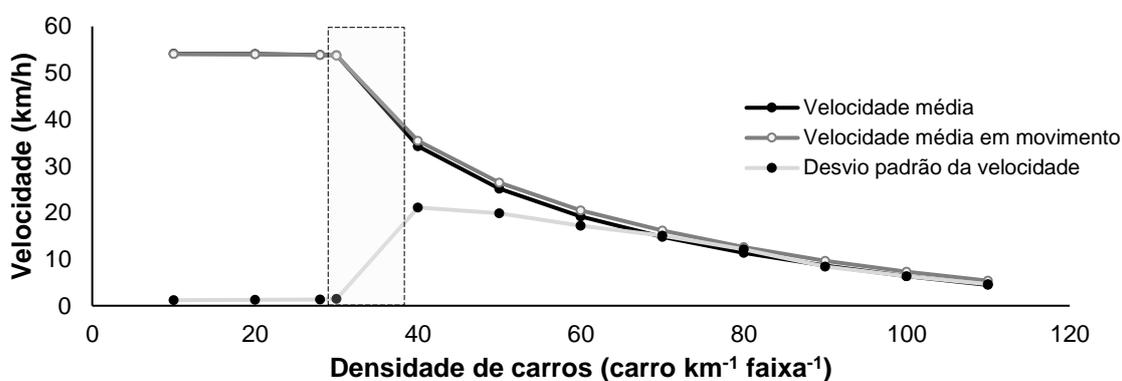
Fonte: O autor (2021)

5.4.2. Comportamento dos parâmetros característicos

Os parâmetros característicos (PCs) são obtidos a partir da velocidade dos veículos simulados no modelo calibrado. Nesse trabalho foram avaliados 10 PCs (Tabela 9), e as figuras a seguir os agrupam em relacionados à velocidade (Figura 58), aceleração (Figura 59) e proporção de tempo em algum dos estados (Figura 60). A Figura 58 foca no comportamento dos parâmetros relacionados à velocidade (velocidade média, velocidade média corrida e desvio padrão da velocidade).

A velocidade média e velocidade média corrida dos veículos tem valores próximos da máxima quando a densidade é baixa ($\rho_{sim}^{pis} < 28$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$), e iniciam a decrescer quando a densidade está na região do ponto crítico. O desvio padrão da velocidade também varia nessa região, onde o valor próximo de zero aumenta consideravelmente. Outro fenômeno ocorre a partir de $\rho_{sim}^{pis} = 70$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$, onde o desvio padrão da velocidade se torna semelhante às velocidades médias até a densidade mais alta estudada $\rho_{sim}^{pis} = 110$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$. A velocidade média e a velocidade média corrida são semelhantes durante todo o conjunto de densidades estudado.

Figura 58 – Parâmetros Característicos relacionados à velocidade



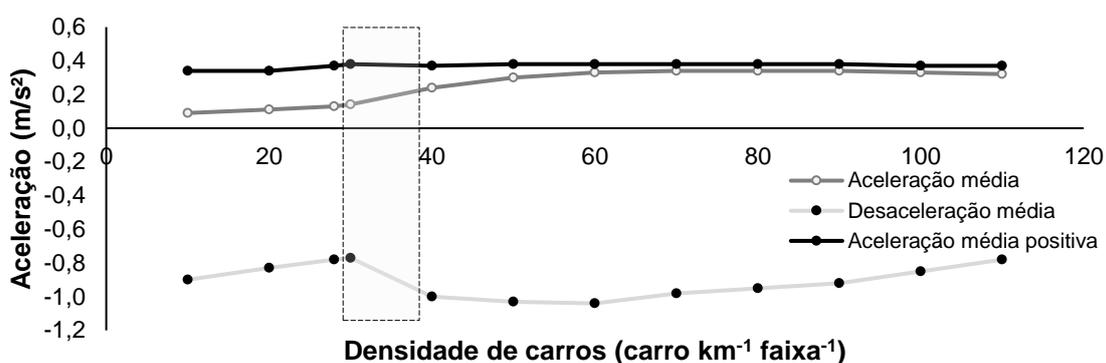
Fonte: O autor (2021)

Na Figura 59 estão os parâmetros relacionados à aceleração (aceleração média, aceleração média positiva e desaceleração média), e percebe-se que a aceleração média dos veículos aumenta com o aumento da densidade de carros na via. A aceleração média positiva se mantém com valor aproximadamente constante, independente da densidade da via. Na desaceleração média, há um comportamento irregular, onde os valores de desaceleração diminuem na região de densidade de carros zero até o ponto crítico, o que indica que os motoristas utilizam frenagem mais branda no geral. As frenagens ficam mais fortes (desaceleração menor) a partir do ponto crítico até $\rho_{sim}^{pis} = 60$ carros km^{-1} faixa $^{-1}$. A partir dessa densidade, a desaceleração diminui em função do aumento de densidade.

A Figura 60 contém os percentuais de tempo em cada modo: aceleração, desaceleração, parado e em cruzeiro. Na Tabela 9, presente na metodologia, é possível ver a definição utilizada para compreender se o veículo está em cada modo. O percentual de tempo parado é igual a zero da densidade mais baixa até chegar ao

ponto crítico ($10 \leq \rho_{sim}^{pis} \leq 28$), aumentando sua participação de forma constante até chegar próximo de 10% nas densidades mais altas. Para que o veículo esteja considerado como parado nesse modelo ele deve cumprir com duas condições: velocidade e aceleração devem ser inferiores aos limites estabelecidos na Tabela 10.

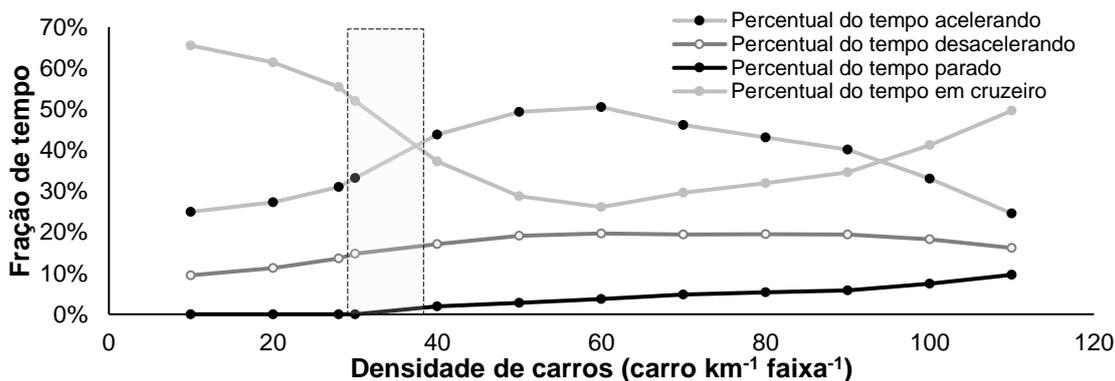
Figura 59 – Parâmetros Característicos relacionados à aceleração



Fonte: O autor (2021)

Em relação ao tempo em cruzeiro, é possível verificar que na situação de tráfego livre (densidade baixa), o veículo chega a passar quase 70% do tempo em condição de cruzeiro. Esse valor diminui para até 30% nas condições de densidades intermediária, e aumenta para até 50% próximo da condição de congestionamento pesado refletindo o caso onde ele segue o movimento dos demais veículos em velocidade muito lenta.

Figura 60 – Parâmetros Característicos relacionados à Proporção de tempo



Fonte: O autor (2021)

Os percentuais de aceleração e desaceleração variam de forma contrária ao percentual de tempo em cruzeiro. Isto é, o veículo tende a acelerar e desacelerar mais nas regiões intermediárias de densidade (Figura 57). As condições de aceleração e desaceleração seguem os limites propostos na metodologia, isto é, só se considera

o veículo acelerando caso $\Delta V > 0,10 \text{ m/s}^2$ (Tabela 10). Alterar o limite desse parâmetro também altera o formato das curvas de PCs. Conforme informado em Andrade *et al.* (2020), a comparação entre PCs de diversos trabalhos deve ser realizada com cautela pelo fato de cada autor empregar limites e condições diferentes.

5.4.3. Parâmetros característicos de outros ciclos ao redor do mundo

Foram selecionados alguns ciclos de condução padrão e locais existentes na literatura para comparar aos CCRs encontrados nesse trabalho. Uma revisão mais ampla dos parâmetros característicos de outros 40 ciclos de condução pode ser encontrada em Andrade *et al.* (2020) que discorre detalhadamente sobre o tópico da comparação de CCLs. Na Tabela 28 foram selecionados nove CCLs e dois CCPs (WLTC e FTP-75), e seus PCs foram calculados utilizando as regras definidas neste trabalho. Como as regras diferem das que estão no artigo publicado, existirão diferenças caso se compare as tabelas.

Tabela 28 – Parâmetros característicos para ciclos locais e padrão ao redor do mundo

Local	Referência	V	V_c	σ_V	a	a_c	d	T_a	T_d	T_p	T_c
Atenas	Karavalis et al (2007)	20.1	27.1	18.4	0.37	0.74	-0.73	28%	33%	25%	15%
Chennai ¹	Arun et al (2017)	17.6	25.7	15.9	0.20	0.46	-0.46	28%	24%	30%	18%
Edimburgo	Esteves-Booth et al (2001)	19.6	29.2	17.1	0.25	0.67	-0.76	24%	23%	30%	23%
Fortaleza	Azevedo et al., (2017)	23.5	33.9	20.3	0.23	0.58	-0.65	27%	25%	29%	19%
Jilin, China	Wang et al., 2008	31.8	34.4	14.2	0.16	0.35	-0.45	29%	25%	7%	39%
RCDC ²	Andrade et al., (2021)	22.5	30.0	18.3	0.26	0.57	-0.64	28%	27%	24%	21%
Santa Maria 12h	Roso e Martins (2015)	37.5	37.5	12.8	0.09	0.26	-0.23	21%	21%	0%	58%
Sydney	Kent, Allen e Rule (1978)	33.4	43.1	24.1	0.39	0.78	-0.77	30%	32%	19%	18%
Toronto ³	Amirjamshidi e Roorda (2015)	15.6	20.9	14.8	0.22	0.42	-0.76	31%	18%	27%	25%
Recife ⁴	Grupo 1 (Livre)	54.9	55,0	1,3	0,12	0,28	-0,81	37%	13%	0%	50%
Recife ⁴	Grupo 2 (Intermediário)	24,8	25,5	19,7	0,18	0,34	-1,08	54%	18%	3%	25%
Recife ⁴	Grupo 3 (Congestionado)	6,8	7,3	7,0	0,29	0,34	-0,81	37%	18%	9%	36%
WLTC	Ciclo padrão	46.4	53.5	36.1	0.28	0.5	-0.53	33%	32%	13%	22%
FTP-75	Ciclo padrão	34.0	42.1	25.6	0.30	0.61	-0.70	29%	28%	18%	25%

¹ – Ciclo em horário de pico

² – Recife Cars Driving Cycle, Ciclo para Recife em horário fora de pico

³ – Ciclo para caminhões em situação de via arterial com trânsito

⁴ – Ciclos obtidos neste trabalho

Os ciclos presentes na Tabela 28 representam vias presentes em vários lugares do mundo: Brasil, China, Austrália, Canadá, Índia e Escócia. Mas não devem ser considerados como os únicos ciclos que definem o local avaliado. Por exemplo, nessa tabela estão três ciclos distintos para cidades brasileiras: Recife (RCDC), Fortaleza e Santa Maria. O ciclo para Recife foi desenvolvido para representar carros

em horário fora de pico, o ciclo de Fortaleza foi desenvolvido considerando vias relevantes da capital cearense para avaliar a emissão de veículos *flex*, enquanto o ciclo de Santa Maria verifica consumo e emissão em uma cidade de médio porte (260 mil habitantes) no interior do Rio Grande do Sul. Também há um ciclo para Santa Maria no horário das 17 h, que não foi abordado nesse trabalho, onde o comportamento do veículo já difere do ciclo das 12 h. Também há os ciclos padrão WLTC e FTP-75, sendo o FTP-75 utilizado como padrão para veículos brasileiros.

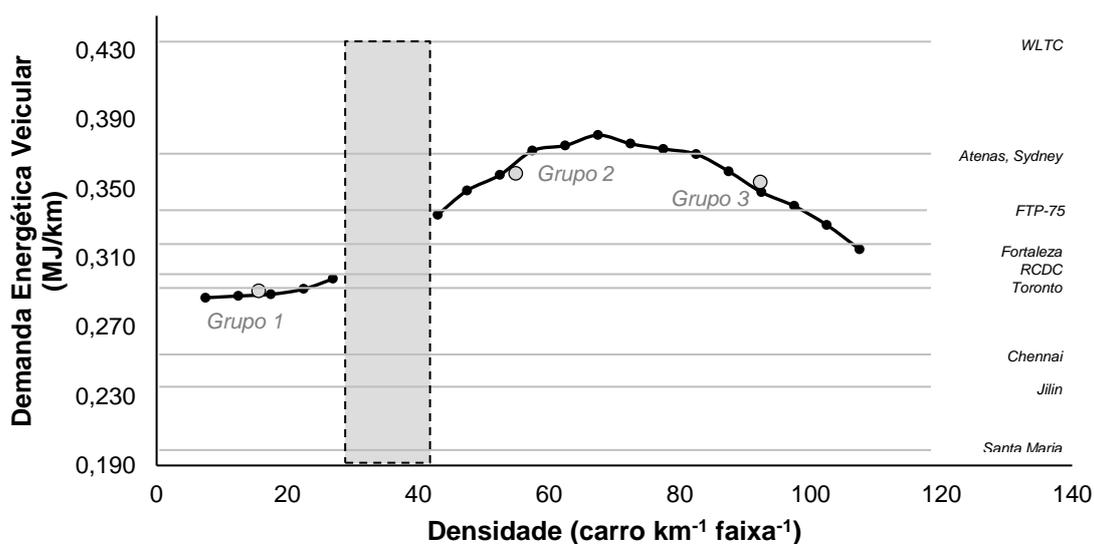
O CCR obtido para fluxo livre (Grupo 1, Figura 50) apresenta velocidade média ($V = 54,9$ km/h) superior aos ciclos mostrados na Tabela 28. Quando comparado aos demais, possui uma baixa aceleração média ($a = 0,12$ m/s²) e percentual de tempo parado $T_p = 0\%$. Comportamento semelhante em relação à aceleração pode ser visto no ciclo de Santa Maria 12h, que também tem baixa aceleração média ($a = 0,09$ m/s²) e tempo parado nulo. Na condição de fluxo livre, entretanto, a desaceleração média ($d = -0,81$ m/s²) é superior a todas presentes na Tabela 28. Isso ocorreu nos três grupos encontrados. Esse comportamento sugere que o modelo realiza frenagens que não representam bem o comportamento real no trânsito, e é um ponto para ser observado nos trabalhos futuros.

O CCR em condição de fluxo intermediário (Grupo 2, Figura 51) apresenta valores próximos dos demais ciclos: ($V = 24,8$ km/h, $\sigma_V = 19,7$ km/h), também em consonância aos valores do ciclo Fortaleza e do Ciclo RCDC. O valor de aceleração média ($a = 0,28$ m/s²) não é discrepante dos ciclos locais apresentados. Mas da mesma forma como ocorreu para o grupo 1, a desaceleração média apresenta valores superiores aos demais ($d = -1,08$ m/s²). O grupo 3, representante da condição mais congestionada, apresenta velocidade e desvio padrão de velocidade inferiores a todos os demais ciclos apresentados ($V = 6,8$ km/h, $\sigma_V = 7,0$ km/h) o que sugere que os ciclos não refletem esse tipo de condição, ou que ele deva ser mensurado de outra forma. Nesse grupo, a proporção de tempo parado é relevante ($T_p = 9\%$). Com exceção de dois ciclos da Tabela 28, os demais possuem tempo parado maior do que o grupo 3, que possui menor velocidade médio, o que indica que a existência de semáforos e interseções na via é relevante nesse estado e deve ser verificado em estudos posteriores.

5.4.4. Demanda energética veicular de ciclos ao redor do mundo

A Figura 61 mostra a curva da demanda energética veicular para as densidades do modelo calibrado e também mostra a demanda de outros ciclos de condução, locais e padrão. Como não se conhece a densidade de carros nos CCLs e CCPs avaliados, o gráfico exibirá uma linha em todas as condições de densidade. Além disso, são colocados os pontos que representam os três CCRs obtidos nesse trabalho. Em relação aos ciclos padrões, o WLTC, ciclo mais recente que tenta representar o comportamento dos veículos da forma mais realista possível, possui a *DEV* acima do valor de qualquer densidade, enquanto o FTP-75, ciclo padrão usado no Brasil, atravessa a curva de densidade em duas situações, em densidade intermediária e congestionada.

Figura 61 – Demanda energética veicular para os grupos e ao redor do mundo



Fonte: O autor (2021)

Em relação aos ciclos locais nacionais, Fortaleza e o Recife (RCDC) apresentam valores de demanda energética que cruzam o gráfico em dois pontos, mas considerando a condição em que foram coletados é possível inferir que a condição que estão próximos da região de densidade crítica. O ciclo para a cidade de Santa Maria foi o que apresentou o menor valor de demanda entre os ciclos avaliados, resultante da menor velocidade média e baixa aceleração média quando comparados aos demais ciclos.

Tabela 29 – Demanda energética veicular para ciclos ao redor do mundo

Local	Referência	VDE	<i>f_{ine}</i>	<i>f_{rol}</i>	<i>f_{aero}</i>
Atenas	Karavalis et al (2007)	0.371	69.2%	23.1%	7.7%
Chennai ¹	Arun et al (2017)	0.255	59.7%	31.6%	8.7%
Edimburgo	Esteves-Booth et al (2001)	0.292	65.2%	26.1%	8.8%
Fortaleza	Azevedo et al., (2017)	0.319	60.3%	27.1%	12.6%
Jilin, China	Wang et al., 2008	0.235	44.4%	38.7%	16.9%
RCDC ²	Andrade et al., (2021)	0.302	62.0%	27.7%	10.3%
Santa Maria 12h	Roso e Martins (2015)	0.199	27.9%	47.3%	24.8%
Sydney	Kent, Allen e Rule (1978)	0.371	63.6%	21.1%	15.4%
Toronto ³	Amirjamshidi e Roorda (2015)	0.290	63.2%	30.5%	6.3%
Grupo 1	Tráfego Livre	0,291	30,1%	35,2%	34,7%
Grupo 2	Tráfego Intermediário	0,359	63,7%	27,7%	8,6%
Grupo 3	Tráfego Congestionado	0,354	70,3%	28,2%	1,5%
WLTC		0.435	44.8%	23.7%	31.5%
FTP-75		0.339	56.8%	24.7%	18.5%

Na Tabela 29 é possível verificar que o FTP-75 possui maior VDE quando comparado aos ciclos nacionais, porém dos ciclos de Recife (RCDC) e Fortaleza apresentam percentual de inercia próximos e maiores do que o FTP-75, indicando que no Brasil deva se dar mais ênfase à inércia quando comparado ao ciclo americano.

6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como primeiro objetivo deste trabalho, foi desenvolvido um diagrama fundamental para uma via em Recife/PE. A partir da observação de vídeos foram obtidos 276 minutos de dados que foram posteriormente tratados, sendo obtido o diagrama fundamental com formato triangular. Dessa forma, este trabalho foi efetuado com um método barato que pode ser replicado em qualquer localidade ao redor do mundo, coletando dados de tráfego a partir de câmeras de vídeo. É necessário apenas que se tenha condições básicas como câmera e computador para processar os dados. Mesmo assim, poucos trabalhos foram publicados com obtenção de diagramas fundamentais a partir de observações ao redor do mundo, e este trabalho apresenta o primeiro diagrama fundamental obtido dessa forma no Brasil. O maior desafio desta etapa foi realizar a observação dos vídeos de forma “manual”. A coleta manual foi empregada por dois motivos: 1) devido ao fato de não haver recursos/tempo para adquirir/adaptar um software para coleta automática dos dados; 2) mesmo se houvesse o software, a contagem manual seria realizada para validar os dados obtidos automaticamente. Não foi realizado um estudo aprofundado sobre variabilidade presente na coleta manual, mas quando o mesmo vídeo foi avaliado pelos integrantes do grupo, o resultado foi similar. Ademais, a escolha de um software para coleta automática dos dados a partir de vídeos é tema para uma pesquisa à parte, pois é necessário conhecer precisão e exatidão do processo.

O segundo objetivo do trabalho consistiu em desenvolver uma metodologia de calibração de um modelo microscópico de tráfego baseado no método de busca exaustiva. Os trabalhos observados que calibraram modelos microscópicos obtiveram erro entre 5% e 15%, e em geral foram executados em simuladores comerciais. O método de calibração deste trabalho pode ser utilizado com qualquer simulador de tráfego microscópico. Após a calibração, o erro geral obtido foi de 2,0% para o fluxo e de 7,5% para a demanda energética veicular, valor baixo quando comparado aos demais trabalhos presentes na literatura.

Para o terceiro objetivo, houve o estudo de quantos ciclos de condução são necessários para caracterizar as possíveis condições de tráfego de uma via. Com os dados divididos de um a quatro grupos, de forma manual e automática, foi concluído que nem sempre o método automático (k-medias) produziu o melhor resultado quando

comparado à seleção manual. Outro resultado relevante foi a descoberta de que utilizar apenas um ciclo de condução para representar todas as possíveis condições da via estudada pode ocasionar um erro de até 35%. Utilizar dois ciclos para representar a via, o que nas publicações configura a divisão em horário de pico e fora de pico apresentou um desvio de até 28% para o grupo de horário fora de pico, e 18% para o grupo do horário de pico. Verificou-se que dividir a via estudada em três condições gerou um erro médio de 5%, e os desvios máximos dos ciclos livre, intermediário e congestionado foram 7,8%, 14,9% e 8,1%, considerado como boa relação custo-benefício.

No quarto objetivo foi criado um ciclo de condução representativo para cada uma das condições (livre, intermediária e congestionada) utilizando o método da cadeia de Markov e Monte Carlo. A escolha do método de Markov foi julgada adequada, vista a grande quantidade de dados que são importados a partir da simulação. Foram importados os perfis de velocidade de 100 veículos para representar cada um dos grupos. Mesmo se a quantidade de veículos importada fosse maior, certamente não haveria o aumento proporcional no custo computacional quando comparado ao método alternativo (micro-viagens). Os ciclos de condução representativos obtidos para as três condições de tráfego apresentaram erro médio menor do que 4% quando comparado aos perfis de velocidade importados.

Por fim, o presente trabalho teve como objetivo global contribuir para o avanço do conhecimento relativo à comparação do comportamento microscópico e macroscópico de uma via. Esse objetivo foi considerado alcançado, mas certamente não se encerra por aqui. Ao longo do texto foi possível verificar oportunidades de trabalhos futuros para ampliar o conhecimento, em especial os descritos a seguir:

- Coletar os dados de vídeo de forma automatizada;
- Compreender o comportamento dos veículos na zona crítica presente no diagrama fundamental;
- Avaliar o comportamento do tráfego com outras densidades de motos: apesar da simulação conter motos, não foi possível calibrar em condições acima de 10 motos km^{-1} faixa⁻¹, porque a via estudada tinha baixo fluxo de motos.
- Teste dos ciclos de condução representativos em dinamômetro;

- Coletar mais trajetórias a partir de testes reais para determinar o gasto energético em outras densidades;
- Obter diagramas fundamentais e ciclos de condução representativos para outras vias de Recife e outras cidades;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, G. M. S. de. **Desenvolvimento de método simplificado de construção e análise de ciclos de condução locais para carros e motos: um estudo de caso no horário fora de pico na cidade do Recife**. 2020. - UFPE, [s. l.], 2020.
- ANDRADE, G. M. S. de; ARAÚJO, F. W. C. de; SANTOS, M. P. M. de N.; GARNÉS, S. J. dos A.; MAGNANI, F. S. Simple Methodology for the Development and Analysis of Local Driving Cycles Applied in the Study of Cars and Motorcycles in Recife, Brazil. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, p. 036119812199185, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0361198121991850>
- ANDRADE, G. M. S. de; ARAÚJO, F. W. C. de; SANTOS, M. P. M. de N.; MAGNANI, F. S. Standardized Comparison of 40 Local Driving Cycles: Energy and Kinematics. **Energies**, v. 13, n. 20, p. 5434, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13205434>
- ANDRIEU, C.; FREITAS, N. de; DOUCET, A.; JORDAN, M. I. An Introduction to MCMC. **Machine Learning**, v. 50, p. 5–43, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-0-387-21811-3_1
- ARASAN, V. T.; KOSHY, R. Z. Methodology for Modeling Highly Heterogeneous Traffic Flow. **Journal of Transportation Engineering**, v. 131, n. 7, p. 544–551, 2005. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:7\(544\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:7(544))
- ARAUJO, F. W. C. **Análise do tráfego misto de motocicletas e automóveis considerando uma variedade de métricas, escalas e pontos de vistas**. 2017. - UFPE, [s. l.], 2017.
- ARUN, N. H.; MAHESH, S.; RAMADURAI, G.; SHIVA NAGENDRA, S. M. Development of driving cycles for passenger cars and motorcycles in Chennai, India. **Sustainable Cities and Society**, v. 32, n. March, p. 508–512, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.001>
- AZEVEDO, J. A. H.; CASSIANO, D. R.; FEITOSA, B. B.; DE OLIVEIRA, M. L. M.; LIMA, E. P.; BERTONCINI, B. V. Influências dos modos de operação nas emissões de poluentes provenientes de veículos flex em região urbana. **Transportes**, v. 25, n. 2, p. 91, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v25i2.1304>
- BANDO, M.; HASEBE, K.; DIVISION, P.; NAKANISHI, K.; NAKAYAMA, A. Analysis of Optimal Velocity Model with Explicit Delay. **Phys Rev E Stat Nonlinear Soft Matter**, v. 58, n. 5, p. 5429–5435, 1995.
- BARCELÓ, J. **Fundamentals of Traffic Simulation**. 1. ed. [S. l.]: Springer-Verlag New York, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6142-6>
- BISHOP, J. D. K.; AXON, C. J.; MCCULLOCH, M. D. A robust, data-driven methodology for real-world driving cycle development. **Transportation Research Part D**, v. 17, n. 5, p. 389–397, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.003>
- BRASIL. **Brazilian Energy Balance**. [S. l.: s. n.].

BROCKFELD, E.; KÜHNE, R.; WAGNER, P. Calibration and Validation of Microscopic Traffic Flow Models. **Transportation Research Record**, v. 1876, n. 1876, p. 62–70, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/1876-07>

CIUFFO, B.; PUNZO, V.; TORRIERI, V. Comparison of Simulation-Based and Model-Based Calibrations of Traffic-Flow Microsimulation Models. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2088, n. 1, p. 36–44, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2088-05>

COOK, R. D. Detection of Influential Observation in Linear Regression. **Technometrics**, v. 19, n. 1, p. 15–18, 1977. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00401706.1977.10489493>

CUNHA, S. dos S. **Estudo computacional da dinâmica das motocicletas nas acelerações, frenagens e curvas**. 2016. - UFPE, [s. l.], 2016.

DAGANZO, C. F. The cell transmission model: a dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. **Transp Res Part B Methodology**, v. 28, n. 4, p. 269–287, 1994.

DAI, Z.; NIEMEIER, D.; EISINGER, D. Driving cycles: a new cycle-building method that better represents real-world emissions. **The U.C. Davis-Caltrans Air Quality Project**, v. 66, n. 66, p. 37, 2008.

DENATRAN. **Frota de Veículos**. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-denatran/frota-de-veiculos-2021>. Acesso em: 21 jun. 2021.

EPA. **Regulations for Emissions from Vehicles and Engines**. [s. l.], 2021. Disponível em: Regulations for Emissions from Vehicles and Engines. Acesso em: 4 abr. 2021.

FALCOCCHIO, J. C.; LEVINSON, H. S. **Road Traffic Congestion: A Concise Guide**. 1. ed. New York: Springer International Publishing Switzerland, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15165-6>

FENG, S.; LI, J.; DING, N.; NIE, C. Traffic paradox on a road segment based on a cellular automaton: Impact of lane-changing behavior. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 428, p. 90–102, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.02.043>

FUKUDA, E.; TANIMOTO, J.; IWAMURA, Y.; NAKAMURA, K.; MITSUHIRO, A. Field measurement analysis to validate lane-changing behavior in a cellular automaton model. **Physical Review E**, v. 94, n. 5, p. 1–7, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.94.052209>

GARCIA NETO, P. D. **Estudo computacional do tráfego misto de motocicletas e automóveis**. 2014. - UFPE, [s. l.], 2014.

GIAKOUMIS, E. G. **Driving and engine cycles**. [S. l.]: Springer, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49034-2>

GREENSHIELDS, B. D. A behavioural car-following model for computer simulation. *In*: 1934, **Proceedings of the 13h annual meeting of the highway board**. [S. l.: s. n.] p. 382–399.

- GUO, M.; WU, Z.; ZHU, H. Empirical study of lane-changing behavior on three Chinese freeways. **PLoS ONE**, v. 13, n. 1, p. 1–22, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191466>
- HEREIJGERS, K.; SILVAS, E.; HOFMAN, T.; STEINBUCH, M. Effects of using Synthesized Driving Cycles on Vehicle Fuel Consumption. **IFAC-PapersOnLine**, v. 50, n. 1, p. 7505–7510, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1183>
- HOOGENDOORN, S.; HOOGENDOORN, R. Calibration of microscopic traffic-flow models using multiple data sources. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 368, n. 1928, p. 4497–4517, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0189>
- HOOGENDOORN, S. P.; BOVY, P. H. L. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering**, v. 215, n. i, p. 283–303, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/095965180121500402>
- HORA, A. L. dos A.; MAGNANI, F. S. Assessment of Sensitivity Curves To the Improvement of the Technique of Estimation of Thermophysical Parameters From Thermographies. *In*: 2009, **20th International Congress of Mechanical Engineering**. [S. l.: s. n.] p. 7.
- HUERTAS, J. I.; QUIRAMA, L. F.; GIRALDO, M.; DÍAZ, J. Comparison of three methods for constructing real driving cycles. **Energies**, v. 12, n. 4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12040665>
- ICPS. **Matrizes Origem-Destino**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/http://icps.recife.pe.gov.br/node/61317>.
- JIE, L.; VAN ZUYLEN, H.; CHEN, Y.; VITI, F.; WILMINK, I. Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 31, p. 172–184, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.04.008>
- KERNER, B. S.; KLENOV, S. L.; WOLF, D. E. Cellular automata approach to three-phase traffic theory. **Journal of Physics A: Mathematical and General**, v. 35, n. 47, p. 9971–10013, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/0305-4470/35/47/303>
- KESSELS, F. **Traffic Flow Modelling**. 1. ed. [S. l.]: Springer International Publishing, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-78695-7>
- KESTING, A.; TREIBER, M. **Calibrating Car-Following Models using Trajectory Data: Methodological Study**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2088-16>.
- LAN, L. W.; CHANG, C.-W. Inhomogeneous cellular automata modeling for mixed traffic with cars and motorcycles. **Journal of Advanced Transportation**, v. 39, n. 3, p. 323–349, 2005. Disponível em: <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/atr.5670390307>
- LAN, L. W.; CHIOU, Y. C.; LIN, Z. S.; HSU, C. C. Cellular automaton simulations for mixed traffic with erratic motorcycles' behaviours. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 389, n. 10, p. 2077–2089, 2010. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.01.028>

LIGHTHILL, M. J.; WHITHAM, G. B. On kinematic waves II . A theory of traffic flow on long crowded roads. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. Series A., n. 229, p. 317–345, 1955.

LIN, J.; NIEMEIER, D. A. An exploratory analysis comparing a stochastic driving cycle to California's regulatory cycle. **Atmospheric Environment**, v. 36, n. 38, p. 5759–5770, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00695-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00695-7)

LIN, J.; NIEMEIER, D. A. Estimating Regional Air Quality Vehicle Emission Inventories: Constructing Robust Driving Cycles. **Transportation Science**, v. 37, n. 3, p. 330–346, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/trsc.37.3.330.16045>

LIU, B.; SHI, Q.; HE, L.; QIU, D. A study on the construction of Hefei urban driving cycle for passenger vehicle. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 31, p. 854–858, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.10.100>

LV, W.; SONG, W. G.; LIU, X. D.; MA, J. A microscopic lane changing process model for multilane traffic. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 392, n. 5, p. 1142–1152, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2012.11.012>

MA, R.; HE, X.; ZHENG, Y.; ZHOU, B.; LU, S.; WU, Y. Real-world driving cycles and energy consumption informed by large-sized vehicle trajectory data. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 564–574, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.002>

MAGNANI, F. S.; GARCIA NETO, P. D.; ARAUJO, F. W. C. de; HORA, A. L. dos A.; VALENÇA, D. A. de A. Multimetric Analysis of a Simulated Mixed Traffic of Motorcycles and Automobiles : Flow , Energy , CO2 and Costs. **Ingeniería e Investigación**, v. 41, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/inginvestig.v41n2.83114>

MAYAKUNTLA, S. K.; VERMA, A. A novel methodology for construction of driving cycles for Indian cities. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 65, n. October, p. 725–735, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.10.013>

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

NYBERG, P.; FRISK, E.; NIELSEN, L. Using Real-World Driving Databases to Generate Driving Cycles with Equivalence Properties. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 6, p. 4095–4105, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2502069>

P.G.GIPPS. A model for the structure of lane-changing decisions. **Transportation Research Part B**, v. 20, n. 5, p. 403–414, 1986.

PAZ, A.; MOLANO, V.; MARTINEZ, E.; GAVIRIA, C.; ARTEAGA, C. Calibration of traffic flow models using a memetic algorithm. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 55, n. 4, p. 432–443, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.001>

PENG, Y.; ZHUANG, Y.; YANG, Y. A driving cycle construction methodology combining k-means clustering and Markov model for urban mixed roads.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, n. June, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0954407019848873>

RECHKEMMER, S. K.; ZANG, X.; BORONKA, A.; ZHANG, W.; SAWODNY, O. Utilization of Smartphone Data for Driving Cycle Synthesis Based on Electric Two-Wheelers in Shanghai. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. PP, p. 1–11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2961179>

ROSO, V. R.; MARTINS, M. E. S. Evaluation of a Real-World Driving Cycle and its Impacts on Fuel Consumption and Emissions. **SAE Technical Paper Series**, v. 1, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2015-36-0195>

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; COMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis**. [S. l.: s. n.].

SANTOS, M. P. M. de N. **A importância do motor na simulação de carros e motos em situação de tráfego**. 2019. - UFPE, [s. l.], 2019.

SANTOS, M. P. M. de N. **Estudo Computacional da Influência das Condições de Tráfego nos Acidentes Envolvendo Motocicletas (tese em andamento)**. 2022. - UFPE, [s. l.], 2022.

SANTOS, M. P. M. de N.; ARAÚJO, F. W. C. de; ANDRADE, G. M. S. de; MAGNANI, F. S. Construction of Driving Cycles: Case Study for Microtrip and Markov Chain methods' using real data. *In*: 2020a, **34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**. : ANPET, 2020. p. 12.

SANTOS, M. P. M. de N.; ARAÚJO, F. W. C. de; ANDRADE, G. M. S. de; MAGNANI, F. S. Análise Qualitativa do Fluxo de Veículos e da Performance Energética Comparando Modelo microscópico contínuo e discreto em relação à velocidade. *In*: 2020b, **34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**. : ANPET, 2020. p. 11.

SHEN, P.; ZHAO, Z.; LI, J.; ZHAN, X. Development of a typical driving cycle for an intra-city hybrid electric bus with a fixed route. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 59, n. February, p. 346–360, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.032>

STEG, L. Car use: Lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 39, n. 2-3 SPEC. ISS., p. 147–162, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2004.07.001>

SUNDARKUMAR, G. G.; V, S. B. B.; RONALD, C.; SINGH, A. A time series clustering based approach for construction of real-world drive cycles. **Transportation Research Part D**, v. 97, n. June, p. 102896, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102896>

TANIMOTO, J.; FUJIKI, T.; KUKIDA, S.; IKEGAYA, N.; HAGISHIMA, A. Acquisition of the field measurement data relating to lane change actions. **International Journal of Modern Physics C**, v. 26, n. 7, p. 1–9, 2015. Disponível em:

<https://doi.org/10.1142/S0129183115500722>

TAZELAAR, E.; BRUINSMA, J.; VEENHUIZEN, B.; BOSCH, P. Van Den. Driving cycle characterization and generation , for design and control of fuel cell buses. **World Electric Vehicle Journal**, v. 3, p. 812–819, 2009.

TREIBER, M.; HENNECKE, A.; HELBING, D. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. **Physical Review E**, v. 62, n. 2, p. 1805–1824, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.62.1805>

TREIBER, M.; KESTING, A. **Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation**. 1. ed. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-32460-4>

VAN WAGENINGEN-KESSELS, F.; VAN LINT, H.; VUIK, K.; HOOGENDOORN, S. Genealogy of traffic flow models. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 4, n. 4, p. 445–473, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13676-014-0045-5>

VASCONCELLOS, E. A. Urban transport policies in Brazil: The creation of a discriminatory mobility system. **Journal of Transport Geography**, v. 67, p. 85–91, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.08.014>

WANG, Q.; HUO, H.; HE, K.; YAO, Z.; ZHANG, Q. Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 13, n. 5, p. 289–297, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.03.003>

WANG, Z.; ZHANG, J.; LIU, P.; QU, C.; LI, X. Driving Cycle Construction for Electric Vehicles Based on Markov Chain and Monte Carlo Method: A Case Study in Beijing. **Energy Procedia**, v. 158, p. 2494–2499, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.389>

YANG, Y.; LI, T.; HU, H.; ZHANG, T.; CAI, X.; CHEN, S.; QIAO, F. Development and emissions performance analysis of local driving cycle for small-sized passenger cars in Nanjing, China. **Atmospheric Pollution Research**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.04.009>

YANG, Y.; ZHANG, Q.; WANG, Z.; CHEN, Z.; CAI, X. Markov chain-based approach of the driving cycle development for electric vehicle application. **Energy Procedia**, v. 152, p. 502–507, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.201>

ZEGEYE, S. K.; DE SCHUTTER, B.; HELLENDORRN, J.; BREUNESSE, E. A.; HEGYI, A. Integrated macroscopic traffic flow, emission, and fuel consumption model for control purposes. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 31, p. 158–171, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.01.002>

ZERVAS, E.; DIAMANTOPOULOS, E. Relationships Between CO₂ Emitted from New Passenger Cars in European Union and Their Engine and Vehicle Characteristics. *In*: 2009, **Sae**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2009-01-1825>

ZHAO, X.; ZHAO, X.; YU, Q.; YE, Y.; YU, M. Development of a representative urban driving cycle construction methodology for electric vehicles: A case study in Xi'an. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 81, p. 102279,

2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102279>

APÊNDICE A – DADOS ORIGINAIS PARA CÁLCULO DE FLUXO E DENSIDADE

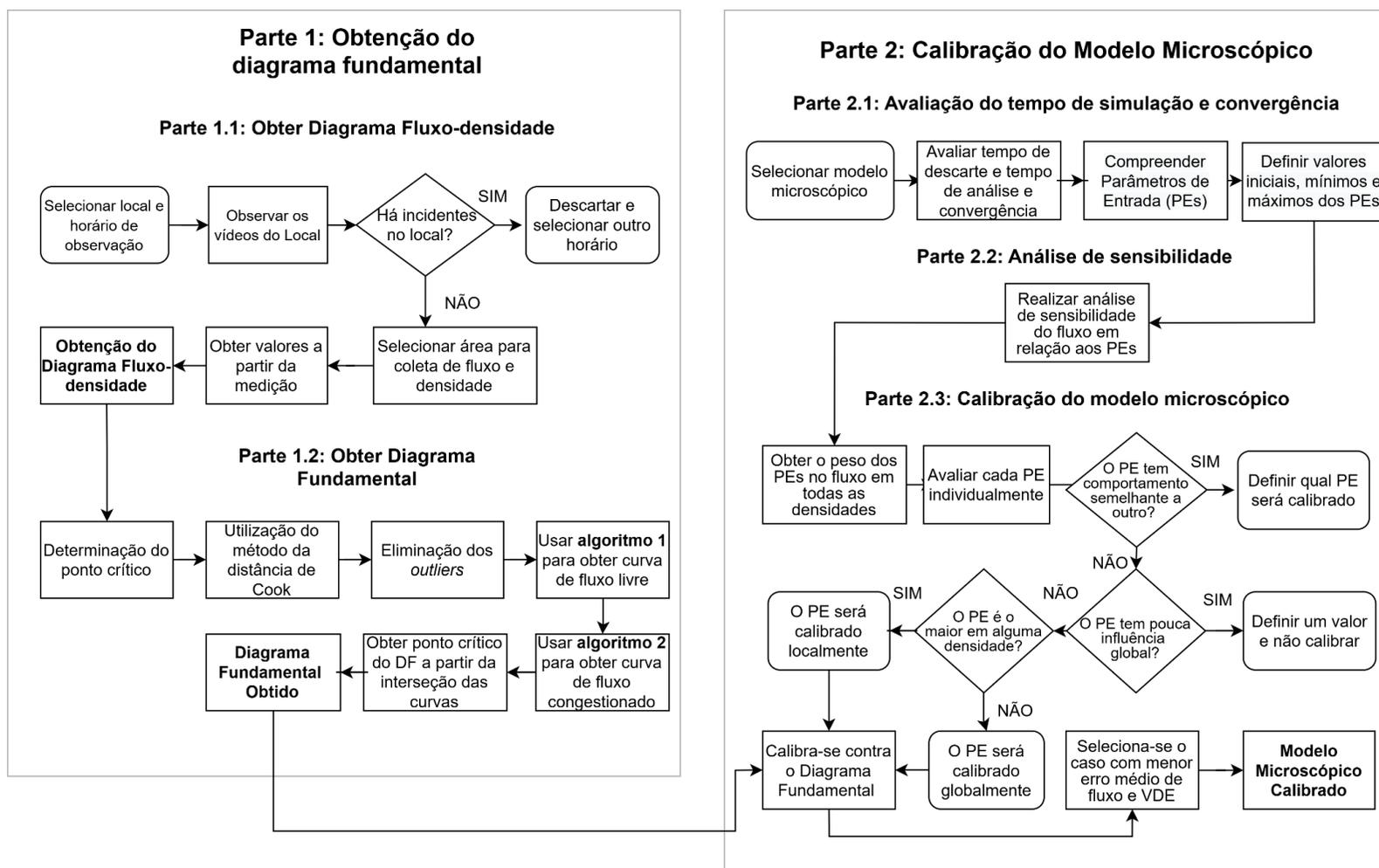
Onde Q é o fluxo de carros por minuto nas três faixas e S é a quantidade de veículos dentro da área delimitada a cada minuto, seguindo a metodologia.

Dia 30/09			Dia 01/10			Dia 02/10			Dia 03/10		
Minuto	Q	S	Minuto	Q	S	Minuto	Q	S	Minuto	Q	S
7:30	70	412	7:30	61	300	10:00	34	136	8:01	69	566
7:31	52	309	7:31	58	281	10:01	38	174	8:02	78	506
7:32	75	427	7:32	55	252	10:02	37	160	8:03	63	480
7:33	66	427	7:33	40	198	10:03	35	162	8:04	22	1337
7:34	62	369	7:34	69	326	10:04	36	157	8:05	23	1281
7:35	54	270	7:35	49	270	10:05	47	207	8:06	24	1513
7:36	62	289	7:36	68	316	10:06	39	176	8:07	17	1586
7:37	40	201	7:37	51	272	10:07	29	130	8:08	26	1385
7:38	64	316	7:38	63	306	10:08	39	164	8:09	34	1223
7:39	31	178	7:39	65	304	10:09	44	192	8:10	24	1124
7:40	69	351	7:40	63	301	10:10	35	146	8:11	63	895
7:41	61	359	7:41	45	214	10:11	37	155	8:12	33	1144
7:42	62	363	7:42	56	231	10:12	38	168	8:14	37	1339
7:43	53	339	7:43	57	274	10:13	46	196	8:15	69	540
7:44	57	927	7:44	47	236	10:14	27	115	8:16	36	1229
7:45	40	1290	7:45	56	277	10:15	36	164	8:17	69	620
7:46	49	1100	7:46	55	283	10:16	41	182	8:18	37	1275
7:47	53	916	7:47	38	165	10:17	29	117	8:19	71	598
7:48	26	1460	7:48	72	370	10:18	37	166	8:20	34	1142
7:49	75	943	7:49	47	236	10:19	43	178	8:21	30	1114
7:50	33	1595	7:50	58	288	10:20	31	140	8:22	61	899
7:51	44	1388	7:51	42	182	10:21	32	144	8:23	23	1456
7:52	38	1077	7:52	55	288	10:22	22	96	8:24	23	1231
7:53	78	906	7:53	42	186	10:23	26	128	8:25	63	785
7:54	25	1692	7:54	67	337	10:24	38	172	8:26	28	1446
7:55	69	896	7:55	35	142	10:25	38	178	8:27	26	1245
7:56	36	1625	7:56	50	248	10:26	48	223	8:28	71	689
7:57	35	1549	7:57	54	282	10:27	29	135	8:29	33	1257
7:58	36	1225	7:58	55	340	10:28	40	179	8:30	38	1293
7:59	41	1185	7:59	47	344	10:29	41	188	8:31	65	739
10:00	35	167	8:00	50	304	7:40	76	569	8:32	33	1363
10:01	35	179	8:01	44	240				8:33	27	1160
10:02	28	151	8:02	54	644				8:34	28	1228
10:03	32	178	8:03	37	1425				8:35	65	838
10:04	34	178	8:04	49	906				8:36	33	1355
10:05	34	180	8:05	58	792				8:37	67	589
10:06	42	225	8:06	35	1212				8:38	33	1332
10:07	27	133	8:07	60	414				8:39	43	1000
10:08	16	94	8:08	54	804				10:00	29	142
10:09	24	130	8:09	37	789				10:01	32	206
10:10	36	203	8:10	60	589				10:02	28	132
10:11	42	228	8:11	26	161				10:03	44	189
10:12	41	211	8:12	62	382				10:04	43	205
10:13	29	146	8:13	47	224				10:05	33	145
10:14	41	196	8:14	48	459				10:06	35	168
10:15	30	162	8:15	24	859				10:07	38	186

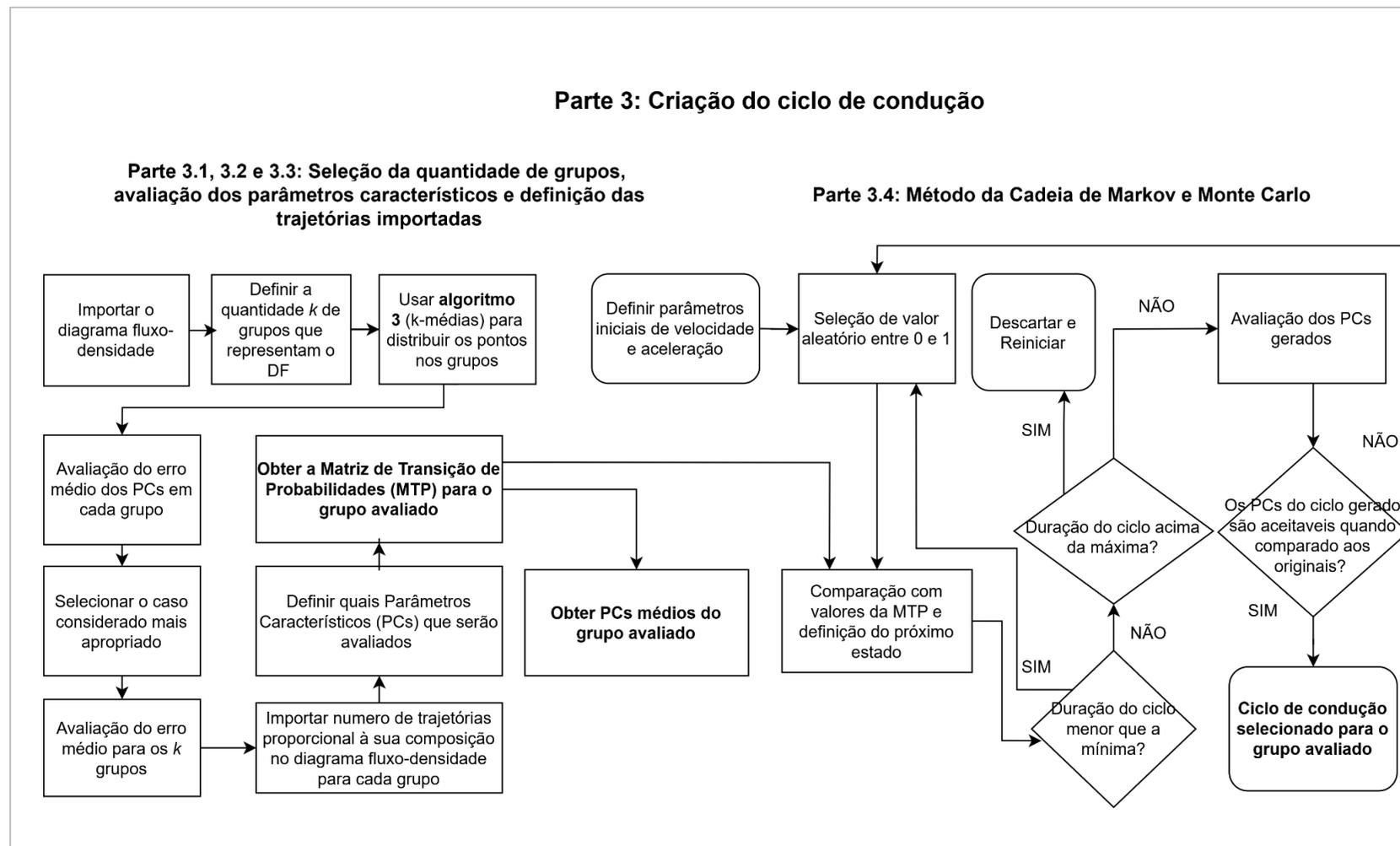
10:16	45	213	8:16	33	1283	10:08	50	246
10:17	42	209	8:17	59	742	10:09	46	215
Dia 30/09			Dia 01/10			Dia 03/10		
Minuto	Q	S	Minuto	Q	S	Minuto	Q	S
10:19	45	208	8:19	30	1319	10:11	45	209
10:20	25	134	8:20	68	539	10:12	31	131
10:21	45	222	8:21	48	817	10:13	30	137
10:22	34	162	8:22	24	1306	10:14	44	190
10:23	47	219	8:23	66	720	10:15	30	135
10:24	48	223	8:24	36	1131	10:16	40	197
10:25	40	206	8:25	68	699	10:17	33	152
10:26	45	218	8:26	47	1192	10:18	61	295
10:27	37	175	8:27	57	464	10:19	48	214
10:28	35	181	8:28	58	595	10:20	43	202
10:29	41	198	8:29	37	175	10:21	45	232
12:30	48	244				10:22	44	212
12:31	34	145				10:23	48	221
12:32	43	222				10:24	45	206
12:33	26	116				10:25	14	61
12:34	35	155				10:26	52	237
12:35	27	143				7:40	52	250
12:36	42	215				7:41	57	293
12:37	22	103				7:42	69	375
12:38	44	235.5				7:43	52	239
12:39	28	135				7:44	62	338
12:40	48	226				7:45	45	235
12:41	37	171				7:46	59	366
12:42	39	186				7:47	43	358
12:43	29	149				7:48	50	839
12:44	35	163				7:49	55	660
						7:50	23	1345
						7:51	37	1128
						7:52	53	666
						7:53	27	1425
						7:54	21	1514
						7:55	68	743
						7:56	23	1532
						7:57	36	1132
						7:58	72	626
						7:59	53	698
						8:00	30	1376
						8:01	70	677
						8:02	19	1075
						8:03	38	1073
						8:04	46	1141
						8:05	25	1241
						8:06	59	880

APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA DO TRABALHO

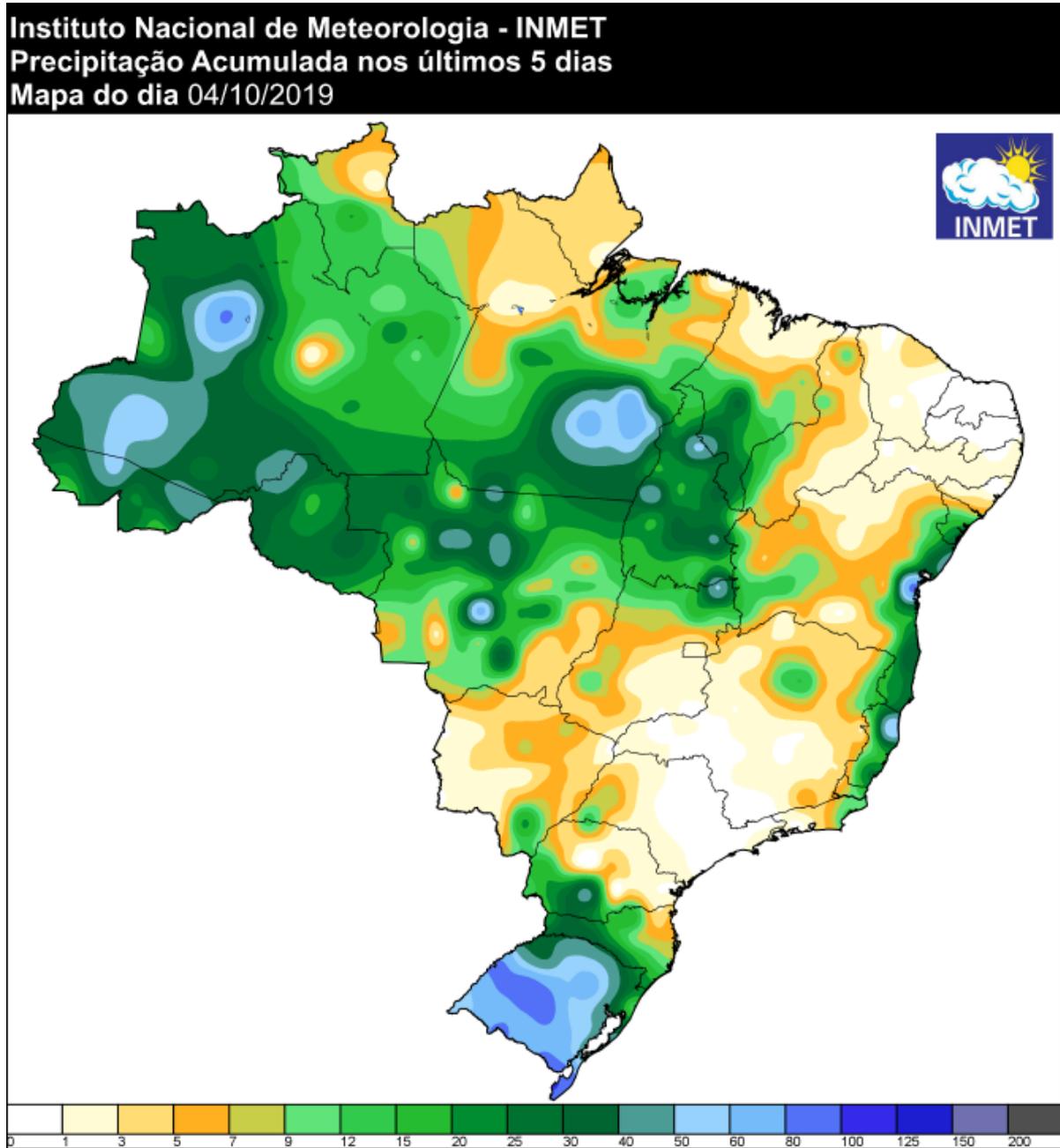
Quadro 6 - Fluxograma da metodologia parte 1



Quadro 7 – Fluxograma da metodologia parte 2



APÊNDICE C – PRECIPITAÇÃO EM MM DURANTE DIAS DE TESTE



Fonte: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia)

ANEXO A – TRABALHOS ACADÊMICOS PRODUZIDOS SOBRE O TEMA DE DUAS RODAS NO LOST - UFPE

Ano	Autor	Título	Nível
2012	Saulo Cunha	Dimensionamento de uma Bicicleta Urbana para Uso em Clima Quente e Úmido	Iniciação
2013	Rodrigo Melo	Emissão de Poluentes em Motores Veiculares: Estudo da Legislação e da Influência de Parâmetros Operacionais na Produção de Poluentes Nocivos à Saúde Humana.	Especialização
2013	Marcos Paes	Motocicleta Urbana: Processo de Homologação e Patenteamento de uma Nova Motocicleta.	Conclusão de curso
2013	Yuri Carvalho	Modelagem Computacional de Motocicletas Visando a Minimização da Emissão de Poluentes.	Iniciação
2014	Paulo Neto	Estudo Computacional do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis	Mestrado
2014	Edmilson Silva	Simulação de Tráfego Considerando Automóveis e Motocicletas: Ênfase na Influência dos Parâmetros do Motor no Consumo Global de Combustível	Conclusão de curso
2015	Arthur Lima	Otimização da Estratégia de Troca de Marchas e das Relações de Transmissão de uma Motocicleta 150 cc Visando a Redução no Consumo de Combustível	Conclusão de curso
2016	Saulo Cunha	Estudo Computacional da Dinâmica das Motocicletas nas Acelerações, Frenagens e Curvas: O Efeito da Técnica do Piloto e das Condições da Estrada	Dissertação
2016	José Pedro Santos	Comparação Técnica, Econômica e Ambiental de Veículos de Transporte Público - Ênfase nas Bicicletas e Motocicletas	Conclusão de curso
2016	Thiago Alves	Estudo Energético e Financeiro de Bicicletas Elétricas	Conclusão de curso
2017	Guilherme Andrade.	Modelo Didático Completo de Integração Motor/Motocicleta: Análise de Consumo e de Performance.	Dissertação
2017	Fernando Araújo	Análise do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis Considerando uma Variedade de Métricas, Escalas e Pontos de Vista.	Dissertação
2017	Maurício Santos	Análise computacional do fluxo de motocicletas e automóveis através de um modelo microscópico contínuo	Conclusão de curso
2017	Thamy Sobreira	A Motocicleta como Objeto de Estudo do Engenheiro Através de Diferentes Abordagens	Conclusão de curso
2017	Heraldo Almeida	Simulação Computacional do Tráfego Misto de Motocicletas e Carros Considerando a Dinâmica do Veículo	Conclusão de curso
2017	Jean Oliveira	Estudo do Impacto do Uso de Motos e Carros Elétricos Considerando Diferentes Condições de Tráfego Urbano	Conclusão de curso
2018	Rafael Silva	Simulação do Tráfego Urbano Considerando o Uso de Veículos Autônomos.	Conclusão de curso
2019	Maurício Santos	A Importância do Motor na Simulação de Carros e Motos em Situação de Tráfego.	Dissertação
2019	Lucas Nogueira	Definição da Relação de Transmissão de um Veículo do Tipo Baja SAE.	Conclusão de curso
2020	Guilherme Andrade	Desenvolvimento de Método Simplificado de Construção e Análise de Ciclos de Condução Locais para Carros e Motos: um Estudo de Caso no Horário Fora de Pico na Cidade do Recife	Tese

Fonte: Memorial de Professor Titular, Professor Fábio Magnani (2021)

ANEXO B – PUBLICAÇÕES PRODUZIDAS NO LOST (ÁREA: DUAS RODAS)

Autor (ano)	Título	Tipo
Fábio Magnani (2011)	Collective Channel*Motoboy	Periódico
Fábio Magnani, Guilherme Andrade e Ramiro Willmersdorf (2017)	Influence of Mathematical Simplifications on the Dynamic and Energetic Performance of an Engine/Motorcycle Integrated Model.	Periódico
Fábio Magnani e Saulo Cunha (2017)	Estudo da Dinâmica das Motocicletas em Frenagens e Curvas: o Efeito da Técnica do Piloto e da Condição da Estrada	Periódico
Maurício Santos et al., (2020a)	Análise Qualitativa do Fluxo de Veículos e da Performance Energética Comparando Modelo Microscópico Contínuo e Discreto em Relação à Velocidade	Congresso
Maurício Santos et al., (2020b)	Construction of Driving Cycles: Case Study for Microtrip and Markov Chain Methods Using Real Data	Congresso
Rodrigo Melo e Fábio Magnani (2020)	Modelo Cinético para Estimativa de Poluentes do Ar em Motores de Combustão Interna	Periódico
Guilherme Andrade et al., (2020)	Standardized Comparison of 40 Local Driving Cycles: Energy and Kinematics.	Periódico
Guilherme Andrade et al., (2021)	A Simple Methodology for the Development and Analysis of Local Driving Cycles Applied in the Study of Cars and Motorcycles in Recife, Brazil.	Periódico
Fábio Magnani et al., (2021)	Multimetric Analysis of a Simulated Mixed Traffic of Motorcycles and Automobiles: Flow, Energy, CO ₂ , and Costs	Periódico

Fonte: Memorial de Professor Titular, Professor Fábio Magnani (2021)

ANEXO C – CAPA DAS PUBLICAÇÕES PRODUZIDAS NO DOUTORADO

Título: Standardized Comparison of 40 Local Driving Cycles: Energy and Kinematics

Revista: Energies

doi: 10.3390/en13205434



Article

Standardized Comparison of 40 Local Driving Cycles: Energy and Kinematics

Guilherme Medeiros Soares de Andrade , Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo ,
Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos  and Fabio Santana Magnani * 

Center of Technologies and Geosciences, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Pernambuco, Recife 50740-550, Brazil; guilherme.soaresandrade@ufpe.br (G.M.S.d.A.); fernando.wesley@ufpe.br (F.W.C.d.A.); mauricio.novaessantos@ufpe.br (M.P.M.d.N.S.)

* Correspondence: fabio.magnani@ufpe.br

Received: 17 August 2020; Accepted: 14 October 2020; Published: 18 October 2020



Abstract: Local driving cycles (LDCs) capture local traffic characteristics, while standard driving cycles (SDCs) compare vehicles in distinct regions. There is a plethora of LDCs, raising the question as to how distinct they are. To quantify it, we first organized a collection of 77 LDCs. From the speed–time images, it was possible to extract numerical vectors of 40 cycles in a standardized way. Comparing the LDCs developed for cars, we found that their parameters fluctuate significantly: the average speed varies from 14.7 to 44.7 km/h, and the fuel economy varies from 10.8 to 20.5 km/L. Comparing the LDCs with FTP-75 cycle, the difference in speed is 7 km/h, and in fuel economy is 1.5 km/L. For WLTC, the difference is 19.4 km/h and 3 km/L, respectively. Thus, given the deviations found between the analyzed LDCs, and between LDCs and SDCs, the numerical results reinforce the relevance of using LDCs for each region.

Keywords: fuel economy; characteristic parameters; driving cycles; energy consumption; average speed

1. Introduction

A driving cycle (DC) is a time–speed series that represents a driving pattern to depict a real-world behavior [1]. Government, researchers, and manufacturers use standard driving cycles (SDCs) to estimate emission and consumption [2,3]. The DCs are used for several purposes, for example: vehicle design (e.g., evaluating the impact of modifying vehicle parts, engine calibration, aerodynamics, choice of tires in the emission, fuel consumption, and drivability), optimization and assessment of new technologies (e.g., the energy management system of hybrid vehicles [4–7]), and evaluation of emission levels as required by the legislation (e.g., European emission standards (Euro) and Brazilian emission standards (PROCONVE)). Examples of the most employed SDCs are FTP-75 cycle (USA), JC08 (Japan), NEDC, and WLTC (Europe). Despite all of the efforts to generate a SDC that considers average real-world driving, there is a growing concern regarding the differences in the results obtained from the type approval tests and those under real-world conditions, because the difference can be up to 60% [8].

This difference between the results can be assigned to several factors, such as the vehicle's characteristic (e.g., vehicle age and mileage, fuel employed, vehicle shape), traffic conditions, road, driver behavior, and the procedure applied to evaluate the vehicle energy consumption. In order to better estimate the actual energy usage of the vehicles in the real-world, new type approval tests are developed, which usually include new driving cycles to be used in laboratory tests, and new procedures (e.g., certification test initial temperature, gear changing criteria, tire calibration, usage of auxiliary equipment) [9]. Besides using stricter procedures, the values obtained in the certification test can be adjusted, applying a correction factor [10].

Título: Simple Methodology for the Development and Analysis of Local Driving Cycles Applied in the Study of Cars and Motorcycles in Recife, Brazil

Revista: Transportation Research Record

doi: 10.1177/0361198121991850

TRR

Research Article

Simple Methodology for the Development and Analysis of Local Driving Cycles Applied in the Study of Cars and Motorcycles in Recife, Brazil

Transportation Research Record
1–12
© National Academy of Sciences:
Transportation Research Board 2021
Article reuse guidelines:
sagepub.com/journals-permissions
DOI: 10.1177/0361198121991850
journals.sagepub.com/home/trr
SAGE

Guilherme Medeiros Soares de Andrade¹, Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo¹,
Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos¹, Silvio Jacks dos Anjos Garnés²,
and Fábio Santana Magnani¹

Abstract

Standard driving cycles are usually used to compare vehicles from distinct regions, and local driving cycles reproduce more realistic conditions in specific regions. In this article, we employed a simple methodology for developing local driving cycles and subsequently performed a kinematic and energy analysis. As an application, we employed the methodology for cars and motorcycles in Recife, Brazil. The speed profile was collected using a smartphone (1 Hz) validated against a high precision global positioning system (10 Hz), presenting a mean absolute error of 3 km/h. The driving cycles were thus developed using the micro-trip method. The kinematic analysis indicated that motorcycles had a higher average speed and acceleration (32.5 km/h, 0.84 m/s²) than cars (22.6 km/h, 0.55 m/s²). As a result of the energy analysis, it was found that inertia is responsible for most of the fuel consumption for both cars (59%) and motorcycles (41%), but for motorcycles the aerodynamic drag is also relevant (36%). With regards to fuel consumption, it was found that the standard driving cycle used in Brazil (FTP-75; 2.47 MJ/km for cars and 0.84 MJ/km for motorcycles) adequately represents the driving profile for cars (2.46 MJ/km), and to a lesser extent motorcycles (0.91 MJ/km) in off-peak conditions. Finally, we evaluated the influence of the vehicle category on energy consumption, obtaining a maximum difference of 38% between a 2.0 L sports utility vehicle and a 1.0 L hatchback.

A driving cycle is a time-speed series used to represent the driving pattern of vehicles in real-world traffic. There are standard driving cycles (SDCs), used for nationwide comparisons, and local driving cycles (LDCs), that are important for regional analysis. These LDCs can be obtained by recording the real movement of a vehicle in traffic, followed by a constructing method that preserves their major kinematic parameters. In this study, we employed a simple methodology to register the speed profile of the vehicle using a smartphone, performed a kinematic characterization of the data set, developed LDCs using the micro-trip method, and finally conducted an energy analysis. The methodology was applied both for cars and motorcycles in Recife, a major Brazilian city.

Governments, research institutes, and manufacturers use SDCs in dynamometers to estimate fuel consumption in standardized testing (1). Since 2008, the United States has adopted the five-cycle method, consisting of the federal test procedure (FTP-75), which is performed in cold start and hot start, the highway fuel economy test cycle

(HWFET), and the supplemental federal test procedures US06 and SC03 (2). The European Union finished the transition from the new European driving cycle (NEDC) to the worldwide harmonized light vehicles test cycles (WLTC) in January 2019 (3). The WLTC is a transient driving cycle and reflects real-world conditions better if compared to the stationary NEDC. In Brazil, the fuel economy is measured for cars and motorcycles using FTP-75 for city conditions and the HWFET for highway conditions (4). Despite all efforts to elaborate an SDC to estimate fuel consumption, there is increasing evidence

¹Department of Mechanical Engineering, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil

²Department of Cartographic Engineering, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil

Corresponding Author:
Guilherme Medeiros Soares de Andrade,
guilherme.soaresandrade@ufpe.br

Título: Multimetric Analysis of a Simulated Mixed Traffic of Motorcycles and Automobiles: Flow, Energy, CO₂ and Costs

Revista: Ingenieria e Investigacion

doi: 10.1177/0361198121991850

INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN VOL. 41 NO. 2, 2021 (IN-PRESS)

<http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v41n2.83114>

Multimetric Analysis of a Simulated Mixed Traffic of Motorcycles and Automobiles: Flow, Energy, CO₂ and Costs

Análisis Multimétrico de un Tráfico Mixto Simulado de Motocicletas y Automóviles: Flujo, Energía, CO₂ y Costos

Fábio Santana Magnani¹, Paulo D'Ávila Garcia Neto², Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo³, Alcides Luiz dos Anjos Hora⁴, and Daniel Arraes de Alencar Valença⁵

ABSTRACT

The fleet of developing countries consists of motorcycles and cars. This heterogeneous traffic condition has its advantages and disadvantages, which results in conflicting points of view (e.g., motorcyclists enjoying a higher mobility while car drivers resent their decreased speed). In this paper, we corroborated the notion that traffic evaluation depends on the chosen metric (e.g., vehicle flow, fuel consumption, monthly costs) and the point of view (driver, rider, and policy makers). To this effect, we studied a mixed traffic condition, considering that the vehicle performance is affected by three scales: engine, vehicle, and traffic. We modeled the engine using empirical correlations of power and energy efficiency, the vehicle based on a balance of propulsive and resistive forces, and traffic with a cellular automata model. We simulated 189 traffic conditions and evaluated vehicle flow, average energy consumption, total CO₂ emission of the road, and monthly costs. We also discussed the results from the point of view of the driver, rider, and society. We concluded that the optimal condition depends both on the choice of metric and point of view, and that is not appropriate to use results from homogeneous traffic to analyze heterogeneous traffic conditions, even if both scenarios present the same total vehicle flow.

Keywords: car, motorcycle, traffic, CO₂, costs, cellular automata

RESUMEN

La flota de los países en vías de desarrollo está compuesta por motocicletas y automóviles. Esta condición heterogénea en el tráfico presenta ventajas y desventajas, lo que resulta en puntos de vista conflictivos (por ejemplo, los motociclistas que disfrutan de su mayor movilidad mientras que los conductores de automóviles se resienten con su velocidad disminuida). En este artículo corroboramos la idea de que la evaluación del tráfico depende de la métrica escogida (por ejemplo, flujo de vehículos, consumo de combustible, costos mensuales) y del punto de vista (conductor, motociclista y responsables de formular políticas). Para ello, estudiamos una condición de tráfico mixto, considerando que el rendimiento del vehículo se ve afectado por tres escalas: motor, vehículo y tráfico. Modelamos el motor usando correlaciones empíricas de potencia y eficiencia energética, la del vehículo a través de un equilibrio de fuerzas propulsoras y resistivas, y la del tráfico mediante un modelo de autómatas celulares. Simulamos 189 condiciones de tráfico y evaluamos el flujo de vehículos, el consumo de energía promedio, la emisión total de CO₂ de la vía y los costos mensuales. También discutimos los resultados desde el punto de vista del conductor, el motociclista y la sociedad. Llegamos a la conclusión de que la condición óptima depende tanto de la elección de la métrica como del punto de vista, además de que no es apropiado usar los resultados del tráfico homogéneo para analizar condiciones de tráfico heterogéneo, incluso si ambos escenarios presentan el mismo flujo total de vehículos.

Palabras clave: automóviles, motocicletas, tráfico, CO₂, costos, autómatas celulares

Received: October 23rd, 2019

Accepted: January 7th, 2021

¹Mechanical Engineer, UFSC, Brazil. Dr. Mech. Eng., UFSC, Brazil.
Affiliation: Associate Professor, UFPE, Brazil. E-mail: fabio.magnani@ufpe.br
²Mechatronic Engineer, UFPE, Brazil. M.Sc. Mech. Eng., UFPE, Brazil.
Affiliation: Assistant Professor, UFPE, Brazil. E-mail: pdgneto@gmail.com
³Chemical Engineer, UFPE, Brazil. M.Sc. Mech. Eng., UFPE, Brazil.
Affiliation: Ph.D. Candidate and Chemical Engineer, UFPE, Brazil.
E-mail: fernando.wesley@ufpe.br
⁴Mechanical Engineer, UFPE, Brazil. M.Sc. Mech. Eng., UFPE, Brazil.
Affiliation: Adjunct Lecturer, UFS, Brazil. E-mail: alcidesluiz@gmail.com
⁵Electronics Engineer, UFPE, Brazil. M.Sc. Mech. Eng., UFPE, Brazil.
Affiliation: General Manager, Ameciclo, Brazil. E-mail: dvalenca@gmail.com

How to cite: Magnani, F. S., Garcia Neto, P. D., Araújo, F. W. C., Hora, A. L. A., and Valença D. A. A. (2021). Multimetric Analysis of a Simulated Mixed Traffic of Motorcycles and Automobiles: Flow, Energy, CO₂ and Costs. *Ingeniería e Investigación*, 41(2). 10.15446/ing.investig.v41n2.83114

Introduction

Most of the fleets of developing countries such as Brazil, Colombia, Malaysia, Pakistan, Thailand, Philippines, and Nigeria consist of cars and motorcycles (WHO, 2015). In those countries, the use of motorcycles is motivated by the poor quality of transit, traffic congestion, and their advantageous cost of acquisition and operation, together with a higher average speed. On the other hand, motorcycle accidents are accountable for economic and social impacts (Koossalapeerom et al., 2019). The conflict between



Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) Share - Adapt

Título: Análise qualitativa do fluxo de veículos e da performance energética comparando modelo microscópico contínuo e discreto em relação à velocidade

Congresso: 34º ANPET 2020

doi: 10.1177/0361198121991850

34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET
100% Digital, 16 a 21 de novembro de 2020



ANÁLISE QUALITATIVA DO FLUXO DE VEÍCULOS E DA PERFORMANCE ENERGÉTICA COMPARANDO MODELO MICROSCÓPICO CONTÍNUO E DISCRETO EM RELAÇÃO À VELOCIDADE

Maurício P. M. de Novaes Santos
Fernando Wesley C. de Araújo
Guilherme Medeiros S. de Andrade
Fábio S. Magnani

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências

RESUMO

Modelos microscópicos são usados em diversos simuladores de tráfego para representar o fluxo de veículos. O principal objetivo deste trabalho é comparar dois modelos microscópicos, um contínuo e outro discreto em relação à velocidade. Diferentes combinações de densidades de carros e motos foram simuladas em uma pista oval de faixa única com 7,5 km. Os resultados mostraram que os modelos têm comportamento parecidos em relação ao fluxo de veículos quando existem poucas motos na pista. No entanto, o modelo discreto sobrestimou o consumo de combustível na maioria dos casos analisados. A diminuição do valor de aceleração no modelo discreto não resultou em grandes diferenças nos resultados de fluxo. Um valor menor da aceleração no modelo discreto diminuiu a diferença do consumo de combustível em relação ao modelo contínuo, mas o valor ainda é alto em vários dos casos. Por fim, ambos os modelos requereram aproximadamente o mesmo tempo de simulação.

ABSTRACT

Microscopic models are used in several traffic simulators to represent the traffic flow. The main objective of this study is to compare two microscopic models, one continuous and other discrete in speed. Different densities of car and motorcycles were simulated in a single-lane oval track of 7.5 km. The results indicated that the models present similar behaviors in relation to the traffic flow when there are few motorcycles on the track. However, the discrete model overestimated the fuel consumption in the most of the cases analyzed. The decrease of the acceleration value in the discrete model did not result in large differences in the traffic flow. A lower value of acceleration in the discrete model reduced the difference of fuel consumption in comparison to the continuous model, but the value is still high in several cases. Finally, both models required approximately the same time of simulation.

1. INTRODUÇÃO

Modelos de tráfego são ferramentas para análise, previsão e descrição do fluxo de veículos. Esses modelos são desenvolvidos desde o início do século XX (van Wageningen-Kessels *et al.*, 2015), associados com a necessidade de um melhor planejamento de tráfego devido aos problemas sociais, econômicos e ambientais resultantes de um crescente número de veículos nas vias.

Os modelos de tráfego são divididos em três grupos principais: microscópico, mesoscópico e macroscópico. No primeiro o movimento de cada veículo é modelado de maneira que o fluxo de veículos é resultado da interação entre cada veículo na pista; no último o tráfego é considerado como um todo, tal qual um fluido em um duto. Por fim, o modelo mesoscópico é comumente descrito como um modelo intermediário entre as duas abordagens anteriores. Mesmo dentro desses grupos é comum existir inúmeras subdivisões. Neste trabalho serão usados dois modelos pertencentes na classificação de modelos microscópicos: modelos contínuos e discretos em relação à velocidade.

A maior parte dos modelos microscópicos se encaixam na subdivisão de *car following* (“veículo seguidor”), em que simula o comportamento de um veículo quando tem outro em sua frente. Um dos modelos mais antigos foi desenvolvido por Pipes em 1953, o qual funciona seguindo uma regra que determina a distância entre dois veículos consecutivos (van Wageningen-Kessels

Título: Construction of driving cycles: case study for microtrip and Markov chain methods' using real data

Congresso: 34º ANPET 2020

doi: 10.1177/0361198121991850

34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET
100% Digital, 16 a 21 de novembro de 2020



CONSTRUCTION OF DRIVING CYCLES: CASE STUDY FOR MICROTRIP AND MARKOV CHAIN METHODS' USING REAL DATA

Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos
Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo
Guilherme Medeiros Soares de Andrade
Fábio Santana Magnani

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências

ABSTRACT

Standard Driving Cycles are used by government, researchers, and industry to compare vehicles using a worldwide standard approach, while Local Driving Cycles (LDCs) are developed to realistically reproduce a vehicle behavior from a specific region. This study presents the two main methods regarding the construction of LDCs: Micro-trip and Markov Chain. We present a concise review and the main aspects of each method. In order to present a real example, we selected a 17.1 km route in the city of Recife (Brazil), collected speed-time data using cars and motorcycles, and constructed LDCs for both methods. As result, although the LDCs are visually different, both methods were capable of generating LDCs with error within the established threshold of 4%, when comparing the generated LDCs with the original data. We conclude that is recommended to choose the construction method prior to selecting the route and collecting the data.

RESUMO

Ciclos padrão de condução são usados por governos, pesquisadores e indústrias para comparar veículos utilizando uma abordagem padrão, enquanto os Ciclos de Condução Locais (CCLs) são desenvolvidos para reproduzir o comportamento dos veículos de uma determinada região de forma mais realística. Esse estudo apresenta os dois principais métodos utilizados para a construção de CCLs: Micro-trip e Cadeia de Markov. Nós apresentamos uma revisão concisa e os principais aspectos de cada método. Como exemplo, selecionamos uma rota de 17.1 km em Recife, coletamos dados de velocidade para carros e motos, e desenvolvemos os CCLs para ambos os métodos. Como resultado, embora os CCLs sejam visualmente diferentes, ambos os métodos foram capazes de gerar CCLs com erros abaixo de 4%. Concluímos que é recomendado escolher o método de construção antes da seleção de rota e coleta de dados.

1. INTRODUCTION

Driving cycle (DC) is a speed-time profile that represents the driver behavior in a city, a region, or a country. Engineers and researchers use DCs to project and evaluate the performance, consumption, and emission of internal combustion, hybrid, and electric vehicles (Pouresmaeili *et al.*, 2018; Koossalapeerom *et al.*, 2019). Governments, on the other hand, use DCs with legislative purpose for emission and consumption. In this case, they are called Standard Driving Cycles (SDC). The most relevant SDCs employed in the world are the American FTP-75 and the Europeans WLTC and NEDC.

SDCs are developed to represent the real world. However, Huertas *et al.* (2017) and Ma *et al.* (2019) discuss that there is a considerable variation among the results obtained for emission and fuel consumption when a vehicle is submitted to the SDC test (in a chassis dynamometer) and when the vehicle is used in a real-world condition. This difference can be higher than 50%. The difference can be justified because SDCs do not consider the exact characteristics from the tested region, such as traffic condition, vehicle, driver behavior, road type, and topography (Hung *et al.*, 2007). In order to decrease the difference obtained between SDCs and real-world measurements, researchers develop a time-speed profile that represent the region analyzed after collecting data from field experiments. This developed cycle is called Local Driving Cycle (LDC).

